proEXPLO2021
Año del Bicentenario

MODALIDAD VIRTUAL

COMPENDIO

XII CONGRESO INTERNACIONAL
DE PROSPECTORES Y EXPLORADORES

RECURSOS MINERALES PARA UN FUTURO SOSTENIBLE

Organiza:

INSTITUTO DE INGENIEROS DE MINAS DEL PERÚ

proexplo.com.pe

ÍNDICE

proEXPLO2021
Año del Bicentenario

Lista de Revisores 10

Programa de Conferencias 11

- Lunes 22 12
- Martes 23 13
- Miércoles 24 14
- Jueves 25 15
- Viernes 26 16

Programa de Posters 17

- Tótem 1 18
- Tótem 2 19
- Tótem 3 20

Resúmenes de Conferencias Magistrales 21

- Machine learning for exploration: review of current and future tolos – *Antoine Caté* 22
- Exploring Peru for metals and hydrocarbons using out-of-the box thinking – *Thierry Sempere* 25
- An Integrated model for Cu and Au Mineralisation in Convergent Margins:Two Fundamental Processes interacting in variable geodynamic situations – *Jon Hronsky* 28
- Converting Mineral Resources for a Sustainable Future: Lessons from the First 20 Years of the New Millennium – *Michael Doggett* 31
- Mercado global de cobre: fundamentos de corto y largo plazo – *Erik Heimlich* 34

Mesas Redondas 37

- El aporte de las mujeres a la industria de la exploración minera del Perú *Silvia Kohler, Claudia Indacochea y María Manrique* 38
- Perú rumbo al CRIRSCO - *Edson Ribeiro, Julio Nery, Wilfredo López, Sergio Vicencio y Samuel Canchaya* 42

Resúmenes extendidos de Charlas Técnicas 48

Lunes 22

- Deep Imaging Technologies Applied to Mine Planning and Exploration Applications for Risk Mitigation at The Mine Site - *Leduar Ramayo Cortes y Robert Gordon* 51

- Characterizing Skarn Mineralogy and Texture Using Hyperspectral Core Imaging: Essential Data fo Accurate Geometallurgical Assessment - *Cristal Palafox, Cassady Harraden y Cari Deyell-Wurst* 55
- Perforación direccionada, la perforación del futuro hoy - *Jorge E. Gamarra Urrunaga, Noé Vilcas Munive y Peggy Silva Mayser* 59
- Unraveling the evolution of southernmost Peru between 100 and 50 Ma through U-Pb geochronology of the Toquepala Group: Implications for exploration of large porphyry copper deposits - *Thierry P.A. Sempere, Jean-Louis Paquette, William Martínez, Alonso A. Marchena y Jorge Acosta* 64
- Caracterización de alteración sericita-clorita en el proyecto Antakori Cu-Au-Ag, norte del Perú - *David G. Portocarrero, Kevin B. Heather y Cari L. Deyell-Wurst* 68
- Exploration outlooks for upper cretacic and paleocene porphyry copper belt, Inca de Oro – *Carrera Pinto mining districts, Atacama Region, Chile - Juan José Latorre M., Miguel Zauschkevich D. y Aldo Dal Santo C.* 72

Martes 23

- Pyrite composition as an exploration tool for volcanogenic massive sulfide deposits - *Azam Soltani Dehnavi* 77
- Distribución de elementos traza en minerales de mena en yacimientos peruanos: potenciales sub-productos y herramienta de exploración - *Lisard Torró y Diego Benites* 81
- Geología del Litio Hospedado en Arcillas y Salmueras en el Altiplano Andino - *Angel Salas y José Yparraguirre* 85
- Ivana: un nuevo depósito de uranio y vanadio con potencialidad económica, Río Negro, Argentina- *Guillermo P. Pensado, Lucía Campos, José M. Rodríguez y Ariel Testi* 89
- The Trapiche Ni-Co prospect, Yauli Dome, Central Peru: formed by Miocene magmatic-hydrothermal activity - *Alvaro Martínez, Lluís Fontboté, Jorge Spangenberg , Carlos Angeles y César Farfán* 93

Miercoles 24

- Historia de la Exploración y Geología del depósito de pórfido Cu-Mo-Au de Cobre Panamá, Panamá – *Juan Burlando*... 99
- Fenix Gold Project: An Epithermal Gold Deposit, in the Maricunga Belt - *Ignacio Ramos* .....
- Copa de Cobre challenge: Machine Learning for predictive mapping from satellite imagery - *Quentin Corlay y Paul Marchive* .....
- A common hydrothermal magmatic system generates different styles of gold mineralization at Shahuindo and Algamarca, Northern Peru - *Renzo Galdós, Jean Vallance, Patrice Baby y Gleb S. Pokrovski* 100
- Cerro Corona: Evolución de los modelos geológicos, vectorización geofísica y sus implicancias para el incremento de recursos minerales de Cu y Au más allá del 2030 - *Juan Carlos Sarmiento, Edwin Ayala, Efraín Ugarte, Gabriel Becerra y Paul Gómez* 105
- The San Francisco Gold-Silver-Copper Project, San Juan, Argentina – an example of a gold-rich intrusion-related tourmaline breccia system - *Rohan Wolfe, Chico Azevedo, Alex Santos, Carlos Medina, Paulo Lima, Neil Motton y Doug Kirwin* 109

Jueves 25

- GEOCATMIN Sistema de Gestión de Bases de Datos Geológicos y Catastro Minero - *Juan Salcedo Carbajal, Hugo Castro Pomatana y Miriam Araya Carrasco* 115
- Impulsando la transformación tecnológica ágil en el catastro minero y en el proceso del otorgamiento de concesiones mineras - *Eloy César Salazar Loayza* 119
- El Machine Learning de la Carta Geológica Nacional 50K y la Exploración Minera - *Rildo Rodríguez, Luis Coba y Mirian Mamani* 123
- Interpretación de Datos Magnetotelúricos de la Transecta del Sur del Perú y su Relación con la Metalogenia - *Luis Quispe, Víctor Torres, Alonso Marchena Campos, Carlos Fernández Geraldino, Jorge Acosta Ale, Darwin Calla, Rossmery Jacobo y Carlos Valencia* 128
- Terminología para reportes de recursos minerales y reservas de mena - *Heller Agustín Bernabé Tapia* 133
- El ratio de descuento y el rol del riesgo en la toma de decisiones en minería - *Alí Ivan Meres Vargas , Juan Manuel Mansilla Olivas , Fernando Enrique Sagastegui Ayala* 137
- Evaluación de proyectos de inversión mediante riesgos e incertidumbre - *Manuel Viera Flores* 143
- Tectónica salina y mineralizaciones polimetálicas de origen magmático-hidrotermal: el caso del distrito de Morococha - *Silvana Stipetich, Abel Zorrilla, Erick Valencia, Julio Zarate, Pablo Valverde, Diego Benites, Lisard Torró y Jean Vallance* 147
- Nuevos conceptos de exploración en el Distrito Minero de Uchucchacua – Perú Central - *Rolando Ligarda, Edwin Arias, Ronald Callupe, Juan Carlos Salazar, José Luis Aquino y María del Pilar Ventura* 153
- The Puagjanca Zn-Pb(-Ag) pipe in the Miocene Santander-Chungar district, Central Peru - *César Farfán, Luis W. Loyola, Rafael Bernaola, José A. Enríquez, Ronner Bendezú y Lluís Fontboté* 159

Viernes 26

- Rol y desafíos de la geometalurgia operacional en Cerro Corona, Cajamarca, Perú - *Julio Castro, Anthony Julián, Edwin Ayala y Gabriel Becerra* 163
- Deepening an old, verticalized pit: rock slope instability hazard assessment using a "digitally augmented" structural database (Flône limestone quarry, Belgium) - *Erwin C. Frets, Antoine Gauffriau, Nicolas Coussaert y Julien Vanneste* 167
- Evaluación del impacto social y análisis de conflictos socioambientales en un proyecto minero en el sur del Perú usando modelos matemáticos - *Solange Guiuliana Ríos Angulo* 171
- Lithocaps y su conexión a estructuras: de los datos abiertos a la prospección puntual de un sector del suroeste de Perú - *Aldo Bendezú Juárez y Cesar Cabellos Roncal* 175
- Evolution and along-strike variations in the Arequipa-Tarapacá Basin structure at 21°S: Implications for Geological Exploration Models in Southern Peru and Northern Chile - *Guillermo Fuentes, Sebastián Perroud, Salvador Cortez, Alejandra Acuña, Brian Townley y Fernando Martínez* 180
- Características Metalogenéticas del Mioceno de las Regiones Cajamarca - La Libertad - *Luis Ysaías Quispe Rentería, Alonso Arturo Marchena Campos, Víctor Raúl Torres Bazán y Carlos Nicolás Fernández Geraldino* 185

Resúmenes extendidos de Pósters 191

Tótem 1: Geología Económica

- Pegmatitas, aplitas, greisen y anomalías de Estaño en el Leucogranito Triásico de Paita, Piura - *Alvaro Espinoza, Silvana Stipetich, Rodrigo Hurtado de Mendoza, Jorge Sáez y Jean Vallance* 193
- Distrito Uranífero de Macusani: Modelo de Mineralización usando Isótopos Estables - Guido Arroyo Pauca..... 198
- Isótopos de Pb en los depósitos de la franja de epitermales de los volcánicos de la cordillera occidental del oeste de Huancavelica, Perú - *Michael Valencia, César Chávez y Alex Santisteban* 202
- Gold and silver deposit in sedimentary units, local characterization and general scopes of exploration (Shahuindo - Cajamarca, Peru) - *Freddy Huisa, Cesar Alvarez, Alejandro Manrique y Nilton Chariarse* 206
- Sistemas de inversión tectónica y su relación con los yacimientos minerales (6° - 8°30'S) de la Cordillera Occidental - *Javier Jacay, Freddy Gómez, Jaime Gómez, Ricardo Pachas e Israel Sangay* 210
- Generando valor en el yacimiento tipo VMS en la Unidad Minera Cerro Lindo a través de la búsqueda de nuevos dominios geológicos (volcánico mineralizado) - *Jean Paul Bueno, Nickol Estrada y Jhonatan López* 215
- Controles Estructurales como guía de exploración de los cuerpos de borde (OB13 y OB9) del Yacimiento Cerro Lindo. - *Sheyla Pinto, Nils Sarmiento y Peter Cerna* 221
- Descubrimiento y geología del proyecto Coralillo, un sistema mineralizado de Cu, Au,Fe asociado a rocas volcano-sedimentarias cretácicas del "Grupo Casma", Cuenca Huarmey, en la costa norte del Perú - *Pedro Jesus Reyes* 226
- Caracterización tectónica de los depósitos tipo VMS en el arco volcánico submarino Casma - *Rosa Jara Torres y Enrique Fernández de Paredes* 231
- Características Metalogenéticas de los Depósitos Tipo Pórfidos y Epitermales de las Franjas XV, XXIII, XXI-A y XXI-C del Sur del Perú - *Luis Ysaías Quispe Rentería, Victor Raúl Torres Bazán, Alonso Arturo Marchena Campos y Carlos Nicolás Fernández Geraldino* 236

Tótem 2: Innovación en la Exploración Minera

- Caracterización litogeoquímica con el analizador XRF Portátil Niton XL5 y vectorización de los elementos económicos Pb -Zn en el Proyecto Minero Zoraida, Perú. - *Juan Jhojan Carhuapoma Carlos y Max Gregorio Paniagua Tasayco* 242
- Modelo explícito de alteración a partir de data litogeoquímica como guía de exploración en el yacimiento tipo VMS - Cerro Lindo - *Maylin Mendoza y Cristina Palacios* 246
- Análisis de Componentes Principales de elementos traza en sedimentos de corriente de la cuenca Cháparra (Arequipa) como herramienta de prospección aurífera - Genaro Manuel Ypanaque Reto 252
- Estudios de Orientación Geoquímica y el uso de herramientas para destacar anomalías - Miguel Martínez..... 256
- Clusterización litológica a partir de data multielemental en La Tapada, depósito cordillerano polimetálico del Perú Central - *Mario Díaz, Susankler Espinoza y Oshin Figueroa* 260
- Análisis de minerales en los sensores Landsat 8, Aster 1B, Sentinel 2A, de la zona 22K; 22J; 21K;21J - *Jhosy Yelsin Alejandro Chavez* 265

Tótem 3: Del Descubrimiento a la Mina

- Aplicación del ratio de Knuckey y la anisotropía dinámica en la estimación de recursos minerales de Cerro Lindo - *Jhonatan López y Gianncarlo Zamora* 270
- Geometalurgia de minerales de cobre óxidos y secundarios e impacto en los recursos y la producción de la Unidad Minera Cerro Lindo - *Jean Paul Bueno y Nickol Estrada* 275
- Grade Uncertainty Assessment for Sub-Vertical Vein Exploration Projects - *David F. Machuca-Mory y Oy Leuangthong*.. 282
- ¿QA/QC realidad o fantasía?: diez años después - *Samuel Canchaya Moya* 286
- Economía circular, rutas tecnológicas para la pirita proveniente de relaves CL - *Daniel Soares, Edelink Tinoco, Anthony Erazo y Rodrigo Gomes* 290
- Análisis de riesgos en el negocio minero aplicando la reconciliación en la Unidad de Cerro Lindo - *Jhonatan López y Gianncarlo Zamora* 295
- Potencial de Exploración de relaveras históricas y sus implicancias para un futuro sostenible caso: Antigua Mina Carhuacayán, Junín-Perú - *Oshin Figueroa, Mario Díaz, Susankler Espinoza, Carlos Velasquez, Franz Marcelo, Christian Blanco, Jainor Teran, Sindy Meza, Robert Monge, Antonio Enriquez y Cesar Farfán* 300
- EDUCACIÓN: Indispensable para evitar conflictos sociales, promover y garantizar la sostenibilidad de la inversión minera en el Perú - *Renzo Valdez Villalobos* 305

Cursos cortos 311

Pre – congreso

- Geometalurgia para exploradores. - *Samuel Canchaya* 312
- Valorización de proyectos mineros. - *James Gilbertson, Mike Armitage y Nick Fox* 315
- Techos y Pisos de Depósitos Epitermales y Transición a los Depósitos del Tipo Pórfido: Aplicación a la Exploración. - *Jeff Hedenquist y Antonio Arribas* 320
- Fundamentos de las leyes de valores de divulgación minera - NI43-101 y S-K 1300. - *Deborah McCombe y Rosmery Cárdenas* 324
- Estrategias para el análisis geoquímico puntual (in situ) de minerales. - *Lisard Torró* 328

Post – congreso

- Alteración y Mineralización en los Yacimientos de Pórfidos. - *David Cooke* 331
- Aplicaciones Geoquímicas y Mineralógicas para la Selección de Métodos Geofísicos en la Exploración de Yacimientos VMS. - *Marcello Imaña* 334
- Aplicación de la Geoquímica a la Exploración Minera: Sistemas Pórfidos y Epitermales. - *William Chavez Jr.* 337

LISTA DE REVISORES

proEXPLO2021
Año del Bicentenario

ALBERTO ARISPE
ALEJANDRO DIEZ HURTADO
ANDRES RECALDE
CARLOS BENAVENTE ESCOBAR
CÉSAR BEDOYA
CÉSAR MUÑOZ
DENY BAYONA
EDMUNDO ALFARO
ELSIARIO ANTÚNEZ DE MAYOLO
FERNANDO SÁEZ
FLUQUER PEÑA
GISELA COBEÑAS
ISAC BURSTEIN
JEAN VALLANCE
JORGE FALLA
JORGE SÁEZ
JOSÉ ARCE
JOSÉ GUTIÉRREZ
JOSÉ MACHARÉ
JULIO CASTAÑEDA
KLAUS MEDER
MARCELLO IMAÑA
MIGUEL CARDOZO
SAMUEL CANCHAYA
SILVIA ROSAS

PROGRAMA DE CONFERENCIAS

proEXPLO2021
Año del Bicentenario

LUNES 22

FECHA	SESIÓN	HORARIOS		TEMA	EXPOSITOR
LUNES 22	SESIÓN COMPAÑÍAS MINERAS JUNIOR	09:20	09:40	Palabras de Bienvenida	Enrique Garay
		09:40	10:00	Homenaje Georg Petersen	Richard Petersen
		10:00	10:20	Rio2 Limited	Alex Black
		10:20	10:40	Bethania Silver Mine expansion - Kuya Silver	David Stein y Christian Aramayo
		10:40	11:00	The Ayawilca zinc - silver project in Pasco, Peru: Advancing towards development - Tinka Resources	Graham Carman
		11:00	11:20	Defining large mineralizing system in Peru´s frontier areas - Hannan Metals Inc.	Lars Dahlenborg
		11:20	11:40	Explorando Proyectos de Gran Potencial de Cu-Au en Perú - Panoro Minerals Ltd	Luis Vela
		11:40	12:00	Bullish on Gold - Pucará Gold	Steve Zuker
	RECESO				
	INNOVACIÓN EN LA EXPLORACIÓN MINERA	15:00	15:15	Deep Imaging Technologies Applied to Mine Planning and Exploration Applications for Risk Mitigation at The Mine Site	Leduar Ramayo y Robert Gordon
		15:15	15:30	Characterizing Skarn Mineralogy and Texture Using Hyperspectral Core Imaging: Essential Data for Accurate Geometallurgical Assessment	Cristal Palafox, Cassady Harraden y Cari Deyell-Wurst
		15:30	15:45	Perforación direccionada, la perforación del futuro hoy	Jorge E. Gamarra, Noe Vilcas y Peggy Silva
		15:45	16:00	Preguntas/Respuestas	
		16:00	16:30	RECESO	
	GEOLOGÍA ECONÓMICA	16:30	16:45	Unraveling the evolution of southernmost Peru between 100 and 50 Ma through U-Pb geochronology of the Toquepala Group: Implications for exploration of large porphyry copper deposits	Thierry P.A. Sempere, Jean-Louis Paquette, William Martínez, Alonso A. Marchena y Jorge Acosta
		16:45	17:00	Caracterización de alteración sericita-clorita en el proyecto Antakori Cu-Au-Ag, norte del Perú.	David G. Portocarrero, Kevin B. Heather y Cari L. Deyell-Wurst
		17:00	17:15	Exploration outlooks for upper cretacic and paleocene porphyry copper belt, Inca de Oro – Carrera Pinto mining districts, Atacama Region, Chile.	Juan José Latorre M., Miguel Zauschkevich D. y Aldo Dal Santo C.
		17:15	17:30	Preguntas/Respuestas	
		17:30	18:00	RECESO	
	CONFERENCIA MAGISTRAL	18:00	18:45	Machine learning for exploration: review of current and future tools	Antoine Caté
	INAUGURACIÓN	18:45	19:30	Jaime Gálvez Delgado, Ministerio de Energía y Minas	

MARTES 23

FECHA	SESIÓN	HORARIOS		TEMA	EXPOSITOR
MARTES 23	SESIÓN COMPAÑÍAS MINERAS JUNIOR	09:20	09:40	Regulus	John Black
		09:40	10:00	Forte Copper Corp. – Gold & Copper Exploration in Peru	Patrick Elliott
		10:00	10:20	Element 29 Resources INC	Brian Booth
		10:20	10:40	Bear Creek Mining Corporation	Eric Caba
		10:40	11:00	Chakana Copper	David Kelley
		11:00	11:20	Candente Copper Corp	Joanne Freeze
		11:20	11:40	Como Financiar un Proyecto Minero Peruano en la Bolsa de Valores de Lima	Alberto Arispe
	RECESO				
	INNOVACIÓN EN LA EXPLORACIÓN MINERA	15:00	15:15	Pyrite composition as an exploration tool for volcanogenic massive sulfide deposits	Azam Soltani
		15:15	15:45	Distribución de elementos traza en minerales de mena en yacimientos peruanos: potenciales sub-productos y herramienta de exploración	Lisard Torró y Diego Benites
		15:45	16:00	Preguntas/Respuestas	
		16:00	16:30	RECESO	
	GEOLOGÍA ECONÓMICA	16:30	16:45	Geología del Litio Hospedado en Arcillas y Salmueras en el Altiplano Andino	Angel Salas Y José Yparraguirre
		16:45	17:00	Ivana: un nuevo depósito de uranio y vanadio con potencialidad económica, Río Negro, Argentina	Guillermo P. Pensado, Lucía Campos, José M. Rodriguez y Ariel Testi
		17:00	17:15	The Trapiche Ni-Co prospect, Yauli Dome, Central Peru: formed by Miocene magmatic-hydrothermal activity	Alvaro Martínez, Lluís Fontboté, Jorge Spangenberg , Carlos Angeles Y César Farfán
		17:15	17:30	Preguntas/Respuestas	
		17:30	18:00	RECESO	
	CONFERENCIA MAGISTRAL	18:00	18:45	Exploring Peru for metals and hydrocarbons using out-of-the box thinking	Thierry Sempere

MIÉRCOLES 24

FECHA	SESIÓN	HORARIOS		TEMA	EXPOSITOR
MIÉRCOLES 24	SESIÓN PROSPECTORES	09:20	09:40	Disponibilidad de inversión para prospectores y exploradores en franjas con gran potencial de pórfidos, epitermales y skarn-CRD	Jaime Suárez
		09:40	10:00	Proyectos de Quantica Inversiones	Alberto Ríos
		10:00	10:20	Proyecto Coralillo, un sistema mineralizado de Cu-Au-Fe asociado a rocas volcánico-sedimentarias cretácicas del "Grupo Casma", Cuenca Huarmey, en la costa norte del Perú	Pedro Reyes
		10:20	10:40	Independiente	Artemio Chirre
		10:40	11:00	Sociedad Minera Reliquias S.A.C.	Alfredo Plenge
		11:00	11:20	Transición epitermal HS-Pórfido Cu-Mo Proyectos Terciopelo y Arcopunco	Juan Rosas
		11:20	11:40	Estructuración y financiamiento de empresas de exploración	José Luis Martínez
		11:40	12:00	Cómo el desplazamiento oriental de la placa del Caribe durante el Paleozoico-Mesozoico formó un distrito aurífero recién descubierto en Colombia: el distrito aurífero de Rionegro, Santander, Colombia	Ricardo Valls
	RECESO				
	GEOLOGÍA ECONÓMICA	15:00	15:15	Historia de la Exploración y Geología del depósito de pórfido Cu-Mo-Au de Cobre Panamá, Panamá	Mario Arancibia
		15:15	15:30	Fenix Gold Project: An Epithermal Gold Deposit, in the Maricunga Belt	Ignacio Ramos
		15:30	15:45	Copa de Cobre challenge: Machine Learning for predictive mapping from satellite imagery	Quentin Corlay y Paul Marchive
		15:45	16:00	Preguntas/Respuestas	
		16:00	16:30	RECESO	
	GEOLOGÍA ECONÓMICA	16:30	16:45	A common hydrothermal magmatic system generates different styles of gold mineralization at Shahuindo and Algamarca, Northern Peru	Renzo Galdos, Jean Vallance, Patrice Baby y Gleb S. Pokrovski
		16:45	17:00	Cerro Corona: Evolución de los modelos geológicos, vectorización geofísica y sus implicancias para el incremento de recursos minerales de Cu y Au más allá del 2030	Juan Carlos Sarmiento, Edwin Ayala, Efrain Ugarte, Gabriel Becerra y Paul Gómez
		17:00	17:15	The San Francisco Gold-Silver-Copper Project, San Juan, Argentina – an example of a gold-rich intrusion-related tourmaline breccia system	Rohan Wolfe, Chico Azevedo, Alex Santos, Carlos Medina, Paulo Lima, Neil Motton y Doug Kirwin
		17:15	17:30	Preguntas/Respuestas	
		17:30	18:00	RECESO	
	CONFERENCIA MAGISTRAL	18:00	18:45	An Integrated model for Cu and Au Mineralisation in Convergent Margins:Two Fundamental Processes interacting in variable geodynamic situations	Jon Hronsky

JUEVES 25

FECHA	SESIÓN	HORARIOS		TEMA	EXPOSITOR
JUEVES 25	MESA REDONDA	09:20	09:40	El aporte de las mujeres a la industria de la exploración minera del Perú	Silvia Kohler, Clara Indacochea y María Manrique
		09:40	10:00		
		10:00	10:15		
		10:15	10:20	Preguntas/Respuestas	
	SESIÓN INGEMMET	10:20	10:40	GEOCATMIN Sistema de Gestión de Bases de Datos Geológicos y Catastro Minero	Juan Salcedo, Hugo Castro y Miriam Araya
		10:40	11:00	Impulsando la transformación tecnológica ágil en el catastro minero y en el proceso del otorgamiento de concesiones mineras	Eloy Salazar
		11:00	11:20	El Machine Learning de la Carta Geológica Nacional 50K y la Exploración Minera	Rildo Rodríguez, Luis Coba y Mirian Mamani
		11:20	11:40	Interpretación de Datos Magnetotelúricos de la Transecta del Sur del Perú y su Relación con la Metalogenia	Luis Quispe, Victor R. Torres, Alonso A. Marchena, Carlos Fernández, Jorge Acosta, Darwin Calla, Rossmery Jacobo y Carlos Valencia
		11:40	12:00	Preguntas/Respuestas	
	RECESO				
	DEL DESCUBRIMIENTO A LA MINA	15:00	15:15	Terminología para reportes de recursos minerales y reservas de mena	Heller Bernabé
		15:15	15:30	El ratio de descuento y el rol del riesgo en la toma de decisiones en minería	Alí Meres, Juan M. Mansilla y Fernando Sagastegui
		15:30	15:45	Evaluación de proyectos de inversión mediante riesgos e incertidumbre	Manuel Viera
		15:45	16:00	Preguntas/Respuestas	
		16:00	16:30	RECESO	
	GEOLOGÍA ECONÓMICA	16:30	16:45	Tectónica salina y mineralizaciones polimetálicas de origen magmático-hidrotermal: el caso del distrito de Morococha	Silvana Stipetich, Abel Zorrilla, Erick Valencia, Julio Zarate, Pablo Valverde, Diego Benites, Lisard Torró y Jean Vallance
		16:45	17:00	Nuevos conceptos de exploración en el Distrito Minero de Uchucchacua – Perú Central	Rolando Ligarda, Edwin Arias, Ronald Callupe, Juan Carlos Salazar y José Luis Aquino
		17:00	17:15	The Puagjanca Zn-Pb(-Ag) pipe in the Miocene Santander-Chungar district, Central Peru.	César Farfán, Luis W. Loyola, Rafael Bernaola, José A. Enríquez, Ronner Bendezú y Lluís Fontboté
		17:15	17:30	Preguntas/Respuestas	
		17:30	18:00	RECESO	
	CONFERENCIA MAGISTRAL	18:00	18:45	Converting Mineral Resources for a Sustainable Future: Lessons from the First 20 Years of the New Millennium	Michael Doggett

VIERNES 26

FECHA	SESIÓN	HORARIOS		TEMA	EXPOSITOR
VIERNES 26	MESA REDONDA	09:20	09:25	Perú rumbo al CRIRSCO	Enrique Garay - Presentación
		09:25	09:45		Edson Ribeiro - Vicepresidente CRIRSCO
		09:45	10:05		Julio Nery - Presidente Directorio CBRR Brasil
		10:05	10:25		Wilfredo Lopez - Presidente CCRR Colombia
		10:25	10:45		Sergio Vicencio - Presidente CCRR Chile
		10:45	11:05		Samuel Canchaya - Perú
		11:05	11:25	Preguntas/Respuestas	
	RECESO				
	DEL DESCUBRIMIENTO A LA MINA	15:00	15:15	Rol y desafíos de la geometalurgia operacional en Cerro Corona, Cajamarca, Perú	Julio Castro, Anthony Julian, Edwin Ayala y Gabriel Becerra
		15:15	15:30	Deepening an old, verticalized pit: rock slope instability hazard assessment using a "digitally augmented" structural database (Flône limestone quarry, Belgium).	Erwin C. Frets, Antoine Gauffriau, Nicolas Coussaert y Julien Vanneste
		15:30	15:45	Evaluación del impacto social y análisis de conflictos socioambientales en un proyecto minero en el sur del Perú usando modelos matemáticos	Solange Ríos
		15:45	16:00	Preguntas/Respuestas	
		16:00	16:30	RECESO	
	GEOLOGÍA ECONÓMICA	16:30	16:45	Lithocaps y su conexión a estructuras: de los datos abiertos a la prospección puntual de un sector del suroeste de Perú	Aldo Bendezú y César Cabellos
		16:45	17:00	Evolution and along-strike variations in the Arequipa-Tarapacá Basin structure at 21°S: Implications for Geological Exploration Models in Southern Peru and Northern Chile	Guillermo Fuentes, Sebastián Perroud, Salvador Cortez , Alejandra Acuña, Brian Townley y Fernando Martínez
		17:00	17:15	Características Metalogenéticas del Mioceno de las Regiones Cajamarca - La Libertad	Luis Quispe, Alonso A. Marchena, Victor R. Torres y Carlos Fernández
		17:15	17:30	Preguntas/Respuestas	
		17:30	18:00	RECESO	
	CONFERENCIA MAGISTRAL	18:00	18:45	Mercado global de cobre: fundamentos de corto y largo plazo	Erik Heimlich
		18:45	19:30	CLAUSURA	

PROGRAMA DE PÓSTERS

proEXPLO2021
Año del Bicentenario

TÓTEM 1

TÓTEM	TEMA	EXPOSITORES
TÓTEM 1: GEOLOGÍA ECONÓMICA	Características Metalogenéticas de los Depósitos Tipo Pórfidos y Epitermales de las Franjas XV, XXIII, XXI-A y XXI-C del Sur del Perú	Luis Quispe, Victor R. Torres, Alonso A. Marchena y Carlos Fernández
	Caracterización tectónica de los depósitos tipo VMS en el arco volcánico submarino Casma	Rosa Jara y Enrique Fernández de Paredes
	Controles Estructurales como guía de exploración de los cuerpos de borde (OB13 y OB9) del Yacimiento Cerro Lindo.	Sheyla Pinto, Nils Sarmiento y Peter Cerna
	Descubrimiento y geología del proyecto Coralillo, un sistema mineralizado de Cu, Au,Fe asociado a rocas volcano-sedimentarias cretácicas del "Grupo Casma", Cuenca Huarmey, en la costa norte del Perú	Pedro Jesus Reyes
	Distrito Uranífero de Macusani: Modelo de Mineralización usando Isótopos Estables	Guido Arroyo Pauca
	Generando valor en el yacimiento tipo VMS en la Unidad Minera Cerro Lindo a través de la búsqueda de nuevos dominios geológicos (volcánico mineralizado)	Jean Paul Bueno, Nickol Estrada y Jhonatan López
	Gold and silver deposit in sedimentary units, local characterization and general scopes of exploration (Shahuindo - Cajamarca, Peru)	Freddy Huisa, Cesar Alvarez, Alejandro Manrique y Nilton Chariarse
	Isótopos de Pb en los depósitos de la franja de epitermales de los volcánicos de la cordillera occidental del oeste de Huancavelica, Perú	Michael Valencia, César Chávez y Alex Santisteban
	Pegmatitas, aplitas, greisen y anomalías de Estaño en el Leucogranito Triásico de Paita, Piura	Alvaro Espinoza, Silvana Stipetich, Rodrigo Hurtado de Mendoza, Jorge Sáez y Jean Vallance
	Sistemas de inversión tectónica y su relación con los yacimientos minerales (6° - 8°30'S) de la Cordillera Occidental	Javier Jacay, Freddy Gómez, Jaime Gómez, Ricardo Pachas e Israel Sangay

TÓTEM 2

TÓTEM	TEMA	EXPOSITORES
TÓTEM 2: INNOVACIÓN EN LA EXPLORACIÓN MINERA	Análisis de Componentes Principales de elementos traza en sedimentos de corriente de la cuenca Cháparra (Arequipa) como herramienta de prospección aurífera	Genaro Ypanaque
	Análisis de minerales en los sensores Landsat 8, Aster 1B, Sentinel 2A, de la zona 22K; 22J; 21K;21J	Jhosy Alejandro
	Caracterización litogeoquímica con el analizador XRF Portátil Niton XL5 y vectorización de los elementos económicos Pb -Zn en el Proyecto Minero Zoraida, Perú.	Juan Carhuapoma y Max Paniagua
	Clusterización litológica a partir de data multielemental en La Tapada, depósito cordillerano polimetálico del Perú Central	Mario Díaz, Susankler Espinoza y Oshin Figueroa
	Estudios de Orientación Geoquímica y el uso de herramientas para destacar anomalías	Miguel Martínez
	Modelo explícito de alteración a partir de data litogeoquímica como guía de exploración en el yacimiento tipo VMS - Cerro Lindo	Maylin Mendoza y Cristina Palacios

TÓTEM 3

TÓTEM	TEMA	EXPOSITORES
TÓTEM 3: DEL DESCUBRIMIENTO A LA MINA	Análisis de riesgos en el negocio minero aplicando la reconciliación en la Unidad de Cerro Lindo	Jhonatan López y Gianncarlo Zamora
	Aplicación del ratio de Knuckey y la anisotropía dinámica en la estimación de recursos minerales de Cerro Lindo	Jhonatan López y Gianncarlo Zamora
	Economía circular, rutas tecnológicas para la pirita proveniente de relaves CL	Daniel Soares, Edelink Tinoco, Anthony Erazo y Rodrigo Gomes
	EDUCACIÓN: Indispensable para evitar conflictos sociales, promover y garantizar la sostenibilidad de la inversión minera en el Perú	Renzo Valdez
	Geometalurgia de minerales de cobre óxidos y secundarios e impacto en los recursos y la producción de la Unidad Minera Cerro Lindo	Jean Paul Bueno y Nickol Estrada
	Grade Uncertainty Assessment for Sub-Vertical Vein Exploration Projects	David F. Machuca-Mory y Oy Leuangthong
	Potencial de Exploración de relaveras históricas y sus implicancias para un futuro sostenible caso: Antigua Mina Carhuacayán, Junín-Perú	Oshin Figueroa, Mario Díaz, Susankler Espinoza, Carlos Velasquez, Franz Marcelo, Christian Blanco, Jainor Teran, Sindy Meza, Robert Monge, Antonio Enriquez y Cesar Farfán
	¿QA/QC realidad o fantasía?: diez años después	Samuel Canchaya

RESÚMENES DE CONFERENCIAS MAGISTRALES

proEXPLO2021
Año del Bicentenario

MACHINE LEARNING FOR EXPLORATION: REVIEW OF CURRENT AND FUTURE TOOLS

ABSTRACT

ABSTRACT

Machine learning has seen a growing interest in the last five years and we often see the term applied in the context of mineral exploration, mine exploitation and geoscience studies. In the mineral exploration space, both recent start-up companies and well-established mining and service companies are implementing machine learning in all facets of their work. Machine learning is used to support targeting, help define and interpret exploration vectors, integrate complex datasets, extract value from geophysical data and make core logging quicker and more reliable. New applications are regularly developed, and it is not clear yet what the limitations are. These implementations promise impressive value gains but how these gains will be achieved is not clear to a general public who is unaware of the underlying technology.

In addition, the potential for these technologies to surpass human performance in specialized tasks creates fear around job loss and restructuring, motivating some to reject them altogether. As is often the case, however, the reality of the impact of these methods on the mining industry is more complex than is widely perceived. Through a series of examples and case studies, this presentation explains machine learning, shows current applications in mineral exploration and discusses future applications, opportunities and challenges.

AUTOR

AUTOR:

DR. ANTOINE CATÉ

Senior Consultant
SRK - Canada

Dr. Antoine Caté is senior consultant in structural geology at SRK Toronto. He has 9 years of both academia and industry field experience working on gold and base metal deposits. He is an expert in the applications of data science and machine learning in geosciences and in mineral exploration. Before working with SRK, Dr. Caté was part of teams awarded at the Integra Gold Rush Challenge and the Disrupt Mining Challenge.

He was involved in the founding of two companies implementing machine learning in the mining industry. Antoine current work at SRK includes structural field investigation, 3D modelling, machine learning, and the development of innovative tools applied to structural geology, and mineral exploration.

EXPLORING PERU FOR METALS AND HYDROCARBONS USING OUT-OF-THE BOX THINKING

ABSTRACT

ABSTRACT

It is self-evident that a better understanding of large- and small-scale Andean geological features and timeline can make a difference in exploration, especially in terms of duration and costs. In other words: the better the geological knowledge in the Andes, the easier it should be to discover and develop ore deposits of economic interest.
Knowledge of the Andean evolution continues however to be plagued by geological myths and obsolete concepts (such as "compressional tectonic phases" or "ocean-continent collision"), while major key features of this evolution remain underrated. Because they rely little on experiments but mainly on interpretations, narratives, and sometimes rhetorics and sociological situations, the Earth sciences form a field where traditional paradigms have never been easy to challenge, and even less to change. Andean geology makes no exception.

Yet research on the general geology of Peru has been fruitful during the last two decades, bringing about many new and unexpected observations and data, which have considerably challenged previously authoritative interpretations. These advances now make that we are reaching a state of knowledge where the diverse pieces of the geological puzzle are falling into place. Although this information remains partly unpublished, this talk will review the main progresses made about the geology of Peru in the course of the last decade.

This talk aims (1) at highlighting updated aspects of the tectonic, stratigraphic, magmatic, structural, and chronological record; (2) at showing how the new interpretations are mutually consistent and combine fruitfully; and (3) at suggesting how they could be assembled and used when conducting mineral exploration in Peru. "Getting the geology right" – conceptually speaking – is simply crucial in mineral and oil exploration, as it considerably increases the chances of success, and decreases costs and risks.

AUTOR

AUTOR:

Dr. THIERRY P. A. SEMPERE

Consultor y Gerente de exploraciones
ANDES C&P - Perú

Thierry Sempere es ingeniero-geólogo y doctor de la Escuela de Minas de París. Cuenta con 37 años de experiencia en los Andes Centrales, especialmente en Perú y Bolivia.

Geólogo netamente andino, se ha especializado en la articulación de observaciones y datos multidisciplinarios a escala regional a local: geología económica, estratigrafía y análisis de cuencas, geocronología y geología del arco magmático, tectónica, geomorfología, etc.

Es autor o co-autor de un centenar de artículos científicos, con unas 3000 citaciones en revistas internacionales.

Es actualmente Consultor y Gerente de exploraciones de la empresa ANDES C&P, desde el año 2017.

AN INTEGRATED MODEL FOR Cu AND AU MINERALISATION IN CONVERGENT MARGINS: TWO FUNDAMENTAL PROCESSES INTERACTING IN VARIABLE GEODYNAMIC SITUATIONS

ABSTRACT

ABSTRACT

Convergent margin orogens, such as the Andes, show a complex range of Cu and Au ore types. While there are often clear links between Cu and Au metallogeny, there are also situations where these deposits occur separately. Recent advances indicate that two fundamental processes act to form ore deposits in convergent margins.

These are the Loucks process, which relates to anomalous high-pressure fractionation of hydrous arc magmas, and generates Cu metallogeny, and the FUME (Fertile Upper Mantle Extraction) process which generates Au metallogeny. Both processes occur in response to anomalous regional-scale geodynamic conditions. In some cases, these conditions favour only one of these two processes whereas in other cases, both processes are simultaneously favoured.

AUTOR

AUTOR:

Dr. JON HRONSKY

Director
Western Mining Services (WMS) - Australia

Jon Hronsky has more than 35 years experience in the mining and exploration industry. He is currently a Principal of Western Mining Services (WMS), a consultancy group that provides strategic-level services to a wide range of groups (from juniors to majors) across the global mineral exploration industry.

Previous roles included Manager of Strategy and Project Generation for BHP's global mineral exploration group and Chief Geoscientist for WMC Resources. Jon is an Adjunct Professor at the Centre for Exploration Targeting at the University of WA. He is, or has been, a Director of several ASX mining companies, and is also a partner in Ibaera Capital, a mining-focused private-equity fund. In January 2019, he was awarded the Order of Australia medal for services to the Mining Industry.

CONVERTING MINERAL RESOURCES FOR A SUSTAINABLE FUTURE: LESSONS FROM THE FIRST 20 YEARS OF THE NEW MILLENNIUM

ABSTRACT

ABSTRACT

Analysis of trends in copper exploration and production over the past 20 years provides insight into the factors impacting future sustainability. Essentially all production over the next 20 years will originate from already known mineral resources and reserves. The challenge of meeting future demand for metals is, therefore, not insufficient resources rather the convertibility of resources and reserves into production.

Our industry has made major strides in convertibility from a technical and economic perspective through innovations in mining and mineral processing, increased productivity, automation and use of artificial intelligence. Conversely, the first 20 years of the millennium have seen lost opportunities to adequately address other fundamental issues of convertibility. Social conflicts over land and water continue to temporarily, or permanently, derail mine developments.

Massive tailings dam failures continue to haunt our industry. We remain stubbornly silent on many key social issues including gender and ethnic workplace diversity and economic inequality in mining jurisdictions. Future convertibility will hinge as much or more on these factors as on technical and economic issues.

AUTOR

AUTOR:

Dr. MICHAEL DOGGETT

Principal Consultant
Doggett & Associates - Canada

Michael Doggett is a Vancouver, Canada based mineral economist with 35 years of experience working with clients in some 20 countries on issues related to project evaluation, mineral taxation, private and government royalties, and industry exploration trends. From 1997 to 2007, Doggett served as Director of the Mineral Exploration Program at Queen's University, Canada where he continues to serve as an adjunct professor. He has authored or co-authored more than 20 publications and provided training to more than 2500 industry professionals. He has served on the board of 6 public companies as well as the PDAC and the Committee on Earth Resources at the U.S. National Academy of Sciences.

The Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum presented him with their Robert Elver Mineral Economics Award in 2002 and named him Distinguished Lecturer in 2010. The Society of Economic Geologists named him as their International Exchange Lecturer for the year 2005 and the Society of Mining Metallurgy and Exploration presented him with their Mineral Economics award in 2019.

MERCADO GLOBAL DE COBRE: FUNDAMENTOS DE CORTO Y LARGO PLAZO

ABSTRACT

ABSTRACT

Analizaremos el mercado de cobre presente y futuro, mostrando el potencial de crecimiento de la demanda y sus principales variables y el estimado de producción futura del metal rojo, incluyendo los proyectos que pueden transformarse en unidades productivas.

Estimaremos el impacto de estas variables en el precio de mediano y largo plazo del cobre. Culminaremos con las ventajas competitivas que tiene la industria de cobre en el Perú y como todos estos fundamentos podría beneficiar al país tremendamente.

AUTOR

AUTOR:

Econ. ERIK HEIMLICH

Analista Principal
CRU Group - Chile

Erik Heimlich es Analista Principal del equipo de Análisis de Metales Base en CRU y posee una larga experiencia en el análisis de mercados de minería y metales. Erik se unió a CRU en septiembre de 2012. Su trabajo en CRU se centra en el mercado del cobre, con especial énfasis en el mercado global de concentrados de cobre y en la oferta latinoamericana.

Antes de unirse a CRU, Erik Heimlich trabajó durante varios años como economista y coordinador de estudios econométricos para la Comisión Chilena del Cobre (Cochilco). Además, fue presidente del Grupo Internacional de Estudios del Cobre (GIEC) y trabajó como consultor en economía. Erik Heimlich tiene una maestría en economía y econometría de la Universidad de Essex.

MESAS REDONDAS

proEXPLO2021
Año del Bicentenario

EL APORTE DE LAS MUJERES A LA INDUSTRIA DE LA EXPLORACIÓN MINERA DEL PERÚ

RESUMEN

No podemos negar que la minería es una pieza clave en la economía peruana por las inversiones, impuestos, puestos de trabajos directos e indirectos que genera, así como por el aporte al capital social de las poblaciones aledañas a sus operaciones y es que el Perú, es un país que posee diversidad de yacimientos minerales que se formaron por procesos geológicos muy peculiares, conformados por eventos tectónicos, magmáticos y de mineralización ocurridos, por ello la exploración minera constituye una actividad fundamental para el éxito de la actividad minera en el país.

Desde el siglo pasado, las profesionales desempeñamos un papel importante dentro de la cada vez más competitiva y exigente industria de la exploración minera en nuestro país.

Recordemos que desde los inicios de la minería, la mayoría de trabajos de exploración se centraron en trabajos de cartografiado geológico y muestreo, agotándose en la práctica los yacimientos de modelos tradicionales y con mejores leyes. La creciente demanda mundial por minerales ha obligado a la exploración minera a evolucionar, implementar nuevas tecnologías, herramientas y enfoques para lograr mayor eficiencia en los esfuerzos que realizan los geoscientistas para la recopilación, sistematización y análisis de datos; nuevos equipos, técnicas y modelos para la realización de sondajes e interpretación para determinar el valor y la viabilidad de las reservas minerales.

Si miramos con mayor detalle las actuales metodologías de teledetección, geología de campo, geofísicas, geoquímicas, entre otras que intervienen en las distintas etapas de la exploración, podemos apreciar las multidisciplinas que interviene en cada una, el avance vertiginoso de la inteligencia artificial, big data, machine learning para obtener una Geociencia Predictiva y modelos prospectivos para superar los desafíos de descubrir nuevos yacimientos o incrementar las reservas de los ya en producción, y es aquí donde las mujeres están logrando mayor participación por las características innatas de su propio género como el ser deductivas, organizadas, detallistas, minuciosas, acatar las normas, mayor sensibilidad social, entre otras, que ser optimizadas añaden un valor agregado a la exploración minera.

En esta presentación se expondrá el análisis de género en la industria minera, tanto en el sector privado y algunas entidades públicas, así como en el sector educativo, se mostrará el actual desempeño de las geoscientistas que están destacando en sus áreas y que son fuente de inspiración para futuras generaciones y alternativas para mejorar la mujer en la exploración minera. Me acompañan dos geólogas destacadas, Clara Indacochea y María Manrique, quienes brindarán sus experiencias, alcances y desafíos a lo largo de su trayectoria profesional en su respectiva especialidad.

Finalmente, se mostrará una visión global del futuro de las exploraciones y las potenciales áreas en demanda para las mujeres en geosciencias en las futuras exploraciones.

AUTORES:

SILVIA KOHLER

Ingeniera Geóloga egresada de la UNMSM, con +25 años de experiencia en exploración minera y extracción mineral en variedad de depósitos metálicos y no metálicos, especialista en geoquímica, QAQC, gestión de base de datos, catastro minero, evaluación de proyectos mineros e implementación de sistemas técnicos en empresas como Ausenco, Vale, Hochschild y BISA entre otras. Persona Competente en Recursos y Reservas mineras (Chile) y QP (USA y Canadá). Maestría en Minería Económica y Finanzas en UBC (Canadá). Miembro del Comité Directivo de la Sociedad Geológica del Perú (2020-2021) y Presidente del Comité de Mujeres en Geosciencias (SGP).

CLARA INES INDACOCHEA ALVAREZ

Ingeniera Geóloga de la Universidad Nacional San Agustín de Arequipa. Si bien, ella ha recibido la capacitación habitual de todo geólogo de exploración, cuenta con estudios de postgrado en Políticas Públicas para el Desarrollo Sostenible, Programa Ambiente, Energía y Población, Educación Intercultural, Gestión en Hidrocarburos, Responsabilidad Social Empresarial, Análisis y manejo integral de problemas socioambientales y Animación Sociocultural. Especializada en el Programa Ambiente, Energía y Población, así como en Pueblos Indígenas, Diversidad cultural, Derechos Humanos, Manejo y Resolución de Conflictos, Comunicación intercultural, Coaching y Mentoring Ejecutivo.

Cuenta con más de 40 años de experiencia profesional, dentro de los cuales, ha trabajado en IGP, INGEMMET, Cerro Verde, MTC, MINEM y PETROPERU. Ha dictado cursos y conferencias en entidades nacionales y extranjeras como en Argentina, Cuba, Colombia, Chile, Brasil, Guatemala, España, México, Portugal y Uruguay.

Ha sido en dos oportunidades miembro del Directorio de Petróleos del Perú – PETROPERÚ S.A. Perteneció al Comité de Responsabilidad Social de la Asociación Regional de Empresas del Sector Petróleo, Gas y Biocombustibles en Latinoamérica y el Caribe -ARPEL desde el 2006, llegando a ser Vice Presidente del mismo y Líder del equipo de Trabajo de Pueblos indígenas. Su trabajo ha sido reconocido por diversas instituciones de la industria de Hidrocarburos, entidades extranjeras y organizaciones indígenas.

MARÍA MANRIQUE

Ingeniera Geóloga, egresada de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos del Perú, con especialización en el Aprovechamiento Sostenible de Recursos Minerales de la Universidad Politécnica de Madrid y estudios de maestría en Ciencias Ambientales en la Universidad Nacional Agraria La Molina.

Cuenta con más de 25 años de experiencia profesional, tanto en el sector privado como en el estatal. Ha desarrollado tareas de prospección y exploración minera, geoquímica, control de calidad de análisis químicos, evaluación de proyectos, compilación y análisis de datos, entre otros; y desde el año 2015 trabaja en el Instituto Geológico Minero y Metalúrgico del Perú, integrando los equipos de geoquímica y de Litoteca Institucional.

PERÚ RUMBO AL CRIRSCO

AUTORES:

EDSON RIBEIRO

Edson Ribeiro has over 30 years of experience in the mining industry, having devoted most of his career to the evaluation of mineral resources covering a broad range of ore types and deposit styles.

Graduated with a B.Sc. Degree in Geology at the University of São Paulo in 1987, he obtained his M.Sc. degree in Metalogenesis at University of Campinas (São Paulo, Brazil) in 1994.

Edson has joined Vale S.A. in 1993 and, besides resource evaluation, along his career he has also been responsible for mineral projects engineering, process development, economic evaluation, strategic planning, business development, technological innovation and mineral exploration. As a technical leader and Vale executive, he has participated of several due diligences, M&A processes and international tenders, and has been a Board Member of Vale-controlled companies and Joint Ventures in Brazil, Zambia, Australia and Indonesia.

Currently leading the Exploration and Mineral Projects area, Edson is responsible for conducting greenfield exploration and pre-feasibility studies within the Company. He is also responsible for the coordination of Vale's Global Committee for Mineral Resources and Mineral Reserves.

Professional memberships:

- Australian Institute of Geoscientists (AIG Member ID 5465)
- Society for Mining, Metallurgy and Exploration (SME Registered Member # 4203166)
- Australian Institute of Mining and Metallurgy (AusIMM Fellow # 990815)
- Brazilian Commission for Resources and Reserves (CBRR Registered Qualified Professional #16001)
- Brazilian representative with CRIRSCO since December 2015, CRIRSCO Secretary 2016-2018, Deputy Chairperson since 2019
- President of ADIMB (Agency for the Technological Development of the Brazilian Mining Industry) between May 2016 and May 2020

JULIO NERY

Mining Engineer from the Federal University of Minas Gerais (UFMG), with other extension courses on Geostatistics (UFOP), Quality and Productivity (SME – MG) Business management FDC (Belo Horizonte), Leadership (Vale, MIT and IMD).

Julio Nery has 41 years of experience in the areas of Environment, Planning and Operations in several mining companies. The executive worked for 25 years at Minerações Brasileiras Reunidas (MBR), passing through the positions of General Manager of Operational Planning and General Manager of Complexo Pico (1998/2005). In addition, he worked at Vale's General Licensing Department. Until January 2020 he was the director responsible for the operations of Crusader do Brasil Mineração and its subsidiary Cascar.

Julio Nery is part of the Environment Council of the Federation of Industries of the State of Minas Gerais (FIEMG) and also coordinated the Committee for International Standardization in Mining at Ibram (CONIM).Now is the Director of Sustainability and Regulatory Affairs of IBRAM, The Brazilian Mining Association and President of Comissão Brasileira de Recursos e Reservas, a CRIRSCO affiliate association.

Presentation on CBRR - Brazilian Commission for Resources and Reserves

- Purpose and objectives
- Historic
- Organizational structure and performance
- Expertizes for registration
- Necessary requirements for professional registration

SERGIO VICENCIO

Sergio Vicencio es geólogo de la Universidad de Chile, con un postítulo en Fundamentos para la Certificación y Valoración de Activos Mineros en la Universidad Católica de Valparaíso.

Su trayectoria profesional es de cincuenta años en el área de geología de minas y exploración de minerales metálicos. Amplia experiencia en recolección de información geológica, modelamiento geológico y dirección de programas de exploración. Auditorías de recursos y modelos geológicos que sustentan las reservas.

Ha trabajado en ENAMI, Compañía de Cobre Salvador, en la Dirección de Minas e Hidrocarburos en Honduras, Anaconda Mining, entre otros. En la actualidad es integrante como socio fundador y gerente de proyectos de EGM Servicios Geológicos Mineros, empresa dedicada a la consultoría en geología de minas y exploración, desarrollando trabajos en Chile, Sud América y África.

Es Persona Competente, y en la actualidad Presidente de la Comisión Minera en representación del Colegio de Geólogos de Chile, y Secretario de CRIRSCO.

Presentación Comisión Calificadora de Competencias en Recursos y Reservas Mineras - Chile

Con fecha 31 de diciembre de 2007, se publica la Ley N°20.235 que regula la figura de las Personas Competentes y crea la Comisión Calificadora de Competencias en Recursos y Reservas Mineras.

En esta presentación consideramos de interés mostrar la evolución que ha tenido la Comisión Minera durante estos 13 años de existencia. Para ello se detallará:

- Constitución de la Comisión, miembros fundadores
- Ley N°20.235
- Algunos hitos históricos
- Código CH 20235
- Personas Competentes
- Certificados emitidos
- Relaciones Internacionales
- Actividades y principales eventos
- Otras Actividades
- Seminarios, Talleres y Cursos
- Programa de Actividades 2021
- Desafíos y Metas

SAMUEL CANCHAYA

Bch., Ing. & Magister

Ingeniero Geólogo de la Universidad Nacional de Ingeniería. Magister en Yacimientos en la Universidad de Heidelberg – Alemania. Profesor visitante en las universidades de Bochum y Heidelberg – Alemania.

Especialista en: Muestreo & QA/QC, Análisis Mineralógico Instrumental: Microscopía óptica y electrónica, NIR, FTNIR, DRX y QEMSCAN; Mineralogía y Yacimientos, Exploraciones, Modelamiento 3D, Caracterización geoquímica multielemental. Geoestadística (aplicada a exploraciones, Plantas metalúrgicas, Estimación, Categorización y Evaluación de Recursos) y Geometalurgia (Caracterización y Logueo y Modelado Geometalúrgico por Bloques).

Trabajó en prestigiosas empresas: Minero Perú, INGEOMIN, INGEMMET, Consultor Internacional PNUD (Prospección por Cu IV Región-Chile), Cyprus-Cerro Verde AQP, North Cía. Minera, Consorcio Minero Horizonte, Director Regional de Energía y Minas de Ucayali, MINSUR S. A. (a través de AESA), Phelp Dodge y Free Port McMoran – Soc. Minera C° Verde y Cía. de Minas Buenaventura.

Consultor en Geoestadística, Muestreo y QA/QC, Microscopía y Geometalurgia. Actualmente Gerente General de Sampling OK SAC y catedrático de pregrado y postgrado de la Pontificia Universidad Católica del Perú y Universidad Nacional de Ingeniería.

Creador, principal impulsor y desarrollador del "Concepto de Roca Total", de la Caracterización Geometalúrgica Global, del Logueo Geometalúrgico y del Modelo Geometalúrgico de Bloques probabilístico.

Ing. WILFREDO LOPEZ

Ing. de Minas y Metalurgia de la Facultad de Minas, Univ. Nacional de Colombia.

Máster en Ciencias en Ingeniería de Minas con énfasis en Geostadística. Escuela de Minas de Colorado.

Experiencia de más de 40 años en el sector minero internacional.

Consultor y actual presidente de la Comisión Colombiana de Recursos y Reservas Minerales (CCRR).

proexplo.com.pe

RESÚMENES EXTENDIDOS DE CHARLAS TÉCNICAS

proEXPLO2021
Año del Bicentenario

LUNES 22

Deep Imaging Technologies Applied to Mine Planning and Exploration Applications for Risk Mitigation at The Mine Site

Leduar Ramayo Cortes[1] and Robert L Gordon[2]
[1] 1 Quantec Geoscience, 146 Sparks Ave, Toronto, Canada (lramayo@quantecgeoscience.com)
[2] 1 Quantec Geoscience, 146 Sparks Ave, Toronto, Canada (Rgordon@quantecgeoscience.com)

1. Abstract

The last 20 has seen vast improvements in geophysical technology thanks in part to advances in computing speed. Several systems have evolved to rapidly collect very deep and accurate information about the subsurface. Collecting deep information at the mine planning stage can provide key insights about the subsurface that can contribute to more effective mine plans. By collecting data and creating comprehensive 3D earth models of the subsurface, where often little information is available, is key to helping reduce associated long term risks to mine operations' systems can rapidly produce images to depths of from surface to 2000 metres by measuring vast amount Resistivity and IP data. This data is often directly related to critical features of the subsurface such as the location of clay layers, faults, shears and water. In addition, large scale images can be used to assist condemnation drilling, map geology and other structural information which may impact the overall plan. Large scale imaging may also provide insights for near mine exploration, these data sets can then be used for life of mine exploration activities, which inevitably occur. In some case the discovery of additional sub deposits at this time, can help avoid disastrous situations such as locating tailings ponds and other infrastructure directly over additional deposits which may exist proximal to the original discovery.

Keywords
Reduce Risk, Brownfield, Mine Site, Condemnation drilling, Exploration, Magnetotelluric, Geophysics.

2. Introduction

In 1994, John Kingman introduced the concept of digital signal processing and this lead to a paradigm shift in instrumentation development. Since that time, things have evolved to a point where, detailed and deep imaging has begun to be routinely used in exploration. A distributed network of sensors collects full waveform data and advanced processing enables the ability to pick up small signals that can represent real structure and targets within the realm of large ambient noise, that typically exists in and around the mine Deep accurate resistivity and chargeability images are provided to roughly 750m.

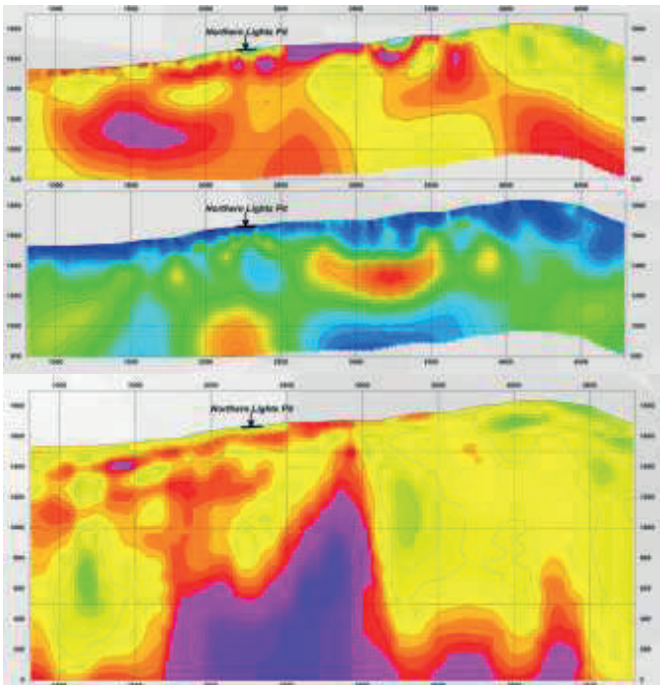


Figure 1 (top) DC resistivity section from 2D TITAN24 distributed array survey. (middle) IP (chargeability) section I. Note how the DC model sees a near surface horizontal layer, senses a second deeper feature and senses something at the bottom of the section. (Bottom) The MT resistivity section corroborates the DC in the near surface but provides additional deeper imaging. Data courtesy Newmont, Nevada USA.

In addition to the deep IP surveys, the applied use of the MT technology, which was routinely used in

regional very deep search academic studies (25km deep), for very detailed deep (2000m) surveys was added to deep penetrating IP surveys, thanks to the multi-tasking computers and contributed further to the ability to image more thoroughly and even deeper with greater accuracy. Multi-parameter 2D images are provided for analysis. (Figure 1.) More recently, full 3D surveys have provided even greater imaging capability in geologically complex environments.

3. Deep 2D imaging success Brownfield and Mine sites environment

In 2000, the first commercial surveys were carried out in greenfield environments. It was quickly realized that these surveys could be useful for exploration activities near older mines where new orebodies might extend the life of mine. The use of these deep 2D surveys was particularly useful in near mine environments where noise rejection allowed acquisition of data in areas never possible before (Figure 2).

Figure 2. Deployment of deep imaging receivers in minesite.

Copper Mountain Mine, Canada

In one very significant application a survey was run over several end of life mining pits. Figure 3. The results of the survey were spectacular. Figure 4 The survey highlighted several unique applications of the technology most significantly was the discovery of new ore below the pit which contributed to the extension of mine life. In addition, plans for extensive Acid Base drilling could be adjusted based on the correlation of geology and the images. This contributed to less drilling in an area planned for tailings,

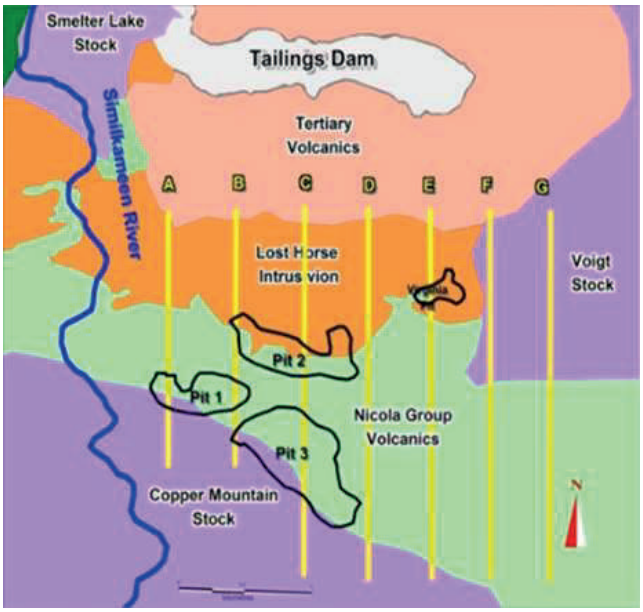


Figure 3. Copper Mountain Open pits and survey layout.

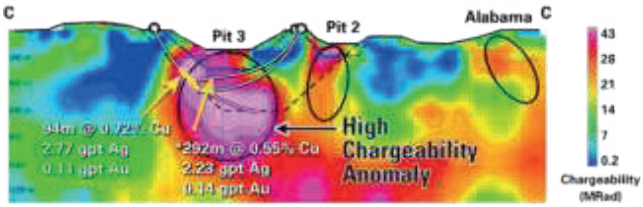


Figure 4 Results from Line C. 2D chargeability section. The section is 750 meters deep and highlights new discoveries directly below existing open pits. Data courtesy Copper Mountain Mining, Canada.

In another near mine application, the images highlighted the importance and the potential cost savings, had the technology been applied at an early stage of mine planning and development.

Kidd Creek Mine, Canada

The multi-parameter system deployed over an area of 5 km by 1 km only 500m from the pit at the top of the mine. (Figure 5.).

The blind test survey was successful at identifying 100 % of the known targets previously drilled within the top 800 metres. A significant region where the survey indicated little further investigation would be warranted (Figure 6) was confirmed by hundreds of barren drill holes that had been previously drilled over 15 years at an estimated cost of over 15 million dollars (Figure 7).

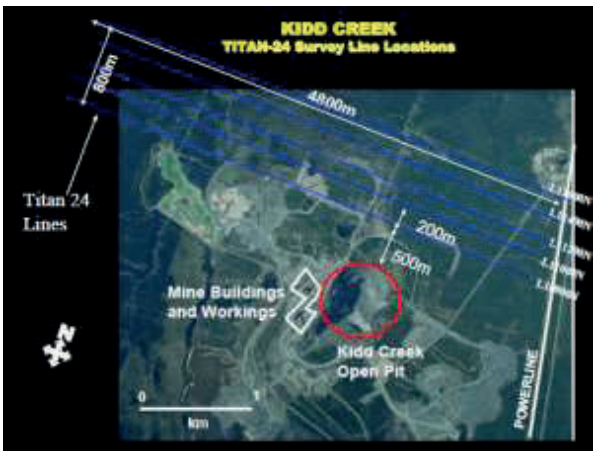


Figure 5. Survey lines near mine and power lines

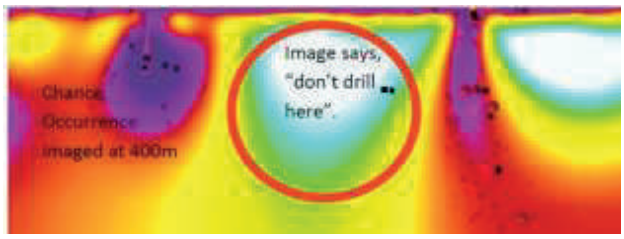


Figure 6 Resistivity section, shown to > 700m depth. Blue/ white regions represent resistive rock, warm colors represent increased conductivity

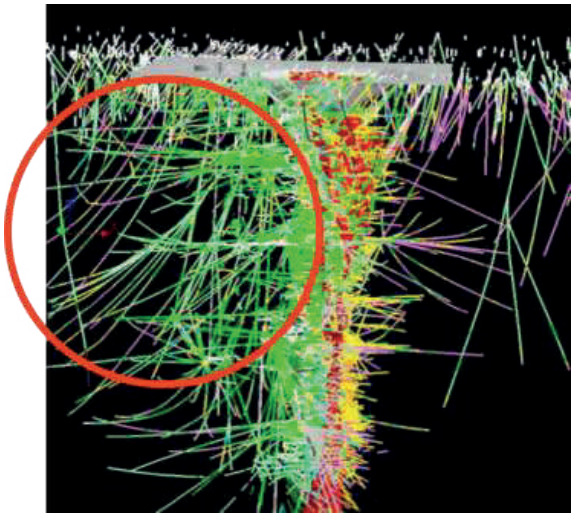


Figure 7. 3D model showing ore body and 15 years of underground exploratory drilling.

4. 3D systems

Following the lead of the oil industry, 3D technology was developed to address limitations in 2D data acquisition techniques. With the advances in 3D data inversion techniques in the early 2000's for single point data collection techniques such as Mag, Gravity and MT, the natural progression was to develop methodologies for collecting full 3D DCIP data.

The further advancement of computing technology allowed the deployment of more sophisticated computers (receivers) that would allow omni directional energizing of the ground as well as omnidirectional measurements of the responses for DCIP surveys. There are several unique features of these systems including a large footprint of 2 x 2 km and more to optimize DC and IP depth of investigation in the 600 m to 900 m depth range; and a large numbers of in-line and cross-line receiver dipoles that maximizes coupling with any target. (Figure 8)

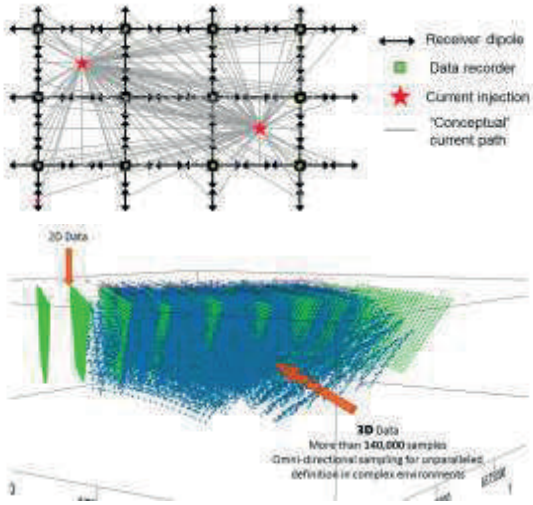


Figure 8 An example of a 3D deployment of receivers with conceptual current paths for just 2 injection points. (bottom) A survey would involve typically over 250 injection points are made on a grid. 3D data plot points are shown in blue and compared to data plot points from a 2D survey shown in green.

For every current injection, all receivers are active. This results in a true omnidirectional coverage for each current injection and gives multiple intersecting current paths over the entire survey with a very large number of data points acquired. The result is greater volumes of data and better coupling with complicated 3D geology and structure which enhances resolution and target detection at both shallow and deep depths. The omnidirectional coverage provides a better 3D inversion result because there is no acquisition directional bias and each cell in the inversion volume is sensitive to multiple omnidirectional current paths.

The increase in data volume coupled with the omnidirectional sampling provides the basis for highly data constrained 3D models. In Figure 9 we see significantly more detail extracted from the full "3D" survey.

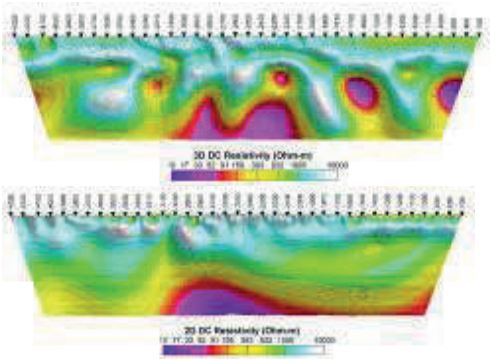


Figure 9 Deep resistivity sections. Depth of the section is roughly 800 meters. (Top) 2D section sliced from a 3D inversion model of 3D data. (Bottom) 2D resistivity section from 2D inversion of single line of receivers. (2D data)

5. Deep imaging at the Yauricocha Mine, Peru

The Yauricocha Mine is in the Alis district, Yauyos province, department of Lima approximately 12 km west of the Continental Divide and 60 km south of the Pachacayo railway station. Until very recently mineralization at the Yauricocha Mine has been represented by variably oxidized portions of a multiple-phase polymetallic system with at least two stages of mineralization, demonstrated by sulfide veins cutting brecciated polymetallic sulfide mineralized bodies.

A deep minesite survey was designed with 23 lines, spaced 200m of length 2.4 km. Sierra Metals confirmed the discovery of a new style of mineralization based on testing of the deep geophysical anomalies, in the quartz monzonite intrusive. Discovery drilling of a new style of mineralization (porphyry) at over 1,300 m was based on deep electrical earth imaging provided by MT data. (Figure 10).

Conclusions

With the great advances in computing power, coupled by the ability to measure small signals in a background of noise, technology is available to address significant mine planning and life of mine issues. Deployment of these technologies at an early stage immediately after discovery at pre- or feasibility stage, can help provide risk mitigation and enhance future exploration initiatives at the mine. Improved condemnation planning, enhanced targeting and ultimately more efficient use of drilling budgets while working around the mine can be achieved. Examples clearly demonstrate effective investigations for mine planning, exploration discovery and extended life of mine in several cases.

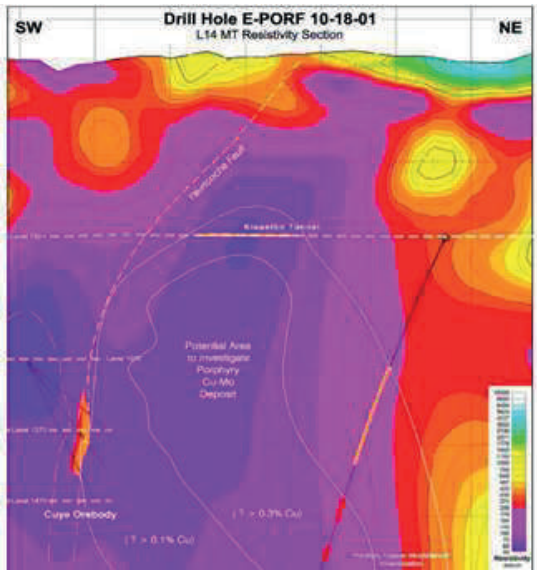


Figure 10. Deep MT resistivity with intersection at 1394 m.

Thanks

The author wishes to acknowledge Sierra Metals, KIDD Creek and Copper Mountain for the use of the data examples.

References

Sharpe, R.[1], Gordon, R.[1], Zhurba, A. [1], Data, E. [1], 2018. A decade of technological advances in distributed IP & Resistivity. Why it was needed. What was achieved.

Gordon R, 2006, New technology approach needed for mining industry. First Break, Vol 24, July 2006.

Goldie M, 2007, A comparison between conventional and distributed acquisition induced polarization surveys for gold exploration in Nevada: The Leading-Edge PP 180-183

Kingman J, 1994, Digital signal processing approaches to interpreting induced polarization data: John S. Sumner memorial international workshop on IP in mining and the Environment, Tucson AZ

Egbert, G and Booker, J, 1986, Robust estimation of geomagnetic transfer functions: Geophys. J. R. astr, Soc. (87) pp 187-194

Macnae. J, 2016, Developments in airborne IP, KEGS special lecture, Toronto

Characterizing Skarn Mineralogy and Texture Using Hyperspectral Core Imaging: Essential Data for Accurate Geometallurgical Assessment

Cristal Palafox[1], Cassady Harraden[2], Cari Deyell-Wurst[3]

[1]Corescan SA, Rosa de Castilla 5, Col. Quinta Emilia, Hermosillo, Sonora, Mexico (cristal.palafox@corescan.com.au)
[2]Corescan Ltd., Suite 800, 1030 West Georgia Street, Vancouver, British Columbia, Canada (cassady.harraden@corescan.com.au)
[3]Corescan Ltd., Suite 800, 1030 West Georgia Street, Vancouver, British Columbia, Canada (cari.deyell-wurst@corescan.com.au)

1. Abstract

Skarn deposits display complex mineralogical and textural relationships as a result of the range of geological processes involved in their development. Mineral associations can be further complicated by supergene leaching and oxidation. Both exploration and mining require an understanding of the type, relative abundance, spatial occurrence, and textural relationships of both prograde and retrograde minerals. Hyperspectral core imaging (HCI) can consistently and continuously map key skarn mineralogy while simultaneously capturing textural and paragenetic data. This information is critical for exploration and mine modelling but also when considering the processing behavior of a skarn deposit. Mapping the mineralogy and texture in complex skarn deposits provides key information to make informed geometallurgical sampling and modelling decisions.

1. Resumen

Los depósitos tipo skarn muestran complejas relaciones mineralógicas y texturales como resultado de la variedad de procesos geológicos involucrados en su desarrollo. Las asociaciones minerales pueden complicarse aún más por la lixiviación y oxidación supergénicas. Tanto la exploración como la minería requieren la comprensión del tipo, abundancia relativa, ocurrencia espacial y relaciones de textura de los minerales progrados y retrógrados. Las imágenes de núcleos hiperespectrales (HCI) pueden mapear de manera constante y continua la mineralogía clave de skarn mientras captura simultáneamente datos de textura y paragenéticos. Esta información es crítica para la exploración y el modelado de mina, pero también cuando se considera el comportamiento de procesamiento de un depósito skarn. El mapeo de la mineralogía y la textura en depósitos tipo skarn complejos proporciona información clave para tomar decisiones de modelado y muestreo geometalúrgico.

2. Introduction

Skarns deposits represent a significant global resource for base and precious metals and are the world's primary source for tungsten (Einaudi et al. 1981, Meinert 1993). Skarns are distinct from many other types of ore deposits and represent a great variety of mineralizing conditions from Fe, Au, W, Cu, Zn, Mo, to Sn dominant resources. The mineralogy within each system is the result of lithologic compositions, structural pathways, and prograde vs retrograde mineral reactions. Mineral associations can be further complicated by supergene leaching and oxidation. These processes result in complex mineralogy and intricate textural relationships.

Understanding the type, relative abundance, spatial occurrence, and textural relationships of both prograde and retrograde minerals is vital to assessing the characteristics of the deposit both for exploration and mining applications. Hyperspectral core imaging (HCI) can consistently and continuously map key skarn mineralogy while simultaneously capturing textural and paragenetic data. This information is critical when considering the processing behavior of a skarn deposit and provides key information to make informed geometallurgical sampling and modelling decisions.

3. Hyperspectral Core Imaging

Characterizing skarn mineralogy can be difficult. Visual logging, combined with traditional analytical techniques (including petrography, XRD, and SEM-based methods) can be effective for major calc-silicate minerals in many cases. However, it is difficult to distinguish phyllosilicate mineral species using these techniques and the range of mineralogical and textural variability may not be adequately represented.

Hyperspectral analysis can provide consistent information regarding both calc-silicate and phyllosilicate mineral proportions and geochemistry over large volumes of geological material (Martini et al., 2017). This mineralogical data generated combined with the imaging capabilities of an HCI system gives the added information about the texture and paragenesis of these minerals (e.g. grain size, mineral associations, Fig. 1).

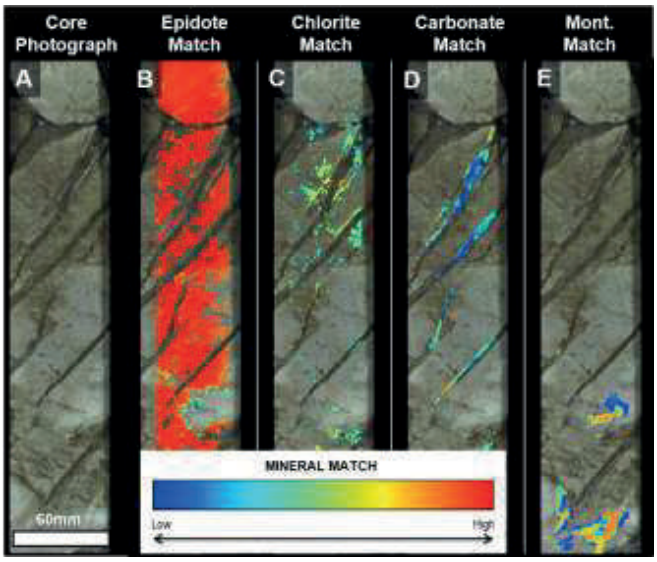


Figure 1. (A) Example of complex paragenetic relationships observed in skarn core that is highlighted by HCI data. Pervasive epidote alteration (B) is cut by carbonate +/- chlorite veins, (C, D). Late-stage montmorillonite occurs as an overprint (E).

4. Mapping Skarn Mineralogy Using HCI

Prograde mineral phases are dominated by anhydrous calc-silicate mineral groups including garnet and pyroxene (Fig. 2A). Although these minerals have weak or broad absorptions in the short-wave infrared (SWIR) region, visible to near-infrared (VNIR) features (Fig. 2B) can be used to identify Fe- and Ca-rich species of garnet (Izawa et al., 2018) and Ca- Fe/Mg-rich species of pyroxene (Horgan et al., 2014).

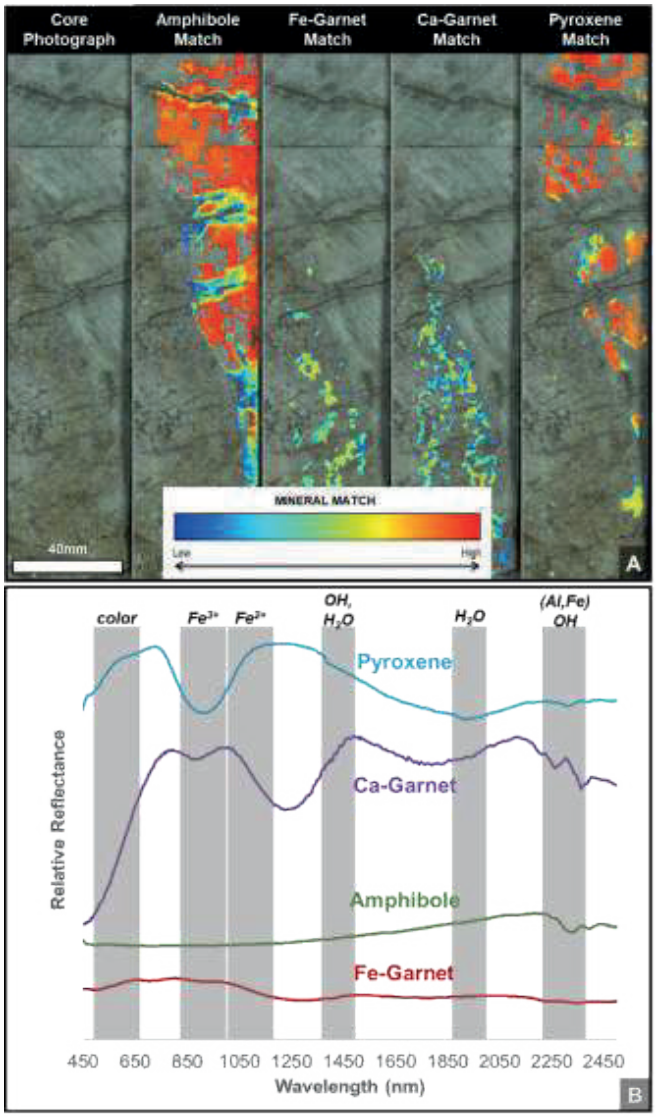


Figure 2. (A) Calc-silicate minerals in skarn mapped using the Corescan HCI-3 system. Representative VNIR-SWIR spectra for pyroxene, amphibole, Fe- and Ca- garnet (B). Note lack of diagnostic SWIR features, although absorption features and spectral shapes in the VNIR can be used to effectively identify these minerals (B).

Retrograde skarn mineralogy commonly consists of 'hydrous' mineral phases; epidote, amphibole, chlorite, micas, vesuvianite, prehnite and a range of clays. Kaolinite is common and several varieties of smectite-group minerals (and/or interlayered species) are typical. Montmorillonite is nearly always present, in addition to Fe- (nontronite) and Mg-rich (saponite) species (Fig. 3A). Sauconite may also be significant in Zn-rich systems. Each of these phases have characteristic features in the SWIR (Fig. 3B) which allows for consistent and reliable identification within skarn systems (e.g., Cudahy et al., 2001; de Mesquita et al, 2019).

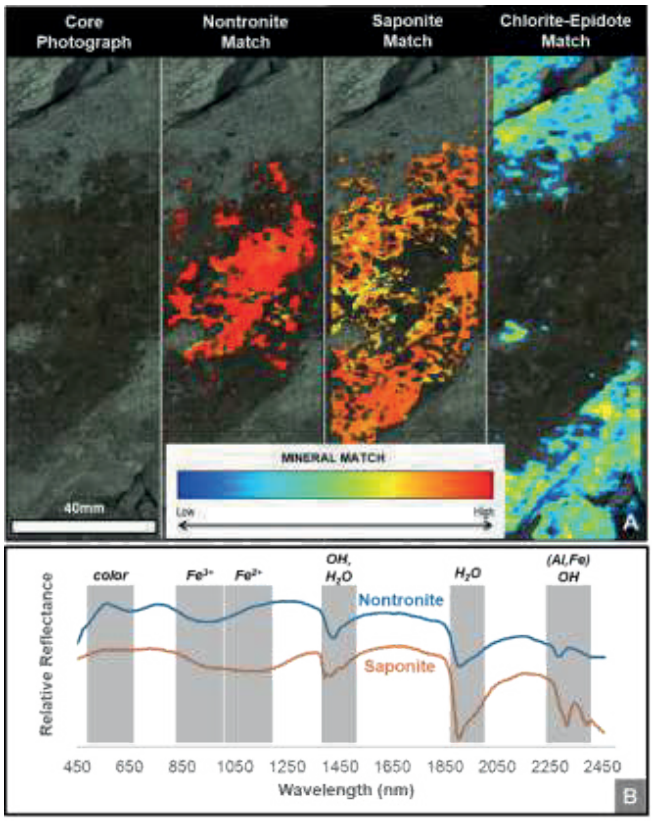


Figure 3. Phylosilicate minerals in skarn (A) with irregular saponite and nontronite textures and pervasive chlorite-epidote alteration (mapped using Corescan HCI-3 system). Representative VNIR-SWIR spectra for saponite and nontronite showing distinct SWIR features that can easily be distinguished from other phyllosilicate and calc-silicate minerals (B).

5. Implications for Geometallurgy

The mineralogical and textural information provided by hyperspectral core imaging can provide significant input into geometallurgical models. Prograde calc-silicate minerals such as garnet, pyroxene, and epidote have higher hardness values than retrograde phases. The abundance, texture and distribution of these minerals within an ore deposit will affect crushing and grinding energy requirements, as well as throughput and residence time in the mill (e.g. Starkey and Scinto, 2010; Hamid et al., 2019). Variations in phyllosilicate mineralogy can affect pulp rheology (Chen and Peng, 2018) and significantly influence flotation kinetics (e.g., Bayraktar et al., 1988, Ndlovu et al., 2014), due to variable compositions, structures, and charge properties of mineral species.

HCI systems provide the opportunity to consistently and continuously map key calc-silicate and phyllosilicate skarn mineralogy while simultaneously capturing textural and paragenetic information (Fig. 4). This combined dataset is critical to assess variability and adequately characterize an orebody in order to make informed geometallurgical sampling and modelling decisions.

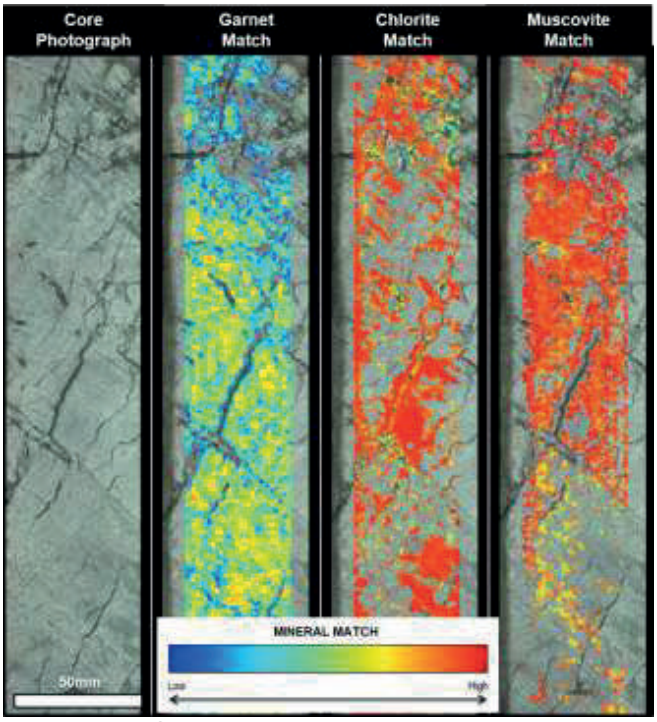


Figure 4. Calc-silicate mineral (garnet) textures relative to phyllosilicate minerals (chlorite and muscovite) in visually homogeneous rock. The ability to distinguish between these phases is attributed to variations in VNIR and SWIR characteristics that can be tracked systematically using hyperspectral imaging.

Acknowledgements

The learnings and ideas presented here represent years of work by the broader spectral community, several of our clients, and the Corescan team. The authors would like to express our thanks to everyone who has contributed to the concepts presented in this abstract.

References

Ahmad Hamid, S., Alfonso, P., Oliva, J., Anticoi, H., Guasch, E., Hoffmann Sampaio, C., Garcia-Vallès, M., Escobet, T., 2019, Modeling the liberation of comminuted scheelite using mineralogical properties. Minerals, v. 9, p.536.

Bayraktar, I., Aslan, A., Ersayin, S., 1998, Effects of primary slime and clay on selectivity of flotation of sub-volcanogenic, complex, polymetallic ores.

Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy, Section C(UK), v. 107, p.71-76.
Chen, X., Peng, Y., 2018, Managing clay minerals in froth flotation—A critical review. Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review, v. 39, p.289-307.
Cudahy, T.J., Wilson, J., Hewson, R., Linton, P., Harris, P., Sears, M., Okada, K., Hackwell, J.A., 2001, Mapping porphyry-skarn alteration at Yerington, Nevada, using airborne hyperspectral VNIR-SWIR-TIR imaging data: International Geoscience and Remote Sensing Symposium, v. 2, p. 631-633.
Einaudi, M.T., 1977, Petrogenesis of the copper-bearing skarn at the Mason Valley Mine, Yerington District, Nevada. Economic Geology, v. 72, p.769-795.
Einaudi, M.T., Meinert, L.D., Meinert, R.J., 1981, Newberry skarn deposit, Economic Geology, p.317-391.
Horgan, B.H.N, Cloutis, E.A., Mann, P., Bell, J.F.III, 2014, Near-infrared spectra of ferrous mineral mixtures and methods for their identification in planetary surface spectra. Icarus, v. 234, p.13-154.
Izawa, M.R.M, Cloutis, E.A., Rhind, T., Mertzmann, S.A., Poitras, J., Applin, D.M., Mann, P., 2018, Spectral reflectance (0.35-2.5um) properties of garnets: Implications for remote sensing detection and characterization, Icarus, v. 300, p.392-410.
Martini, B.A., Harris, A.C., Carey, R., Goodey, N., Honey, F., Tufilli, N., Tschirhart, V., Thomas, M.D., 2017, Automated Hyperspectral Core Imaging–A Revolutionary New Tool for Exploration, Mining and Research: Proceedings of Exploration, v. 17, p. 911-922.
Meinert, L.D., 1992, Skarns and skarn deposits. Geoscience Canada, v 19, n 4, p. 145-162.
Meinert, L.D., 1997, Application of skarn deposit zonation models to mineral exploration. Exploration and Mining Geology, v. 6, p.185-208.
Ndlovu, B., Forbes, E., Farrokhpay, S., Becker, M., Bradshaw, D., Deglon, D., 2014. A preliminary rheological classification of phyllosilicate group minerals, Minerals Engineering, v. 55, p.190-200.
Starkey, J., Scinto, P., 2010, SAG mill grinding design versus geometallurgy-getting it right for competent ores: Proceedings of 25th International Mineral Processing Congress. Brisbane, AusIMM, p. 1265-1271.

PERFORACIÓN DIRECCIONADA, LA PERFORACIÓN DEL FUTURO HOY

Jorge E. Gamarra Urrunaga[1], Noe Vilcas Munive[2] y Peggy Silva Mayser[3]

[1] Gerente de Servicios Técnicos, Explomin del Perú, Lima, Perú (jorge.gamarra@explomin.com)
[2] CEO, Explomin del Perú, Lima, Perú (nvilcas@explomin.com)
[3] Sub Gerente Comercial, Explomin del Perú, Lima, Perú (peggy.silva@explomin.com)

1. Abstract

La técnica de perforación direccionada tiene actualmente más de 100 años de uso. Los avances tecnológicos de las últimas décadas en la perforación direccionada permiten controlar o corregir la trayectoria predeterminada de un pozo hacia uno o varios objetivos subterráneos con un alto nivel de precisión, logrando asombrosas hazañas de ingeniería.

Debido al gran control de la desviación, permite obtener impactos con gran precisión incluso en zonas de hasta más de 1,000m de profundidad, favoreciendo la identificación de objetivos profundos y difíciles de acceder con los métodos tradicionales de perforación.

Explomin introdujo de forma exitosa esta tecnología para adaptarla a las exigencias y necesidades de la industria minera desde el 2013. Logrando excelentes resultados en la exploración y delineación de recursos minerales en Perú y Colombia.

Palabras Clave: Innovación, tecnología, exploración, minería, ingeniería.

DIRECTIONAL DRILLING, THE DRILLING OF THE FUTURE TODAY

Directional drilling techniques have been employed for almost 100 years now. Over the past few decades, technological improvements in directional drilling allowed great control to correct and steer a borehole along a planned trajectory to one or multiple underground targets, with a high level of accuracy, achieving amazing feats of engineering.

This great control of deviation and steering, it allows to obtain impacts with great precision even in zones over 1,000m deep, favoring the identification of deep targets which are difficult to access with traditional drilling methods.

Explomin successfully introduced this technology and adapted it to the demands and needs of the mining industry since 2013. Achieving excellent results in exploration and delineation of mining resources in Peru and Colombia.

Key Words: Innovation, technology, exploration, mining, engineering.

2. Introducción

La perforación direccionada es la ciencia que permite corregir o controlar la perforación de un pozo a lo largo de una trayectoria predeterminada hacia uno o varios objetivos subterráneos o puntos definidos por un desplazamiento horizontal y profundidad vertical real desde el punto de origen.

Estas técnicas forman parte integral de la industria del gas y petróleo desde los años 1920, permitiendo a los operadores mantener la verticalidad de los pozos, construir curvas (cambios en la inclinación o caídas) y mantener las tangentes en una dirección específica.

Las técnicas de la perforación direccionada fueron diseñadas para mejorar la mecánica de la desviación de pozos y así perforar múltiples pozos a partir de una misma ubicación con diferentes ángulos, mejorando los costos de perforación asociados y reduciendo el impacto ambiental.

Gracias a la evolución en la precisión de los métodos de medición de desviación de pozos desde las pruebas de ácido hasta el uso de giroscopios, en gran parte, como consecuencia de la exigencia de la industria y del desarrollo de esta tecnología, permitieron el desarrollo de la ciencia de la perforación direccionada controlada.

3. Perforación direccionada

3.1. Parámetros Clave

El desarrollo tecnológico de los instrumentos de medición de desviación de pozos basados en instrumentos magnéticos y giroscopios de medición simple y múltiple contribuyó también al desarrollo de la perforación direccionada.

Estos métodos de medición de desviación más precisos permitieron: Desviar pozos intencionalmente a ubicaciones precisas en el fondo del pozo; restringir los pozos verticales a unos pocos grados de inclinación, finalmente restringir el desvío natural del pozo.

La perforación direccionada controla o corrige la trayectoria predeterminada de un pozo hacia uno o varios objetivos subterráneos o puntos definidos por un desplazamiento horizontal y profundidad vertical real desde el punto de origen con un rango de precisión de impacto de hasta 1% (Figura 1).

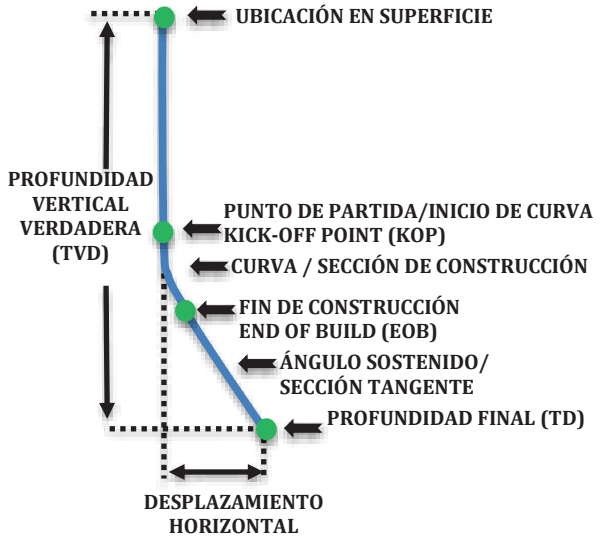


Figura 1: *Parámetros clave en la perforación direccionada.*

3.2. Metodología

3.2.1. Método Antiguo

Los primeros pozos perforados que fueron deliberadamente desviados datan de finales de 1920. Para lograr este objetivo, se usaron cuñas de madera dura con la finalidad de empujar la broca de perforación hacia un lado del pozo, generando el desvío de la trayectoria vertical del pozo hacia una dirección deseada. Posteriormente, estas cuñas evolucionaron de ser de madera a materiales más resistentes (Figura 2, IADC, 2015, Silva, 2019).

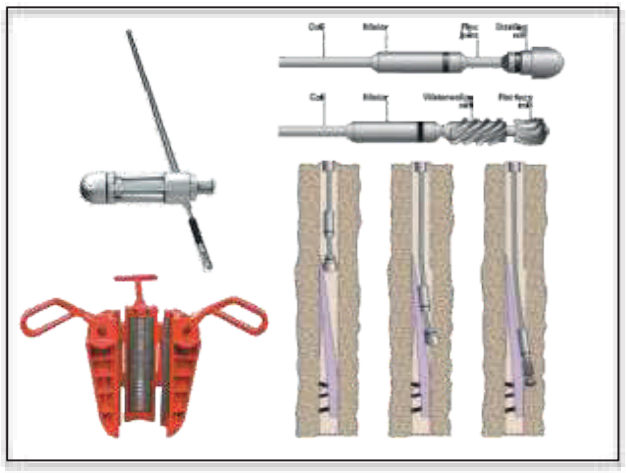


Figura 2: *Cuñas o "wedges"*

3.2.2. Método Moderno

La perforación direccionada usa herramientas de última generación y gran precisión en la medición de la desviación del pozo, las cuales toman registros continuos del pozo cada 10, 20 o 50m dependiendo del grado de precisión deseado. Esta información de los instrumentos de medición es procesada continuamente con el objetivo de seguir el trazo de la línea planeada para el sondaje (IADC, 2015, Silva, 2019).

El método moderno integra un conjunto de instrumentos de perforación que van desde brocas de perforación especializadas con sensores que indican al perforista sobre peso externo, velocidad de rotación que pueden influir en la trayectoria del sondaje. Motores de lodo, próximos a las brocas de perforación, los que, mediante la inyección de lodo de perforación a presión, empujan la broca en un ángulo diferente a la trayectoria del eje del sondaje, haciendo rotar la broca, únicamente con la presión del fluido. Una vez que los sensores identifican que la broca está apuntando en la dirección correcta, toda la línea de perforación empieza a girar en la dirección hacia donde apunta la broca.

Adicionalmente, la perforación direccionada usa sistemas de rotación direccionables, los cuales permiten perforar y direccional el sondaje al mismo tiempo, permitiendo el ingreso a zonas consideradas anteriormente inaccesibles.

El método moderno incluye dos tecnologías, las que se diferencian en la recuperación de testigo en

la zona de curva o sección de construcción del sondaje (Figura 1).

La primera tecnología, sin recuperación de testigo en curva, emplea una broca ciega que destruye la muestra en la zona de curva o sección de construcción del sondaje; y la segunda tecnología, con una broca especializada, permite la recuperación de testigo en curva en un diámetro AQ (Figura 3, DEVICO, 2020, IADC, 2015, Silva, 2019).

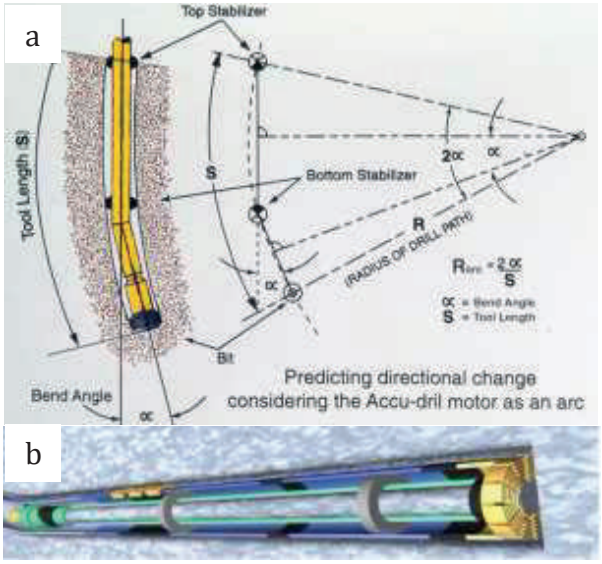


Figura 3: *a) Tecnología sin recuperación de testigo en curva, b) Tecnología con recuperación de muestra en curva.*

4. Áreas de Aplicación

4.1. Exploración Geológica y Minera

4.1.1. Zonas de Geología Compleja

La perforación direccionada permite gran precisión en zonas con alto riesgo de desviación. El gran control del direccionamiento del sondaje, permite ir corrigiendo la desviación para mantener el sondaje dentro de la traza planeada, favoreciendo la identificación de objetivos profundos con gran precisión.

4.1.2. Perforación Controlada

La gran precisión en el control de desviación del sondaje permite la identificación de formaciones geológicas clave, así como fallas, vetas y cuerpos mineralizados. Así mismo, permite direccionar la perforación a fin de evitar estructuras que se quieran evitar durante la planifación del sondaje.

4.1.3. Pozos múltiples

La posibilidad de realizar un pozo madre con ramificaciones permite la perforación de objetivos profundos con impactos múltiples de gran precisión. Logrando que los programas de recategorización de recursos en mallas tipo *infill* tengan una gran precisión, incluso en objetivos muy profundos (>1,000m).

4.1.4. Objetivos múltiples

La perforación direccionada permite identificar objetivos múltiples con gran precisión a partir de un pozo madre. Incluso en objetivos de gran profundidad (>1,000m).

4.1.5. Zonas de difícil acceso superficial

La perforación direccionada permite realizar perforaciones múltiples a partir de una misma ubicación, evitando así invadir zonas próximas a lagos, ríos, áreas ecológicas sensibles y zonas de operación minera como tajos u otro tipo de laboreo minero.

4.2. Otras áreas

4.2.1. Geotecnia

La perforación direccionada permite realizar perforaciones para chimeneas y túneles asegurando la verticalidad y horizontalidad de los sondajes respectivamente.

4.2.2. Geotermia e Hidrogeología

La perforación direccionada permite realizar perforaciones precisas para la identificación de formaciones clave (acuíferos).

4.2.3. Petróleo y Gas

La perforación direccionada permite realizar perforaciones para identificar formaciones madre, realizando sondajes direccionados de modo que una mayor sección de la formación productora de hidrocarburos quede expuesta al pozo.

5. Ventajas de la Perforación Direccionada

Son múltiples los beneficios que brinda la perforación direccionada, tanto económicos como operativos, entre los cuales se puede citar:

- Ahorro en tiempo y costos indirectos: Este método de perforación reduce la cantidad de estaciones de perforación para habilitar, ya que permite la ejecución de pozos múltiples a partir de una sola estación.

- Reducción de metraje en zonas estériles: El método de perforación con un pozo madre con ramificaciones, permite reducir el metraje de testigos en zonas estériles, dando un mayor enfoque a las zonas de interés, logrando optimizar los programas de perforación.
- Perforación de objetivos profundos con gran precisión: Debido al gran control de la desviación, permite obtener impactos con gran precisión incluso en mallas reducidas tipo *infill* en zonas de hasta más de 1,000m de profundidad.
- Gran control de la desviación natural: La tecnología de la perforación direccionada permite eliminar la desviación natural de la perforación, controlándola y corrigiéndola permitiendo que el eje del sondaje se mantenga dentro de la trayectoria planificada.
- Recuperación continua de testigos: Incluso en la zona de curva, la tecnología de perforación direccionada permite la recuperación de testigos.
- Mitigación del impacto ambiental: La reducción significativa de las estaciones de perforación, permite un menor impacto al medio ambiente.

6. Casos de Éxito

6.1. Buritica, Continental Gold, Colombia

La perforación direccionada permitió la exploración exitosa de vetas con mineralización en profundidad con sondajes de 600 a 1,200m de longitud y más de 1,000m de profundidad vertical.

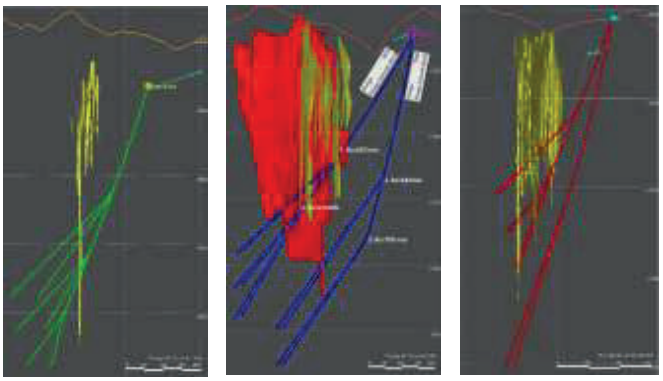


Figura 4: *Secciones transversales en Buritica.*

6.2. Antamina, Perú

La perforación direccionada permitió la exploración exitosa de la continuidad de cuerpos mineralizados por debajo del pit en operación, con sondajes de 800 a 2,000m de longitud.

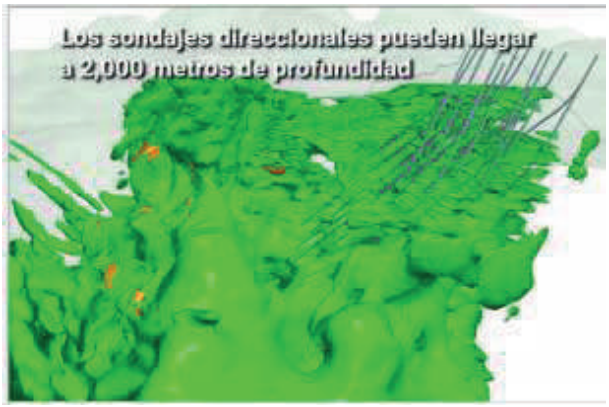


Figura 5: *Modelo 3D de los cuerpos mineralizados con la traza de sondajes direccionados.*

6.3. Quenamari, MINSUR, Perú

La perforación direccionada permitió la exploración exitosa de la continuidad de vetas con mineralización profunda con gran precisión. El programa incluyó sondajes con longitudes entre 600 a 1,200m en mallas tipo infill para recategorización de recursos con una precisión de +/-5m en pozos de >1,000m de longitud.

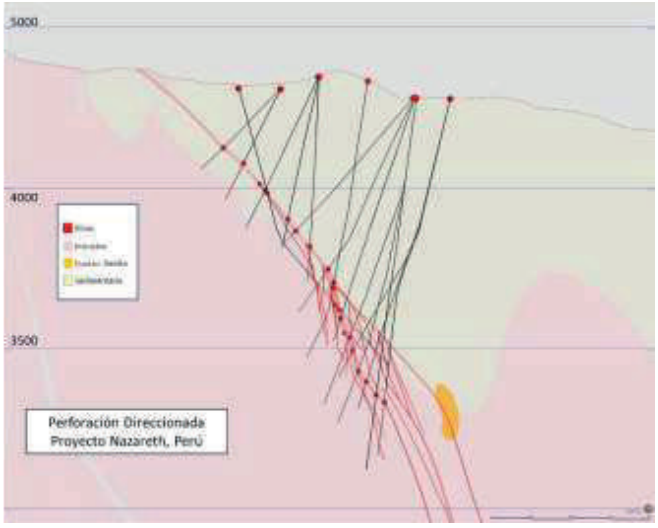


Figura 6: *Sección transversal Veta Nazareth, con impactos de sondajes direccionados.*

6.4. Segovia, Gran Colombia, Colombia

La perforación direccionada permitió la exploración exitosa de la continuidad de vetas con mineralización profunda con gran precisión. El programa incluyó sondajes con longitudes entre 900 a 1,200m en mallas tipo *infill* para recategorización de recursos con una precisión de +/-5m en pozos de >1,000m de longitud.

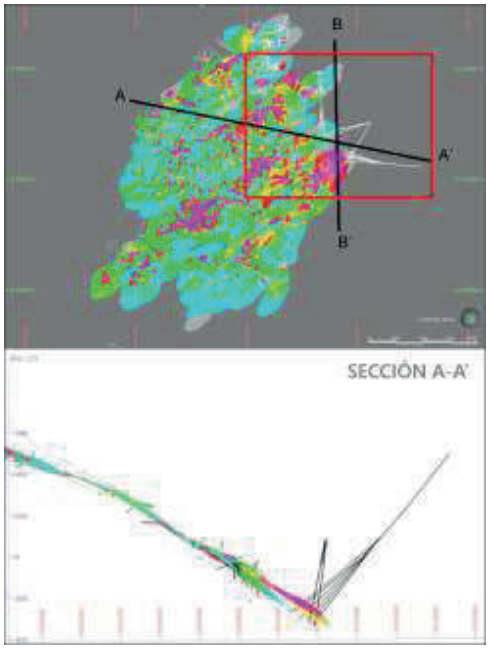


Figura 6: *Vista en Planta y Sección transversal de la veta El Silencio con las trazas de los sondajes direccionados.*

7. Conclusiones

La perforación direccionada es un método moderno con un gran control sobre la desviación del sondaje que hace posible que se tenga una alta precisión en la dirección planeada de los sondajes e impactos programados.

La perforación direccionada es el método idóneo para la perforación de objetivos profundos donde se requiere un alto nivel de precisión en los impactos, frecuentemente en programas de perforación tipo infill para recategorización de recursos.

La perforación direccionada representa un gran ahorro en tiempo y costos indirectos, ya que permite ejecutar diversos pozos ramificados a partir de un pozo madre. Reduciendo significativamente la cantidad de estaciones de perforación y optimiza el metraje de testigo recuperado en zonas de mayor interés.

El hecho de perforar pozos múltiples a partir de una misma estación y con el uso de una sola máquina de perforación, minimiza también el impacto ambiental.

Agradecimientos

Los autores del presente artículo brindan un especial agradecimiento a nuestros valiosos clientes quienes amablemente autorizaron la publicación de las imágenes de secciones geológicas y modelos mostrados en el presente artículo. Así mismo, hacemos presente nuestro agradecimiento por compartir sus testimonios sobre la gran experiencia con la perforación direccionada en cada uno de sus proyectos. Nuestro agradecimiento a Miroslav Kalinaj, Gerente Corporativo de Exploraciones MINSUR y Luis Carlos Castaño, Superintendente de Exploración Gran Colombia Gold.

Referencias

DEVICO, 2020. Directional Core Drilling, coring while steering. https://www.devico.com/downloads-2/brochures/.

IADC, 2015. Drilling Manual, 12th ed. ISBN: 978-8-9915095-0-8

Silva, Peggy, 2019. Perforación del Futuro, Hoy. Reporte Interno, v. 01, p. 001-039.

Unraveling the evolution of southernmost Peru between 100 and 50 Ma through U-Pb geochronology of the Toquepala Group: Implications for exploration of large porphyry copper deposits

Thierry P.A. Sempere[1], Jean-Louis Paquette[2], William Martínez[3], Alonso A. Marchena[3], & Jorge Acosta[3]

[1] Gerencia Regional de Exploraciones, ANDES C&P, Lima, Perú (thierrysempere@icloud.com)
[2] Université Clermont Auvergne, CNRS, Laboratoire Magmas et Volcans, 63178 Aubière, Francia
[3] Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET), Lima, Perú

1. Abstract / *Resumen*

Integration of the zircon U-Pb ages available on the Toquepala Group, La Caldera batholith (*s.l.*), and porphyry Cu systems, in combination with geochemical data, unravels the evolution of the magmatic arc of southernmost Peru during the Late Cretaceous and Early Paleogene. Arc magmatic production increased starting ~90 Ma, and culminated between ~74 and ~62 Ma through a flare-up characterized by large plutonic and volcanic (especially ignimbritic) volumes. This long process resulted in the thickening of the arc crust, to a state of overthickening that triggered its extensional collapse, starting diachronously 61–59 Ma, during which giant porphyry Cu systems were emplaced between ~60 and ~53 Ma. Our empirical reconstruction of this protracted evolution provides simple guides for exploration of giant porphyry Cu deposits in southern Peru, as well as a magmato-tectonic theoretical framework.

Aclarando la evolución del extremo sur del Perú entre 100 y 50 Ma mediante la geocronología U-Pb del Grupo Toquepala: Implicancias para la exploración por grandes pórfidos de cobre.

*La integración de las edades U-Pb en zircones disponibles sobre el Grupo Toquepala, batolito de La Caldera (s.l.), y pórfidos de cobre permite aclarar la evolución magmática del arco sur-peruano durante el Cretácico superior y Paleógeno inferior, en combinación con datos geoquímicos. A partir de ~90 Ma la actividad magmática fue creciendo y culminó entre ~74 y 62 Ma por una llamarada (*flare-up*) caracterizada por importantes volúmenes tanto plutónicos como volcánicos (y especialmente ignimbríticos). Este largo proceso resultó en el engrosamiento de la corteza del arco, a tal punto que ésta terminó por sufrir un colapso extensional a partir de 61–59 Ma, durante el cual se emplazaron sistemas porfídicos, incluyendo pórfidos gigantes de cobre, entre ~60 y ~53 Ma. Nuestra reconstrucción empírica de esta evolución proporciona una guía simple para la exploración minera, además de un marco teórico de índole magmato-tectónica.*

2. Introduction

World-class porphyry copper deposits in southernmost Peru (Cuajone, Quellaveco, Toquepala; = CQT hereafter) are related to porphyry intrusions emplaced in a thick succession of volcanic and volcanodetritic strata, referred to as the Toquepala Group (Concha & Valle, 1999; Mattos & Valle, 1999; Martínez & Cervantes, 2003; Acosta, 2006; Martínez et al., 2017). In contrast with the copper deposits, relatively little is known about the geochronology of the Toquepala Group, and this work attempts to fill this gap. Here we outline a chronology based on zircon U-Pb ages that illuminates the magmatic evolution of southernmost Peru and shows that the porphyry copper deposits were emplaced during the final stage of this evolution, a finding that has crucial implications for mining exploration.

We use hereafter '*zUPb*' as an abbreviation for the locution 'zircon U-Pb'.

3. Stratigraphy of the Toquepala Group

The >2 km-thick Toquepala Group is known south of 16.4°S and east of 71.5°W. It generally overlies sedimentary strata of Jurassic to Early Cretaceous age, and is overlain by the forearc sedimentary deposits of the Moquegua Group, the base of which is, at least locally, older than 45 Ma.

Martínez & Zuloaga (2000) updated the stratigraphy of the Toquepala Group in the Moquegua area and divided it into 4 formations, namely the Huaracane, Inogoya, Paralaque and Quellaveco formations (from base to top). Zircon U-Pb dating of 3 of these units (Simmons, 2013; Fig. 1) however resulted in discrepancies with this stratigraphy, suggesting that the units may have been misidentified, at least in part, during sampling. For instance, samples reportedly from the oldest Huaracane Formation yielded the oldest and *youngest* ages in Simmons' (2013) *zUPb* age dataset: 90.3 ± 0.8 and 68.3 ± 0.7 Ma, respectively. Only one sample assigned to the Paralaque Formation was dated, to 71.4 ± 0.7 Ma, but this age falls in the range of ages obtained by Simmons (2013) reportedly from the Quellaveco Formation; these ages allow to define 4 major eruptions, at 73.8 ± 0.8 Ma (n=1), 72.9 ± 0.6 Ma (n=2), 71.3 ± 0.3 Ma (n=5), and 69.8 ± 0.3 Ma (n=4).

Given these discrepancies, we do not refer hereafter to the stratigraphy and focus instead on absolute *zUPb* ages (Fig. 2).

Figure 1. Location of the *zUPb* ages obtained on the Toquepala Group and related units. Circles indicate dated ignimbrites; curved arrows indicate ages on detrital zircons. Red symbols plot ages obtained by Paquette & Sempere (unpublished). The other ages (mainly by Simmons, 2013) are referenced in the figure.

3. Late Cretaceous – Early Paleogene zircon U-Pb age spectrum

The oldest *zUPb* age obtained so far on the Toquepala Group is from a laminated ignimbrite intercalated in andesite flows ~34 km NE of Ilo, which yielded a late Cenomanian age (~94.1 Ma; Paquette & Sempere, unpublished). This ignimbrite occurs ~1 km above the base of a very thick volcanic succession mapped as the Toquepala Group, which overlies volcano-sedimentary strata that yielded Callovian ammonites (Bellido & Guevara, 1963). The youngest age, ~63.4 Ma (Danian), is from a deformed ignimbrite sampled ~34 km NNE of the city of Tacna (Paquette & Sempere, unpublished).

Figure 2 displays most of the available *zUPb* ages concerning southernmost Peru: porphyry and plutonic rocks from the CQT deposits and area, and ignimbrites from the Toquepala Group (Fig. 1). A

clear continuity of *zUPb* ages is observed between the main ignimbrite field, the dated plutons in the CQT area, and the CQT porphyry systems, as well as the known range of *zUPb* ages obtained on the La Caldera batholith (*sensu lato*, *i.e.* from the Arequipa region to the border with Chile; Mukasa, 1986; Demouy et al., 2012; Noury, 2014; Paquette & Sempere, unpublished). In addition, porphyry Cu systems in the Arequipa area (where the Toquepala Group is unknown; Núñez et al., 2000) intrude the La Caldera batholith (and, tangentially, the Precambrian basement) but have only slightly older ages (~60-59 Ma; Mukasa, 1986).

The continuous age distribution observed in Fig. 2 indicates that porphyry emplacements in the late Paleocene and earliest Eocene occured near the end of one single protracted evolution that had started in the mid-Cretaceous or even earlier.

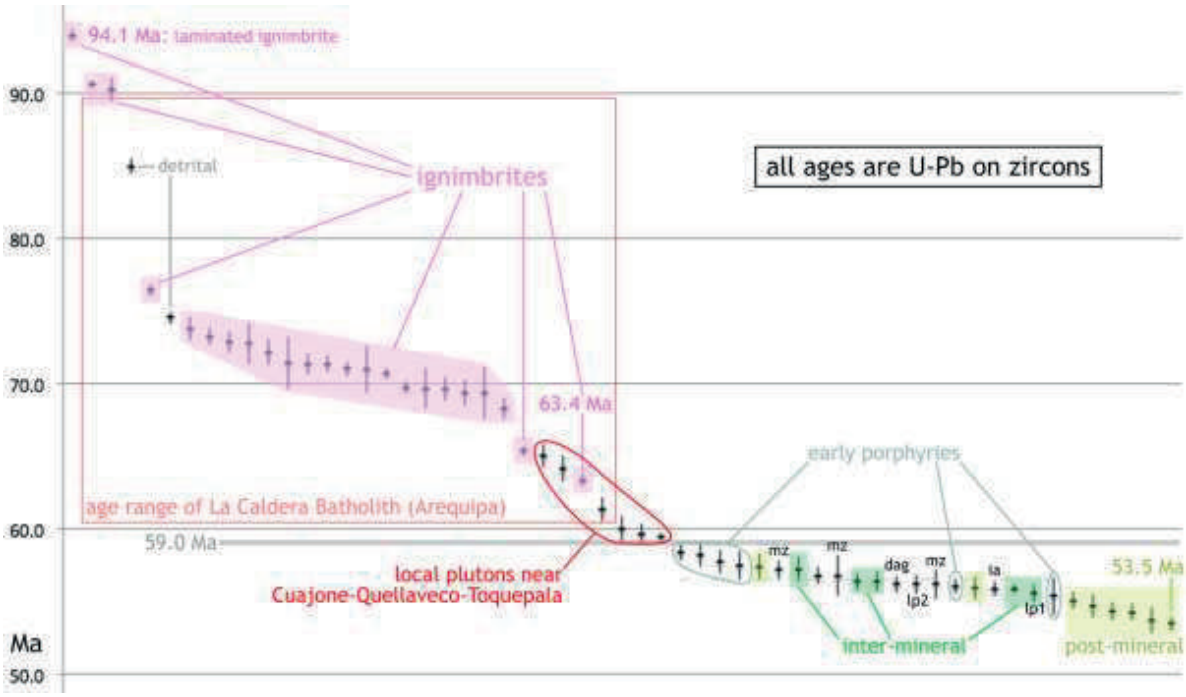


Figure 2. Spectrum of *zUPb* ages relative to the area shown in Figure 1, evidencing the time continuity between the overall evolution of the magmatic arc and the giant porphyry systems. Most age data are derived from Sillitoe & Mortensen (2010), Simmons (2013), Simmons et al. (2013), and Paquette & Sempere (unpublished). The *zUPb* age range of the La Caldera batholith in the Arequipa region is also shown (Mukasa, 1986; Demouy et al., 2012).

4. Magmatic (over)thickening of the arc crust

The La Caldera arc was established at ~90 Ma along what is now the homonymous horst, and underwent a magmatic growth reflected by increasingly voluminous plutonic masses (Demouy et al., 2012). This growth culminated between ~74 and 62 Ma by a magmatic flare-up involving very large plutonic and volcanic volumes, with thick ignimbrites erupted every 1–2 Myr (Fig. 2; Simmons, 2013; Noury, 2014; this work).

The available geochemical data strongly suggest that this growth resulted in an anomalous thickening of the arc crust (Martínez et al., 2017, 2018; Marchena, 2019; Marchena et al., 2019): the "precursor" plutons shortly predating the porphyry systems (Fig. 2) display indeed high Sr/Y ratios reflecting that the coeval crust was overthickened at that time. This signature commonly results from high Sr implying the inhibition of plagioclase crystallization by high lithostatic pressure at depths >50 km, and/or from low Y reflecting that the lower crust included stable garnet and was thus anomalously thick.

5. Extensional collapse and coeval emplacement of porphyry systems

Confirming a now classical concept, the overthickened arc crust ended up undergoing a major extensional collapse, which resulted in the uplift and exhumation of specific areas. The *zUPb* dataset reveals that the collapse was initiated diachronously between 61 Ma (Arequipa longitude) and 59 Ma (Quellaveco longitude). In agreement, nearly all faults observed in the area of interest are normal, and the most important have km-size offsets that define large blocks. In particular, the La

Caldera horst was structured and exhumed during the collapse. Thermochronological ages in the area (Noury, 2014; Noury et al., 2017) are compatible with a collapse-driven exhumation and cooling during the ~60-55 Ma interval. Hydrothermal muscovite crystallized in a normal fault zone 40 km NNE of Tacna yielded an ^{40}Ar-^{39}Ar age of 61.4 ± 0.3 Ma (Sempere et al., 2018).

Because the porphyry systems that host the giant Cu deposits of southernmost Peru yielded *zUPb* ages between ~60 and ~53 Ma (Mukasa, 1986; Sillitoe & Mortensen, 2010; Simmons et al., 2013; Fig. 2), our work implies that they were emplaced during the extensional collapse.

6. Conclusions

The world-class porphyry Cu systems of southern Peru were emplaced during a short (<7 Myr) time span that coincided with the extensional collapse of the previously overthickened arc crust.

This empirical finding provides a simple guide for exploration, and also suggests a theoretical framework that stresses the importance of tectonic phenomena driven by arc magmatism.

Acknowledgments

We warmly thank for their collaboration many colleagues and students too numerous to be cited here. Our study includes *zUPb* ages obtained at the Université Clermont Auvergne, France (Paquette & Sempere, unpublished), which will be published at a later stage of this research.

References

Acosta, J. 2006. Características metalogenéticas de los yacimientos asociados a los arcos magmáticos mesozoicos y cenozoicos del sur del Perú (latitudes 16°00'S-18°30'S). INGEMMET, 32 p.

Bellido, E., Guevara, C. 1963. Geología de los cuadrángulos de Punta de Bombón y Clemesí. Boletín de la Carta Geológica Nacional, v. 5, 102 p.

Concha, O., Valle, J. 1999. Prospección, exploración y desarrollo del yacimiento de Cuajone. ProExplo 1999, p. 117–143.

Demouy, S., Paquette, J.-L., Saint-Blanquat, M. de, Benoit, M., Belousova, E.A., O'Reilly, S.Y., García, F., Tejada, L.C., Gallegos, R., Sempere, T. 2012. Spatial and temporal evolution of Liassic to Paleocene arc activity in southern Peru unraveled by zircon U–Pb and Hf in-situ data on plutonic rocks. Lithos, v. 155, p. 183–200.

Marchena, A. 2019. Caracterización petrográfica e interpretación litogeoquímica del magmatismo de los proyectos Tía María–La Tapada, Los Calatos y Chipispaya (Arequipa-Moquegua-Tacna). Tesis de grado, Universidad Nacional de Ingeniería, 279 p.

Marchena, A., Martínez, W., Otero, J. 2019. Trazadores litogeoquímicos de fertilidad del magmatismo vinculado a pórfidos de Cu (-Mo, -Au) en el sur del Perú, del Jurásico al Mioceno. ProExplo 2019, 4 p.

Martínez, W., Zuloaga, A. 2000. Memoria explicativa de la geología del cuadrángulo de Moquegua. INGEMMET, Boletines, serie A, 12 p.

Martínez, W., Cervantes, J. 2003. Rocas ígneas en el sur del Perú: Nuevos datos geocronométricos, geoquímicos y estructurales entre los paralelos 16° y 18°30′S. INGEMMET, Boletines, serie D, v. 26, 140 p.

Martínez, W., Marchena, A., Otero, J., Cervantes, J., León, W. 2017. Geología y controles tectono-magmáticos de los sistemas porfiríticos en el arco magmático occidental del Sur del Perú. INGEMMET, Boletines, serie D, 112 p.

Martínez, W., Marchena, A., Otero, J., Cervantes, J. 2018. Tectonomagmatismo y fertilidad de los depósitos porfiríticos del Jurásico al Neógeno, sur de Perú. XIX Congreso Peruano de Geología, Lima, 4 p.

Mattos, R., Valle, J. 1999. Exploración, geología y desarrollo del yacimiento Toquepala. ProExplo 1999, p. 101–116.

Mukasa, S.B. 1986. Zircon U-Pb ages of super-units in the Coastal Batholith, Peru: Implications for magmatic and tectonic processes. Geological Society of America Bulletin, v. 97, p. 241–254.

Noury, M. 2014. Evolution géologique de l'avant-arc sud-péruvien : apports des données géo-thermo-chronologiques. PhD dissertation, Université de Grenoble, 341 p.

Noury, M., Philippon, M., Bernet, M., Paquette, J.-L., Sempere, T. 2017. Geological record of flat slab–induced extension in the southern Peruvian forearc. Geology, doi:10.1130/G38990.1 .

Núñez, F., Mollepaza, S., Salas, P. 2000. Características metalogenéticas del depósito porfirítico Cerro Verde. X Congreso Peruano de Geología, Lima, p. 1217–1230.

Sempere, T.P.A., Fornari, M., Acosta, J., Pino, A., Flores, A., Jacay, J., Bedoya, C. 2018. Nuevas edades ^{40}Ar-^{39}Ar y K-Ar en el sur del Perú. XIX Congreso Peruano de Geología, Lima, 4 p.

Sillitoe, R.H., Mortensen, J.K. 2010. Longevity of porphyry copper formation at Quellaveco, Peru. Economic Geology, v. 105, p. 1157–1162.

Simmons, A.T. 2013. Magmatic and hydrothermal stratigraphy of Paleocene and Eocene porphyry Cu-Mo deposits in southern Peru. PhD dissertation, The University of British Columbia at Vancouver, 346 p.

Simmons, A.T., Tosdal, R.M., Wooden, J.L., Mattos, R., Concha, O., McCracken, S., Beale, T. 2013. Punctuated magmatism associated with porphyry Cu-Mo formation in the Paleocene to Eocene of southern Peru. Economic Geology, v. 108, p. 625–639.

Caracterización de alteración sericita-clorita en el proyecto de Cu-Au-Ag Antakori, norte del Perú.

David G. Portocarrero[1], Kevin B. Heather, Cari L. Deyell-Wurst

[1] Regulus Resources Inc., Av. Jorge Chávez No. 184, Oficina No. 1001, Lima, Perú (David.portocarrero@regulusresources.com)

1. Resumen

El proyecto Antakori está ubicado a 50 km al noroeste de la ciudad de Cajamarca y es parte de los depósitos de Cu-Au-Ag del Mioceno del norte del Perú. Se reconoce macroscópicamente una alteración de color gris verdosa asociada a fuerte mineralización Cu-Au en las partes profundas al norte y noreste del área de perforación, afectando a pórfidos de feldespato-hornblenda-biotita y brechas hidrotermales-freatomagmáticas. Estudios petrográficos, junto con análisis hiperespectrales, muestran un ensamble de alteración compuesto por mica blanca de composición muscovítica-fengítica junto con clorita, cuarzo, anhidrita y depositación asociada con óxidos de hierro hipógenos y subsecuente pirita-calcopirita-bornita, mostrando características transicionales entre la alteración potásica y fílica. Las relaciones temporales registradas indican que esta alteración no guarda relación genética con los sistemas skarn, pórfido y epitermales reconocidos anteriormente en el proyecto, sugiriendo la manifestación de un segundo sistema tipo pórfido y constituyendo un vector de exploración.

Abstract

The Antakori project is located 50 km northwest of the city of Cajamarca and is part of the Miocene cluster of Cu-Au-Ag deposits of northern Peru. A dark to pale green alteration associated with strong Cu-Au mineralization is recognized at depth in the central and northeast areas of the project and affects both feldspar-hornblende-biotite porphyries and hydrothermal-phreatomagmatic breccias. Petrographic studies, together with short-wave infrared hyperspectral core imaging technology show an alteration assemblage of texturally destructive muscovitic to phengitic white mica, chlorite, quartz, anhydrite and associated deposition of hypogene iron oxides and latter pyrite-chalcopyrite-bornite, showing transitional features between potassic and phyllic alteration assemblages. Furthermore, crosscutting relations reveal that this alteration doesn't have genetic link with the skarn, porphyry and epithermal systems recognized before in the project, suggesting a reactivation of the hydrothermal system at Antakori that can be used as a vector for exploration.

2. Introducción

El proyecto Antakori está ubicado a 50 km al noroeste de la ciudad de Cajamarca y es parte de los depósitos de Cu-Au-Ag del Mioceno del norte del Perú, contando con recursos de 250 Mt con 0.48% Cu, 0.29 g/t Au y 7.5 g/t Ag en la categoría de indicados, y 267 Mt con 0.41% Cu, 0.41 g/t Au y 7.8 g/t Ag en la categoría de inferidos, aplicando un cut-off de 0.3% Cu (Eggleston et al., 2019).

La geología del proyecto consiste del basamento cretácico de cuarcitas, arcosas, lutitas calcáreas y calizas de las Formaciones Farrat, Inca y Chúlec, que son intruidas por diversos diques y stocks porfiríticos de feldespato-hornblenda-cuarzo formando halos termales y alteración metasomática tipo skarn. El skarn generado comprende una fase prograda de granates rojos y verdes, piroxenos y vesuvianita, seguido de una fase retrógrada intensa de epidota y clorita asociada a mineralización de Cu-Au-Ag-(Zn) en forma de cuerpos de reemplazamiento masivos de magnetita-calcopirita-pirita. La secuencia cretácica está cortada por numerosos diques porfiríticos de feldespato-hornblenda-biotita

y cuerpos de brechas hidrotermales y freato-magmáticas que se sobreimponen al skarn formado previamente. Los diques contienen mineralización débil de Cu-Au-Ag-(Mo) en forma de diseminaciones de pirita-calcopirita-(bornita) y vetillas tipo B y D (Gustafson & Hunt, 1975), con extenso desarrollo de alteración fílica, dejando solo relictos de alteración propilítica y potásica temprana. A su vez, tanto los diques y brechas son afectados por tres eventos hidrotermales: (1) venillas de anhidrita-especularita-(magnetita) con la introducción de molibdeno asociada, (2) mineralización de calcopirita-bornita en forma de cemento de brechas y venillas de cuarzo, y (3) alteración sericita-clorita y mineralización calcopirita-pirita en forma de venillas tipo C (Gustafson & Quiroga, 1995); siendo los tres eventos de tipo pórfido, pero con intrusivos asociados aún desconocidos.

Las secuencias sedimentarias cretácicas son sobreyacidas en forma discordante por rocas volcánicas piroclásticas miocénicas del Grupo Calipuy, y son subsecuentemente intruidas por diversos cuerpos subvolcánicos de feldespato-hornblenda-cuarzo, generando la intensa alteración argílica avanzada de pirofilita-alunita-kaolinita y mineralización de Cu-Au-Ag de tipo epitermal de alta sulfuración asociada a estructuras subverticales de enargita-pirita masiva. Diques hipabisales riolíticos y domos de flujo locales cortan las secuencias volcano-sedimentarias del Calipuy, y presentan mineralización de Au-Ag-Zn-Pb-Cu de tipo epitermal de intermedia sulfuración “Base Metal Carbonate” en forma de vetas con alteración sericítica asociada. Una serie de diques de feldespato-biotita-cuarzo post-minerales cortan toda la geología descrita, representando el último evento geológico del sistema Antakori.

3. Alteración sericita-clorita

La alteración sericita-clorita en el proyecto Antakori está afectando a pórfidos de feldespato-hornblenda-biotita y brechas hidrotermales en forma pervasiva, reemplazamiento selectivo, halos de vetillas, como inyecciones en la roca caja y cemento de brechas. Estudios petrográficos e hiperespectrales de las muestras de brechas y pórfidos revelan un ensamble de alteración de mica blanca (sericita), clorita y cuarzo como minerales principales, con cantidades variables de anhidrita y ocurrencias raras de turmalina en trazas.

La mineralización se presenta en forma diseminada, venillas y cemento de brechas. La cantidad y tipo de sulfuros depositados varían en cada sondaje, reconociéndose dominios de especularita-magnetita, especularita-calcopirita, calcopirita-pirita y pirita.

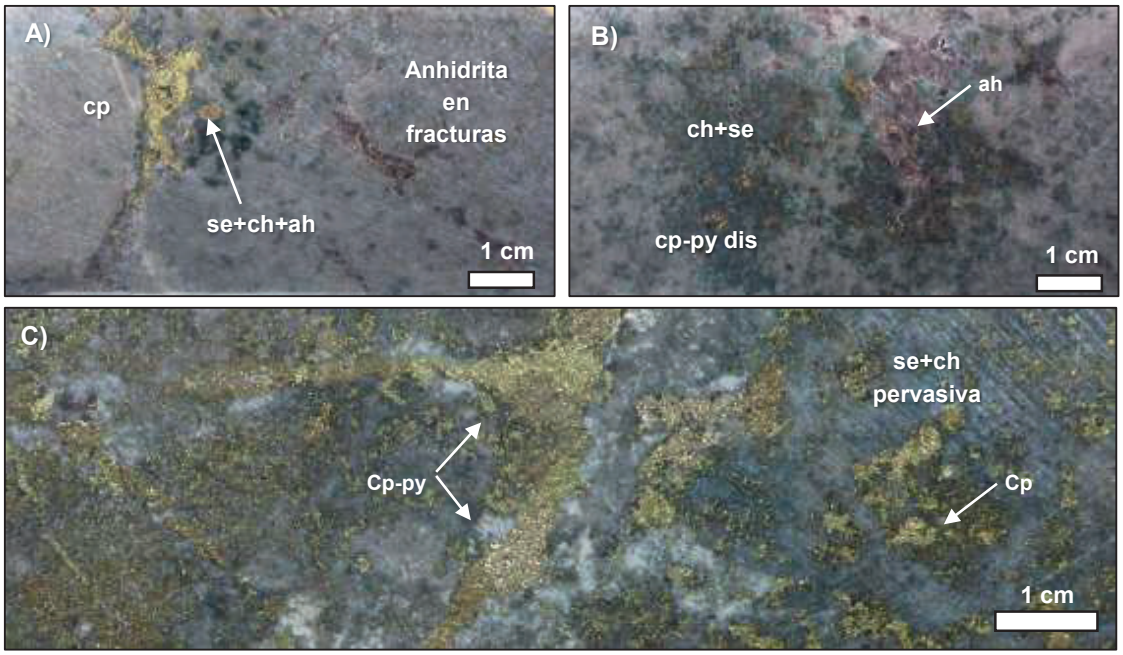


Figura 1. Alteración sericita-clorita pervasiva en pórfidos de feldespato-hornblenda-biotita (A y B) y brecha hidrotermal (C) con mineralización en forma de diseminaciones y cúmulos de calcopirita-pirita.

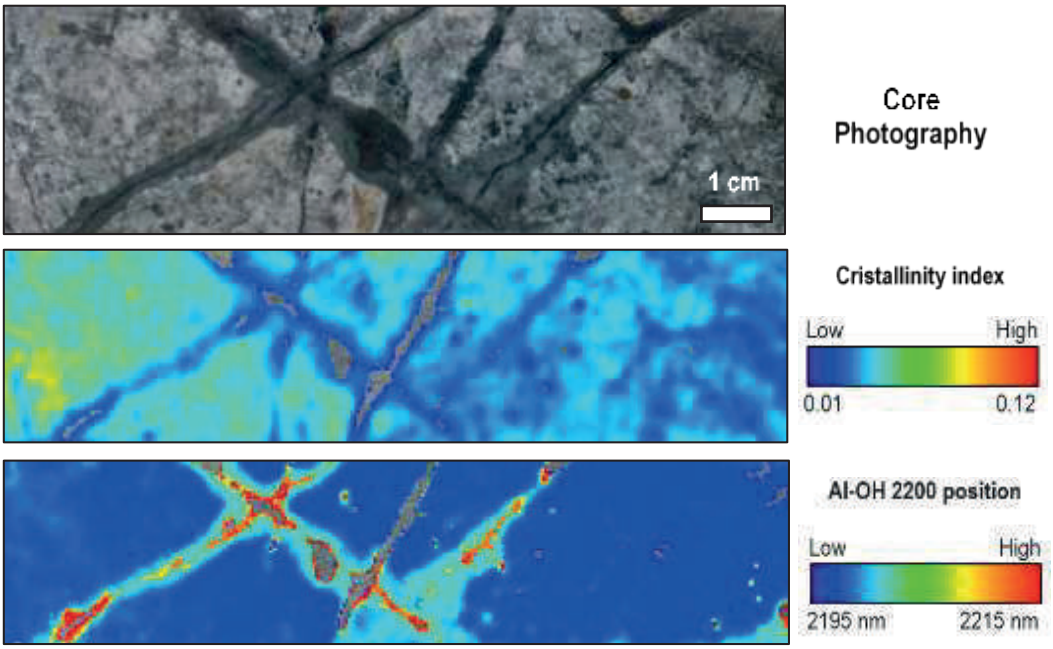


Figura 2. Fotografía de testigo de perforación y mapas mineralógicos (500 µm resolución espacial, 3.5 nm resolución espectral) producidos por el espectrómetro HCI-3 de Corescan. Muestra de pórfido de feldespato-hornblenda-biotita con venilla de calcopirita-anhidrita y halo de alteración sericita-clorita cortando alteración fílica anterior. Notar las diferencias en índices de cristalinidad (profundidad/área del rasgo Al-OH) y la posición de absorción de las longitudes de onda del Al-OH en ambos estilos de alteración.

Según estudios petrográficos, existe una secuencia paragenética clara con una primera fase de óxidos hipógenos de hierro (magnetita y hematita), seguida por una fase de sulfuros con pirita y posteriormente, calcopirita y bornita en trazas formando texturas de intercrecimiento, y finalmente una última fase con sulfuros y sulfosales de cobre hipógenos de alta sulfuración (bornita, covelita, calcocina, enargita y tenantita).

4. Geoquímica de mica blanca

El análisis de composición de mica blanca usando el rasgo de absorción de Al-OH en la longitud de onda 2200 nm muestra una mica blanca de composición muscovítica con rasgo de absorción de Al-OH entre 2200–2207 nm en su mayoría, con una tendencia a composición más fengítica (aumento de Fe) cuando está asociado a clorita, llegando a tener rasgos de absorción de Al-OH entre 2209–2214 nm. La cristalinidad de la mica blanca se calcula usando la relación profundidad/área del rasgo de absorción Al-OH en la longitud de onda 2200 nm, y constituye el rasgo más distintivo de esta alteración con valores entre 0.01–0.03 que contrastan con otros eventos de alteración presentes en la roca caja.

5. Interpretación

La mica blanca de composición fengítica se forma por reemplazamiento de silicatos en condiciones de pH más altas que la muscovita (Cohen, 2011; Halley 2012) y está asociada a la introducción de Cu, mientras que la mica blanca de composición muscovítica está más relacionada a alteración fílica y reemplazamiento de calcopirita por pirita (Benavides et al., 2019). La mica blanca de la alteración sericita-clorita en Antakori presenta características transicionales entre estos patrones, sin embargo, constituye un evento mineralizante con introducción de Cu, diferenciándose de la alteración fílica muscovítica típica.

Las relaciones de corte registradas en el proyecto indican que la alteración sericita-clorita no guarda relación genética directa con el sistema skarn, eventos relacionados a los pórfidos de feldespato-hornblenda-biotita y los sistemas epitermales de alta e intermedia sulfuración, sin embargo, si comparte relaciones temporales cercanas con otros dos eventos magmático-hidrotermales: (1) venillas de anhidrita-especularita-(magnetita) y (2) mineralización de calcopirita-bornita siendo los tres eventos posteriores a las brechas hidrotermales y anteriores al sistema epitermal de alta sulfuración. La ocurrencia de anhidrita en depósitos tipo pórfido

es común y está relacionada principalmente a la fase potásica junto con biotita y feldespato potásico, con magnetita-especularita, zonas de bornita-calcopirita e introducción de Mo (Russin, 2008; Vry et al., 2010), y relacionada a alteración sericita-clorita (Uribe-Mogollón & Maher, 2018 y 2020; Sillitoe et al., 2019). De esta manera, el evento de venillas de anhidrita en Antakori y anomalía de molibdeno asociada puede ser interpretado como un evento perteneciente a etapas tardías y distales de una fase prograda con condiciones oxidantes de un sistema porfirítico. De manera similar, el evento de mineralización de calcopirita-bornita en brechas hidrotermales presenta un ensamble característico de las partes centrales de los sistemas porfiríticos (Sillitoe, 2010). Así, ambos eventos junto con la alteración sericita-clorita podrían indicar una transición y zonación entre las fases potásicas y fílicas de un sistema porfirítico.

A su vez, varios de los interceptos de alteración sericita-clorita cortan a una alteración fílica más temprana (ver Figura 2), es decir, un orden inverso a la secuencia normal de alteración en un sistema tipo pórfido (Sillitoe, 2010), lo que sugiere que la alteración sericita-clorita en Antakori es la manifestación de un segundo sistema porfirítico o una reactivación del mismo.

6. Conclusiones

El evento de alteración sericita-clorita en Antakori coincide con la alteración chlorite-sericite del modelo de Sillitoe (2010) y “Early green phyllic alteration” de Uribe-Mogollón & Maher (2018) y (2020), mostrando características transicionales en la composición de mica blanca y ensamble de óxidos a sulfuros, indicando un cambio en condiciones de pH, estado de oxidación y temperatura en un fluido hidrotermal derivado de un pórfido aún no interceptado. Este evento de alteración se ubica después de la alteración potásica y antes de la alteración fílica, constituyendo una guía de exploración en el proyecto Antakori.

Agradecimientos

Un agradecimiento especial a la compañía Regulus Resources Inc. por el apoyo y facilidades para la realización del presente trabajo, así como al equipo de geólogos de exploraciones del proyecto Antakori.

Referencias

Benavides, S., Cooke, D. R., Ireland, I., Zhang, L., Thompson, J., Belousov, I., 2019, Caracterización de alteración sericítica en Taca Taca Bajo, Argentina. Resúmenes Extendidos proEXPLO 2019.

Cohen, J.F., 2011, Mineralogy and geochemistry of hydrothermal alteration at the Ann Mason porphyry copper deposit, Nevada: Comparison oflarge-scale ore exploration techniques to mineral chemistry: MSc thesis, Corvallis, Oregon State University, 111 p.

Eggleston, T., Reid, D. & Colquhoun, W., 2019: AntaKori Project, Cajamarca Province, Peru. NI 43-101 Technical Report: Informe de Amec Foster Wheeler (Perú) SA para Regulus Resources Inc., 15 abril 2019, 191 p.

Gustafson, L.B., and Hunt, J.P., 1975, The porphyry copper deposit at El Salvador, Chile: Economic Geology, v. 70, p. 857−912.

Gustafson, L.B., and Quiroga G., J., 1995, Patterns of mineralization and alteration below the porphyry copper orebody at El Salvador, Chile: Economic Geology, v. 90, p. 2−16.

Halley, S., 2012, Calculating spectral scalars to map hydrothermal mineral systems: Mineral Mapping Internal Report, 68 p.

Russin, D., 2008, Hypogene alteration and mineralization in the Dos Pobres porphyry Cu(-Au-Mo) deposit, Safford District, Arizona: A gold- and magnetite rich variant of Arizona porphyry copper systems: University of Arizona, Thesis Dissertation

Sillitoe, R.H., 2010, Porphyry copper systems: Economic Geology 105, p. 3–41.

Sillitoe, R.H., Devine, F.A.M., Sanguinetti, M.I., and Friedman, R.M., 2019, Geology of the Josemaría porphyry copper-gold deposit, Argentina: Formation, exhumation, and burial in two million years: Economic Geology, v. 114, p. 407–426.

Uribe-Mogollón, C. & Maher, K., 2018, White mica geochemistry of the Copper Cliff porphyry Cu deposit: Insights from a vectoring tool applied to exploration: Economic Geology, 113, p. 1269–1295.

Uribe-Mogollón, C. & Maher, K., 2020, White Mica Geochemistry: Discriminating Between Barren and Mineralized Porphyry Systems: Economic Geology 115, p. 325–354.

Vry, V.H., Wilkinson, J.J., Seguel, J., Millán, J., 2010. Multistage intrusion, brecciation, and veining at El Teniente, Chile: evolution of a nested porphyry system. Economic Geology 105, 119–153.

Exploration outlooks for upper cretacic and paleocene porphyry copper belt, Inca de Oro – Carrera Pinto mining districts, Atacama Region, Chile.

Juan José Latorre M.[1], Miguel Zauschkevich D.[2] y Aldo Dal Santo C.[3]
[1] Latorre AGM SpA, Av. Las Tranqueras 830, Las Condes, Santiago, Chile (jjlatom@gmail.com)
[2] Inversiones Cisnes S.A., Coyancura 2241, of. 81, Providencia, Santiago, Chile (slmmila@tie.cl)
[3] Inversiones Cisnes S.A., Coyancura 2241, of. 81, Providencia, Santiago, Chile (adalsantocid@yahoo.com)

1. Abstract

La faja prospectiva de Inca de Oro-Carrera Pinto tiene 40x20 km y corresponde a un antiguo cluster minero; sus depósitos y prospectos más relevantes de tipo pórfido cuprífero son: *Inca de Oro* (460.1 Mill ton @ 0.41% Cu, 0.1 gpt Au y 0.01% Mo), *Carmen* (45.8 Mill ton @ 0.34% Cu, 0.34 gpt Au y 1 gpt Ag), *Atlántida* (427.1 Mill ton @ 0.2% Cu, 0.34 ppm Au y 27 ppm Mo) y *Caldera-Cisnes*. Los complejos intrusivos productivos del Cretácico Superior y Paleoceno están localmente cubiertos por una litocapa con potencial prospectivo. Los desafíos son: realizar un levantamiento estructural y de asociaciones de alteración hidrotermal de detalle para identificar bloques alzados prospectivos y asociaciones minerales de mayor temperatura dentro de la litocapa e integrar y complementar la información geoquímica y geofísica para generar nuevos blancos.

The Inca de Oro-Carrera Pinto is a 40x20 km prospective belt and it is part of an old mining cluster; the most relevant porphyry copper deposit and prospects occurring within this belt are: *Inca de Oro* (460.1 Mill ton@0.41% Cu, 0.1 gpt Au and 0.01% Mo), *Carmen* (45.8 Mill ton @ 0.34% Cu, 0.34 gpt Au and 1 gpt Ag), *Atlántida* (427.1 Mill ton @ 0.2% Cu, 0.34 ppm Au and 27 ppm Mo) and *Caldera-Cisnes*. Productive Upper Cretaceous and Paleocene intrusive complexes are locally covered by a prospective lithocap. Future work in this belt should include: structural and hydrothermal alteration detailed mapping to identify uplifted blocks and high temperature mineral associations within the lithocap and, integrating geochemical and geophysical information for target generation.

2. Introducción

La faja de 40x20 km en estudio, emplazada entre los pueblos de Inca de Oro y Carrera Pinto está ubicada en la tercera Región a 80 km al norte de Copiapó. Corresponde a un segmento del cinturón metalogénico de pórfidos de Cu-Au-Mo del Cretácico Superior y Paleoceno (Petersen, 1999). En el entorno de la localidad de Inca de Oro, se conocen a lo menos 4 proyectos de exploración en distintas etapas de avance y cuenta con una excelente infraestructura (Figura 1).

Figura 1 Plano de ubicación distritos mineros y prospectos principales.

3. Marco geológico distrital

El área está caracterizada por un sistema de falla regional de orientación NS conocido como falla Chivato, la cual tiene una larga historia de deformación (Grocott and Taylor, 2002). Los complejos intrusivos del Cretácico Superior y Paleoceno están interrumpiendo una secuencia de rocas volcánicas y volcanocásticas jurásicas y

cretácicas, a las cuales sobreyacen rocas carbonatadas cretácicas. Estas unidades están cubiertas discordantemente por un sistema de calderas de edad paleocena con rocas volcánicasde composición ácida a intermedia y gravas terciarias (Matthews et al, 2006).

4. Historia minera

Se reconocen tres distritos mineros dentro de la franja: Inca de Oro-San Pedro de Cachiyuyo, Tres Puntas-Chimberos (Ag) y Carrera Pinto-Puquios (Cu). En el primero de ellos la explotación de vetas auríferas y brechas de cobre, oro y molibdeno de San Pedro de Cachiyuyo (Ortiz, 1974) data de varios siglos. Tres Puntas-Chimberos es un distrito minero argentífero importante con actividades durante el período (1848 – 1922). En Carrera Pinto-Puquios "La Dulcinea" ha sido la mina más importante durante el período (1854–1929) con leyes de cobre entre 11-14% (Geovirtual 2020, a, b, c y d). Los prospectos más relevantes de tipo pórfido cuprífero son: *Inca de Oro* de Codelco-Panaust (460.1 Mill ton @ 0.41 % Cu, 0.1 gpt Au y 0.01% Mo) (Panaust, 2013), *Carmen* de Panaust (45.8 Mill ton @ 0.34% Cu, 0.34 gpt Au y 1 gpt Ag) (Panaust, 2012), *Atlántida* de Golden Arrow (427.1 Mill ton @ 0.2% Cu, 0.34 ppm Au y 27 ppm Mo) (Inmet 2012 en GlobeNewswire, 2018) y *Caldera-Cisnes* de particulares.

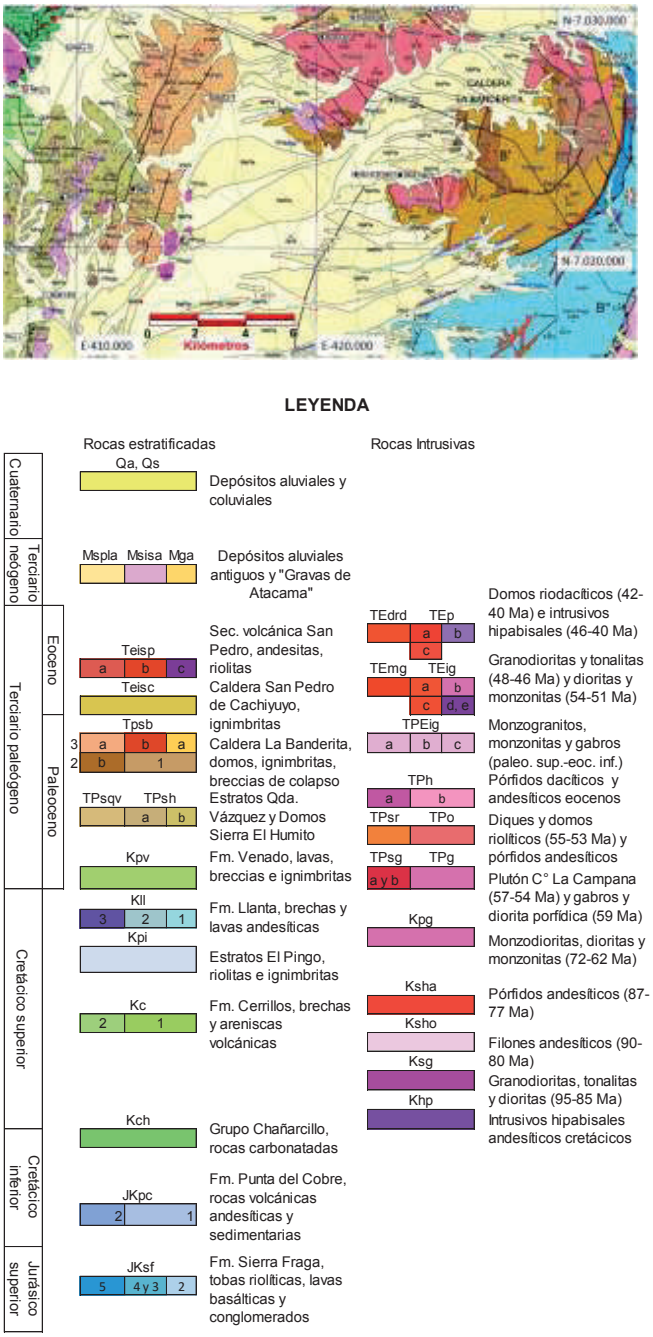
5. Casos de prospectos tipo pórfido cuprífero

5.1. Inca de Oro

El proyecto de tipo pórfido de cobre y oro está ubicado en los alrededores del pueblo homónimo; está emplazado en una secuencia de rocas volcano-sedimentarias de Fm. Punta del Cobre (Jurásico superior-cretácico inferior); se reconocen apófisis de intrusivos de composición intermedia, alteración biotítica y feldespato potásico, zonas sericíticas discretas a moderadas y la mineralización primaria es calcopirita, la cual ocurre diseminada, en vetillas tempranas (tipo A) y en stockwork con cuarzo, feldespato potásico, anhidrita y magnetita con una alta correlación Cu-Au (Rivera et al, 2006). El cuerpo mineralizado se ubica bajo una cubierta de gravas, rocas estériles y lixiviadas de más de 100 m de espesor. El proyecto se encuentra en estado de exploración básica avanzada.

5.2 Litocapa Caldera-Cisnes

El prospecto está ubicado 10 km al sur del pueblo de Inca de Oro, en el sector conocido como Llano del Humito; está protegido por 7.918 hás y corresponde a una litocapa emplazada en rocas volcanoclásticas ácidas terciarias cuyos afloramientos silíceos están rodeados por alteración argílica avanzada y parcialmente cubiertos por gravas terciarias (Figura 2).



Basada en Carta Inca de Oro, 1:100.000 (Mathews et al, 2006)

Figura 2 Plano geológico de superficie sector prospecto Caldera-Cisnes.

Durante el período 2017-2019 First Quantum Minerals (FQM) llevó a cabo un extenso programa de exploración geológica, geoquímica y geofísica que incluyó la perforación de 16 sondajes diamantinos totalizando 11.284,05 m y se ha logrado identificar un sistema tipo pórfido cuprífero emplazado bajo los 500 m de profundidad; está constituido por intersectos de diques de pórfido con leyes de hasta 0.7% de Cu y cuerpos de brechas ígneas hidrotermales de hasta 1.8% Cu (Figura 3), los cuales están aparentemente emplazados sobre un centro de batolito magnético con alteración potásica (Burlando, 2019). Se reconocieron asociaciones de alteración, mineralización y vetillas tempranas favorables (Zauschkevich, en prep), sin embargo, FQM concluyó que el potencial remanente del proyecto tendría un emplazamiento profundo (Burlando, op cit). A nuestro juicio, el desafío es identificar bloques alzados dentro de la propiedad. En etapa de exploración básica de seguimiento.

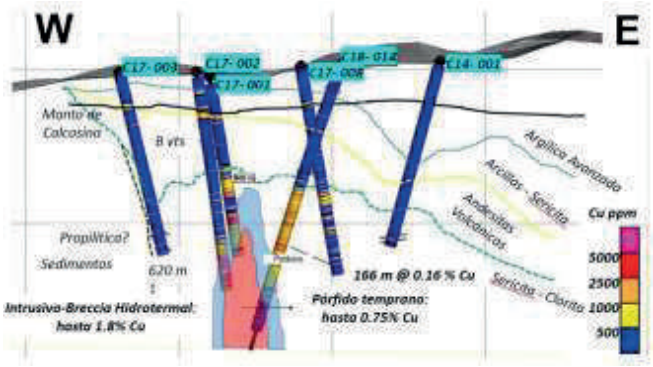


Figura 3 Sección de exploración prospecto Caldera-Cisnes.

6. Modelo regional de exploración de litocapas.

Definición: son dominios de alteración de subsuperficie, groseramente estratificados y extensos tanto lateral con dimensiones de hasta 10 km como verticalmente con dimensiones de más de 1 km; se forman cuando magmas ácidos generan fluídos hidrotermales y reaccionan con la roca encajonante durante el ascenso a la paleosuperficie (Sillitoe, 1995); corresponde a la fase vapor del fluido hidrotermal que se condensa en la superficie y se deposita sobre ésta, solidificándose posteriormente en forma de Si de alta pureza (Hedenquist et al, 1998). El fluído mineralizador principal proviene de una roca con textura porfídica que provoca un colapso hidrotermal, fenómeno que hace posible su ascenso (Sillitoe, 2010). Una litocapa productiva es *Valeriano* de 13.0x4.5 km de extensión (Sillitoe et al, 2016); está ubicado a 100 km al este de la ciudad de Copiapó, en la faja de intrusivos miocena y mediante la perforación de 14.270 m de sondajes, de hasta 1.857 m de largo se logró identificar la transición completa desde un ambiente epitermal de alta sulfuración con brechas hidrotermales y costrones mineralizados en superficie, hasta un sistema de tipo pórfido representado por una granodiorita con stockwork de vetillas A, alteración potásica y mineralización de calcopirita>bornita (Burgoa et al, 2015).

7. Conclusiones

La franja en estudio se ubica dentro de un metalotecto favorable y está caracterizada por la ocurrencia de algunos intrusivos productivos que generan sistemas de tipo pórfido cuprífero, brechas de turmalina localmente mineralizadas por cobre, oro y molibdeno y vetas tardías de oro-cobre. Los prospectos están localmente cubiertos por remanentes de una extensa litocapa con potencial prospectivo, y para su modelamiento se compara con la litocapa del prospecto Valeriano. Estos constituyen un cluster que hace posible generar sinergias tanto en infraestructura como en la construcción de una planta de tratamiento común. Los desafíos de exploración son: realizar un levantamiento estructural y de asociaciones de alteración hidrotermal de detalle, incluyendo la zonación de los halos propilíticos (Orovan and Hollings, 2020) para identificar bloques alzados prospectivos y asociaciones minerales de mayor temperatura en la litocapa e integrar y complementar la información geoquímica y geofísica disponible para generar nuevos blancos.

Agradecimientos

Se agradece a Inversiones Cisnes por facilitar la información del prospecto Caldera-Cisnes y a la Cámara Minera de Chile por su auspicio.

Referencias

Burgoa, C, Hopper, D. y Ambrus, J., 2015. Exploración profunda de un pórfido Cu-Au bajo el Litocap Valeriano:
Geología y Zonación del Sistema Hidrotermal, Región de Atacama, Chile. XIV Congreso Geológico Chileno, págs. 36-39.

Burlando, J., 2019. Caldera-Cisnes Final Report. First Quantum Minerals. Informe inédito, 34 págs.

Geovirtual, 2020a. Ficha distrito Inca de Oro, Región de Atacama, 2 págs.
_____, 2020b. Ficha minas San Pedro, Inca de Oro, Región de Atacama, 1 pág.
_____, 2020c. Ficha minas Tres Puntas, Región de Atacama, 1 pág.
_____, 2020d. Ficha minas Puquios y Dulcinea, Región de Atacama, 1 pág.

GlobeNewswire, 2018. Golden Arrow Expands into Chile with Agreement to Acquire the Ataltida Copper-Gold Project, 3 págs.

Grocott, J. and Taylor, G.K, 2002. Magmatic arc fault systems, deformation particioning and emplacament of granitic complexes in the Coastal Cordillera, north Chilean Andes (25°30'S to 27°00'S. Journal of the Geological Society, Vol. 159, págs. 452-442.

Hedenquist, J. W., Arribas Jr.,A. and Reynold, T.J., 1998. Evolution of an Intrusion-Centered Hydrotermal System: Far Southeast – Lepanto Porphyry and Epithermal Cu-Au Deposits, Philippines. Economic Geology. Vol 93, N°4, págs. 373-403.

Matthews, S.J., Cornejo, P. y Riquelme, R., 2006. Carta Inca de Oro N°102. Sernageomin. Mapa a escala 1 :100.000, 79 págs.

Orovan, E. and Hollings, P., 2020. Exploring the green rock environment: An Introduction. Economic Geology, Vol 115, págs. 695-700.

Ortiz, F., 1974. Geología del yacimiento cuprífero Manto de Cuba y depósitos minerales adyacentes. Distrito San Pedro de Cachiyuyo, Inca de Oro, prov. de Atacama. Memoria para optar al título de Geólogo. Universidad de Chile, 177 págs.

Pan Aust, 2012. Carmen Gold Deposit, Chile. ASX Announcement, 4 págs.

Pan Aust, 2013. Proyecto Inca de Oro en presentación a inversionistas, 2 págs.

Petersen, U., 1999. Magmatic and Metallogenic Evolution of the Central Andes. In Geology and Ore Deposits of the Central Andes. Society of Economic Geologist, Special Pub. N° 7, Chapter 4, págs. 109-153.

Rivera, S., Baeza, L., Kovacic P. y Martínez, A. 2006. Primeros antecedentes de la Geología del Pórfido de Cu-Au-Mo Inca de Oro, Tercera Región de Atacama, Chile. XI Congreso Geológico Chileno, págs. 339-341.

Sillitoe, R.H., 1995. Exploration of porphyry copper lithocaps. In Proceedings of the 1995 PACRIM Congress. Australasian Institute of Mining and Metallurgy, págs. 527-532.

Sillitoe, R.H. 2010. Porphyry Copper Systems. Society of Economic Geologists. Economic Geology, Vol. 105, págs. 3-41.

Sillitoe, R.H., Burgoa, C. and Hopper, D.R., 2016. Porphyry Copper Discovery beneath the Valeriano Lithocap, Chile. Society of Economic Geologists, Newsletter, N°106, 7 págs.

Zauschkevich, M.,en prep. Modelo de alteración hidrotermal de Litocapa Caldera-Cisnes, Región de Atacama, Chile. Tesis para Magister en Geología Económica. Universidad Católica del Norte.

MARTES 23

Pyrite composition as an exploration tool for volcanogenic massive sulfide deposits

Azam Soltani Dehnavi[1]

[1] School of Earth Sciences, Energy and Environment, Yachay Tech University, San Miguel de Urcuquí, Ecuador (asoltani@yachaytech.edu.ec | azam.soltani@utoronto.ca)

1. Abstract

Pyrite is a ubiquitous sulfide mineral in all volcanogenic massive sulfide deposits of the Bathurst Mining Camp (BMC), northern New Brunswick, Canada. In particular, the quantity of pyrite within host rocks associated with massive sulfide deposits of the BMC incrementally increases towards the sulfide horizons in both hanging wall and footwall samples. Pyrite shows variety of textures classified as pre-deformation, syn-deformation, and post deformation, having subtle but detectable correlation with geochemical signatures observed. For example, the framboidal pyrite and spongy core pyrite show the highest concentration of trace-elements compared to recrystallized pyrite. Therefore, the evolution history of the mineralization systems can be postulated based on textures and chemistry of pyrite. Also, this study demonstrated the variation and magnitude of geochemical signatures within pyrite in the host rocks surrounding the massive sulfide horizons, which can be used as a micro-chemical exploration tool.

2. Introduction

Volcanogenic massive sulfides are among the most divers mineralization systems in terms of metal tenor and host lithology in geological time and space (see Piercy, 2011 and references therein). So, what makes research and exploration of VMS systems challenging is that each VMS-type should be understood individually. Besides, wide geochemical variations are observed exclusive to each type. More puzzling is to find signature of mineralization in higher depth as a current demand in the industry (see Peter and Mercier-Langevin, 2015 and references therein). Therefore, new tools are necessitated to assist filling the knowledge gaps for a better understanding of VMS types and potentially integrating modern approaches with the current exploration techniques. In particular, as exploration increasingly focusses on deeper targets and moves inevitably into areas of post-mineral cover, the geochemical approaches in exploration programs are being more focused. This is achieved by significant advancements in analytical technologies in the last decades. Geochemical advances with a focus of micro-analytical techniques have been and continue to be favorable methods of use in Earth Sciences research in the last decades (i.e., Laser Ablation-Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry (LA–ICP–MS), see Cook et al., 2016 and references therein). In particular, great developments have been achieved for sample preparation, analysis speed, multi-element analysis capability, resolution and sensitivity, and by the availability of reliable reference materials. In addition to conventional LA–ICP–MS data request, the application of LA–ICP–MS is examined in the exploration of several mineral deposits to introduce vectoring and fertility tools towards mineralization systems (porphyry systems: Wilkinson et al., 2015; VMS systems: Soltani Dehnavi, 2017 and references therein). Mineral chemistry can offer a wealth of new information on texturally complex and fine-grained samples of VMS systems.

This synapsis presents the results of LA-ICP-MS analysis of pyrite from representative VMS deposits of the Bathurst Mining Camp. The extended geochemical data of texturally-distinct pyrite is presented. The magnitude and variation of pyrite chemistry around the massive sulfides is introduced as vectoring tool.

3. Summary Geology of the BMC

3.1. Regional Geology

The VMS deposits of the BMC are part of *Central Mobile Belt* of New Brunswick and Newfoundland are related to extensional arcs and early phase continental back-arcs setting (Rogers et al., 2007). The Middle Ordovician bimodal-siliciclastic Zn-Pb-Cu (Au-Ag) VMS systems of the BMC contains 45

known deposits. Closure of the Tetagouche-Exploits back-arc basin from the Late Ordovician to Early Silurian resulted in the incorporation of the Miramichi Group and Bathurst Supergroup rocks into the Brunswick subduction complex. The Bathurst Supergroup formed within an intra-crustal (continental) proto-back-arc basin (similar to the Japan Sea) and is referred to as the Tetagouche-Exploits Basin. The BMC can be divided into five groups, namely: Miramichi, Tetagouche, California Lake, Sheephouse Brook, and Fournier groups (Fig. 1; van Staal et al., 2003 and references therein). The Cambro-Ordovician Miramichi Group (490–478 Ma) occurs at the base of the sequence and consists of a passive-margin continentally derived turbidite sequence of quartz wacke, quartzite, siltstone, and shale deposited on the Gondwana margin. The Miramichi Group was succeeded by Bathurst Supergroup that constitutes the Sheephouse Brook, Tetagouche, California Lake, and Fournier groups. The first three groups mainly include ensialic
volcanic and sedimentary rocks, which are dominated by two distinct cycles of felsic volcanism that give way up section to mafic rocks. The Fournier Group is the youngest group (~ 465 Ma); it is defined by ocean-floor mafic volcanic and related sedimentary rocks.

Fig. 1

3.2. Mineralization

Most deposits of the BMC show some or all of five distinct hydrothermal facies typical to VMS deposits, namely: 1) sulfide stringer, 2) vent complex (basal Cu zone, or basal sulfide), 3) bedded sulfide (or banded sulfide), 4) bedded pyrite, and 5) carbonate-oxide-silicate exhalite (iron formation). Also, hydrothermal events have been recognized in the BMC, including Caribou (472–470 Ma), Brunswick and Chester (469–468 Ma), and Stratmat (467–465 Ma) horizons. The Stratmat and Brunswick horizons both occur in the Tetagouche Group, whereas the Caribou and Chester horizons occur in the California Lake and Sheephouse Brook groups, respectively.

4. Methodology

4.1. LA-ICP-MS analysis

Over 3000 LA-ICP-MS spot analysis is performed on representative polished thin sections of major VMS deposits of the BMC. Dataset is carefully handled and any analysis showing the sub-surface inclusions of other minerals is excluded (*n = 1561* spot analysis presented here). The LA-ICP-MS system in the Department of Earth Sciences, University of New Brunswick includes an Australian Scientific Instruments (formerly Resonetics Llc.) Resolutione M-50 193 nm ArF (excimer) laser connected to an Agilent 7700x quadrupole inductively coupled plasma-mass spectrometer (Q-ICP-MS) equipped with dual external rotary pumps. The ICP-MS was operated at 1450–1550 W and a torch depth of 4.5–5.0 mm. It was tuned during ablation of a raster line across NIST610 glass to achieve ThO^+/Th^+ < 0.3% (monitor of oxide production), $^{238}U^+/^{232}Th^+$ ~ 1.0 (monitor of plasma robustness), and $^{44}Ca^{++}/^{44}Ca^+$ < 0.3% (monitor of double-charged production). Raw counts were collected with the ICP-MS in peak-hopping mode (total quadrupole sweep time about 1 s) and displayed in time-resolved format. Analyte dwell times were set individually, with the longest dwell times set for elements with the lowest concentrations or elements of interest. Concentrations in unknowns were standardized against external standard USGS MASS-1 and internal standardization was achieved using the stoichiometric value of iron in the pyrite. The LA-ICP-MS technique was also used to generate element maps of various pyrite type. Further details of the methodology and raster-mapping approach can be found in Soltani Dehnavi, 2017.

5. Results

5.1. Textural variability of pyrite

Pyrite in the massive sulfide deposits of the BMC occurs in association with three principal sulfide facies, including the: 1) vent complex, 2) bedded sulfide, and 3) bedded barren pyrite. Also, finely laminated sulfide lenses hosted by iron formation near the hanging wall of some of the deposits contain various amounts of pyrite. Additionally, host rocks associated with massive sulfide deposits contain pyrite from 0.5 to over 25% in volume (Fig. 2).

Fig. 2

Textural criteria and grain size were used to categorize pyrite in to: 1) pre-deformation (primary pyrite) that is divided into 4 sub-types (Py1a-d), and

2) deformation related (metamorphic) types. The latter is further divided into syn-deformation (Type 2a) and post-deformation (Type 2b) (see Soltani Dehnavi et al., 2018). According to this classification, LA-ICP-MS analysis was performed, which shows subtle but related geochemical signatures.

5.2. Composition of pyrite

The majority of pyrite analyzed are arsenian type (up to 3.31 wt%, belong to pyrite from Louvicourt, followed by Caribou and Brunswick No. 12 deposits), in which Sb, Tl, Au, Bi, Sn, and Hg contents are elevated as well. In addition, over half of the analyzed pyrite grains contain more than 100 ppm Co and Ni within their structure. Intra-deposit geochemical variations suggest different physico-chemical condition of ore formation (see Soltani Dehnavi et al., 2018) and subsequent events.

6. Implications

6.1. Evolution history of VMS systems via pyrite textures and composition

Pyrite refrectory nature demonestrates resistance to diagenesis and/or metamorphism events via remobilization and recrystallization processes by which softer sulfides commonly being affected (Cook et al. 1993). Therefore, pyrite primary and pseudo-primary textures can be representative of its crystalization from hydrothermal fluids. The seconday and tertiary textures can be formed by syn- to post-deformation processes. According to the results of this study metamorphism results in depletion of trace-element (except Se) in recrystalized textures (See Soltani Dehnavi et al., 2018). As it is previously presnted, the BMC has undergone several phases of deformation and subsequent metamorphism which is reflected in the pyrite chemistry presented here. The question is if trace-element lost happened from the sulfide horizons, is there any signature of these elements can be traced in surrounding host rocks ? And how far from the sulfide horizons these signatures can be detected? Finally, what are the main mineral phases being able to accomodate these trace-elements? Answering these question is the foundation of micro-chemical vectoring tool.

6.2. Pyrite vectoring tool

The host rocks associated with massive sulfide deposits of the BMC contain pyrite from 0.5 to over 25% in volume that can be detected in several hundred meters outboard of sulfide horizons in both hanging wall and footwall samples (see Soltani Dehnavi et al., 2018).

Conclusions

Composition and texture of pyrite from the BMC demonestrate the robustness of a simple and ubiquitous sulfide phase within sulfide horizons and host rocks as a tool for interpretation of evolution history and formation of massive sulfides as well as potential exploration tool.

Thanks

This research was part of the TGI-4 program entitled “Contributions to the Understanding of Volcanogenic Massive Sulfide Deposit Genesis and Exploration Methods Development” funded from the Earth Science Sector, Natural Resources Canada. I sincerely appreciate colleagues at the Geological Survey of Canada, particularly Dr. Jan Peter (VMS Ore System Science Leader) for his cooperation and advice. The project is supervised by Profs. David R. Lentz and Chris McFarlane, which I highly appreciate them. Espacial Thanks to Drs. Walker and McClenaghan for great help in discussion and edition of the project.

References

Cook, N.J., Halls, C., and Boyle, A.P., 1993. Deformation and metamorphism of massive sulfides at Sulitjelma, Norway: Mineralogical Magazine, v. 57, p. 67-67.

Cook, N. J., Ciobanu, C. L., George, L., Zhu, Z., Wade, B., Ehrig, K., 2016. Trace element analysis of minerals in magmatic–hydrothermal ores by laser ablation inductively–coupled plasma mass spectrometry: approaches and opportunities. Minerals, v. 6, p. 111.

Peter, J.M. and Mercier-Langevin, P. (ed.), 2015. Targeted Geoscience Initiative 4: Contributions to the Understanding of Volcanogenic Massive Sulfide Deposit Genesis and Exploration Methods Developmen; Geological Survey of Canada, Open File 7853, 214 p.

Piercey, S. J., 2011. The setting, style, and role of magmatism in the formation of volcanogenic massive sulfide deposits. Mineralium Depositsa, v. 46, p. 449-471.

Rogers, N., van Staal, C. R., Zagorevshki, I., Skulski, T., Piercey, S., McNicoll, V. J. 2007. Timing and Tectonic Setting of Volcanogenic Massive Sulfide Bearing Terranes within the Central Mobile Belt of the Canadian Appalachians. In "Proceedings of Exploration 07: Fifth Decennial International Conference on Mineral Exploration" edited by B. Milkereit, p. 1199-1205.

Soltani Dehnavi, A., 2017. Volatile Element Signature of Volcanigenic Massive sulfide Deposits in the Bathurst Mining Camp, New Brunswick, Canada.Unpublished Ph.D. Thesis, University of New Brunswick, Fredericton, NB, 615 p.

Soltani Dehnavi, A., McFarlane, C.R.M., Lentz, D.R., Walker, J.A., 2018. Assessment of pyrite composition by LA-ICP-MS techniques from massive sulfide deposits of the Bathurst Mining Camp, Canada: from textural and chemical evolution to its application as a vectoring tool for the exploration of VMS deposits. Ore Geology Reviews, v. 92, p. 656–671.

van Staal, C.R., Wilson, R.A., Rogers, N., Fyffe, L.R., Langton, J.P., McCutcheon, S.R., McNicoll, V., and Ravenhurst, C.E., 2003. Geology and tectonic history of the Bathurst Supergroup, Bathurst Mining Camp and its relationships to coeval rocks in southwestern New Brunswick and adjacent Maine - A synthesis: Economic Geology Monograph 11, p. 37-60.

Walker, J., and McCutcheon, S., 2011. A chemostratigraphic assessment of core from the discovery hole of the Halfmile Lake Deep VMS zone, Bathurst Mining Camp, northeastern New Brunswick. *In* Geological Investigations in New Brunswick for 2010. *Edited by* G.L. Martin. New Brunswick Department of Natural Resources; Lands, Minerals and Petroleum Division, Mineral Resource Report, v. 2, p. 1-49.

Wilkinson, J.J., Chang, Z., Cooke, D.R., Baker, M.J., Wilkinson, C.C., Inglis, S., Chen, H.; Gemmell, J.B., 2015. The chlorite proximitor: a new tool for detecting porphyry ore deposits. Journal of Geochemical Exploration, v. 152, p. 10–26.

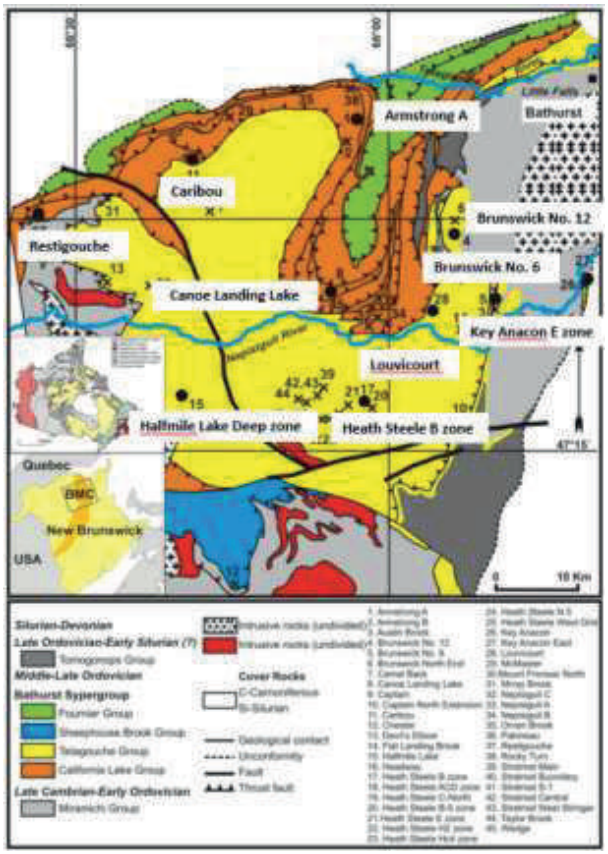


Fig. 1. Simplified geological map of the Bathurst Mining Camp, northeastern New Brunswick, showing the location of massive sulfide deposits examined during this study (modified from Walker and McCutcheon, 2011).

Fig. 2. Pyrite occurrence in various zones of Halfmile Lake Deep zone deposit, BMC.

Distribución de elementos traza en minerales de mena en yacimientos peruanos: potenciales sub-productos y herramienta de exploración

Lisard Torró[1,*], Diego Benites[1]

[1] Especialidad Ingeniería Geológica, Facultad de Ciencias e Ingeniería, Pontificia Universidad Católica del Perú Av. Universitaria 1801, San Miguel, Lima 15088, Perú. (lisardtorro@hotmail.com)

1. Abstract

In this communication, new data on the concentration, mineralogy and distribution of high-tech elements occurring in trace and minor amounts in sulfide deposits from the Central Andes in Peru will be presented. Studied mineralizations belong to the porphyry Cu (Ayawilca deposit and Morococha district) and volcanogenic massive sulfide (María Teresa) systems. These data are used to assess the potential of the studied deposits as a source of critical elements (e.g., In, Ge and Ga) and to describe element distribution patterns that can be used to both vector magmatic-hydrothermal centers and reconstruct the original geometry of tectonically dismembered sulfide bodies.

2. Introducción

El crecimiento exponencial de las economías emergentes y la innovación tecnológica han propiciado un aumento en la demanda mundial de las denominadas materias primas "críticas". Aproximadamente 30 elementos son considerados indispensables para la sostenibilidad de la sociedad moderna y futura a la vez que presentan riesgo en su suministro según diferentes organismos internaciones (Skirrow et al. 2013; Comisión Europea 2020). Muchos de los metales y metaloides incluidos en este grupo son masivamente utilizados para la fabricación de tecnologías verdes y por consiguiente, cualquier aspiración global para una reducción o substitución de los combustibles fósiles pasa por un mejor reconocimiento de sus yacimientos y mecanismos de concentración en la corteza terrestre.

De entre los elementos catalogados como críticos para la economía global encontramos la triada compuesta por indio (In), germanio (Ge) y galio (Ga), base de nuestra investigación. Son empleados industrialmente como arseniuro o nitruro de galio (GaAs o GaN), tetracloruro o dióxido de germanio ($GeCl_4$ o GeO_2) y óxido de indio y estaño (ITO) (Foley et al. 2017; Shanks et al. 2017). Dentro de sus numerosos usos, estos compuestos son masivamente empleados para la fabricación de *smartphones* (In, Ga), dispositivos optoelectrónicos (In, Ge, Ga) y fibra óptica (In, Ge). La producción de celdas fotovoltaicas involucra aleaciones de selenio, cobre, indio y galio (CIGS), y germanio de manera individual o aleado (Bleiwas 2010).

El In, Ge y Ga no forman yacimientos propios y su extracción se da como subproductos a partir del procesamiento de menas de Al (en el caso del Ga, subproducto del procesamiento de bauxitas), Ag, Cu, Pb y Zn (Shanks et al. 2017). Dada su afinidad calcófila, estos elementos suelen concentrarse en yacimientos minerales de sulfuros de diferentes tipologías. Si bien existen algunos minerales en los que alguno de estos tres elementos aparece de forma nominal en su fórmula estructural, su presencia en yacimientos de sulfuros es mayoritariamente en solución sólida en la estructura cristalina de sulfuros y sulfosales tales como esfalerita, calcopirita y estannita, entre otros (Cook et al. 2009; George et al. 2015, 2018).

Además de su importancia geoestratégica, la variación en la concentración del In, Ge y Ga, así como de otros elementos traza, en la estructura de minerales de mena también puede ser usada para determinar condiciones fisicoquímicas de cristalización. A modo de ejemplo, la concentración de elementos traza, incluyendo In, Ge y Ga, en esfalerita está fuertemente controlada por la temperatura de cristalización (ver geotermómetro *GGIMFis* de Frenzel et al. 2016). La correlación entre las concentraciones de estos elementos traza en minerales de mena y las condiciones de cristalización (temperatura, presión, salinidad, origen de los fluidos, entre otras) ha abierto un campo de investigación en el que se busca determinar patrones de distribución elemental que puedan ser usados para vectorizar centros magmático-hidrotermales o restituir la estructura y morfología de cuerpos minerales en distritos con fuerte deformación tectónica.

Trabajos recientes sobre la distribución de metales de alta tecnología en sistemas magmático-

hidrotermales de los Andes centrales se han centrado en gran medida en los depósitos subepitermales y epitermales del cinturón estannífero de Bolivia, con conspicuos enriquecimientos en In (p.ej., Murakami e Ishihara 2013; Torró et al. 2019a,b). En cambio, se han realizado pocas investigaciones sobre la distribución de estos elementos en sistemas magmático-hidrotermales de cualquier índole en el Perú, que básicamente se limitan a determinaciones elementales realizadas por Soler (1987) en concentrados de zinc.

En esta comunicación presentaremos nuevos datos sobre concentraciones de elementos traza de alta tecnología en yacimientos magmático-hidrotermales peruanos obtenidos en el marco del proyecto de investigación "Exploración de metales estratégicos (In, Ge y Ga) en los Andes Centrales: abastecimiento sostenible de materias primas para la fabricación de tecnologías verdes" [107-2018-FONDECYT-BM—IADT-AV], actualmente en desarrollo. El objetivo de esta investigación es doble: i) evaluar si mineralizaciones magmático-hidrotermales en el Perú alcanzan concentraciones económicas de elementos de alta tecnología, y ii) determinar su expresión mineralógica y distribuciones temporal y espacial para la descripción de patrones útiles durante exploración. Los resultados obtenidos, además, pueden ser de interés para el diseño de procesos metalúrgicos optimizados para el beneficio de sub-productos.

3. Metodología

A partir de muestras de roca representativas de las diferentes características paragenéticas y estructurales de la mineralización metálica en los yacimientos estudiados, se prepararon 158 secciones pulidas en el laboratorio QEMSCAN de la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP). Éstas fueron analizadas mediante microscopía óptica de luz reflejada y microscopía electrónica de barrido con analizador de energías (SEM-EDS; equipo Quanta 650 FEI en el Centro de Caracterización de Materiales de la PUCP). El estudio de la geoquímica mineral se llevó a cabo mediante microsonda electrónica (EPMA; equipo JEOL JXA-8230 en la Universidad de Barcelona) y ablación laser acoplada a espectrometría de masas con fuente de plasma de acoplamiento inductivo (LA-ICP-MS; equipo de ablación laser excimérico RESOlution S-155 [ASI/Applied Spectra] de 193 nm acoplado a un ICP-MS de campo Element XR [Thermo] en ETH Zürich).

4. Resultados y discusión

4.1. Yacimientos en sistemas tipo pórfido Cu

4.1.1. Yacimiento de Ayawilca

El yacimiento de tipo cordillerano de Ayawilca en Pasco, Perú, es representativo de yacimientos polimetálicos en los que uno de estos tres metales estratégicos, en este caso el In, alcanza concentraciones económicas como sub-producto del beneficio metalúrgico de otros metales (Zn, Pb y Sn). Ayawilca alberga un recurso indicado de 11,7 Mt con leyes de 6,9% Zn, 0,16% Pb, 15 g/t Ag y 84 g/t In, equivalente a 983 t de In asumiendo una recuperación metalúrgica del 75%. Además, cuenta con un recurso inferido 45,0 Mt con leyes de 5,6 % Zn, 0,23 % Pb, 67 g/t In y 17 g/t Ag, equivalente a 3003 t de In. Análisis puntuales revelan contenidos de In en esfalerita de hasta 17372 ppm, en estannita, de hasta 1908 ppm y en calcopirita, de hasta 1185 ppm. De acuerdo a correlaciones entre las concentraciones de elementos traza en esfalerita y a perfiles de ablación (Figura 1), el In se incorporó en la red cristalina a través de sustituciones acopladas como $(Cu^{+} + In^{3+}) \leftrightarrow 2Zn^{2+}$ y/o $(Sn, Ge)^{4+} + (Ga, In)^{3+} + (Cu + Ag)^{+} \leftrightarrow 4Zn^{2+}$.

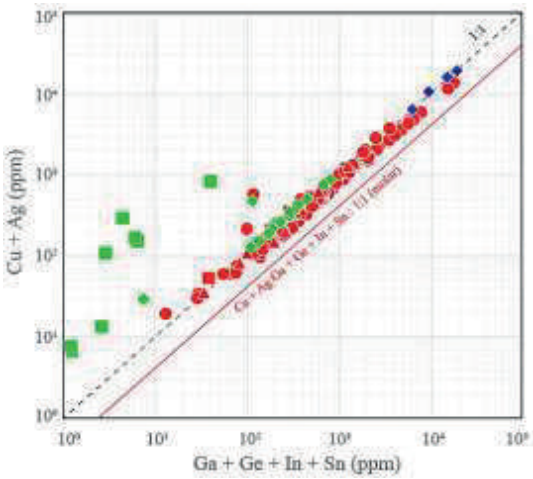


Fig. 1. Diagrama binario Cu+Ag vs Ga+Ge+In+Sn (ppm) en esfalerita del depósito de Ayawilca.

En contraste con la esfalerita, los mecanismos de incorporación de In y otros elementos traza en la red cristalina de la calcopirita y de la estannita son poco conocidos y, por lo general, no existe consenso. Wittmann (1974) sugirió que la calcopirita puede alojar concentraciones significativas de In por ser isoestructural con la roquesita [$CuInS_2$]. En los granos estudiados de calcopirita y estannita en Ayawilca no se pudieron determinar correlaciones elementales claras.

4.1.2. Distrito de Morococha

Las tipologías de mineralización analizadas en este distrito incluyen skarns, así como “mantos” (i.e., cuerpos de reemplazamiento) y vetas epitermales polimetálicas (de tipo "Cordillerano"). Entre los minerales analizados, las mediciones indicaron que tanto el In como el Ga se concentran principalmente en esfalerita (rango intercuartil [RIQ] 209-1 ppm In y hasta 4618 ppm In; RIQ 61-2 ppm Ga y hasta 2137 ppm Ga) y calcopirita (RIQ 112-32 ppm In y hasta 1071 ppm In; RIQ 62-2 ppm Ga y hasta 630 ppm Ga). En generaciones coetáneas de esfalerita y calcopirita, la concentración de In y Ga en el primer mineral es por lo menos de dos a tres veces mayor con respecto al segundo. La concentración de Ge, en cambio, es sistemáticamente baja en los cuatro minerales analizados (RIQ 1.2-0.2 ppm), con algunos valores anómalos de hasta 701 ppm registrados en esfalerita de tipo coloforme. Los datos obtenidos sugieren que el In, Ge y Ga se incorporaron en la red cristalina de esfalerita a través de sustituciones acopladas que involucran Cu y, subordinadamente, también Sn y Ag. La disponibilidad de Cu en los fluidos mineralizantes es, por tanto, clave para el enriquecimiento de estos tres elementos en esfalerita. El indio se encuentra enriquecido en esfalerita perteneciente a una asociación de baja sulfuración que sobreimprime a un skarn magnésico prógado, así como en vetas epitermales de alta sulfuración que sobreimprimen el stock de Toromocho. En esfalerita perteneciente a asociaciones de sulfuración intermedia a lo largo del distrito se observa enriquecimiento de In en mineralizaciones proximales al centro magmático-hidrotermal causativo (zonas metalíferas de Cu y Zn-Cu) con respecto a mineralizaciones distales (zonas Zn-Pb-Ag y Pb-Ag); además, la concentración de In disminuye progresivamente desde las generaciones tempranas a las generaciones tardías de esfalerita, mientras que la concentración de Ge aumenta.

4.2. Yacimientos tipo VMS

4.2.1. María Teresa

Los perfiles de ablación sugieren que, en esfalerita de María Teresa, el Fe, Mn, Cd, Hg, Cr, Ag, Sb, Se, In, Ge y Ga están incorporados en solución sólida en la red cristalina, mientras que el Sn, Tl, Bi y Pb aparecerían al menos en parte como microinclusiones minerales. Las concentraciones de In (RIQ 42,1-1,6 ppm, hasta 415,0 ppm) y Ga (RIQ 31,05-5,90 ppm, hasta 95,70 ppm) son normalmente mucho más altas que las de Ge (RIQ 0.846-0.164 ppm, hasta 9.310 ppm). Las tendencias de correlación positiva entre In, Ga y Cu sugieren sustituciones acopladas del tipo $Cu^{+} + In^{3+} \leftrightarrow 2Zn^{2+}$ y $Cu^{+} + Ga^{3+} \leftrightarrow 2Zn^{2+}$. En relación con la esfalerita, la calcopirita se encuentra empobrecida en In (RIQ 28,29-8,39 ppm, hasta 49,49 ppm) y Ga (RIQ 8,25-2,87 ppm, hasta 23,63 ppm) y enriquecida en Ge (RIQ 5,92-0,70 ppm, hasta 79,60 ppm). La distribución espacial de elementos traza fue estudiada en el cuerpo de sulfuros masivos de Sofía-D. Los patrones de distribución elemental son más evidentes para esfalerita que para calcopirita. En esfalerita, éstos incluyen un enriquecimiento progresivo en In, Cu, Mn y Se, y un empobrecimiento en Ge desde la parte alta (menor temperatura de cristalización) a la parte baja (mayor temperatura de cristalización) del cuerpo de sulfuros (Figura 2).

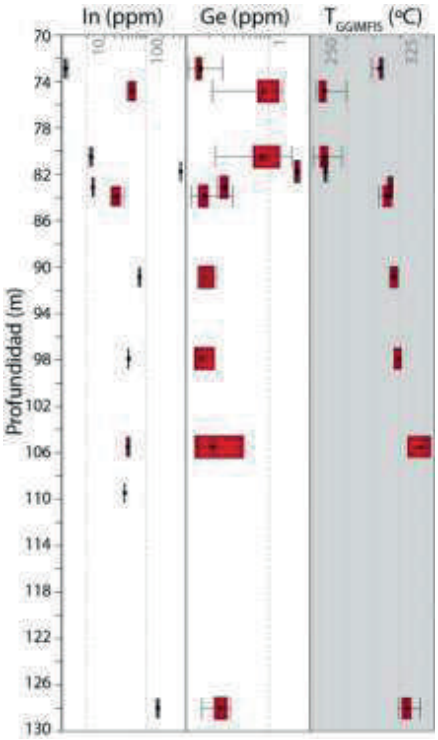


Fig. 2. Diagramas boxplots de las concentraciones de In y Ge en esfalerita y de temperatura de cristalización según geotermómetro GGIMFIS de Frenzel et al. (2016) vs. profundidad para el cuerpo de sulfuros masivos de Sofía-D en el depósito de María Teresa.

5. Conclusiones y desarrollos futuros

El estudio in situ de la geoquímica mineral de fases de mena en los yacimientos asociados a sistemas tipo pórfido Cu revelan que i) yacimientos de tipo Cordillerano pueden alcanzar concentraciones de In económicas para su

recuperación como sub-producto (p.ej., Ayawilca), y ii) que la concentración de estos elementos muestra patrones de distribución zonales alrededor de los centros magmático-hidrotermales causativos. En cuerpos de sulfuros masivos volcanogénicos (VMS), la distribución espacial de elementos traza en solución sólida en esfalerita (p.ej., Cu, In, Ge) se mantiene a pesar de la intensa deformación y metamorfismo. La investigación, actualmente en marcha, busca extender la metodología de estudio a otros yacimientos de sulfuros en el Perú, como aquellos del tipo Mississippi Valley.

Agradecimientos

Este trabajo fue financiado por el CONCYTEC-FONDECYT en el marco de la convocatoria E041-01 [número de contrato 107-2018-FONDECYT-BM—IADT-AV] y por la Dirección de Gestión de la Investigación de la PUCP en el marco del proyecto FONCAI-0023-2019. D.B. disfruta de una beca doctoral Huiracocha otorgada por la PUCP. Agradecemos a Tinka Resources Ltd., Minera Colquisiri y Pan American Silver Corp. por garantizar el acceso a las muestras y por su importante apoyo logístico y técnico. Agradecemos el apoyo técnico de X. Llovet (CCiT-UB) durante la adquisición de datos de EPMA y de O. Laurent y C. Chelle-Michou (ETHZ) durante la adquisición de datos de LA-ICP-MS. A los profesores L. Fontboté, K. Kouzmanov, J. Vallance, J. Sáez y S. Rosas por la discusión sobre aspectos geológicos de los yacimientos estudiados. A los tesistas Pablo Valverde, Patrick Quispe, Brayam Ortiz y Johann Culqui (PUCP) por su valioso apoyo.

Referencias

Bleiwas, D. 2010. Byproduct Mineral Commodities Used for the Production of Photovoltaic Cells. U.S. Geological Survey Circular. Reston, Virginia, number 1365, p. 1-6.

Comisión Europea. 2020. Critical Raw Materials. Disponible en línea: https://rmis.jrc.ec.europa.eu/uploads/CRM_2020_Report_Final.pdf (acceso 7 noviembre 2020).

Cook, N.J., Ciobanu, C.L., Pring, A., Skinner, W., Shimizu, M., Danyushevsky, L.V., Saini-Eidukat, B., Melcher, F. 2009. Trace and minor elements in sphalerite: a LA-ICPMS study. Geochimica et Cosmochimica Acta, v. 73, p. 4761–4791.

Foley, N., Jaskula, B., Kimball, B., Schulte, R. 2017. Gallium, chap H. En: Schulz, K.J., DeYoung, J.H., Jr Seal, R.R. II Bradley, D.C. (Eds) Critical mineral resources of the United States Economic and environmental geology and prospects for future supply: U.S. Geological Survey. Professional Paper 1802, p. H1 – H26.

Frenzel, M.F., Hirsch, T., Gutzmer, J., 2016. Gallium, germanium, indium and other trace and minor elements in sphalerite as a function of the deposit type – A meta-analysis. Ore Geology Reviews, v. 76, p. 52-78.

George, L.L., Cook, N.J., Ciobanu, C.L., Wade, B.P. 2015. Trace and minor elements in galena: A reconnaissance LA-ICP-MS study. American Mineralogist, v. 100, p. 548-569.

George, L.L., Cook, N.J., Crowe, B.B.P., Ciobanu, C.L. 2018. Trace elements in hydrothermal chalcopyrite. Mineralogical Magazine, v. 82, p. 59-88.

Murakami, H., Ishihara, S. 2013. Trace elements of indium-bearing sphalerite from tin polymetallic deposits in Bolivia, China and Japan: a femto-second LA-ICPMS study. Ore Geology Reviews, v. 53, p. 223-243.

Shanks, W., Kimball, B., Tolcin, A., Guberman, D. 2017. Germanium and Indium, chap I. En: Schulz, K.J., DeYoung, J.H., Jr Seal, R.R. II Bradley, D.C. (Eds) Critical mineral resources of the United States Economic and environmental geology and prospects for future supply: U.S. Geological Survey. Professional Paper 1802, p. I1 – I26.

Skirrow, R.G., Huston, D.L., Mernagh, T.P., Thorne, J.P., Dulfer, H., Senior, A.B. 2013. Critical Commodities for a High-Tech World: Australia's Potential to Supply Global Demand. Geoscience Australia: Canberra, Australia.

Soler, P. 1987. Variations des teneurs en éléments mineurs (Cd, In, Ge, Ga, Ag, Bi, Se, Hg, Sn) des minerais de Pb-Zn de la province polymetallique des Andes du Pérou Central. Mineralium Deposita, v. 22, p. 135–143.

Torró, L., Melgarejo, J., Gemmrich, L., et al. 2019a. Spatial and Temporal Controls on the Distribution of Indium in Xenothermal Vein Deposits: The Huari Huari District, Potosí, Bolivia. Minerals, v. 9, p. 304–340.

Torró, L., Cazorla, M., Melgarejo, J., Camprubí, A., et al. 2019b. Indium Mineralization in the Volcanic Dome-Hosted Ánimas–Chocaya–Siete Suyos Polymetallic Deposit, Potosí, Bolivia. Minerals, v. 9, p. 604-642.

Wittmann, A. 1974. Indium. 49-A Crystal chemistry. En: Wedepoh, K.H. (Ed) Handbook of geochemistry, Berlin, Springer–Verlag, v. II/4, p. 49-A-1 - 49-A-8.

Geología del Litio Hospedado en Arcillas y Salmueras en el Altiplano Andino

Angel Salas[1] & José Yparraguirre[2]

[1] UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS, Av. Venezuela S/N, San Miguel, Lima-Perú. (angel.salas@unmsm.edu.pe)
[2] MINEMETALLURGY SAC, Av. Santa Elvira 6136, Urb. Santa Luisa, Los Olivos, Lima-Perú. (ayparraguirre@minemetallurgy.com)

1. Abstract

With the increasing demand for environmentally friendly energy, lithium is emerging as an important material of the future, mainly with the advent of Hybrid Electric Vehicles. Nowadays lithium is mined from brines, pegmatites and recently in clays, in that order of volume; in recent years have been many studies about lithium-rich clays focused in origin, source, and accumulation of lithium, one of them is the Andean Plateau. The Andean Plateau meets the characteristics that allow the economic concentration of lithium, such qualities are: 1) volcanism on a lithium-rich basement and 2) endorheic basins that concentrate lithium-rich solutions, result of leaching.
Key words: lithium, Li-rich clays, Li-rich brines, Andean Plateau, endorheic basin

2. Resumen

En la creciente demanda de energía amigable con el medio ambiente, el litio emerge como un material del futuro, principalmente con el desarrollo de Vehículos Eléctricos Híbridos. Actualmente el litio es minado de salmueras, pegmatitas y recientemente de arcillas, en ese orden de volumen; por ende, en años recientes se ha realizado investigación sobre el origen y acumulación de litio y uno de los lugares de estudio es el Altiplano Andino. En el altiplano andino confluyen características que permiten la concentración económica del litio, estas cualidades son: 1) volcanismo y basamento rico en litio y 2) cuencas endorreicas que concentran las soluciones que lixivian las rocas circundantes.
Palabras clave: litio, arcillas ricas en litio, salmueras ricas en litio, Altiplano Andino, cuenca endorreica

3. Introducción

El litio no es un metal raro, por el contrario se encuentra ampliamente distribuido en la Tierra, se encuentra disperso en rocas, suelos y aguas oceánicas y continentales, sin embargo este metal se halla en concentraciones económicas principalmente en salmueras (59 %) y pegmatitas (25 %), y el remanente se encuentra en arcillas, aguas geotermales, y salmueras petrolíferas (Kavanagh et al., 2018). La presencia de litio en arcillas aún se encuentra en estado de entendimiento, posiblemente porque este tipo depósito aún es escaso en el mundo.

4. Ocurrencia del Litio en el altiplano

4.1. Evolución geológica del Altiplano

El Altiplano Andino es el más grande *plateau* orogénico formado en un margen tectónico de subducción (Garzione et al., 2017), en el cual se manifiesta un clima árido ocasionado por una barrera orográfica. En el interior se encuentran múltiples cuencas endorreicas, como producto del levantamiento de los Andes. El Altiplano Andino alcanzó su posición actual (~3.8 km de altitud) hace 5.4 Ma, tal levantamiento es adjudicado a la remoción de la litósfera inferior desde el Oligoceno tardío hasta el Mioceno tardío, principalmente en la zona central del Altiplano Andino (referencias en Garzione et al., 2017); a consecuencia de este proceso de delaminación se originaron múltiples erupciones de ignimbritas desde el Mioceno al Plioceno (Allmendinger et al., 1997), seguidas por volcanismo máfico proveniente del manto, finalmente precedidas por relleno cuaternario.

Las rocas paleozoicas en el Altiplano Andino presentan contenidos de Li y B significativamente mayores a la abundancia de la corteza superior,

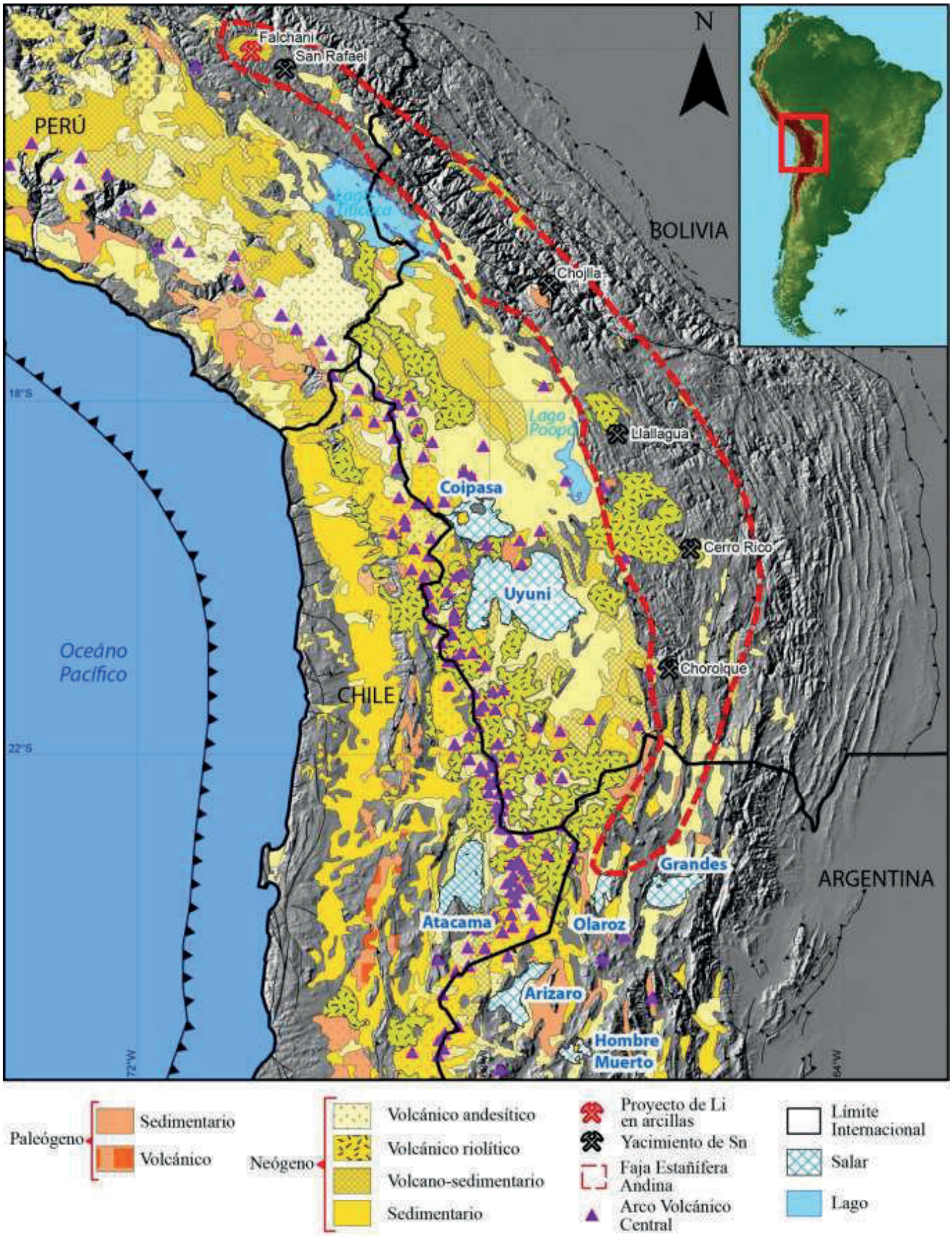


Figura 1.- Mapa Geológico del Paleógeno y Neógeno del Altiplano. Adaptado de Gomez et al. (2019).

en consecuencia los magmas de la Zona Volcánica Central incorporan material del manto y a su vez rocas del basamento, resultando en contenidos de Li mucho mayores a los esperados por el proceso convencional de diferenciación magmática, además estos valores son mayores a la Zona Volcánica del Sur y Norte (Meixer et al. 2019); una evidencia de este fenómeno son los valores extremadamente altos de Li en obsidiana denominada localmente como "Macusanita" en el sur del Perú, con un promedio de ~1300 ppm y un máximo de ~3400 ppm (Pichavant et al., 1987), la macusanita es considerada como la manifestación volcánica de un plutón de tipo-S. En consecuencia se hace evidente que la fuente de Li en los salares del Altiplano proviene de la lixiviación de rocas paleozoicas y del Arco Volcánico Central.

4.2. Litio en salmueras

Las salmueras (> 40 000 ppm en TSD) ricas en Li se originan en cuencas endorreicas de clima árido, generalmente se localizan en latitudes subtropicales y medias (Munk et al. 2016), actualmente salmueras de litio en concentraciones económicas se encuentran en el Tibet – Qinghai *Plateau* (China) y en el Altiplano Andino (Sudamérica).

La principal producción de Litio a nivel global proviene de salmueras, específicamente del Altiplano Andino, del cual el principal productor en el mundo es el Salar de Atacama (Chile). La mayor reserva de litio del mundo se encuentra en el salar de Uyuni (Bolivia) y otras salmueras de menor volumen de Li como Hombre Muerto en Argentina, véase Fig. 1; estos países son denominados informalmente como "el triángulo del litio". Según Munk et al. (2016) los sistemas de salmueras comparten seis características en común, estos son: (1) clima árido, (2) cuencas cerradas conteniendo una corteza de sal, (3) actividad hidrotermal y/o magmática asociada, (4) subsidencia controlada por tectonismo, (5) fuentes de litio idóneas y (6) tiempo suficiente para concentrar el litio en la salmuera.

4.3. Depósitos de Litio en Arcillas

Los depósitos de litio en arcillas se encuentran hospedados en rocas volcánicas y/o piroclásticas.

La fuente del litio siempre ha sido tema de debate, hasta estudios recientes que determinan que proviene de: (1) lixiviación de rocas volcánicas, esencialmente riolitas, las cuales poseen cantidades variables de litio, tales cantidades aumentan al originarse sobre una corteza gruesa (> 1000 ppm; Benson et al., 2017), llegando a > 2000 ppm en raras riolitas aluminosas; (2) del aporte de soluciones hidrotermales producto de la desgasificación de las cámaras magmáticas mientras aún se encuentran en actividad.

Hasta la actualidad solo se conocen 3 depósitos de este tipo, estos son: Thacker Pass (EE.UU.), Bacanora (México) y Falchani (Perú), y estos reúnen las características siguientes: (1) se localizan en depresiones volcánicas (paleocaderas) o tectónicas (grabens), (2) se encuentran hospedados en rocas volcánicas y piroclásticas asociadas y (3) son de edad reciente (Mioceno hasta la actualidad).

Siempre se ha asumido que la especie mineral que contiene el litio en estos depósitos es la hectorita [$Na_{0.3}(Mg,Li)_3Si_4O_{10}(OH)_2$], la cual posee 1.16 % de Li_2O, este mineral se origina a causa de: la desvitrificación de la ceniza o vidrio volcánico, por precipitación de aguas lacustrinas o la incorporación de Li en depósitos en arcillas preexistentes (Asher-Bolinder, 1991); no obstante un reciente estudio en la caldera McDermitt (Nevada) indica que el mineral principal es la illita rica en Li (Castor & Henry, 2020).

5. Exploración de Litio en el Altiplano Andino

5.1. Exploración de Li en salmueras

La distribución de cuencas evaporíticas está en función del clima del pasado reciente haciendo improbable nuevos descubrimientos (Kesler et al., 2012); sin embargo aún existe potencial en sistemas de aguas subterráneas, los métodos convencionales para la exploración son: análisis químico de agua y sedimentos, adicionalmente estudios geofísicos para la determinación la conductividad eléctrica (Munk et al. 2016).

5.2. Exploración de Li en Arcillas

Los depósitos de litio hospedados en arcillas afloran como rocas volcánicas y/o piroclásticas, por lo cual podrían pasar como desapercibidas a simple vista. Sin embargo las características del descubrimiento reciente del proyecto Falchani, en el sur del Perú indican que estos se han formado en el interior de una caldera volcánica, aunque sus límites no están definidos hasta el momento (The Mineral Corporation, 2019).

Las calderas volcánicas son grandes depresiones, asociadas a volcanismo explosivo, geográficamente conforman sistemas hidrológicos

cerrados, lo cual facilita la concentración de elementos litófilos como el Li en las facies de intracaldera (Benson et al., 2017), en añadidura el aporte de Li por aguas subterráneas también es posible (Munk et al., 2016), después de la formación de las calderas estas se encuentran sujetas a levantamiento o subsidencia acorde al marco tectónico (Rytuba, 1994). En consecuencia se enfatiza la localización de las estructuras tipo caldera tales como fallas anulares y radiales, las cuales posiblemente han sido obliteradas por erupciones volcánicas continuas y/o por diversos procesos erosivos.

Figura 2. Representación esquemática del altiplano andino

6. Conclusiones

- Recientes estudios confirman que el litio en el altiplano en salmueras es producto de:
  a) Un magmatismo que posee concentraciones anómalas de litio, mucho mayor a otros arcos volcánicos andinos, originado por delaminación, y un basamento rico en litio.
  b) La lixiviación del litio en cuencas endorreicas en un clima árido que permite la acumulación y precipitación.
- La exploración en estructuras tipo caldera en el altiplano puede llevar al descubrimiento de recursos de litio en arcillas.

Referencias

Allmendinger, R., Jordan, T., Kay, S. & Isacks, B. 1997. The Evolution of the Altiplano-Puna Plateau of the Central Andes. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, v. 25, p. 139–74.

Asher-Bolinder, S. 1991. Descriptive model of lithium in smectites of closed basins. En: Orris, G.J. & Bliss, J.D. (eds.), Some Industrial Mineral Deposits: Descriptive Deposit Models, United States Geological Survey Open Report 91-11A.

Benson, T.R., Coble, M., Rytuba, J. & Mahood, G. 2017. Lithium enrichment in intracontinental rhyolite magmas leads to Li deposits in caldera basins. *Nature Communications*, v. 8, p. 1-9.

Castor, S. & Henry, D. 2020. Lithium-rich Claystone in the McDermitt Caldera, Nevada, USA: Geologic, Mineralogical, and Geochemical Characteristics and Possible Origin. *Minerals,* 10, 68, p. 1-38.

Garzione, N., McQuarrie, N., Perez, N., Ehlers, T., Beck, S., Kar, N. … & Horton, B. 2017. Tectonic Evolution of the Central Andean Plateau and Implications for the Growth of Plateaus. *Annual Reviews of Earth and Planetary Sciences*, v. 45, p. 529 – 559.

Gómez, J., Schobbenhaus, C. & Montes, N.E., compiladores. 2019. Geological Map of South America 2019. Escala 1:5 000 000. Commission for the Geological Map of the World (CGMW), Servicio Geológico Colombiano y Servicio Geológico de Brasil. París.

Kavanagh, L., Keohane, J., García Cabellos, G., Lloyd, A. & Cleary, J. 2018. Global Lithium Sources-Industrial Use and Future in the Electric Vehicle Industry: A Review. *Resources*, v 7, 57.

Kesler, S., Gruber, P., Medina, P., Keoleian, G., Everson, M., & Wallington, T. 2012. Global lithium resources: Relative importance of pegmatite, brine and other deposits. *Ore Geology Reviews*, 48, 55-69. doi: 10.1016/j.oregeorev.2012.05.006

Meixer, A., Sarchi, C., Lucassen, F., Becchio, R., Caffe, P., Lindsay, J., Rosner, M. & Kasemann, S. 2019. Lithium concentrations and isotope signatures of Palaeozoic basement rocks and Cenozoic volcanic rocks from the Central Andean arc and back-arc. *Mineralium Deposita*, https://doi.org/10.1007/s00126-019-00915-2

Munk, L., Hynek S., Bradley, D., Boutt, D., Labay, K. & Jochens, H. 2016. Lithium brines: a global perspective. En : Philip L. Verplanck, P. & Hitzman, M. (eds.), *Rare Earth and Critical Elements in Ore Deposits,* Reviews in Economic Geology, v. 18, p. 339–365.

Rytuba, J. 1994. Evolution of Volcanic and Tectonic Features in Caldera Settings and their importance in the localization of ore deposits *Economic Geology*, v. 89, p. 1687-1696.

The Mineral Corporation. 2019. Mineral Resource Estimates for the Falchani Lithium Project in the Puno District of Peru, Report Nº C-MYI-EXP-1727-1134. Recuperado de: www.sedar.com.

IVANA: UN NUEVO DEPOSITO DE URANIO y VANADIO CON POTENCIALIDAD ECONÓMICA, RÍO NEGRO, ARGENTINA

Guillermo P. PENSADO[1], Lucía CAMPOS[1], José M. RODRIGUEZ[1] y Ariel TESTI[1]

[1] Blue Sky Uranium Corp., 312-837 West Hastings St., Vancouver, Canadá (info@grossogroup.com)

1. Abstract

Ivana deposit is a new uranium deposit discovery at the Amarillo Grande project, Argentina. This project covers multiple uranium exploration targets at the austral border of the Neuquén basin, when the basin sequences directly overlays the Norpatagonian Massif. Ivana deposit shows characteristics of surficial and sandstone hosted uranium deposits. The mineralization observed on surface is dominated by carnotite as coatings on pebbles and sand grains, and as disseminations in poorly consolidated sandstones and conglomerates. The buried mineralization in depth is dominated by an anomalous coffinite-like uranium silicate, plus pyrite, filling pores between grains. The mineral resource, defined as inferred, was estimated on 28 million tones containing 22.7 million pounds U_3O_8 and 11.5 million pounds V_2O_5. A preliminary economic assessment indicates its viability and low operating cost. More uranium vanadium occurrences are recognized along the district and represent potentially new discoveries.

2. Introducción

El depósito Ivana se ubica en el borde austral de la cuenca Neuquina, provincia de Río Negro, Argentina (Figura 1). Su descubrimiento fue resultado de un programa de prospección y exploración de Blue Sky Uranium Corporation (BSK). El depósito Ivana comprende mineralización de uranio y vanadio sub-aflorante en el extremo sur del proyecto Amarillo Grande, un nuevo distrito de uranio y vanadio en Argentina descubierto por BSK en 2006. Este proyecto incluye múltiples manifestaciones superficiales de uranio, entre ellas las correspondientes a Ivana, descubiertas en 2010, con mineralización de carnotita en superficie. La mineralización fue definida inicialmente como depósitos de uranio tipo superficial, y por su distribución errática y baja ley promedio como sub-económica. Una revisión geológica iniciada en 2016, que incluyó trabajos geológicos, geofísicos y perforaciones de aire-reversa, definieron que la mineralización tipo superficial era la expresión oxidada y parcialmente movilizada de un depósito de uranio en arenisca no aflorante con contenidos de uranio y volumen de potencialidad económica. Esto llevó a un intenso programa de exploraciones entre los años 2017 y 2019, que incluyó perforaciones, definición de recursos minerales, estudios mineralógicos, ensayos metalúrgicos y una evaluación económica preliminar. Sus resultados fueron presentados en un Informe Técnico NI-43.101 Evaluación Económico Preliminar (PEA) con fecha efectiva el 27 de febrero de 2019 (Kuchling et al, 2019).

3. MARCO GEOLÓGICO

3.1. REGIONAL

El Proyecto Amarillo Grande, que incluye el depósito Ivana, se ubica en el extremo austral de la cuenca Neuquina, donde sus secuencias sedimentarias se apoyan en discordancia sobre el Macizo Norpatagónico definido como basamento del distrito e incluye unidades de edad Neo-Proterozoico a Jurásicas. Unidades sedimentarias y volcánicas de edad Cretácico Superior a Terciario representan una secuencia distal y condensada de Cuenca Neuquina, que a su vez es cubierta por depósitos sedimentarios y volcánicos del Terciario Medio a Superior. Depósitos aluviales y coluviales del Cuaternario cubren mayormente todas las unidades anteriores.

Una inversión tectónica que reactivó las estructuras del basamento del Macizo Norpatagónico durante el Cenozoico (D´Elia et al,

2012) deformó los grupos Neuquén y Malargüe, del Cretácico Superior a Terciario Superior, para luego ser cubiertos por los depósitos fluviales de la Formación Chichinales de edad Oligoceno a Mioceno Inferior. Los depósitos Miocenos y Pliocenos son interpretados como sinorogénicos al levantamiento andino (Folguera et al, 2015).

3.2. LOCAL

El proyecto Amarillo Grande se ubica en un corredor NW-SE cubriendo una serie de depresiones topográficas limitadas al este por el lineamiento NW-SE Bajo del Gualicho, interpretado como una zona de sutura profunda (Greco et al, 2017). El Depósito Ivana se ubica próximo a la intersección del lineamiento Bajo del Gualicho y el NE-SW Nahuel Niyeu (Gregori et al, 2008). Las unidades estratigráficas corresponden a depósitos epiclásticos y piroclásticos de la Formación Chichinales, depositados en discordancia sobre el basamento ígneo-metamórfico del Macizo Norpatagónico. La Formación Chichinales se puede diferenciar en tres miembros poco consolidados evidenciando diagénesis parcial. La mineralización de Ivana se aloja en el miembro inferior que incluye conglomerados pobremente seleccionados, areniscas tobáceas gruesas y niveles discontinuos de areniscas con cemento carbonático o niveles arcillosos. Depósitos aluviales o coluviales modernos cubren mayormente la zona.

Cuatro tipos de alteraciones fueron relacionadas al depósito Ivana: reducida, reducida carbonosa, oxidada y hematítica. La distribución de estas cuatro variaciones de alteraciones se presenta en el depósito Ivana como un típico frente de óxido reducción o complejo “roll-front”.

La mineralización de uranio y vanadio se aloja en horizontes entre la superficie y los 25 metros de profundidad. También se presenta en fracturas del basamento y su regolito en la zona de discordancia. Su distribución en planta presenta una forma de “C” y en sección vertical pueden reconocerse dos horizontes mineralizados superpuestos. La parte superior corresponde a mineralización oxidada dominada por carnotita [$K_2(UO_2)_2(VO_4)_2 \cdot 3H_2O$] y se presenta como pátinas en clastos de areniscas y conglomerados, como también finamente diseminada en la matriz. Otros minerales oxidados minoritarios identificados mediante análisis QEMSCAN® son tyuyamunita, leibegita y un mineral no identificado (posiblemente arcillas conteniendo uranio, Edwards, 2018a). La parte inferior corresponde a mineralización primaria parcialmente oxidada, siendo el mineral más abundante una variación de cofinita [$U(SiO_4)_{1-x}(OH)_{4x}$] cuyo contenido en sílice no se corresponde con la composición teórica según los análisis SEM y QEMSCAN® (Arce, 2017 y Creighton, 2018). Ésta se encuentra diseminada en la matriz de las arenas y conglomerados. Un estudio geoquímico determinó que ~90% del uranio en el depósito Ivana se encuentra como U^{+6} (Carlevaris, 2017), confirmando que la mineralización inferior posee un proceso de oxidación marcado.

Ivana es clasificado como un modelo híbrido porque cuenta con características o similitudes a dos tipos de depósitos, superficial y en areniscas. La mineralización en superficie predominantemente de minerales secundarios de uranio y vanadio se asemeja a los depósitos superficiales de Australia y Namibia, como Yeelirrie y Langer-Henrich respectivamente (Cuney y Kyser, 2015). El nivel mineralizado inferior, que representa la mayor parte del depósito, es conformado por minerales primarios en proceso de oxidación. Estos minerales primarios se relacionan a un frente de óxido-reducción bien marcado y semejan a los depósitos en areniscas del Colorado Plateau en USA (Cuney y Kyser, 2015). Por la distribución de la mineralización y su relación con las rocas del basamento, suma características de los subtipos “canal basal” y “roll-front”.

4. EVALUACIÓN ECONÓMICA

4.1. Trabajos Exploratorios

Entre los años 2016 y 2019, BSK desarrolló un intenso programa de exploración que incluyó: geofísica mediante tomografía eléctrica (ET) con arreglo Polo-Dipolo; perforaciones de aire reverso con 488 sondajes verticales totalizando 8.792 metros; muestreos metro a metro; y perfilajes con sonda radimétrica. También se realizaron análisis mineralógicos con microscopio electrónico de barrido y QEMSCAN® (Arce, 2017, Creighton, 2018 y Edwards, 2018a). Ensayos metalúrgicos preliminares se realizaron en INVAP S.E. en 2017, y Saskatchewan Resource Council en 2018 (Carlevaris, 2017 y Edwards, 2018b). Se definió así un proceso sencillo y económico que incluye una preconcentración física por lavado con atrición, seguido de lixiviación alcalina. La recuperación final promedio, incluyendo la

concentración física y lixiviación química, es de 84.6% uranio y 52.5% vanadio (Edwards, 2018b).

4.2. Estimación de Recursos Minerales

Una estimación de recursos minerales en el depósito Ivana fue llevada a cabo por consultores certificados independientes, quienes se ajustaron conforme a las guías y prácticas del Instituto Minero, Metalúrgico y Petrolero Canadiense (CIM, Kuchling et al, 2019). Los recursos, clasificados como recursos minerales inferidos, totalizaron 28 millones de toneladas mineralizadas con una ley media de 0.037% U_3O_8 y 0.019% V_2O_5, representando un contenido de 22.7 millones de libras de U_3O_8 y 11.5 millones de libras de V_2O_5.

4.2. Evaluación Económica Preliminar

Para la evaluación económica preliminar, se consideró que el depósito Ivana podría ser minado por métodos convencionales, con una vida operativa de 13 años y producción anual promedio de 1.35 millones de libras U_3O_8 y 0.5 millones de libras V_2O_5, totalizando una producción de 17.5 millones de libras de U_3O_8 y 6.5 millones de libras de V_2O_5. La inversión de capital estimada es de US$ 128 millones para su construcción y US$35.4 millones para mantenimiento productivo (~30% de contingencias). Los costos operativos promedio, incluyendo los créditos por vanadio, son de US$ 18.27 y US$ 16.24 por libra U3O8 (AISC o cash, créditos incluidos). El valor neto presente es de US$135.2 millones (tasa 8%), con una tasa interna de retorno de 29.3% y un tiempo de recuperación de inversión de 2.4 años.

5. Conclusiones

El depósito Ivana representa el mayor descubrimiento de depósitos de uranio en Argentina en los últimos 40 años. A su vez, el proyecto Amarillo Grande representa un nuevo distrito de uranio y vanadio que incluye un importante número de ocurrencias superficiales. El estudio económico preliminar indica la viabilidad económica del depósito Ivana gracias a costos operativos muy bajos, dentro del primer cuartil a nivel mundial y comparables a costos operativos productivos en depósitos de recuperación “in situ”. Las múltiples manifestaciones de minerales de uranio y vanadio reconocidas a lo largo de todo el proyecto Amarillo Grande pueden representar la expresión superficial de múltiples depósitos y generar un distrito potencialmente productivo de importancia mundial, donde el depósito Ivana representa su primer descubrimiento.

Agradecimientos

Los autores desean expresar su agradecimiento a la empresa Blue Sky Uranium por autorizarnos a publicar información de su proyecto Amarillo Grande. Muy especialmente al “Chairman of the Board”, Sr. Joseph Grosso, y a todo el equipo de campo y administrativo que forman parte de este descubrimiento tan importante para el país y la generación de energía limpia para un mundo mejor.

Referencias

Arce, M. 2017. Estudio sobre las muestras AGI-100- arenas; AGI-100-pelitas y AGI-100-MO mediante microscopía electrónica de barrido y difractometría de RX. Universidad Nacional de Río Negro-CONICET. Inédito para Minera Cielo Azul S.A. 17 páginas.

Carlevaris, R. 2017. Proyecto Amarillo Grande, Sector Ivana 8, Informe Técnico Ensayos Metalúrgicos Uranio y Vanadio. 0289-3DGU-EICCI-001-A, Invap. Inédito para Minera Cielo Azul S.A. 43 páginas.

Creighton, S. 2018. QEMSCAN Analysis: Saskatchewan Research Council, Mining and Minerals, SRC Publication 13478-9C18. Inédito para Blue Sky Uranium Corp. 16 páginas.

Cuney, M. y Kyser, K. 2015. Geology and Geochemistry of Uranium and Thorium Deposits. Mineralogical Association of Canada, v. 46, ch. 2, p. 15-37.

D´Elia, L., Muravchik, M., Franzese, J. y Lopéz, L. 2012. Tectonostratigraphic analysis of the Late Triassic-Early Jurassic syn-rift sequence of the Neuquén Basin in the Sañicó depocenter, Neuquén Province, Argentina: Andean Geology, v.39, p. 133-157.

Edwards, C. 2018a. Analysis of SRC QEMSCAN mineralogical data. Extractive Metallurgy Consulting. Inédito para Blue Sky Uranium Corp. 9 páginas.

Edwards, C. 2018b. Analysis of SRC Mill Feed and Alkaline Leach Tests. Extractive Metallurgy Consulting. Inédito para Blue Sky Uranium Corp. 5 páginas.

Folguera, A., Zárate, M., Tedesco, A., Dávila, F. y Ramos, V. 2015 Evolution of the Neogene Andean foreland basins of Southern Pampas and

Northern Patagonia (34°-41°S), Argentina. Elsevier; Journal of South American Earth Sciences, 64, Part 2, 12-2015, 452-466.

Greco, G., González, S., Sato, A., González, P., Basei, M., Llambias, E. y Varela, R. 2017. The Nauhuel Niyeu basin: A Cambrian forearc basin in the eastern North Patagonian Massif: Journal of South American Earth Sciences, v79, p. 111-136

Gregori, D., Kostadinoff, J., Strazer, L. y Raniolo, A. 2008. Tectonic significance and consequences of the Gondwanide orogeny in northern Patagonia, Argentina. Elsevier Science; Gondwana Research, 14, 3, 10-2008, 429-450.

Kuchling, K., Thorson, J., Edwards, C., Davis, B., Embree, K., y Lomas, s. 2019. Preliminary Economic Assessment for the Ivana Uranium – Vanadium Deposit, Amarillo Grande Project - NI 43-101 Technical Report for Blue Sky Uranium Corp. Publicado en www.sedar.com: 194 páginas. Canadá.

Ilustraciones

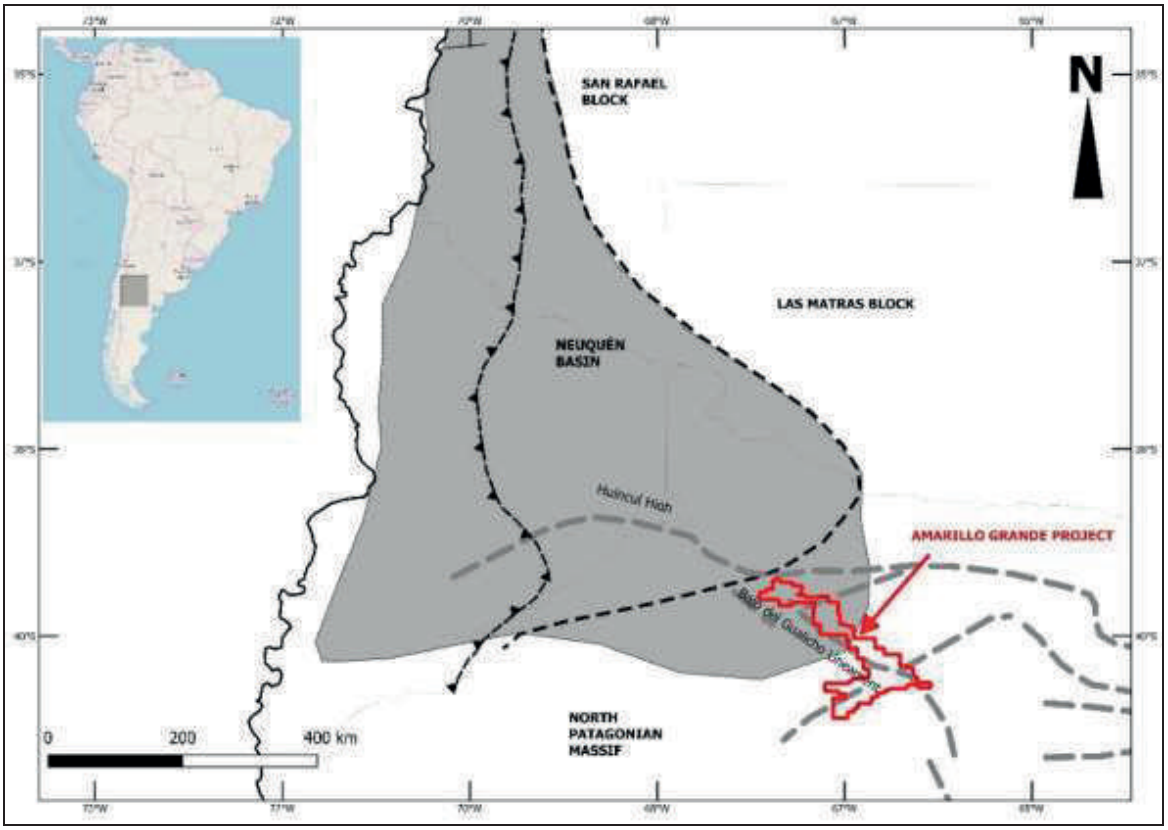


Figura 1. Ubicación del Proyecto Amarillo Grande en relación con las principales estructuras morfo-tectónicas (líneas discontinuas) en la región centro oeste de la República Argentina (modificado de Gregori et al, 2008)

The Trapiche Ni-Co prospect, Yauli Dome, Central Peru: formed by Miocene magmatic-hydrothermal activity

Alvaro Martínez[1,4], Lluís Fontboté[1], Jorge Spangenberg [2], Carlos Angeles[3], César Farfán[4]

[1] University of Geneva, Department of Earth Sciences, Geneva, Switzerland (lluis.fontbote@unige.ch)
[2] University of Lausanne, Institute of Earth Sciences, Lausanne, Switzerland
[3] carlosangeles55@gmail.com
[4] Volcan Compañía Minera S.A.A., Manuel Olguín 373 Piso 8, Lima, Peru

Abstract

The Trapiche Ni-Co prospect, province of Yauli, is located in the SE tip of the Yauli Dome, 2 km SE of the Andaychagua Ag-Zn-Pb mine. At Trapiche, discontinuous Ni-Co-Zn-Pb-Cu manto bodies are hosted by weakly metamorphic carbonate and basaltic rocks of the Devonian Excelsior Group. Despite its Ni-Co rich mineral association, Trapiche shares main characteristics with Miocene Cordilleran polymetallic deposits in the area.

Resumen

El prospecto Trapiche está ubicado en el extremo SE del Domo de Yauli, a 2 km al SE de la mina de Ag-Zn-Pn de Andaychagua. En Trapiche mantos discontinuos con mineralización principal de Co-Ni-Zn-Pb-Cu están hospedados en calizas y basaltos del Grupo Excelsior que muestran un leve metamorfismo. A pesar de su mineralogía rica en Ni y Co, Trapiche comparte las características principales de yacimientos polimetálicos cordilleranos miocenos en el área.

Introduction and geological background

The Trapiche Ni-Co prospect (11.755532°S, 76.000321°W, 4400 masl), is located 2 km SE of the Andaychagua Mine, Yauli Province, in the western Andean Cordillera of Peru, about 110 km east of Lima. The prospect is located in the SE tip of the Yauli Dome, a NNW-SSE elongated anticlinorium core consisting of Paleozoic rocks that outcrop between Mesozoic and younger rocks. The Yauli Dome is crosscut by Eocene and mainly late Miocene intrusive rocks. Porphyry Cu-Mo and porphyry-related epithermal polymetallic "Cordilleran" (Bendezú and Fontboté, 2009, Fontboté 2020) mineralization including, from south to north, the deposits of Andaychagua, San Cristobal, Toromocho, and Morococha (Beuchat, 2003, Beuchat et al., 2004, Catchpole et al., 2015 a,b) are genetically related to the late Miocene magmatic activity. Main intrusions are aligned in NNW-SSE direction and main faults strike NE-SW and NNW-SSE.

The Trapiche area is affected by Pre-Andean tight overturned folds with steep axes dipping to the SW. The host sequence is inverted. The ore is mainly hosted by hydrothermally altered encrinitic limestone (Rosas et al., 2010) located on top (i.e., stratigraphically underlying) basalts that in places contain also minor Ni-Co mineralization (Fig. 1). Both, encrinitic limestones and basalts are intercalated Excelsior organic-rich shales attributed to the Devonian (McLaughlin, 1924, Harrison, 1943, Saintilan et al. 2021) and that may be correlated to lithologically similar Early to Middle Devonian units in southern Peru including the Cabanillas Group (Newell 1949, Boucot et al, 1980). Volcanic rocks at Trapiche are MORB within plate tholeiite alkaline basalts. Excelsior pillow lavas occurring 1 km to the east are within plate sub-alkaline basalts. The sequence is affected by weak metamorphism related to the Carboniferous Gondwanian (formerly, eo-Hercynian) Orogeny (Chew et al. 2016).

The presence of nickel and cobalt at Trapiche and other occurrences had been reported by Kobe (1982). In 2007, Volcan Compañía Minera performed an exploration program including 700 m underground workings and 22 short diamond drill holes defining an in average 1.10 m thick and 1050 long discontinuous "manto", with 0.60% Ni and 0.11% Co (Oldham et al., 2008). Zinc contents are in general below 2000 ppm, those of Cu and Pb largely below 1000 ppm, those of Bi, As, Sb lie mostly below 100 ppm, and those of Ag below 10 ppm. Gold contents are low, below 10 ppb whereas those of Pt higher, around 100 ppb in Ni-rich intersections; Pt/Pd ratios around 30.

Previous works on Trapiche and similar nearby occurrences suggested, mainly based on the

stratiform character of the ore showings and their correlation with basaltic rocks, a syngenetic volcanic-exhalative origin (Kobe 1990; Oldham et al. 2008; Acuña et al., 2008). The present study focused on the Trapiche main manto challenges this interpretation.

Mineralization and alteration styles

Figure 2 shows a paragenetic sequence of the Trapiche manto. Nickel- and cobalt bearing recognized sulfides are millerite (Figs. 3, 4, 5, 6) siegenite-violarite (Figs. 4, 5, 6, 7), gersdorffite, cobaltite, and ullmannite. They occur with pyrite, Fe-poor sphalerite (~4-1% mol FeS), galena, chalcopyrite, and tetrahedrite. Sulfides appear as euhedral to subhedral fine- grained crystals within small aggregates up to 4 mm in length, mainly filling spaces between the fragments of crinoids (Fig. 3).

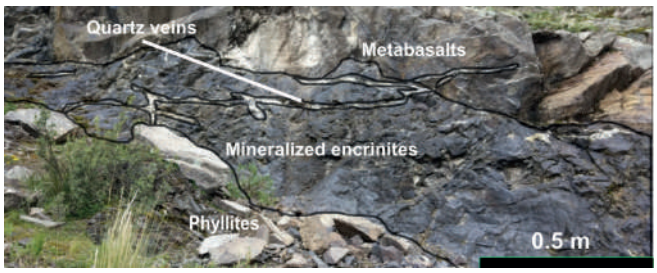


Fig. 1. Outcrop of the Trapiche manto. It mainly replaces encrinitic limestone and subordinately metabasalt layers intercalated in phyllites of the Excelsior Group with pre-ore quartz veins produced by metamorphic segregation.

Fig. 2 Paragenetic sequence at the Trapiche manto.

Manganese-rich carbonates are the main alteration minerals in Trapiche. A first generation of Mn>Fe>>Ca-Mg carbonates replaces pervasively the limestone and partly the basalt. Less abundant Mn-Ca-Mg-Fe carbonates (with distinctly lower Mn and Fe contents) occur in late veins and crosscut metamorphic segregation quartz veins (Fig. 8.) Quartz and minor sericite are intergrown with both generations of carbonates. Black alteration crusts of Mn-Fe oxides resulting from the oxidation of the Mn-bearing carbonates are observed in the manto outcrops, both in basaltic and carbonate host rocks. (Fig. 1.)

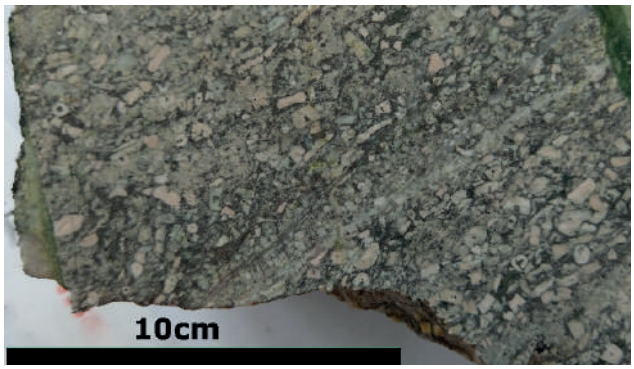


Fig. 3. Hand sample of mineralized encrinite. Dark parts between the fragments host sulfide mineralization, mainly millerite. Bioclasts are altered to Mn-Fe-Ca-Mg carbonates.

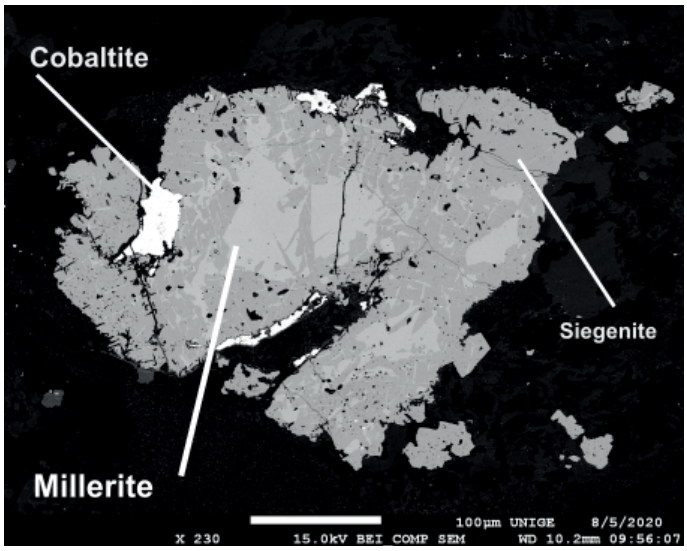


Fig 4. Sulfide grain, with millerite, siegenite, and cobaltite. Millerite is apparently replaced by siegenite in Mn-Fe-Ca-Mg carbonate (dark parts). Backscattered electron SEM image, width 10.2 mm.

Sulfur isotopes

Seven samples of sulfides from the Trapiche manto were selected for sulfur isotope analysis. All the measured $\delta^{34}S$ values are close to zero (Table 1), pointing to a deep/magmatic sulfur source.

Discussion and conclusion

Most primary nickel and cobalt deposits occur in mafic and ultramafic rocks as the result of magmatic fractionation. However, other hypogene types of Ni-Co deposits including "five element veins" are

known. Also, relatively high amounts of Ni and/or Co are occasionally found in mineral assemblages of Cordilleran deposits in several parts of the Andean Cordillera, as for example in Mina Ragra, Perú (Haggan and Parnel, 2000) and in Capillitas and Famatina, Argentina (Paar et al., 2016)

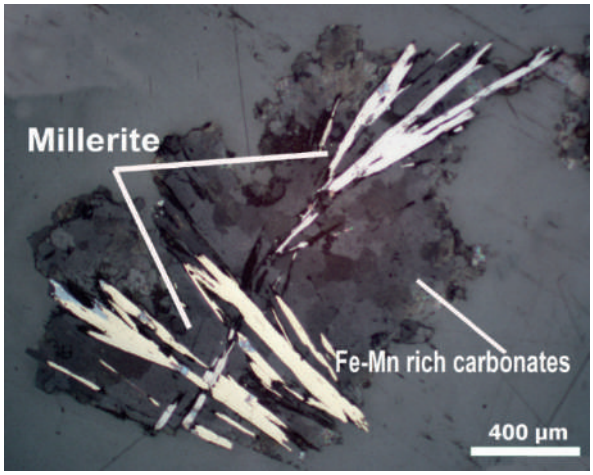


Fig 5. Small euhedral needle like crystals of millerite, in Fe-Mn-Ca-Mg carbonate. Reflected light, NX.

Table 1. Values of $\delta^{34}S$ for sulfide samples from Trapiche. Analysis carried out at the University of Lausanne, Switzerland.

Sample	Mineral	Total S (mg)	$\delta^{34}S$ ‰ VCDT
TAM-15	Millerite$_1$	28.6	-1.6
TAM-15	Millerite$_1$	30.3	-0.8
TAM-15	Grey sulfide$_2$	0.04	-2.6
TAM-15	Grey sulfide$_2$	21.7	-1.4
TAM-15	Millerite$_3$	26.3	-1.3
TAM-1	Ni concentrate$_4$	27.2	2.1
TAM-1	Ni concentrate$_4$	32.1	1.9

1. Millerite, traces of violarite-siegenite. Sulfides concentration included treatment with 15% HCl for 24 h. 2. Likely siegenite -violarite. Concentration without HCl treatment. 3. Millerite with traces of violarite-siegenite. Concentration included treatment with 15% HCl for 24 h. 4. The concentrate, according to microscopic observation and portable XRF analysis, contained approximately 31% millerite, 5% siegenite, 21% sphalerite, 26% pyrite, 7% galena, 5% chalcopyrite, 2% arsenopyrite, and 1% fahlore. TS: total sulfur.

Several observations, including that the hydrothermal alteration and ore mineral assemblages crosscut Carboniferous metamorphic quartz veins (Fig. 8), are not compatible with volcanic-exhalative interpretations as previously suggested (Kobe 1990; Oldham et al. 2008; Acuña et al., 2008). Rather, the Trapiche intermediate sulfidation mineral assemblages can be compared with "Stage C" assemblages in Zn-Pb-Ag veins in the Domo de Yauli characterized by the presence of complex Mn- Fe-dominated carbonates, fahlore and Fe-poor sphalerite (stage nomenclature according to Rottier et al., 2018 and Fontboté, 2020).

Fig 6. Crystals of siegenite-violarite over millerite needles in a veinlet of Mn-Fe-Ca-Mg carbonate. The carbonate has been attacked with H3PO4 to reveal the crystal shapes. Image width: 1 mm.

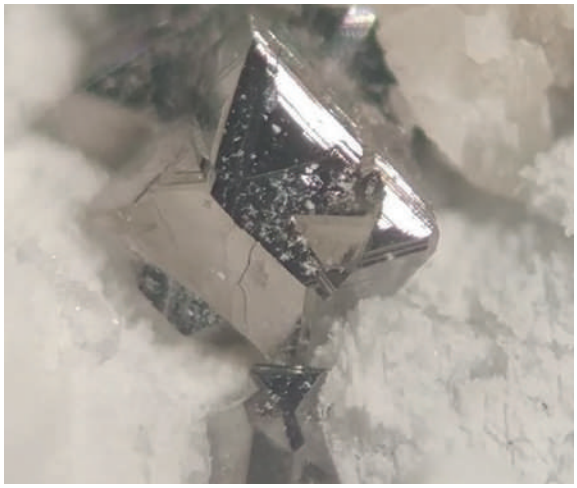


Fig. 7. Twinned (spinel law twin) crystal of siegenite-violarite in a veinlet of Mn-Fe-Ca-Mg carbonate. The carbonate has been attacked with H_3PO_4 in order to reveal the crystalline shape. Image width: 1.5 mm.

The $\delta^{34}S$ values close to zero of Ni-Co sulfides in Trapiche are consistent with a predominant magmatic origin of the sulfur. The fact that the values are slightly below zero and also lighter than those of sulfides in Cordilleran polymetallic ore deposits in other parts of the Yauli Dome (Moritz at al., 2001; Beuchat, 2003; Catchpole 2011) suggests that a small contribution of a bacteriogenic source is possible, probably small amounts of sulfur leached from framboidal pyrite in the Excelsior shales.

In conclusion, available results suggest that the Trapiche mineralization is a Ni-Co rich variety of Stage C Cordilleran polymetallic mineralization. Cooling and neutralization are the main processes

favoring precipitation of Ni and Co minerals in the epithermal environment (e.g. Jannson and Liu (2020), i.e., the same parameters that favor precipitation of the other metals of the polymetallic ores in the district. The fact that Zn-Pb-Ag veins outcropping at Andaychagua contain also high amounts of Ni (i.e., up to 600 ppm Ni, pXRF measurements NE of the Andaychagua vein), supports this view. High Ni-Co contents are known of other Miocene polymetallic deposits of magmatic-hydrothermal affiliation, as for example in Capillitas and Famatina (Argentina).

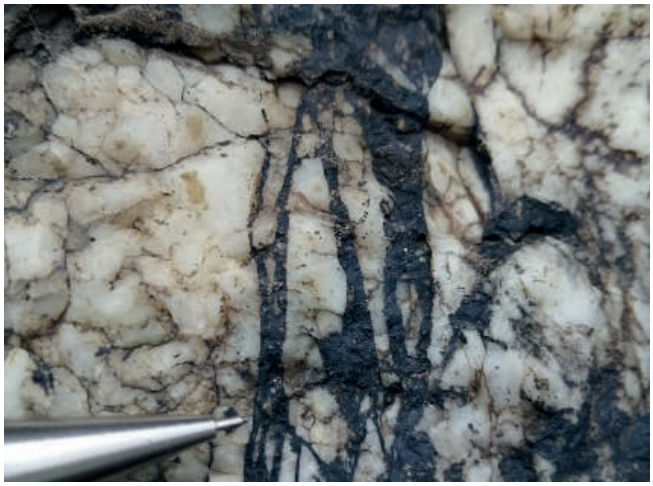


Fig 8. Veinlets of Mn-Ca-Mg-Fe carbonates and Nic-Co minerals crosscutting a metamorphic segregation vein of quartz.

The reason why the mineralization at Trapiche particularly Ni-Co rich is not known. As reviewed by Jannson and Liu (2020), saline oxidizing hydrothermal fluids have the potential of leaching Ni and Co of a variety of rocks. Leaching by Miocene hydrothermal fluids of Excelsior Devonian shales could be considered as Devonian reduced sediments with high Ni-Co contents have been described in Yukon and elsewhere (e.g., Peter et al., 2018, Gadd et al., 2020). However, the predominant magmatic sulfur isotope signature with $\delta^{34}S$ values close to zero that allow only a minor, if any, biogenic reduced sulfur contribution does not support extensive leaching of Excelsior shales as it could be expected if Excelsior shales were important metal contributors (for instance, the Yukon Ni-Co hyper-enriched shales are characterized by strongly negative $\partial^{34}S$ values, Gadd et al., 2019). Analyses of the Excelsior phyllites with Ni and Co values below 50 and 20 ppm, respectively, do not support this hypothesis either. Leaching of Excelsior mafic rocks or rather of other older mafic or ultramafic rocks by the Miocene hydrothermal fluids is a more plausible explanation. Leaching by hydrothermal fluids or incorporation in the magmatic system of basement ultramafic rocks is supported by the existence of Neoproterozoic ultramafic rocks with Cr- and Ni-Co occurrences in central Peru (Tassinari et al. 2011) and by the relatively high Pt contents of the Trapiche ore.

References

Acuña, S, Cajachagua, V., and Soto, G. 2008. Ocurrencias de Ni-Co en el Domo de Yauli – Junín. Proyecto Trapiche – Yuracgaga. CD Abstracts XIII Congreso Latinoamericano de Geología / XIV Congreso Peruano de Geología. Soc. Geológica del Perú, 6 p.

Bendezú, R., Fontboté, L. 2009. Cordilleran epithermal Cu-Zn-Pb-(Au-Ag) mineralization in the Colquijirca district, central Peru: Deposit-scale mineralogical patterns. Economic Geology, v. 104, 905-944.

Beuchat, S. 2003. Geochronological, structural, isotopes and fluid inclusion constraints of the polymetallic Domo de Yauli district, Peru. Université de Genève. PhD Thesis. Terre & Environnement, v. 41, 130 p.

Beuchat, S., Moritz R., Pettke T. 2004. Fluid evolution in the W-Cu-Zn-Pb San Cristobal vein, Peru: Fluid inclusion and stable isotope evidence Chemical Geology, v. 210, p. 201-224.

Boucot, A.J., Isaacson, P.E., Laubacher, G., 1980. An early Devonian, eastern Americas realm faunule from the coast of southern Peru. Journal of Paleontology 54, 359-365.

Catchpole, H. 2011. Porphyry-related polymetallic mineralisation in the Morococha district, central Peru: Mineralisation, styles, timing and fluid evolution: Terre & Environnement, v. 102, 192 p.

Catchpole, H., Kouzmanov, K., Bendezú, A., Ovtcharova, M., Spikings, R., Stein, H., Fontboté, L. 2015a. Timing of porphyry (Cu-Mo) and base metal (Zn-Pb-Ag-Cu) mineralisation in a magmatic-hydrothermal system-Morococha district, Peru. Mineralium Deposita, 2015, vol. 50, p. 895-922.

Catchpole, H., Kouzmanov, K. Putlitz, B., Fontboté, L. 2015b. Zoned base metal mineralization in a porphyry system: Origin and evolution of mineralizing fluids in the Morococha District, Peru. Economic Geology, 2015, v. 110, p. 39-71.

Chew D.M., Pedemonte G., Corbett E. 2016. Proto-Andean evolution of the Eastern Cordillera of Peru. Gondwana Res., v. 35, p. 59-78.

Fontboté, L. 2020. Systematic trends in the evolution of porphyry-related Zn-Pb-(Ag) deposits. Swiss Geoscience Meeting, Zurich, p. 40-41.

Gadd, M. G., Peter, J. M., Hnatyshin, D., Creaser, R., Gouwy, S., Fraser, T. 2020. A Middle Devonian basin-scale precious metal enrichment event across northern Yukon (Canada). Geology, v. 48, p. 242–246.

Gadd, M.G., Peter, J.M., Fraser, T.A., and Layton-Matthews, D. 2020 Lithogeochemical and sulphur isotope indicators of environment of formation and genesis of the Moss hyper-enriched black shale showing, Yukon. In Rogeres, N. (ed.:) Targeted Geoscience Initiative: 2018 report of activities. Geological Survey of Canada, Open File 8549, p. 163–178.

Haggan, T., Parnell, J. 2000. Hydrocarbon–metal associations in the Western Cordillera, Central Peru. Journal of Geochemical Exploration, v. 69-70, p. 229–234.

Harrison, J.V. 1943. The geology of the central Andes in part of the Province of Junín, Peru (Final Report). Boletín de la Sociedad Geológica del Peru v. 16, p. 7–97.

Jansson, N.F., and Liu, W. 2020. Controls on cobalt and nickel distribution in hydrothermal sulphide deposits in Bergslagen, Sweden - constraints from solubility modelling: GFF, v. 142, no. 2, p. 87–95

Kobe H.W. 1982. A strata-bound Ni-Co arsenide/sulphide mineralization in the Paleozoic of the Yauli Dome, Central Peru. In: Amstutz GC et al. (eds) Ore genesis - the state of the art. Springer, Berlin Heidelberg New York Tokyo, p. 150-160.

Kobe H.W. 1990a. Metallogenic evolution of the Yauli Dome, central Peru. In: Fontboté L., Amstutz G.C., Cardozo M., Cedillo E., Frutos J. (eds) Stratabound ore deposits in the Andes. Special Publication Nr. 8 of the Society for Geology Applied to Mineral Deposits, Springer, Berlin, Heidelberg, p. 113-122.

Kobe H.W. 1990b. Stratabound sulfide occurrences in the Paleozoic of the Yauli Dome, central Peru. In: Fontboté L., Amstutz G.C., Cardozo M., Cedillo E., Frutos J. (eds) Stratabound ore deposits in the Andes. Special Publication No. 8 of the Society for Geology Applied to Mineral Deposits, Springer, Berlin, Heidelberg, p. 150-160.

Moritz, R., Beuchat, S., Chiaradia, M., Sallier, B., Lisboa, H., Stucky, P. 2001. Zn – Pb mantos and veins at Domo de Yauli, Central Peru: two products of one hydrothermal system with common Pb and S sources, but contrasting fluid inclusion characteristics. In: 6th SGA Biennial Meeting, Krakow, Poland, Balkema, Netherland, p. 173–176

Newell, N.D. (1949) Geology of the Lake Titicaca region, Perú and Bolivia. Geological Society of America, Memoir 36,142 p.

McLaughlin, D.H. 1924. Geology and physiography of the Peruvian Cordillera. Departments of Junín and Lima. Geological Society of America Bulletin, v. 35, p. 591-632.

Oldham, L., Dávila, D., Puma, Z. 2008. Exploración geológica Proyecto Trapiche (Yacimiento Ni-Co). Consultora Minera Anglo-Peruana. Unpubl. internal report to Volcan Cía. Minera, 105 p.

Paar, W.H., de Brodtkorb, M., Putz, H., Martin, R.F. 2016. Atlas of ore minerals: Focus on epithermal deposits of Argentina, Mineralogical Association of Canada, Special Publ., v. 11, 400 p.

Peter, J.M, Gadd, M.G., and Layton-Matthews, D., 2018. Textural and mineralogical characterization of a Ni-Zn-rich black shale occurrence at the Akie property, Kechika Trough, northern British Columbia, and comparison with examples from Yukon. Geological Survey of Canada Open File Report 8358, p. 207-216.

Rosas, S., Muñoz, C., Acuña, G., Cajachagua, V. 2010. Caracterización sedimentológica y geoquímica de las rocas carbonatadas Paleozoicas relacionadas a la mineralización de Ni y Co de la zona de Yuraccgaga-Trapiche (Domo de Yauli-Perú central). Extended abstracts. XV Congreso Geol. Peruano, 4 p.

Rottier B., Kouzmanov, K., Casanova, V., Wälle, M., Fontboté, L. 2018. Cyclic dilution of magmatic metal rich hypersaline fluids by magmatic low-salinity fluid: A major process generating the giant epithermal polymetallic deposit of Cerro de Pasco, Peru. Economic Geology, 113, 825–856.

Saintilan, N., Sproson, A.D., Selby, D., Rottier, B., Casanova, V., Creaser, R.A., Kouzmanov, K., Fontboté, L., Piecha, M., Gereke, M., and Zambito, J.J., 2021, 1 Osmium isotopic constraints on sulphide formation in the epithermal environment of magmatic-hydrothermal mineral deposits: Chemical Geology, v. 564, no. 120053.

Tassinari, C.C.G., Castroviejo, R., Rodrigues, J.F., Acosta, J., and Pereira, E. 2011. A Neoproterozoic age for the chromitite and gabbro of the Tapo ultramafic Massif, Eastern Cordillera, Central Peru and its tectonic implications: Journal of South American Earth Sciences, v. 32, p. 429–437.

MIERCOLES 24

Historia de la Exploración y Geología del depósito de pórfido Cu-Mo-Au de Cobre Panamá, Panamá

Juan Burlando

Firts Quantum Mineral
Torre de Las Américas. Torre A. Piso 21 – Iguana Mall, Penonomé – Donoso, Colón
juan.burlando@fqml.com

Abstract

Cobre Panamá es actualmente una mina en operación con reservas probadas y probables de 3,143.7 Mt @ 0.38% Cu, 59 ppm Mo, 0.07 g/t Au, 1.37 g/t Ag; por un total aproximado de 12 Mt de Cu contenido y 7.1 Moz Au. La presentación abarcará la historia desde su descubrimiento por la Naciones Unidas en 1968, pasando por las distintas etapas de exploración hasta llegar al estado actual de mina en producción comercial. También se presentarán detalles sobre la geología y mineralización del proyecto.

A common hydrothermal magmatic system generates different styles of gold mineralization at Algamarca and Shahuindo, Northern Peru

Renzo Galdos[1], Jean Vallance[1], Patrice Baby[2], Gleb S. Pokrovski[2]

[1] Facultad de ciencias e ingeniería, Especialidad Ingeniería Geológica, Pontificia Universidad Católica del Perú Av. Universitaria 1801, San Miguel, Lima 15088, Perú. E-mail: rgaldosp@pucp.edu.pe
[2] Groupe Métallogénie Expérimentale, Géosciences Environnement Toulouse (GET), UMR 5563, Observatoire Midi-Pyrénées, Université de Toulouse, Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS), Institut de Recherche pour le Développement (IRD), 14, Avenue Edouard Belin, F-31400 Toulouse, France

1 Abstract

Algamarca and Shahuindo are two neighboring intermediate-sulfidation Au-Ag epithermal deposits of Miocene age located in the Marañon fold and thrust belt in the north of Peru, hosted in sedimentary sequences rich in carbonaceous matter of the Goyllarisquizga Group. These two deposits show strongly different styles of mineralization. At Algamarca, mineralization is expressed by up to 2 m-thick veins of quartz and sulfide minerals, with native gold content, traces of gold telluride minerals and possibly invisible gold in arsenical pyrite. In contrast, at Shahuindo, disseminated and replacement sulfide mineralization dominates, with gold exclusively present as invisible gold in arsenical pyrite and arsenopyrite. Algamarca and Shahuindo deposits show, however, similarities in age and paragenetic sequences that strongly suggest they were formed at the same time and were part of the same magmatic-hydrothermal system.
KEYWORDS: Arsenical pyrite; Invisible gold; Native gold; Intermediate-sulfidation deposit.

2 Resumen

Un mismo sistema magmático hidrotermal generó distintos estilos de mineralización aurífera en Algamarca y Shahuindo, Norte de Perú
Algamarca y Shahuindo son depósitos contiguos de oro y plata, de sulfuración intermedia, del Mioceno, están ubicados en la faja corrida y plegada del Marañón al norte de Perú y están hospedados en las secuencias sedimentarias, ricas en materia orgánica, del grupo Goyllarisquizga. Estos dos depósitos muestran diferentes estilos de mineralización, Algamarca consiste en vetas de cuarzo y sulfuros de hasta 2m de potencia, donde el oro se presenta bajo la forma de oro nativo, teluros de oro a nivel de trazas y además se infiere la presencia de oro en pirita arsenical; mientras que en Shahuindo, la mineralización se encuentra como sulfuros diseminados o de remplazamiento y el oro se presenta únicamente como oro invisible en pirita arsenical y arsenopirita. Sin embargo, Algamarca y Shahuindo muestran similitud en edad y en sus características mineralógicas y paragenéticas, indicando que se formaron coetáneamente y son probablemente parte de un mismo sistema magmático hidrotermal.

3 Introduction

The Marañon fold and thrust belt of Northern Peru hosts various porphyry-to epithermal-style gold deposits of Miocene age. Some of these deposits (e.g., La Arena, Lagunas Norte, Fig. 1), hosted by sedimentary sequences rich in organic matter of the Goyllarisquizga Group, are known as the metallogenic belt XXIA (Acosta et al., 2009). Algamarca and Shahuindo are two intermediate-sulfidation epithermal deposits that are part of this belt and are just ~2 km one from another (Fig. 1).
At Algamarca, mining has started since the colonial period (Defilippi et al, 2012) and continued more recently, between 1940 and 1989, with 1.5 million tons of ore grading 2.0% Cu and 680 g Ag/t with “some gold” extracted (Saucier and Poulin, 2004). Mineralization consists of veins of 0.1 to 2 m filling NE-SW to E-W strike faults, cutting the Chimu bedded quartzite of the NW-SE Algamarca anticline. The veins are filled mainly by quartz, chalcopyrite, tetrahedrite-tennantite, and pyrite

(Tumialan, 2003). Sphalerite, galena, bornite, and enargite were also reported (Reyes, 1980; Sánchez, 2012; Defilippi et al., 2016). The underground mine is currently worked by small-scale miners. The main mineralized structure is known as the Descubridora vein where punctual values of 8.4 g/t Au, 2058 g/t Ag, and 13.3% Cu were reported (Defilippi et al., 2016). A K-Ar age of 15.5±0.4 Ma was reported by Noble and McKee (1999) from hydrothermal muscovite bordering a polymetallic vein.

At Shahuindo, exploration started in the 1980s and the gold production started in 2016. Proven plus probable reserves are of ~55 t Au (1,763 koz Au) at 0.46 g/t (Cesar Alvarez, 2019 pers. comm.). The mineralization is expressed as disseminations and replacements in the Carhuaz and Farrat sandstone to siltstone Formations and, to a lesser extent, within andesitic to dacitic intrusives and as massive pyrite bodies at the intrusive contacts. Pyrite is the most abundant sulfide mineral and occurs together with lesser amounts of chalcopyrite, arsenopyrite, pyrrhotite, sphalerite, galena, tetrahedrite-tennantite and enargite, white mica is the main gangue mineral with scarce carbonate and quartz. Pre-ore andesitic to dacitic intrusives were dated to 26 and 16 Ma, respectively, using the U-Pb method on zircon (although no error margins reported; Bussey and Nelson, 2011). These similar ages suggest that the two deposits formed at ca. 15.5 Ma similarly to other intermediate-sulfidation deposits of the same belt like Quiruvilca from 15.18± 0.08 to 15.41± 0.13 Ma or Las Princesas 15.69 ± 0.07 Ma, estimated using $^{39}Ar/^{40}Ar$ data from hydrothermal minerals (Montgomery, 2012).

4 Sampling and methods

Twenty polished sections were studied: 7 samples from Algamarca, from dumps and ore load of underground mining works in Alisos and San Blas veins, and 13 samples from Shahuindo, from drill cores. A detailed mineralogical study has been performed using optical microscopy combined with Scanning Electron Microscope (SEM) at PUCP University, Lima. Quantitative analyses, Electron Probe Microanalyses (EPMA) of pyrite, arsenopyrite, marcasite, sphalerite, chalcopyrite, tennantite-tetrahedrite and enargite were performed by CAMECA SXFive instrument at the Centre of Microcaractérisation R. Castaing (Toulouse, France).

5 Results

Petrography

At Algamarca, veins show crustiform banding and breccias, textures of open space precipitation, with abundant, up
to 4-mm-size, euhedral quartz intergrown with pyrite (Py-C) of the same size; grains of native gold up to 20 µm across were identified in 3 polished sections. They mainly fill micro fractures in tetrahedrite, or at the contact between chalcopyrite and tetrahedrite grains. At Shahuindo, ore is mainly present as sulfides with replacement textures or as disseminations, the host rock permeability controls the gold mineralization, presents scarce quartz up to 250 µm in size. Native gold or electrum have not been observed. Based on the analytical data obtained, the paragenetic sequences of Algamarca and Shahuindo have been established (Fig. 1). Both show several generations of pyrite, 3 at Algamarca (Py-A, Py-B, and Py-C) and 4 at Shahuindo (Py-I, Py-II, Py-III, and Py-IV) where the most recent generations overgrowed or replaced earlier ones. Diagenetic pyrite was only observed at Shahuindo (Py-I). Both sequences exhibit an As-rich pyrite stage, Py-B at Algamarca and Py-III at Shahuindo, the main gold carrier mineral in this deposit (Vallance et al., 2019). Followed by a Cu-Ag stage dominated by chalcopyrite and tetrahedrite. Late minerals like sphalerite and enargite previously reported at Algamarca (Reyes 1980, Sanchez 2012 and Defilippi et al 2016) and identified at Shahuindo were not found in our Algamarca's samples.

Compositional data

Native gold at Algamarca contains 13.9 wt% Ag (on average). The generations of pyrite with highest As concentrations are Py-B at Algamarca with a mean value of 2.3 wt%, and Py-III at Shahuindo with a mean value of 1.8 wt%. At Algamarca and Shahuindo, all tetrahedrite is systematically Fe-rich with values from 1.1 to 2.2 apfu, with tetrahedrite at Shahuindo being more enriched in Zn and Ag than at Algamarca. Ag was not detected in enargite and tennantite (detection limit 0.2 wt%), while in tetrahedrite the values reached 1.6 and 5.9 wt% at Algamarca and Shahuindo, respectively.

6 Discussion and conclusions

The spatial proximity, age and paragenetic sequence similarities, all indicate that both Algamarca and Shahuindo are related to the same magmatic-hydrothermal center. However, although

they were generated from a common source, they do show strongly different mineralization styles. At Algamarca, ore occurs as veins with typical textures of open space precipitation, gold is present as native gold and as gold-telluride minerals. Arsenical pyrite occurs in a similar position as at Shahuindo and it is expected to host bound gold (LA-ICP-MS analysis are in progress to evaluate its gold content). The main and most common Au ore-bearing minerals in epithermal deposits are known to be electrum, native gold, and Au tellurides (White and Hedenquist, 1995; Simmons et al., 2005), but arsenical pyrite has also been recognized as an important gold carrier in many cases (e.g., Reich et al., 2005; Deditius et al., 2014; Morishita et al. 2018; Sykora et al., 2018; references therein). Efficient gold scavenging by pyrite and arsenopyrite may occur from low-concentrated fluids undersaturated with respect to metallic gold, whereas native gold precipitation requires much more Au-concentrated fluids. Thermodynamic modeling of fluid-rock interactions at Shahuindo indicates that carbonaceous matter favor gold transport in chemically reactive few competent carbonaceous-bearing rocks (Vallance et al., 2019). By contrast, we infer that in Algamarca in highly competent and less reactive rocks other gold transport and mechanisms (e.g. uptake of reduced sulfur from the fluid related to sulfide precipitation) lead to native gold precipitation. Our findings highlight the importance of further studies such as fluid inclusions, stable isotopes, geochronology and, most importantly, the true state of this bound gold in the mineral that can only be assessed by direct in situ techniques (synchrotron), coupled with the full range of more traditional microanalytical methods, to understand the respective gold transport, deposition, at Shahuindo and Algamarca. Our results show an example of different styles of gold epithermal mineralization present in a same hydrothermal-magmatic system; they thus offer important perspectives for improving exploration models for gold mineralization in Northern Peru.

Acknowledgements

This work was funded by the Institut Carnot ISIFoR (Grant OrPet) and the CONCYTEC-FONDECYT (project 425-2019). We thank A. Marquet and S. Gouy for the LA-ICP-MS and EPMA analysis. We are grateful to C. Alvarez, R. Alva, and R. Vilchez of Pan American Silver Corp. for their professional help and assistance in the field.

References

Acosta, J., Rivera, R., Valencia, M., Chirif, H., Huanacuni, D., Rodríguez, I., Villareal, E., Paico, D., Santisteban, A., Santisteban, A., 2009, Memoria mapa metalogenético del Perú 2009. Instituto geológico minero y metalúrgico (INGEMMET), Perú, 17 p.

Bussey, S., Nelson, E., 2011, Geological analysis of the Shahuindo district, Cajabamba Province, Peru. Prepared by Western Mining Services LLC for Sulliden Gold Corporation.

Defilippi, C., Dyer, T., Tietz, P., 2012, Technical Report on the Shahuindo Heap Leach Project Cajabamba, Peru. NI 43-101 Technical Prepared for Sulliden Gold Corporation, Ltd, 420 p.

Defilippi, C., Muerhoff, C., Williams, T., 2016, Technical Report on the Shahuindo Mine, Cajabamba, Peru. NI 43-101 Technical Report for Tahoe Resources, 307 p.

Deditius, A., Reich, M., Kesler, S., Utsunomiya, S., Chryssoulis, S., Walshe, J., Ewing, R., 2014, The coupled geochemistry of Au and As in pyrite from hydrothermal ore deposits. Geochimica et Cosmochimica Acta, v. 140, p. 644-670.

Eude A., 2014, La croissance des Andes centrales du nord du Pérou (5-9°S): Propagation d'un prisme orogénique dans un contexte d'héritage tectonique et de subduction plane. Unpublished Ph.D. thesis, Toulouse, France, Paul Sabatier University, 323 p. https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01080498.

Montgomery, A., 2012, Metallogenetic controls on Miocene high sulphidation epithermal gold mineralization, Alto Chicama district, La Libertad, Northern Peru. Unpublished PhD dissertation Department of Geological Sciences and Geological Engineering. Kingston, Queen's University. 382 p.

Morishita, Y., Shimada, N., Shimada, K., 2018, Invisible gold in arsenian pyrite from the high-grade Hishikari gold deposit, Japan: Significance of variation and distribution of Au/As ratios in pyrite.Ore geology reviews, v. 95, p. 79-93.

Noble, D., McKee, E., 1999, The Miocene metallogenic belt of central and northern Peru. Soc. Economic Geology Special Publication 7, p. 155–193.

Reich, M., Kesler, S., Utsunomiya, S., Palenik, C., Chryssoulis, S., Ewing, R., 2005, Solubility of gold in arsenian pyrite. Geochimica et Cosmochimica Acta, v. 69, p. 2781-2796.

Reyes, L., 1980, Geología de los cuadrángulos de Cajamarca, San Marcos y Cajabamba. Instituto geológico minero y metalúrgico (INGEMMET), Perú, 75 p.

Sánchez Rodas Ramón. (2012), Determinación de los vectores de mineralización y zonamiento de alteraciones hidrotermales del proyecto Shahuindo-Perú, Facultad De Ingeniería. Universidad nacional de Cajamarca, p 48.

Saucier, G., and Poulin, L., 2004, Resources Estimation, Shahuindo Project, Peru, prepared for Sulliden Exploration by Met-Chem Canada Inc.

Simmons, S., White, N., John D., 2005, Geological characteristics of epithermal precious and base metal deposits. v. 100th anniversary, p. 485-522.
Sillitoe, R., 2010, Porphyry copper systems. Economic geology, v. 105, p. 3-41.
Sykora, S., Cooke D., Meffre, S., Stephanov A., Gardner, K., Scott R., Selley D., Harris, A., 2018, Evolution of pyrite trace element compositions from porphyry-style and epithermal conditions at the Lihir gold deposit: Implications for ore genesis and mineral processing. Economic Geology, v. 113, p. 193-208.
Tumilan, P., 2003, Compendio de yacimientos minerales del Perú – Boletín 10. Instituto geológico minero y metalúrgico, Perú, 619 p.
Vallance, J., Balboa, M., Berna, B., Baya, C., Baby P., Pokrovski, G., 2019, Links between organic matter and gold-bearing arsenian pyrite at Shahuindo (Cajamarca, Peru): an integrated analytical and modeling study. XI congreso internacional de prospectores y exploradores, Extended Abstracts, Peru, 5 p.
White, N., Hedenquist J, 1995, Epithermal gold deposits: styles, characteristics, and exploration. SEG newsletter, v. 23 p. 9-13.

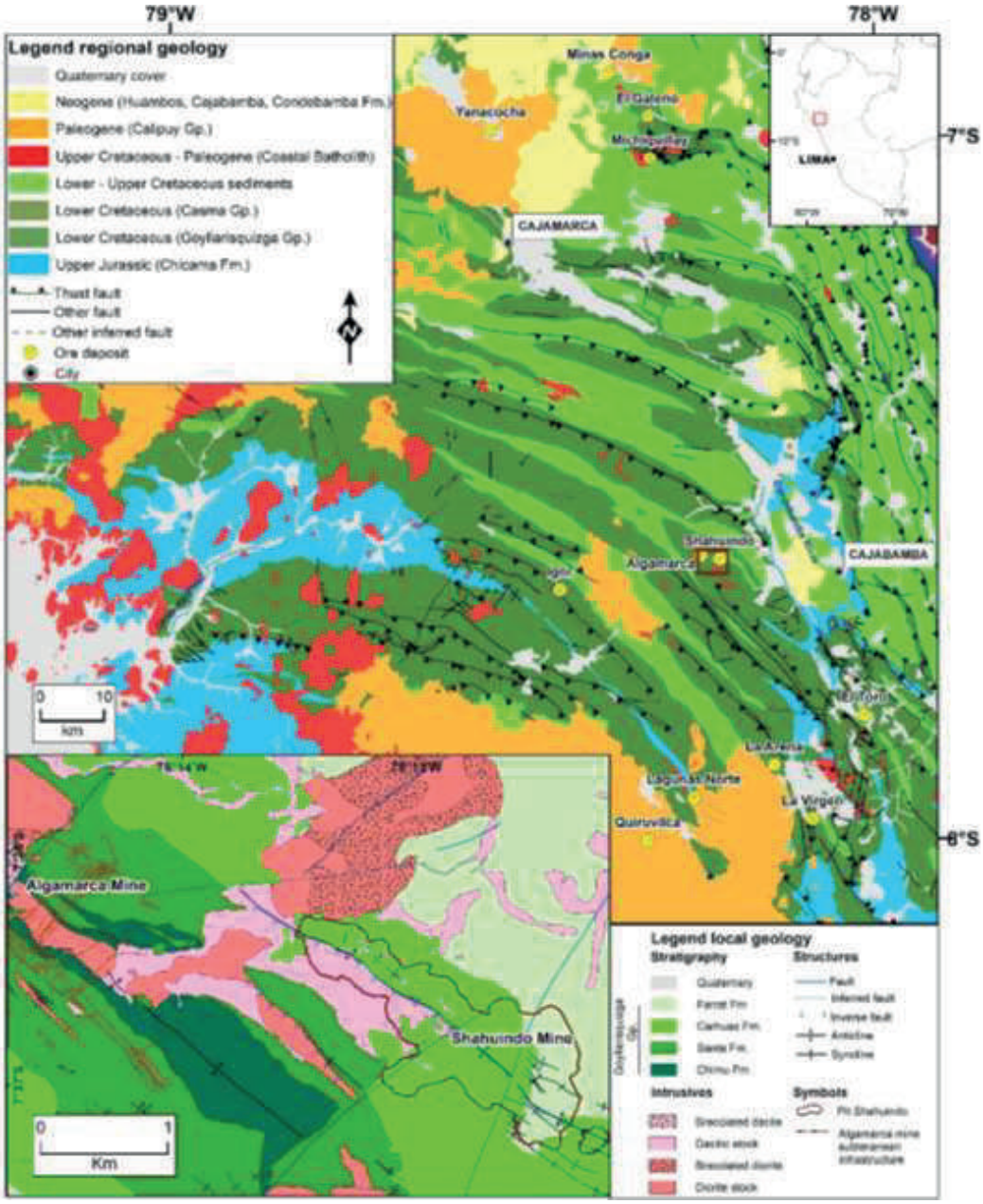


Fig.1. Geological map of the Marañon Fold and Thrust Belt in northern Peru with location of major deposit and projects, modified from Eude (2014). Inset: Geological map of the study area with location of the Shahuindo open pit and the former Algamarca mine (Pan American Silver, 2019).

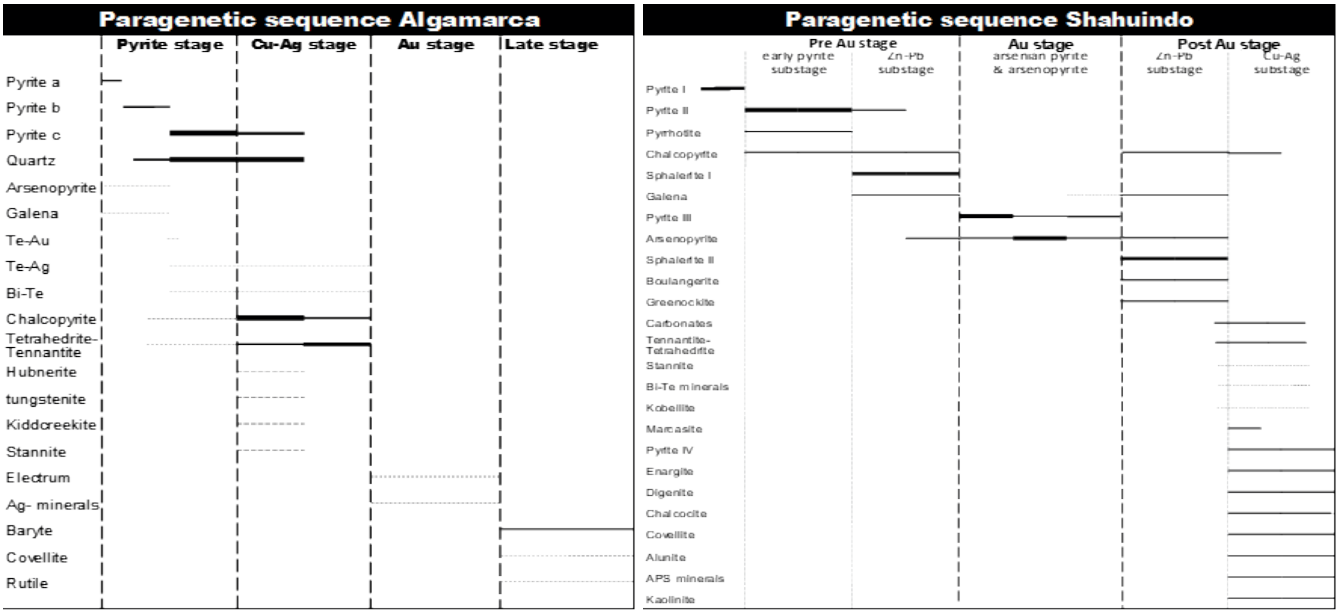


Fig. 2. Paragenetic sequences for Algamarca and Shahuindo.

Cerro Corona: Evolución de los modelos geológicos, vectorización geofísica y sus implicancias para el incremento de recursos minerales de Cu y Au más allá del 2030

Juan Carlos Sarmiento[1], Edwin Ayala[2], Efrain Ugarte[3], Gabriel Becerra[4] y Paul Gomez[5]

[1, 2, 3, 4, 5] Gold Fields, Av. 28 de Julio N° 1150, Oficinas 201-202, Lima, Perú.

[1] Juan.Sarmiento@goldfields.com; [2] Edwin.Ayala@goldfields.com; [3] Efrain.Ugarte@goldfields.com
[4] Gabriel.Becerra@goldfields.com; [5] Paul.Gomez@goldfields.com

Resumen
Cerro Corona (CC), a escala distrital, constituye un "cluster" de pórfidos de Cu-Au, que se caracterizan por ser polifásicos, bimodal y estar preservados. Se asocian a la actividad magmática calco-alcalina entre los 15Ma a 13.5Ma, dichos intrusivos se emplazaron en una cuña tectónica regional y en un régimen transpresivo.
Cerro Corona es un depósito tipo pórfido de Cu rico en Au, se ha minado y explorado solo 500 metros del sistema porfídico, teniendo todavía un alto potencial exploratorio y minero, que está abierto.
La re-interpretación y vectorización no-convencional de los modelos geológicos 3D junto a los modernos estudios de IP profundo y Magneto Telúricos (MT), ayudaron a definir 08 targets de perforación. En la última campaña, se completó 11,665m de perforación en dos targets, siendo el target de la zona Este del tajo el que incorporo, en el 2019, los principales recursos de Au y Cu.
En el tajo, a diciembre del 2019 se cuenta con recursos minerales, dentro del cono, en el orden de 107.22 Mt @ 0.58 g/t Au y 0.36 % Cu, los que corresponden a un incremento del 3%, que podría ampliar la vida de la mina hasta el año 2032.

Summary
At Cerro Corona, on a district scale, the Cu-Au porphyry cluster is characterized for having polyphasics, bimodals, and preserved intrusions. These pulses are associated with calca-alkaline magmatic activity between 15Ma to 13.5Ma, which were located in a regional tectonic wedge at a transpressive régime.
Cerro Corona is a Cu-Au porphyry deposit, that is rich in gold, and it has been explored and mined at the upper portion, 500 meters of the porphyry system, having a high exploratory and mining potential.
The re-interpretation and an unconventional vectoring of 3D geological models together with modern deep IP & MT studies, helped define 08 drilling targets. In the last campaign, 11,665m was completed at two of these targets. Being the eastern-wall target that incorporated new mineral resources of Au and Cu in 2019 at Cerro Corona.
In the open pit, as of december 2019, the mineral resources, within the shell pit is in the order of 107.22Mt @ 0.58g/t Au and 0.36% Cu, which represent increase of aproximately 3% respect to the previous years, that will probably increase the life of the mine towards 2032.

1. Distrito Minero de Hualgayoc

En el distrito de Hualgayoc de la provincia de Cajamarca, Norte de Perú, durante el Mioceno se han emplazado una serie de intrusiones, subvolcánicas y facies volcánicas dentro de una secuencia sedimentaria silicoclástica y calcárea del Cretácico (Wilson, 1984). El basamento cretácico, entre 135 Ma a 91 Ma, está constituido de 300m de areniscas cuarzosas y lutitas del Grupo Goyllarisquizga. En discordancia sobreyacen horizontes delgados de lutitas y limonitas de la Formación Inca, seguida de 320m de calizas nodulares y margas de la Formación Chulec, calizas bituminosas y lutitas negras de la Formación Pariatambo y finalmente se depositaron 400m de

capas de calizas grises y delgados niveles de lutitas de la Formación Yamagual.

Las secuencias cretácicas se plegaron formando sinclinales y monoclinales N 40° - 60° O con vergencias al Sur (NE del pueblo de Hualgayoc). Distritalmente se ha reconocido tres principales sistemas estructurales, formados y reactivados durante todo el Mioceno: (1) Fallas regionales sinestrales e inversas N 30° - 60° O; (2) Sistemas de fallas kilométricas, dextrales, de orientación NE - SO. Estos dos sistemas controlan el emplazamiento de los sistemas, complejos y polifásicos, de pórfidos de Cu - Au de Cerro Corona (14.4 Ma), Cerro Jesús, Las Gordas (14.3 Ma); así como formación del batolito de San Miguel y el emplazamiento de los stocks y domos relacionados a los depósitos, erosionados, epitermales de alta sulfuración de Au, Ag, Cu de Tantahuatay (12.4 Ma), Ciénaga (12.7 Ma) y Peña de las Águilas (13.3 Ma). El tercer sistema, se formó en régimen transtensivo, es contemporáneo con la apertura / reapertura de fallas secundarias de orientación E-O, que son de carácter sinestral y dextral, estas controlan la mineralización polimetálica y argentífera de los depósitos de Carolina y Hualgayoc; así como la formación de vetas y cuerpos de enargita - pirita en San Nicolás y otros en Tantahuatay.

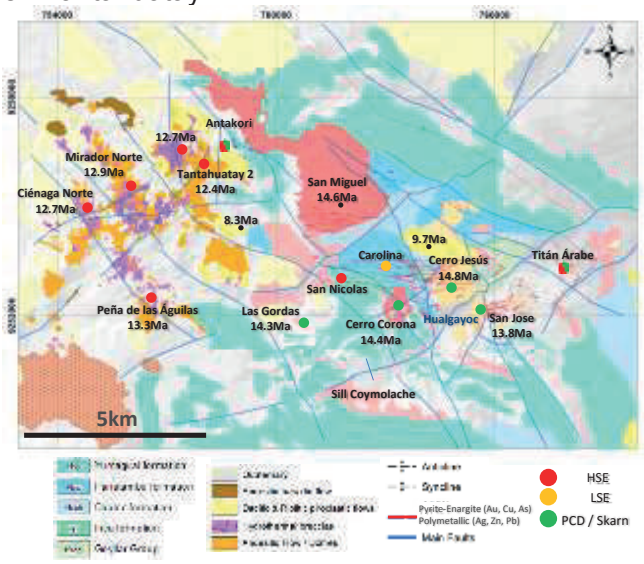


Figura N° 01. Mapa geológico distrital

Hualgayoc tiene una compleja y extensa huella hidrotermal que cubre 17Km por 7Km en dirección NO - SE. La producción histórica de Ag se remonta a la Colonia y hasta finales del Siglo XX, esta produjo +225M oz Ag y presentando +20M oz Ag equivalente, en recursos potenciales, aún por extraer. Las dos últimas décadas la producción de Au, Cu y Ag se realiza en tajos abiertos. La unidad minera de Tantahuatay tiene una planta de 36 ktpd, produjo hasta el 2019 ~1.2M oz Au y ~6.5M oz Ag en óxidos, por lixiviación en pilas, y la unidad de Cerro Corona produjo 4.27M oz Au y 1627M lb Cu en sulfuros en una planta de flotación de 20 ktpd.

1.1. Fertilidad magmática distrital

La actividad magmática calco-alcalina en el distrito fue estudiado desde la década de los 80, considerando el inicio en el Paleoceno.

Nuevas dataciones de U/Pb en zircones (Viala et al; 2019) indican un magmatismo continuo desde 14.8 Ma a 9.7 Ma, con una pausa entre 11 Ma y 10 Ma. En Cerro Corona, Cerro Jesús, Cerro Quijote y las Gordas el magmatismo relacionado a pórfidos de Cu - Au oscila entre ~15 y 13.5Ma. El magmatismo relacionado a domos / subvolcánicos, asociado a los sistemas, complejos, epitermales de alta sulfuración y potenciales skarn y pórfidos de Tantahuatay, Ciénaga y Antakori, tiene una edad de 13.5 Ma a 12 Ma. Domos y coladas riolíticas de 9.7 Ma a 8.3 Ma son post mineral, representan el fin de la actividad magmática en el distrito. Las intrusiones porfídicas mineralizadas tienen un ratio de Ce^{4+}/Ce^{3+} más alto que las intrusiones estériles, este ratio podría discriminar intrusiones que pueden ser potencialmente fértiles para pórfidos de Cu – Au para magmas oxidados.

2. Evolución de los modelos geológicos y geoquímicos en Cerro Corona

2.1. Geología Local (Figura N 02)

Cerro Corona se compone de seis eventos intrusivos de cuarzo diorita y diorita de texturas porfiríticas (Uzategui et. al, 2016), tienen forma cilíndrica sub-vertical con 80°- 85° al SE. El evento temprano es extenso, está en contacto con las calizas de la Formación Yamagual, que están marmolizadas y localmente se han formado cuerpos de exoskarn retrogrado con valores anómalos de Au y Cu, ubicados al Este del tajo.

Hay tres eventos intra mineral, estos contienen vetillas paralelas, en la parte alta, y “stockworks” conformados por vetillas de cuarzo - molibdenita (temprano); vetillas irregulares de magnetita - especularita - pirita - calcopirita ± bornita (Intermedio 1), vetillas de cuarzo - pirita - calcopirita con halos de sericita, clorita (Intermedio 2) y las vetillas de cuarzo - magnetita (tardío) cortanto a todas las preexistentes.

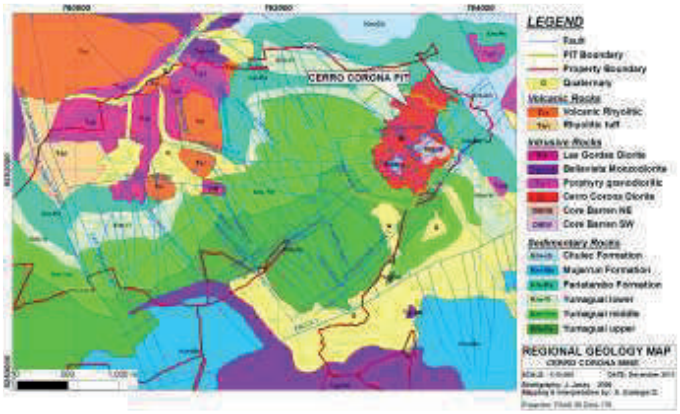


Figura N°02. Geología de Cerro corona

La zonación vertical de la alteración hidrotermal (Figura N° 03) empieza por la alteración potásica, temprana de alta temperatura y posterior la biotítica. La argílica 1 (cuarzo, illita, sericita, caolín, esmectita) y argílica 3 (cuarzo, montmorillonita, illita ± caolín), éstas dos se sobreponen a las alteraciones potásicas y se formaron por fluidos progrados de menor temperatura. Tardíamente ocurre la silicificación, controlada por estructuras verticales, está sobreimpuesta a las anteriores. La alteración Argílica 2 (Montmorillonita, clorita ± illita) es supérgena. En la base del sondaje más profundo, se evidencia una disminución de la intensidad de la alteración potásica temprana, superpuesta a una alteración calco-sódica. Actualmente más del 80% de los recursos se encuentran en la alteración potásica y silicificación.

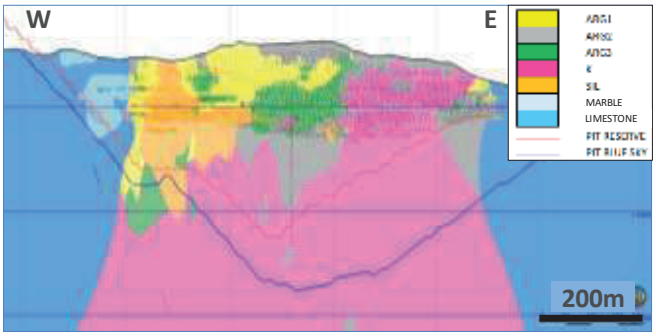


Figura N° 03. Sección E-O de alteración en CC

Cerro Corona presenta cuatro zonas de mineralización: supérgena, oxidación, transicional y zona hipógena, siendo esta última en actual producción. La mena en la zona hipógena consiste en calcopirita, con menor contenido de bornita. El oro esta principalmente como oro nativo y en pequeñas partículas de electrum (± 10%) asociado a calcopirita y pirita dentro de sus intersticios. La pirita está presente en todas las partes del depósito y no muestra una zonación como en otros pórfidos de Cu-Au (Baumgartner et al; 2016).

2.2. Distribución geoquímica

En las "Ore Zones" el Au (+ 0.3g/t) y Cu (+ 0.2%) se tiene una fuerte correlación positiva (Figura N° 04), se estima que se depositaron de manera gradual, entre los 350° - 400°C. Existen dos zonas de baja ley o "Barren Zones" relacionadas a pórfidos dioríticos tardíos, caracterizados por sus fenocristales de biotita.

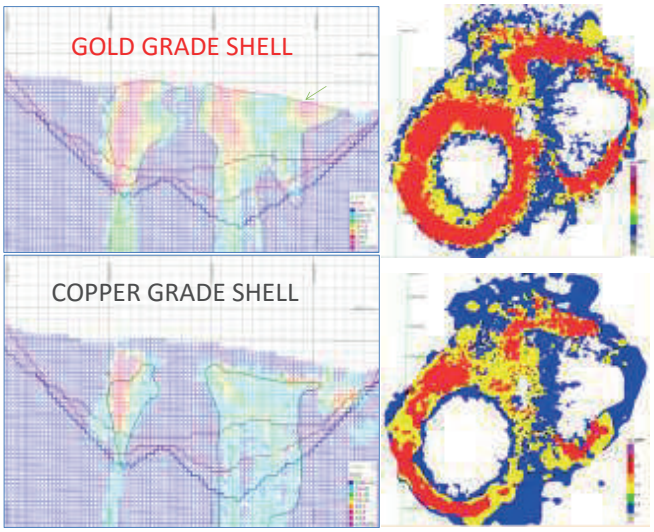


Figura N° 04. Distribución de Au y Cu en CC

El contenido de As es bajo, en promedio ~150ppm. La envolvente de As ≥ 60ppm muestra una distribución semi anular en la pared Oeste de tajo. Los valores de Sb y Ag están a nivel de trazas, estos tienen una correlación espacial positiva con el As, asociado más a enargita y tenantita. Los contenidos de Mo están a nivel de trazas.

3. Vectorización IP profundo & MT

3.1. IP profundo Orión Swath & MT

Cubrió 375 ha con 06 líneas maestras (N – S) dentro del tajo y sus alrededores (Figura N° 05). Se utilizó el método Orión Swath, el cual registró señales de IP (cargabilidad, resistividad - conductividad) de alta resolución hasta 800 m de profundidad y en paralelo se registraron señales magneto telúricas (MT) hasta 1500 m de profundidad. La primera fase del estudio se realizó dentro de las propiedades superficiales de Gold Fields.

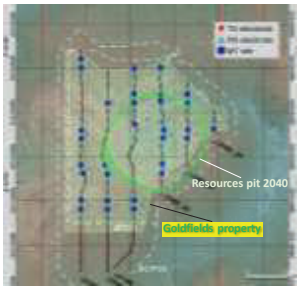


Figura N° 05. Ubicación de líneas geofísicas

3.2. Vectorización IP 3D inversión y MT

Los valores de alta conductividad (magenta, Figura N°07) o baja resistividad (<100ohm.m) se correlacionan directamente con el modelo de bloques de Cu de largo plazo. Las leyes de Cu mantienen una correlación moderada con la conductividad. Dos anomalías verticales de alta conductividad están ubicadas en la parte central del tajo relacionadas a la alteración silícea y potásica.

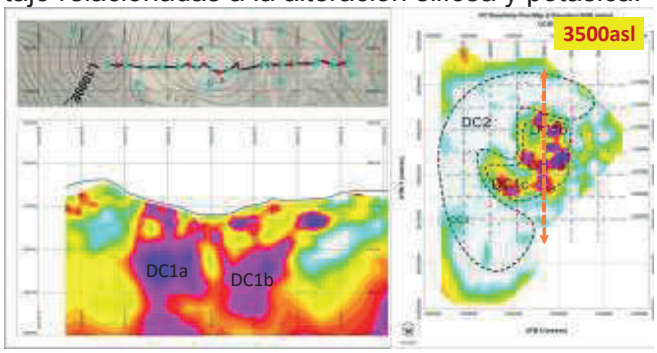


Figura N° 06. Anomalías de conductividad

Los valores altos de cargabilidad (10-60mrads) definen un cilindro vertical dentro del tajo, en la cota 3500msnm. La correlación de la alta cargabilidad es sutil con altos valores de Cu dentro del cono óptimo de recursos. La cargabilidad está limitada por la extensión del área que cubre la geofísica.

Las anomalías MT de conductividad, en color magenta (Figura N° 06), definen la continuación de la conductividad del IP 3D inversión por debajo de la cota 3200 msnm. Dos anomalías profundas, definen anillos verticales de orientación N - S, que parecen contornear un cambio de la alteración potásica interna y la mineralización (¿Zona de bornita?). Las altas conductividades del IP 3D inversión y MT tienen una inclinación de 80° - 85°SE, definiendo la inclinación del pórfido de Cerro Corona en la pared Este del tajo (Figura N°07).

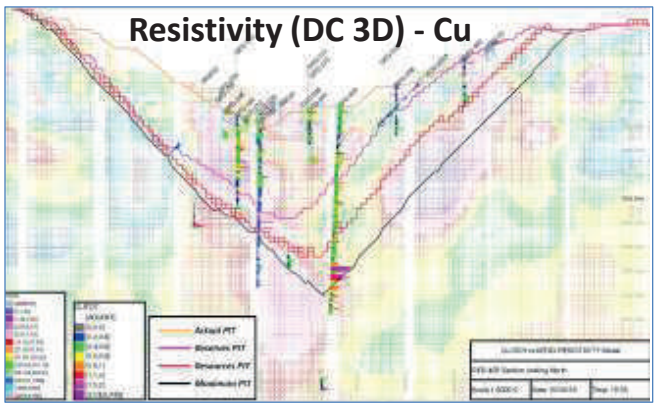


Figura N° 07. Sección E – O mirando al Norte. Valores de resistividad con leyes de Cu (%).

3.3. Targeting y potencial exploratorio

Se definió 08 targets de perforación (Figura N° 08). Los targets de primera prioridad están ubicados el Norte y Sur del tajo y están enfocados en generar nuevos recursos. Los targets de segunda prioridad tienen como objetivo incrementar recursos de Au y Cu y se exponen en la pared Oeste y Este del tajo (aquí se completó la última campaña de perforación). Las anomalías de conductividad y cargabilidad están abiertas al NE y SO. Finalmente, al Este se tiene una extensa anomalía resistiva somera (DC2), con moderada cargabilidad y está relacionada a las calizas Yamagual y diques dioríticos argilizados.

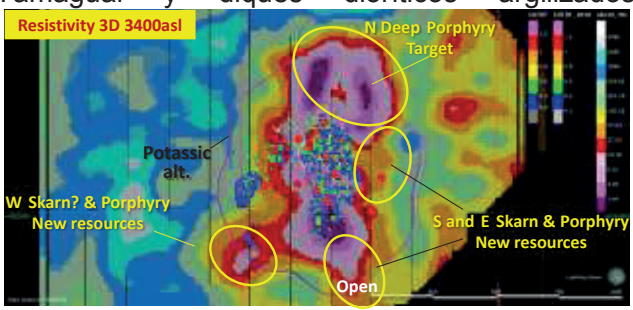


Figura N° 08. Targets de perforación en CC

4. Incremento de recursos de Au y Cu

Cerro Corona desde el 2008 hasta diciembre de 2018 ha producido 4.27M oz Au y 1627M lb Cu.

La última campaña de perforación termino en el primer semestre del año 2019 y se completaron 11 665 m. Se ha logrado incorporar nuevos recursos minerales, principalmente en la pared Este, representando un incremento de casi 3% en tonelaje y aproximadamente 1% en leyes de Au y Cu; en comparación al modelo de recursos del 2018

Los recursos minerales estimados a diciembre del 2019, dentro del cono, están en el orden de 107.22 Mt @ 0.58 g/t Au y 0.36 % Cu equivalentes a 2.07M oz de Au y 851M lb de Cu (www.goldfields.com), sin considerar los recursos de óxidos y “stockpiles” existentes.

Agradecimientos

Nuestro especial reconocimiento al Ingeniero Luis Rivera, presidente ejecutivo de Gold Fields Las Américas y a todo el equipo de Servicios Técnicos.

Referencias

Baumgartner, R., Gomez, P. and Escobar, G., (2016) Comprehensive Mineralogical Characterisation at the Cerro Corona Cu-Au Porphyry Mine – the Fundamental Key for Geometallurgical Applications: The third AUSIMM international Geometallurgy Conference, Perth, WA, Publ. Esp., p. 221-230.

Uzategui, A., Azan, J. y Ríos, H., (2016) Mineralización y fases intrusivas en el pórfido de cobre-oro-molibdeno de Cerro Corona: XVIII Congreso Peruano de Geología, resúmenes extendidos, Sociedad Geológica del Perú, 03 p.

Viala, M., Hattori, K., (2019) Temporal evolution of magmas associated with Au-Cu mineralization in the Hualgayoc Mining District, Northern Peru: Geological Association of Canada-Mineralogical Association, Quebec City, 2019 Annual Meeting.

Wilson, J., (1984) Geología de los cuadrángulos de Jayanca, Incahuasi, Cutervo, Chiclayo, Chongoyape, Chota, Celendín, Pacasmayo y Chepén: Ingemmet, Serie A, Boletín N° 38.

The San Francisco Gold-Silver-Copper Project, San Juan, Argentina – an example of a gold-rich intrusion-related tourmaline breccia system

El Proyecto de Oro-Plata-Cobre San Francisco, San Juan, Argentina – Un ejemplo de mineralización aurífera relacionada a sistemas de brechas de turmalina.

Rohan Wolfe[1], Chico Azevedo[1], Alex Santos[1], Carlos Medina[1], Paulo Lima[1], Neil Motton[2] and Doug Kirwin[3]

[1] Turmalina Metals, #488 – 1090 W. Georgia Street, Vancouver, Canada (info@turmalinametals.com)
[2] Consultant geologist, Melbourne, Australia (roxex2012@gmail.com)
[3] Consultant geologist, Bangkok, Thailand (djkdoug@gmail.com)

1. Abstract

Intrusion-related tourmaline breccias not obviously associated with porphyry copper systems are a subclass of tourmaline breccia that have not been widely reported in the academic literature. Intrusion-related tourmaline breccias are characterized by clusters of narrow, vertically-extensive downward-flaring tourmaline breccia pipes hosting a complex multi-element mineral assemblage (Au, Ag, Cu, Pb, Zn, Mo, Bi and W) with strong vertical zonation. Breccia clasts frequently exhibit decompressive shock textures and lack porphyry-type quartz veining. Exploration at San Francisco has defined a cluster of intrusion-related tourmaline breccia pipes, with drilling returning some of the highest gold-contents for this deposit style (i.e. 37m @ 6.3 g/t Au, 122 g/t Ag and 0.9 % Cu).

Resumen

Brechas de turmalina relacionadas a intrusiones, sin clara asociación con sistemas de pórfidos de cobre, son una subclase de brechas que no han sido ampliamente documentadas en la literatura académica. Estas brechas de turmalina tienden a ocurrir agrupadas en *clusters*, exhibiendo morfología de chimenea (*pipe*), con gran extensión vertical y ensanchándose conforme aumenta la profundidad. En términos de mineralización, las brechas de turmalina se caracterizan por una compleja asociación polimetálica (Au, Ag, Cu, Pb, Zn, Mo, Bi y W) que revela una fuerte zonación vertical. Los clastos de las brechas usualmente exhiben texturas de descompresión y carecen de vetillas de cuarzo tipo pórfido. La exploración en San Francisco ha identificado un conjunto de brechas *pipes* de turmalina relacionadas a rocas intrusivas, cuyos resultados de perforación arrojaron leyes de oro comprendidas entre las más altas reportadas para este estilo de depósito (por ejemplo, 37 m @ 6,3 g/t Au, 122 g/t Ag y 0,9% Cu).

2. Introduction

Turmalina Metal's 3405 ha San Francisco property (the 'Project') is located at approximately 30° 50' S, 69° 36' W in San Juan province, Argentina: approximately 130 km northwest from the capital of San Juan and 55 km north-northwest from the town of Calingasta.

The project is located in the eastern foothills of the Andes mountain chain at an elevation of 2300 to 3200 m RL. Access to the project is by 20 km of dirt road from a graded provincial road.

To date five companies have conducted small scale mining or exploration at the project. The largest mine, the San Francisco de Los Andes ('San Francisco') mine, operated sporadically from 1941 to late 1970's (Lara, 2009). Subsequent local private companies and the Mines Department of Argentina conducted mapping, sampling and drilling campaigns at the project, with a total of 9 holes drilled for a total of 740m.

Turmalina Metals ('Turmalina' or 'the company'), a Canadian explorer listed on the TSX Venture exchange, entered into an option agreement on the project with two private land holders in late 2018. In 2019 Turmalina drilled ten holes at the San Francisco mine, intersecting multiple high-grade gold-copper-silver intersections (Table 1). This was

followed up by a comprehensive mapping and sampling program over the entire project area, which identified over 60 breccia occurrences. As of July 2020 the company was conducting a follow up drill program at San Francisco and several newly identified breccia targets.

37 m @ 6.3 g/t Au, 122 g/t Ag & 0.9% Cu (8.7 g/t AuEq; SFDH-001)
85 m @ 4.4 g/t Au, 109 g/t Ag & 0.8% Cu (6.6 g/t AuEq; SFDH-002)
Including 22 m @ 6.6 g/t Au, 86 g/t Ag & 1.5% Cu (9.5 g/t AuEq)
51 m @ 3.6 g/t Au, 82 g/t Ag & 1.90% Cu (6.7 g/t AuEq; SFDH-003)
Including 26 m @ 5.5 g/t Au, 97 g/t Ag & 3.3% Cu (10.6 g/t AuEq)
85 m @ 2.6 g/t Au, 88 g/t Ag & 0.6% Cu (4.3 g/t AuEq; SFDH-005)
Including 21m @ 5.0 g/t Au, 173 g/t Ag & 0.8% Cu (8.0 g/t AuEq)
27 m @ 3.0 g/t Au, 124 g/t Ag & 0.4% Cu (4.8 g/t AuEq; SFDH-007)

Table 1 – drill intersections from the Turmalina Metals 2019 drill program at San Francisco.

3. Geology

3.1. Regional Geology

There are three major north–south-trending ranges in San Juan Province. These are, from west to east, the Cordillera Principal (Permian–Triassic calc-alkaline intrusives and andesitic to rhyolitic volcanics of the Choiyoi Group), the Cordillera Frontal (Carboniferous clastic sediments basement rocks of the Agua Negra Formation, intruded and overlain by Permian–Triassic volcanics and intrusives), and the Pre-cordillera (Palaeozoic limestones and clastic sediments in a basin and range terrain).

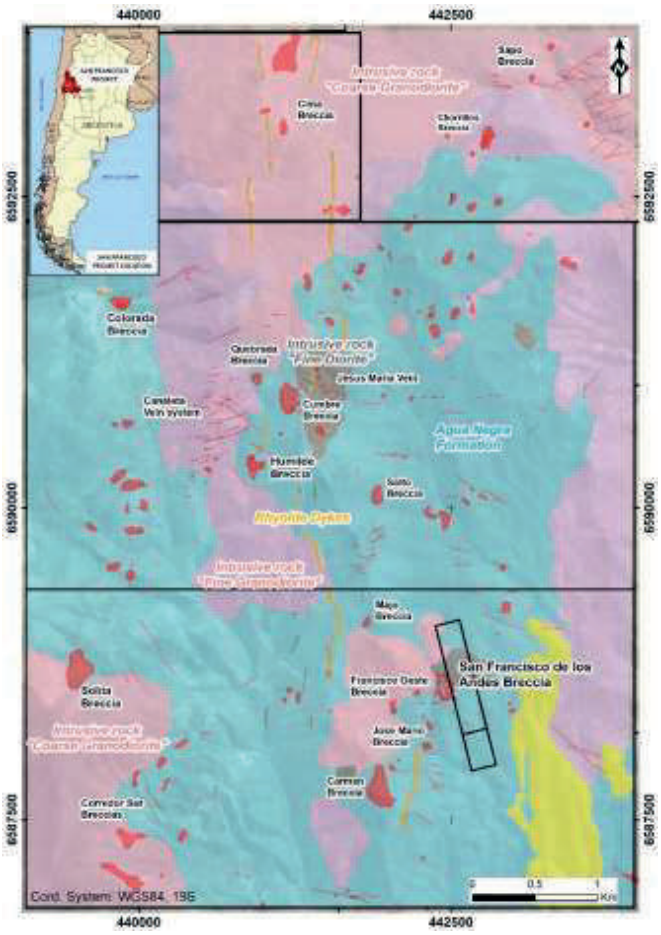


Figure 1 – Geology of San Francisco project area.

3.2. Project Geology

The San Francisco Project is located on the eastern border of the Cordillera Frontal, with Late Permian diorite, granodiorite and quartz monzonite intrusives of the Colanguil Batholith emplaced into Carboniferous-Permian shallow marine quartzites and shales of the Agua Negra Formation (Llambias and Malvicini 1969). The Colanguil batholith has a strike length of over 40 km, and is part of a regional magmatic suite that is known to widespread tourmaline breccia polymetallic mineralization. The Colanguil batholith and Agua Negra formation are cut by Permian rhyolite dykes that post-date mineralisation in the area (Wyck, 2008).

3.2.1. Agua Negra Formation

The oldest rocks in the project area are dark grey arenites and siltstones of the Carboniferous Agua Negra Formation. The formation has been metamorphosed to shales and quartzite and, in close proximity to younger intrusives, contact metamorphosed to hornfels.

3.2.1. Plutonic Rocks

The Agua Negra Formation has been intruded by a late Permian feldspar-phyric biotite-quartz monzonite pluton. This plutonic phase varies from monzonite and quartz monzonite to granite, and the pluton contains small blocks/rafts or plugs of feldspar-phyric diorite to granodiorite. All of these units have been mapped as a single map unit by pervious workers (Figure 1; Wyck, 2008).

3.2.1. Andesite Dykes

Andesite dykes up to 5 meters width are present throughout the project area. The dykes cross cut both the intrusives and hornfelsed sediments.

3.2.1. Rhyolite Dykes

Distinctive, reddish weathering aphyric rhyolite dykes up to 10 meters truncate all intrusive rocks and associated quartz veins and tourmaline breccias.

4. Economic Geology

Two styles of mineralization occur within the property: gold-silver-copper mineralized tourmaline breccia pipes and gold-silver or copper-gold mineralized quartz veins.

4.1. Tourmaline Breccias

Recent mapping by the company and previous workers has defined 62 breccia outcrops on the property. Several breccia pipes have supported small scale mining, with the most significant being the San Francisco de Los Andes breccia pipe.

The tourmaline breccias on the property are typically circular to ellipsoid in plan shape, and range from <10m to over 200m in diameter.

Within the breccia pipes angular sedimentary and/or igneous clasts are hosted in a quartz-tourmaline-pyrite-chalcopyrite matrix. Mineralization is typically focused on the margins of the breccia pipe while the adjacent wall rocks are typically strongly sericite altered with abundant margin-parallel sheeted quartz-tourmaline-sulphide veins.

The breccia pipes typically have an "inverted carrot" morphology, with pipes increasing in width with depth, with vertical extents of greater than 500 meters above their source pluton.

Clasts and matrix composition, alteration and mineralization styles all vary with depth, with the San Francisco breccia pipe being considered an example of a breccia pipe top, while the Chorrillos breccia is considered to be an example of the base of a breccia pipe.

4.1.1. The top of a breccia pipe: the San Francisco Breccia

The San Francisco de Los Andes breccia pipe is 20m wide on surface and 70m long, with drilling indicating that the pipe becomes wider at depth. The breccia has been emplaced into hornfelsed quarzitic sediments of the Agua Negra formation.

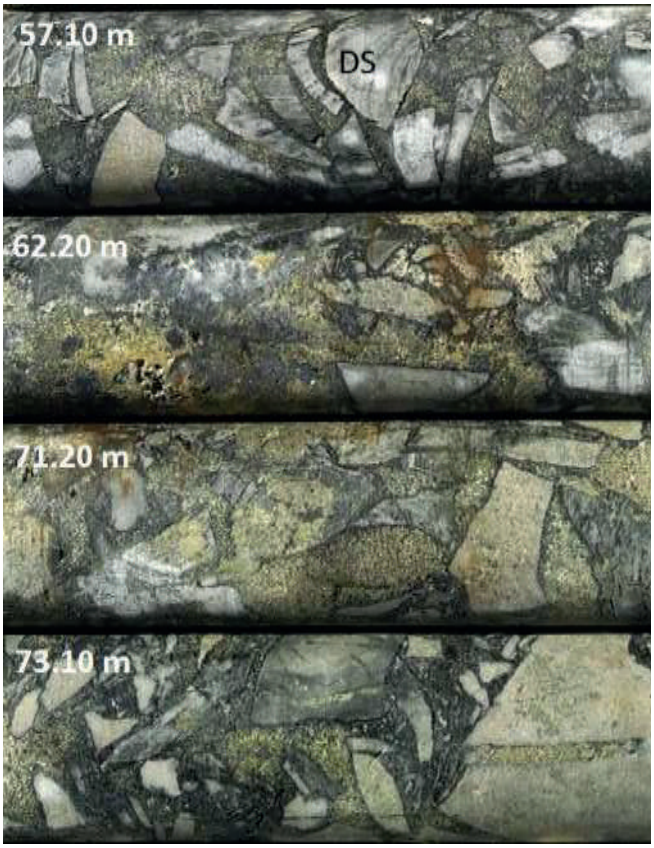


Figure 2 – Photographs of shallow breccia mineralisation from drill hole SFDH-005, San Francisco de Los Andes breccia pipe. Sericite-altered sedimentary clasts set in a sulphide-tourmaline matrix. 'DS' – curvilinear decompressive shock textures.

Within the breccia angular sericite-altered clasts of only the Agua Negra formation are supported in a pyrite-quartz-tourmaline-arsenopyrite-chalcopyrite-galena-sphSalerite-bismuthinite matrix (Figure 2). Polymetallic mineralisation (Au-Ag, Cu-Pb-Zn & Bi) is strongly zoned over distances of 10's of meters.

4.1.2. The base of a breccia pipe: the Chorrillos Breccia

The Chorrillos breccia pipe is elliptical in plan, approximately 90m wide on surface and 100m long. The breccia pipe has been emplaced into a biotite granodiorite that contains common tourmaline rosettes, miarolitic cavities and magmatic breccias. Within the breccia pipe angular sericite- or albite-altered granodiorite clasts are hosted in a tourmaline-quartz-chalcopyrite-pyrite matrix (Figure 3; Motton, 2019), with Cu-Mo mineralisation focused on the margins of the breccia pipe.

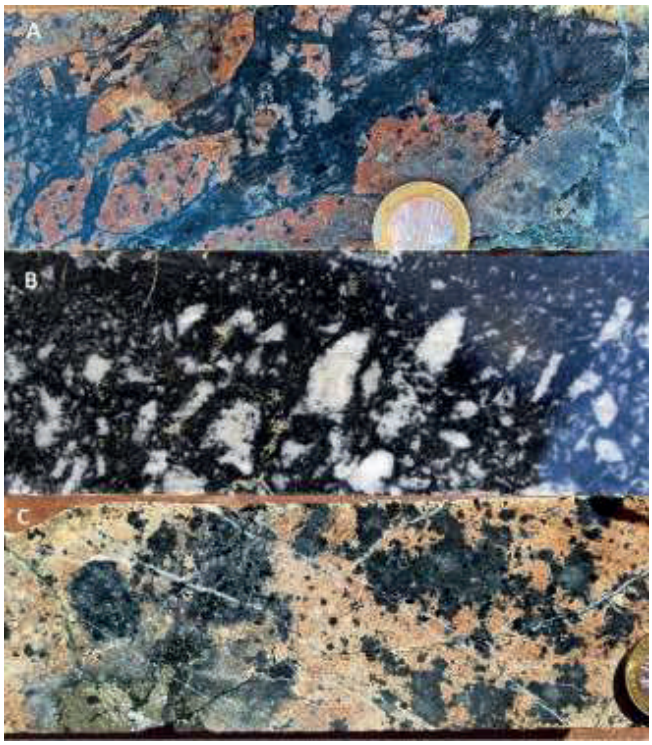


Figure 3 – Photographs of typical deep tourmaline breccia textures from the Chorrillos breccia pipe. A: Orthoclase-altered intrusive clasts set in a tourmaline-quartz matrix breccia. B: Eroded quartz clasts set in a tourmaline-chalcopyrite matrix. C: tourmaline rosettes and large miarolitic cavities filled by tourmaline-quartz-pyrite within the 'parent' granodiorite pluton.

4.2. Veins

The project area hosts numerous 0.1 to 5 m wide quartz-limonite-hematite veins associated with sericite alteration. These veins are typically either Au-Ag or Cu-Au-Ag mineralized and several have supported small scale mining for gold.

5. Discussion

Intrusion-related gold-silver-copper tourmaline breccias are a sub-class of tourmaline breccia that have received less attention then 'porphyry-related' copper-molybdenum tourmaline breccias. Intrusion-related tourmaline breccias typically form clusters of downward-flaring narrow pipes above a source pluton (Kirwin et. al. 2018), and individual breccias commonly display a complex multi-element mineral assemblage (Au, Ag, Cu, Pb, Zn, Mo, Bi and W) with strong vertical zonation. In contrast porphyry-related tourmaline breccias display a relatively simple Cu-Mo mineral assemblage and flare upwards into breccias that can be over 1 km in width. Clasts in intrusion-related examples often display decompressive shock textures and lack porphyry-type quartz veining.

Given the strong vertical zonation it is important when exploring in an intrusion-related tourmaline breccia cluster to understand where a given breccia is located relative to the vertical zonation.

The shallow parts of intrusion-related tourmaline breccias are characterized by narrow shingle breccias (typically tens of meters wide) with sericite-altered clasts of country rock set in a sulphide-rich pyrite-quartz-tourmaline matrix with strong precious and base metal mineralization. Deeper zones are characterized by potassic alteration, +/- biotite and magnetite.

With increasing depth the breccia pipes become wider, clasts of intrusives become more common and mineralization grades from Au-Ag to Cu-Mo, with the highest grades typically focused on the inside margin of the breccia pipe.

The base of intrusion-related tourmaline breccias may be greater than 300m in diameter and is hosted in the source pluton which displays signs of volatile saturation, such as UST's, miarolitic cavities and tourmaline rosettes. The base of the breccias are characterized by orthoclase- or albite-alerted intrusive clasts hosted in a matrix that grades from hydrothermal (quartz-tourmaline) to magmatic (quartz-aplite) with increasing depth.

6. Conclusions

Intrusion-related tourmaline breccias may represent attractive high-grade Au-Ag-Cu

exploration targets and low development CAPEX opportunities that have not received significant attention from the exploration or academic communities.

References

Kirwin, D., Kelley, D., Azevedo, F. and Wolfe, R., 2018, Characteristics of Intrusion-Related Copper-Bearing Tourmaline Breccia Pipes. SEG Metals, Minerals and Society.

Lara, R. 2009. El Tapau Project, Calingasta, San Juan Province, Argentina. Prepared for China Mining Industry Ltd and Petra Gold Servicios Mineros S.R.L.

Llambias, E and Malvicini, L, 1969, The Geology and Genesis of the Bi0Cu Mineralized Breccia Pipe, San Francisco de los Andes, San Juan, Argentina. Economic Geology Vol 64, pp 271-286.

Motton, N. 2019, 43-101 Technical Report San Francisco Copper-Gold project, San Juan Province, Argentina.

Wyck, N.V. 2008, 43-101 report for TNR Gold Corp. on the El Tapau prospect area, San Juan Province, Argentina.

JUEVES 25

GEOCATMIN

Sistema de Gestión de Bases de Datos Geológicos y Catastro Minero

Juan Salcedo Carbajal[1], Hugo Castro Pomatana[2], Miriam Araya Carrasco[3]

[1] INGEMMET, Av. Canadá 1470, Lima, Perú (jsalcedo@ingemmet.gob.pe)
[2] INGEMMET, Av. Canadá 1470, Lima, Perú (hcastro@ingemmet.gob.pe)
[3] INGEMMET, Av. Canadá 1470, Lima, Perú (maraya@ingemmet.gob.pe)

1. Abstract

El INGEMMET desarrolló un Sistema de Información Geológico y Catastral Minero de acceso gratuito utilizando la gestión de base de datos con las últimas tecnologías de información geográfica, el uso de estándares internacionales para la administración, organización, diseño, arquitectura de datos, logrando desarrollar el Sistema Geocatmin, que integra dicha metodología en un sistema de información de uso internacional. A la fecha tiene más de 200 capas de información y registra más de 1400 millones de interacciones en más de 180 países.

2. Introducción

El Instituto Geológico Minero y Metalúrgico - INGEMMET, es un Organismo Público Técnico Descentralizado del Sector Energía y Minas del Perú, con personería jurídica de derecho público interno, autonomía, técnica administrativa y económica, que tiene como objetivo la obtención, almacenamiento, registro, procesamiento, administración y difusión eficiente de la información geo científica y aquella relacionada a la geología básica, los recursos del subsuelo, los riesgos geológicos y el geo ambiente, según web: www.ingemmet.gob.pe

El GEOCATMIN, representa una gran ventana del INGEMMET a través de internet para el acceso gratuito y libre de información geológica y catastral minera. Además, esta herramienta permite la integración y estandarización de información para el desarrollo de proyectos de inversión. Este sistema ha sido desarrollado por personal de la Oficina de Sistemas de Información del INGEMMET, utilizando las últimas tecnologías de información geográfica.

3. Gestión de Base de Datos

La gestión de base de datos espacial basado en la nueva tecnología de Geodatabase de ESRI Inc. significa definir la forma en que se estructurarán los datos, su forma de almacenamiento, las relaciones que deben existir entre estos datos para satisfacer los requerimientos de información y las funcionalidades con las que debe cumplir el sistema, entre otros aspectos.

De acuerdo a lo anterior, es necesario que la información que sea ingresada, sea lo suficientemente estandarizada y estructurada para que al importarla al sistema GIS con el modelo de redes geométrico y lógico no sufra demasiadas transformaciones y no requiera edición compleja. Para el caso de sistemas GIS también es importante la estructura de los datos de acuerdo a un modelo definido. De lo anterior se desprende que lo importante no es en qué sistema se capturen los datos, sino de su estructura y estandarización de acuerdo a un modelo de datos definido, de tal manera que no haya distorsión de los datos en el proceso de importación.

Este diseño de base de datos espacial es la base sobre la cual se fundamenta el Sistema de Información Geográfica (GIS) que usa el INGEMMET, que a su vez proporciona los elementos y el ambiente como una armazón de análisis espacial para soportar la toma de decisiones, lo cual conlleva a la utilización inteligente de los recursos y administración del entorno geográfico y territorial.

En los últimos años la tecnología ha dado grandes avances en productores, gestores, investigadores, empresa privada que se dedican a la gestión de información geográfica y la gestión de proyectos de negocio con información geográfica, las academias y las universidades, tienen un nuevo desafío:

adoptar soluciones de software empresarial basadas en la nube o seguir con el modelo actual de tecnologías y mantener su aislamiento del mundo y la ola tecnológica que sugiere el momento de la información geográfica, en el mundo.
Es así que el impulso de este nuevo interés es un modelo de datos que permite que el INGEMMET sume a su gestión de datos, en este caso geológico minero, temas tecnológicos modernos, de manera conjunta y que así mantengan bajos costos y continúen en carrera frente a la exigencia del mercado de tener datos cartográficos lo más rápido posibles, en línea a través de la colección de datos en campo almacenando en la nube virtual con las aplicaciones móviles personalizadas de collector y survey.

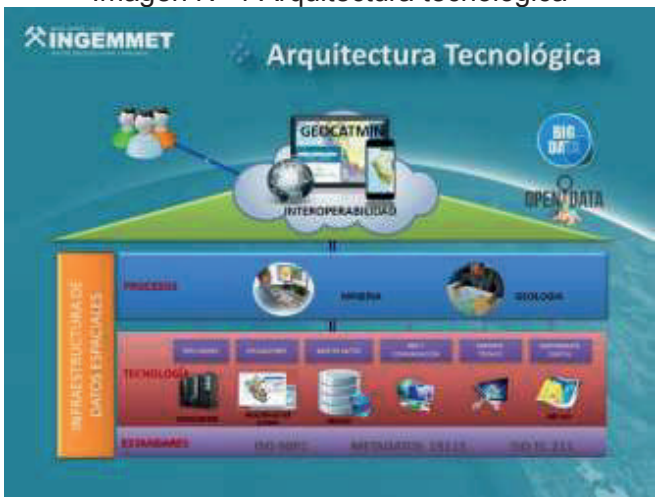
3.1. Arquitectura tecnológica

La nueva arquitectura del GEOCATMIN, permite integrar información interinstitucional relevante para la toma de decisiones en inversión e investigación geológica, con herramientas y enfoque de Infraestructura de Datos Espaciales (IDE) para contribuir a la reactivación de la economía.

El GEOCATMIN está organizado por capas de información de forma tal que permite realizar las siguientes funciones:

- Ubicar concesiones mineras.
- Identificar nuevos proyectos considerando los permisos ambientales correspondientes.
- Identificar los peligros geológicos para proyectos de inversión pública o privada.
- Identificar zonas con estudios de impacto ambiental (EIA), para reutilizar en nuevos estudios de línea base de proyectos mineros.
- Ubicar áreas con estudios geológicos y cateo en proyectos de prospección y reutilizarlas para nuevos proyectos.
- Ubicar fuentes de energía (agua y fuentes geotérmicas) para proyectos de inversión.
- Interoperabilidad intersectorial para ver los estudios ambientales, catastro forestal, agrícola, zonas arqueológicas entre otros.
- Interactuar rápidamente con las bases de datos de petromineralogía, geología 1000K-100K-50K, geocronología y catastro.

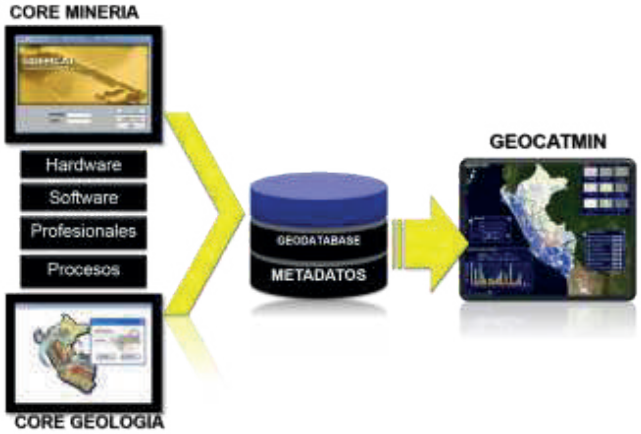
Imagen N° 1 Arquitectura tecnológica



3.2. Componentes

El GEOCATMIN tiene 5 componentes principales: Información, hardware, software, profesionales y procesos.

Imagen N° 2 Componentes de la base de datos

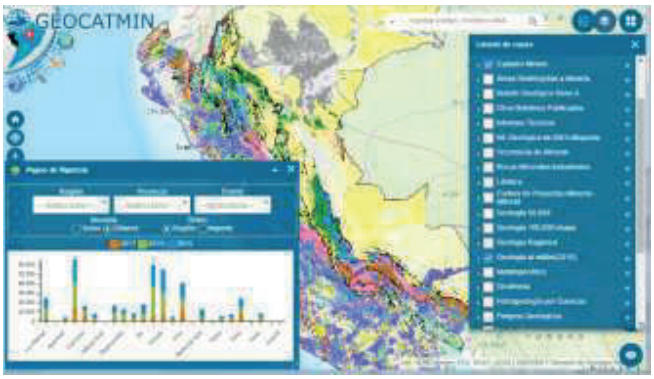


3.3 Tecnología

3.2.1. Plataforma Cloud Computing

El sistema tiene una plataforma hibrida de funcionamiento. Una plataforma en la nube de Azure, como contingencia para la atención de consultas en el mundo y una plataforma local institucional para el mantenimiento de la información.

Imagen N° 3 Geocatmin



3.2.2. Software GIS

La gestión de información geológica se realiza usando la última tecnología de Sistemas de Información Geográfica, reconocida a nivel mundial de ESRI.

3.2.3. Base de datos

La gestión de datos se realiza usando la tecnología de ESRI - Geodatabase corporativa.

Imagen N° 4 Geodatabase integrada

4. Estándares

4.1. Metadatos

El INGEMET adopto el uso de estándares de metadatos geográficos para catalogar su información usando el ISO 19115.

En el marco de la infraestructura de datos especiales el INGEMMET lanzo su primer catálogo de metadatos con más de 10000 metadatos según estándares del ISO 19115, Latinoamericano y del IPGH. Actualmente es el nodo alimentador de metadatos del portal internacional GEOSUR, geoportal IDEP del catálogo nacional del Perú. Fue premiado a la mejora catálogo de metadatos con mayor información de servicios de mapas

4.1. Datos espaciales

El INGEMET aplica los estándares de datos espaciales para la gestión de información geográfica con el uso del ISO 19110 para ordenar el catálogo de datos geológicos. Actualmente usa los estándares ISO 19128 para la publicación de servicios de mapas WMS, WFS y WCS para alimentar el Geoportal de GEOSUR y es usuario que registra sus servicios de mapas WMS en dicho geoportal GEOSUR, One Geology y PREDECAN.

5. Metodología

Se utilizó aspectos más relevantes de las metodologías: Project Management Ingeniería (PMI) para el desarrollo de sistemas; Unified Modelyng Language (UML) para el análisis y diseño; Modelo de datos Geodatabase para diseño del modelo de datos espacial y por supuesto la metodología para el desarrollo de Sistemas de Información Geográfica usando estándares ISO TC 211.

6. Reconocimientos

- En 2009, INGEMMET obtiene el premio “Excelencia en Tecnologías GIS”
- En 2010 lanzamiento del GEOCATMIN, en la convención PDAC Canadá.
- En 2010 fue reconocido como mejor trabajo técnico en el 8ª Congreso Nacional de Minería,
- En 2012 “Premio a las Buenas Prácticas en Gestión Pública” en la categoría acceso y transparencia de información.
- En 2013 premio “Excelencia en uso de tecnologías GIS”.
- En 2015 premio al primer catálogo de metadatos ISO19115 por ONGEI.
- 2017 premio Buenas prácticas en gestión de geo información por PCM.
- 2018 premio internacional SAG Award ESRI por excelencia en GIS.

Imagen N° 5 Reconocimientos y visitas

Conclusiones

1. El sistema implementado por el INGEMMET, permite la gestión de información geológica minera del Perú.

2. La gestión de datos permite analizar, ubicar, modelar, georreferenciar, planificar, gestionar y ordenar el territorio utilizando la geología como base para el desarrollo de proyectos a nivel nacional.

3. El uso de estándares permite la gestión de base de datos e integración de información de los sistemas institucionales.

4. El sistema de gestión de base de datos del INGEMMET permite interoperar a otros proyectos nacionales e internacionales para promover la reactivación económica y especialmente la reactivación de las exploraciones mineras.

Agradecimientos

- Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, INGEMMET.
- Oficina de Sistemas de Información, INGEMMET.
- TELEMATICA, empresa distribuidora del software que brinda el soporte técnico para el mejor rendimiento del uso de las tecnologías ESRI representante a nivel nacional.

Referencias

White, S., & Miers, D. (2009). Guía de Referencia y Modelado BPMN. EEUU: Future Strategies Inc.

Oficina Nacional de Gobierno Electrónico e Informática. (2014). Plan Nacional de Datos Espaciales (Documento preliminar). Lima, Perú.

International Organization for Standardization (ISO). (2008). NTP ISO/IEC 27001:2008. Tecnologías de la información. Técnicas de seguridad. Sistemas de gestión de la seguridad de la información.

Requisitos (2008 ed.). Lima, Lima, Perú: INDECOPI.

Bernabé Poveda, M. A., & López Vázquez, C. M. (2012). Fundamentos de las Infraestructuras de Datos Espaciales (IDE). Madrid, España: UPM Press.

ESRI (2012). “Geoprocesamiento”. USA. Disponible en http://resources.arcgis.com/es/content/geoprocessing/10.0/about, visitado el 3 de octubre del 2012.

Gómez, B., (2005) Tesis de Doctoral “Generación de Métodos basados en inteligencia artificial para el análisis de datos medioambientales”, Madrid, Universidad de Alcala.

Manual de Sistemas de Información Geográfica (SIG), (s.f). [En línea]. [Fecha de consulta: 16 de junio 2017]. Disponible en: http://www.gbif.es/gbif/ficheros/Guion_SIG.pdf.

Impulsando la transformación tecnológica ágil en el catastro minero y en el proceso del otorgamiento de concesiones mineras

Eloy Cesar Salazar Loayza

INGEMMET, Av. Canadá 1470, Lima, Perú(csalazar@ingemmet.gob.pe)

1. Abstract

Los principales hitos de transformación tecnológica en el catastro minero peruano y en el otorgamiento de concesiones mineras, esencialmente, lo constituyen la creación del sistema de cuadrículas, el desarrollo informático, la participación de sus profesionales, la formación del catastro minero nacional y la transformación del catastro minero del Sistema geodesico PSAD56 al WGS84.

Es de importancia señalar el desarrollo de los sistemas de información como soporte para el gran impulso, reflejados en el SIDEMCAT, SIGCATMIN y GEOCATMIN.

Asimismo, para continuar impulsando la transformación tecnológica ágil en el catastro minero y en todo el proceso del otorgamiento de concesiones mineras es necesario que el INGEMMET continue la sistematización y automatización de sus procesos.

2. Introducción

El cambio trascendental de la economía peruana en los últimos años, en gran medida ha sido consecuencia del aprovechamiento tecnológico que han utilizado y aprovechado algunos sectores de nuestro país sobre todo en el sector minero.

En el campo minero hubo un buen enfoque en los procesos, se dieron normas legales promotoras que se promulgaron a partir del año 1992.

A partir de ello, el ciudadano cuenta con suficiente información sobre el estado de trámite de sus derechos mineros, de la ubicación del área solicitada, evitando la superposición de derechos mineros y por ende de conflictos entre los titulares mineros respecto de sus concesiones mineras.

El tiempo empleado en el proceso de titulación minera se ha reducido sustancialmente, respecto al tiempo empleado antes de 1992.

En el INGEMMET se estructuró y desarrolló un sistema de gestión nacional de otorgamiento de concesiones mineras único y descentralizado, así como se aseguró la administración del Catastro Minero Nacional y la distribución del derecho de Vigencia y Penalidad.

El INGEMMET desarrolló los sistemas de gestión alfa numérico y gráfico denominados SIDEMCAT y SIGCATMIN para registrar, gestionar y consultar la información de los derechos mineros, los mismos que han sido adoptados por los 25 Gobiernos Regionales para tramitar y otorgar petitorios mineros de la pequeña minería y minería artesanal.

A consecuencia del cambio se incrementaron sustancialmente las inversiones mineras en el Perú, lo que trajo consigo la creación de nuevos puestos de trabajo.

3. Principales hitos para la transformación tecnológica e impulsar el catastro minero peruano y el otorgamiento de concesiones mineras

3.1. Creación del sistema de cuadrículas

A partir de 1992 desde que el Registro Público de Minería (RPM), ahora INGEMMET inició las nuevas funciones de otorgar concesiones mineras, se hizo una transformación total de la forma como se solicitan las concesiones mineras en el Perú, asi como la construcción del Catastro Minero y como se procesan las solicitudes para otorgar las concesiones mineras.

Se introdujo el sistema de cuadrículas y un procedimiento administrativo sencillo como nueva tecnología para procesar el otorgamiento de concesiones mineras.

Por Resolución Ministerial Nº 320-91-EM-DGM, se aprobó con carácter oficial la determinación del

Sistema de Cuadrículas elaborado por la División de Catastro y Padrón Minero de la Dirección de Concesiones Mineras, sobre la base de las Cartas Nacionales del Instituto Geográfico Nacional.

La formulación de petitorios mineros en cuadrículas, utilizando las coordenadas UTM se inició el año 1992 de acuerdo al D.Leg.708. Anteriormente los denuncios se formulaban indicando el Punto de Partida y los ángulos y distancias para determinar los rectángulos que seguían la dirección de la veta.

Estos cambios, han sido vitales para que despegue la minería en el Perú; el 2 de enero de 1995 en un solo día se recibieron 6,000 solicitudes de petitorios mineros, algo sin precedentes en el país.

El nuevo procedimiento de formulación de petitorios mineros en cuadrículas, se ha constituido en un modelo para varios países del mundo que continuamente visitan el INGEMMET.

3.2. **Desarrollo informático**

La transformación tecnológica del catastro minero y el otorgamiento de las concesiones mineras iniciado en 1992, tuvo como aliado principal el desarrollo de la informativa y las bases de datos que permitieron dar el salto de un bajo nivel a un nivel inmensamente superior.

A la fecha, a tono con las nuevas tecnologías de la información y comunicación, el Perú cuenta con un Catastro Minero Nacional que presta servicios en tiempo real, a nivel nacional e internacional. INGEMMET y todos los Gobiernos Regionales se encuentran interconectados vía internet.

3.3. **Participación de sus profesionales**

Otro de los factores trascendentes, vitales para la transformación tecnológica del catastro minero peruano y el otorgamiento de concesiones mineras ha sido sin lugar a dudas la particpación de sus profesionales.

El trabajo en equipo del personal, la nueva tecnología informática aplicada y los sólidos valores con los que se trabajó y se trabaja institucionalmente, permitió incrementar sustancialmente la cantidad de solicitudes de petitorios mineros, esto dio un gran impulso a las inversiones en el país, que trajo consigo más oportunidades de trabajo para los peruanos y la mejora económica del país. No solo creció la minería, sino lo distintos sectores conexos a la minería.

Asímismo, se mantiene la transparencia y apertura de información y comunicación, que es la mejor forma que tienen las organizaciones civiles de defenderse del flagelo de la corrupción que azota a las instituciones tutelares de la sociedad. El INGEMMET orienta buena parte de sus esfuerzos en capacitaciones y tutela a las Gobiernos Regionales a fin que ellos hagan lo propio, para mantener el alto nivel logrado a nivel internacional.

3.4. **Formación del catastro minero nacional**

Ley Nº 26615, Ley del Catastro Minero Nacional, crea el Catastro Minero Nacional, que comprende a) El Sistema de Cuadrículas a que se refiere el artículo 11 del Texto Único Ordenado de la Ley General de Minería, aprobado por Decreto Supremo Nº 014-92-EM. b) Las concesiones mineras vigentes otorgadas y las que se otorguen como consecuencia de denuncios formulados al amparo de legislaciones anteriores al Decreto Legislativo Nº 708, que cuenten con coordenadas Universal Transversal Mercator (UTM) definitivas según lo dispuesto en la presente Ley. c) Las concesiones mineras vigentes otorgadas y que se otorguen al amparo del TUO y que cuenten con resolución consentida. d) Las concesiones de beneficio, de labor general y de transporte minero que cuenten con coordenadas UTM definitivas, según lo dispuesto en la presente Ley.

La construcción del catastro minero nacional constituye un hito para la transformación tecnológica e impulso del catastro minero peruano y el otorgamiento de concesiones mineras, pues logra el objetivo de determinar con exactitud la ubicación de todas las concesiones y denuncios mineros, en un sistema único no importando el régimen legal bajo el cual se solicitó el derecho minero, con lo cual se ordena la titulación minera.

3.5. **Transformación del catastro minero del Sistema geodesico PSAD56 al WGS84**

A finales de los años 90 y primera década del 2000, el Registro Público de Minería (RPM),

posteriormente Instituto Nacional de Concesiones y Catastro Minero (INACC), y actualmente Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET), efectuó una serie de investigaciones basadas en observaciones de campo y cálculo de gabinete, concluyendo que el sistema de medición a través de la percepción remota desde satélites artificiales GPS resulta ser el más preciso, económico y simple para la ubicación de los derechos mineros.

En aquel entonces, formaban parte del catastro minero no oficial del país un sin número de derechos mineros cuyas coordenadas UTM eran obtenidas mediante diligencias periciales que utilizaban GPS establecidos bajo el sistema WGS 84; las cuales eran convertidas al sistema PSAD 56 utilizando fórmulas de transformación que consideran sólo tres parámetros.

Era necesario lograr mayor precisión en la determinación de coordenadas UTM para los derechos mineros, motivando que el INGEMMET desarrolle fórmulas de transformación del sistema WGS 84 al PSAD 56, para las 11 Zonas Catastrales mineras en las que fue dividido el territorio peruano. Estas fórmulas fueron oficializadas mediante los Decretos Supremos Nº 051-99-EM y Nº 001-2002-EM, publicadas en el Diario Oficial el Peruano el 20 de setiembre de 1999 y 10 de enero del 2002, respectivamente; las mismas que utilizan los denominados parámetros de HEIGHES aplicables para 11 Zonas Catastrales Mineras: 17E-II, 17E-III, 18E-V, 18E-VI, 18W-III, 18W-IV, 18W-V y 19W-VI; 18W-II, 18E-IV y 19W-V. (Ver anexo 01)

Paralelamente, la utilización de GPS se difundió masivamente para uso civil, y con ello un gran desarrollo de la cartografía satelital, empleando precisamente el sistema WGS 84, lo cual llevó a que las instituciones a nivel mundial masifiquen la utilización la información georeferenciada al WGS 84. Asimismo, el Instituto Geográfico Nacional (IGN), organismo rector de la cartografía en el país, decidió mediante Resolución Jefatural Nº 079-2006-IGN/OAJ/DGC y Resolución Nº 086-2011-IGN/OAJ/DGC oficializar el uso de la cartografía en base a WGS 84, disponiendo la conversión progresiva pero obligatoria de toda la información cartográfica en el país, la cual culminó en mayo de 2011.

De manera que en el país se estableció un nuevo Sistema de referencia Geodésico Oficial de uso obligatorio para las entidades públicas y privadas con fines específicos, en base a la cartografía WGS 84, y con la dación de la Ley N° 30428, Ley que Oficializa el Sistema de Cuadrículas Mineras en Coordenadas UTM WGS 84, se hizo necesario determinar los parámetros de transformación más precisos con el que se adecuo el Catastro Minero Nacional al nuevo Sistema de Referencia Geodésico.

En este contexto, el INGEMMET el año 2016 utilizó los Parámetros Zonales Inversos de Heighes como la metodología más apropiada para transformar el Catastro Minero Nacional del sistema PSAD56 al sistema oficial WGS 84.

La transformación de coordenadas constituye un hito para la transformación tecnológica e impulsar el catastro minero peruano y el otorgamiento de concesiones mineras en la medida que la utilización de técnicas espaciales en la determinación de coordenadas, especialmente, los sistemas globales de navegación por satélites (GNSS) como el GPS, han revolucionado la definición de los sistemas de referencia dejando en desuso los adoptados localmente (PSAD56), obligando la migración de los datos geográficos a un sistema de compatibilidad universal (WGS84).

Asimismo, el Sistema Geodésico de Referencia con Datum en el WGS84 es un sistema de coordenadas Mundial, base para el uso de equipos GPS. Sistema geodésico oficial en nuestro País. Contar con el Catastro Minero en este sistema, permite el uso directo de Sistemas Globales de Navegación por Satélite (GPS, GLONASS, GALILEO), es decir las coordenadas del catastro minero estan en el mismo sistema de referencia que los satélites GNSS (Sistema Global de Navegación por Satélite), garantizando altas precisiones de las posiciones determinadas en campo.

4. **Desarrollo de los sistemas de información**

Para impulsar la transformación tecnológica ágil en el catastro minero y en todo el proceso del otorgamiento de concesiones mineras, el INGEMMET ha desarrollado algunas herramientas vitales. Las principales son:

4.1. **SIDEMCAT**

Constituye la plataforma virtual que ha desarrollado el INGEMMET que integra la información de los derechos mineros.

Lo constituye el catastro minero nacional, el precatastro, el catastro de áreas restringidas a la actividad minera y la información relativa al cumplimiento del pago del derecho de vigencia y penalidad.

A través de este sistema se puede ingresar información a las bases de datos y consultar los datos generales del derecho minero, información de pagos por vigencia y penalidad y visualizar el expediente en formato digital.

4.2. **SIGCATMIN**

Este sistema ha sido desarrollado para analizar y evaluar gráficamente la información de los derechos mineros, se puede sacar reportes, generar e imprimir planos catastrales mineros. Este aplicativo informático trabaja con la base de datos de derechos mineros, empleando el software Arc View, Arc GIS y contiene herramientas que se utilizan en los procesos de análisis de superposición, cálculo de hectáreas, consulta de coordenadas, determinación de demarcación política, análisis sobre la carta nacional, preparación de planos para informes técnicos entre otros.

4.3 .GEOCATMIN

El INGEMMET ha implementado varias formas como difundir la información sobre los derechos mineros.

Una de las formas más importantes es a través del Sistema de Información Geologico y Catastral Minero (GEOCATMIN), ubicado en la página web del INGEMMET. Este sistema ha obtenido varios premios en certámenes nacionales e internacionales.

5. Sistematización de procesos

Para impulsar la transformación tecnológica ágil en el catastro minero y en todo el proceso del otorgamiento de concesiones mineras es necesario que el INGEMMET continue sistematizando y automatizando sus procesos

5.1. Automatización de procesos

Los procesos para otorgar la concesión minera están estrechamente ligados a lo que establece la normativa legal.

Para desarrollar estos procesos técnicos legales también se ha establecido los formatos automáticos y la automatización de los procesos que constituyen la tecnología que impulsan el otorgamiento de la concesión minera.

5.2. El petitorio minero on line

La implementación del petitorio minero on line constituirá uno de los grandes impulsos de la transformación tecnológica ágil en el catastro minero y en todo el proceso del otorgamiento de concesiones mineras.

El desarrollo de este sistema que viene impulsando el INGEMMET, traerá consigo un gran cambio en la forma como se presentarán las solicitudes de petitoros mineros; ya no será necesario la presentación física de las solicitudes, lo que traerá consigo un significativo ahorro de tiempo, dinero y otros recursos, tanto para el usuario como para las instituciones.

Conclusiones

1. La transformación tecnológica en el catastro minero y en el proceso del otorgamiento de concesiones mineras, debe ser visto como un proceso de mejora continua, de aplicación permanente.

2. El fin supremo de estos procesos siempre debe ser dar el mejor servicio al ciudadano.

3. Considerando la tecnologia como el conjunto de instrumentos, recursos técnicos o procedimientos aplicados para obtener resultados. Desde este punto de vista, en poco tiempo se ha obtenido significativos cambios en el catastro minero y en el proceso de otorgamiento de concesiones mineras que han traido mucho bienestar al ciudadano y al pais en general.

El Machine Learning de la Carta Geológica Nacional 50K y la Exploración Minera

Rildo Rodríguez[1], Luis Coba[1], Mirian Mamani[1]

[1] Instituto Geológico Minero y Metalúrgico - Ingemmet, Av. Canadá # 1470, San Borja, Lima, Perú. (rrodriguez@ingemmet.gob.pe, lcoba@ingemmet.gob.pe, mmamani@ingemmet.gob.pe)

1. Abstract

La constante actualización de información que puede ser utilizada para mejorar la Carta Geológica Nacional, obliga a que esta se actualice constantemente y forme la base para el desarrollo socio-económico del país.

Actualmente la implementación de inteligencia artificial está en todos los sectores; en ese sentido, los usuarios de Ingemmet necesitan una Carta Geológica Nacional inteligente que les permita interactuar con los atributos de las bases de datos para obtener mejores resultados. La integración de la Carta Geológica Nacional 50k es el primer paso para crear inteligencia artificial. Por ello, Ingemmet viene implementado el machine learning de la Carta Geológica Nacional integrada a lo largo de todo el territorio.

Las aplicaciones del machine learning de la Carta Geológica Nacional son tangibles y contribuyen a la reactivación económica en diferentes sectores, especialmente en la exploración de depósitos minerales.

2. Introducción

La Carta Geológica nacional se ha desarrollado desde 1960, bajo el nombre de Comisión Carta Geológica y actualmente, Ingemmet es la institución encargada de elaborarla con el objetivo de brindar información geológica accesible para los ciudadanos.

La Carta Geológica se realiza en diferentes escalas, siendo las principales 1:100.000, 1:50.000 y 1:1'000.000. La carta a escala 1:100.000 se culminó en el año 1999 y de ello se tuvo una nueva versión del Mapa Geológico del Perú a escala 1:1'000.000.

Los mapas geológicos a escala 1:50,000 se elaboran desde el año 2000 con los mismos estándares de calidad de los mapas a escala 1:100,000, obteniendo mapas individualizados en un formato que no permite la automatización de procesos al momento de la elaboración y edición de los mismos, haciendo necesario innovar para mejorar nuestros procesos.

A partir del año 2018 se diseñó e implementó una geodatabase geológica en el Software ArcGIS, permitiendo la estandarización de la base de datos y el uso de herramientas de automatización desarrolladas en Python. Esto facilita la edición y administración de la información de manera integral, debido a que permite organizar los datos y añadir herramientas de búsqueda inteligentes, automatizando los procesos en la elaboración de mapas geológicos, hacer consultas más rápidas, y realizar estudios puntuales mediante relaciones con otras bases de datos.

3. Estructura de la Geodatabase Geológica

La estructura de la geodatabase geológica está basada en los estándares cartográficos de la Federal Geographic Data Committee Geologic Data Subcommittee (2006) de la USGS, la guía estratigráfica internacional, entre otros manuales de integración de diversos servicios geológicos del mundo como del Servicio Geológico Chino (Li et al., 2016), toda la información fue complementada con los manuales de la Dirección de Geología Regional del Ingemmet. El resultado es una nueva estructura de geodatabase apropiada para el territorio peruano.

La geodatabase fue estructurada en el Software ArcGIS. Contiene 13 feature dataset y 12 tablas (Figura 01). Los feature dataset en conjunto contienen 146 feature class, que representan a grupos de datos del Sistema Geográfico y UTM. Por medio de ellos se representa en el mapa geológico las entidades tipo punto, línea y polígono. A su vez, cada feature class se relaciona con un dominio que contiene un rango de valores alfa numéricos o numéricos de un determinado campo. Las tablas permiten almacenar información no espacial como

soporte de los diversos procesos de automatización.

Esta estructura permite realizar consultas rápidas de la información existente en ella. Su base de datos se puede relacionar con una inmensa cantidad de información, esto es posible por la conexión de campos en común que tengan ambas bases de datos. Mediante la relación e interacción de bases de datos es posible realizar diversos trabajos de investigación relacionados a la exploración minera, tomando como base los mapas geológicos.

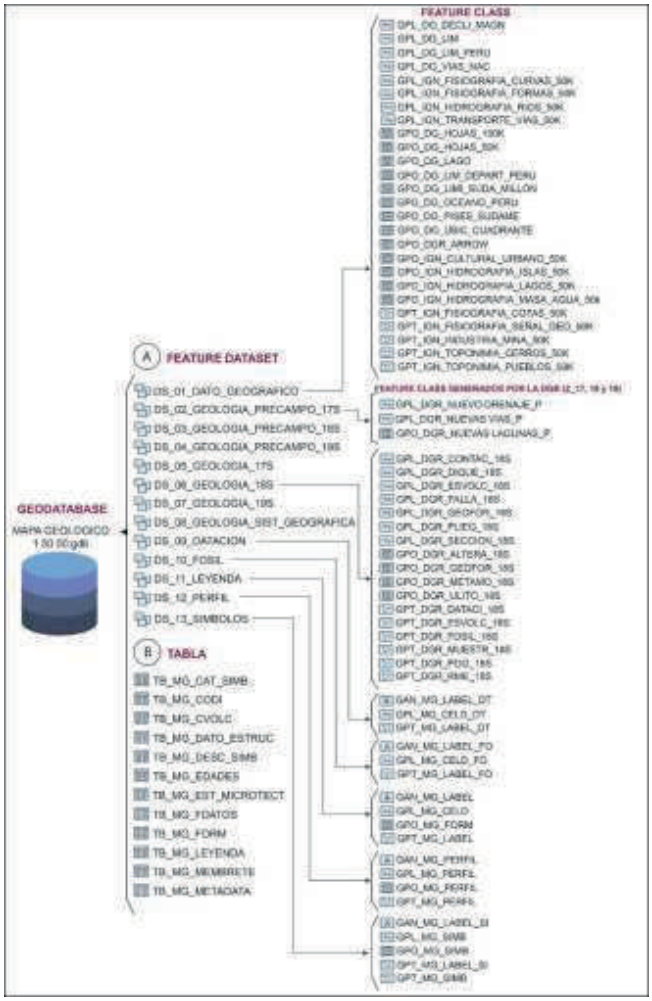


Figura 01.- Estructura de la Geodatabase Geológica.

3.1. Estandarización de la información.

Luego del diseño de la geodatabase se realiza la uniformización de terminologías, nomenclaturas, simbologías y colores según estándares Internacionales y del INGEMMET, organizando la información por categorías, nombrando a cada categoría como un dominio, asignado un código a cada elemento que contenga el dominio. Finalmente se cargó la información a la geodatabase.

4. Proceso de integración geológica

4.1. Migración de la información a la geodatabase.

La información de los mapas elaborados durante los años 2000 – 2019 fueron migrados a la geodatabase geológica, permitiendo el almacenamiento y administración eficiente de la información de manera centralizada.

Una vez migrada la información a la geodatabase se completó la base de datos, unificando terminologías y nomenclaturas según los estándares del INGEMMET.

4.2. Corrección de empalmes

Para lograr que la Carta Geológica Nacional adquiera inteligencia artificial, es necesario que la información migrada a la geodatabase sea estandarizada, es decir que las discrepancias entre los mapas geológicos deben ser corregidos. En ese sentido, se sectorizó al Perú en dominios geológicos que se emplazan de manera similar a los dominios tectónicos del Perú (Figura 2). Los dominios geológicos presentan unidades estratigráficas con características litológicas similares.

El empalme de mapas se realizó utilizando imágenes satelitales, de las cuales es posible extraer información de los diferentes tipos de rocas, contactos litológicos, morfología, estructuras tectónicas, estructuras ígneas, zonas de alteración hidrotermal, etc. Así mismo, se ha consultado bibliografía relevante que ayude a resolver problemas geológicos complejos.

Dado que los problemas de empalmes pueden presentar variada dificultad, se ha registrado un valor que oscila desde simple a complejo, este último debe ser revisado en campo para confirmar la calidad de la información.

4.3. Validación de la Información.

Luego de la corrección de empalmes se realiza la validación de la información. Para ello, se hace uso

de diferentes herramientas de automatización que identifican algunos errores topológicos y en la base de datos.
La información validada ya está lista para ser utilizada en estudios puntuales, como la exploración minera y su aprovechamiento será optimizada al relacionarla con otras bases de datos.

5. Aplicaciones a la exploración minera

Las aplicaciones directas del machine learning se llevan en diferentes sectores, debido a que se pueden interrelacionar con otras geodatabases y mientras más información se tenga la inteligencia artificial será mayor. Por ejemplo, en el campo de la agricultura se puede aprovechar con la composición de suelos.

En el caso específico, para la exploración minera, como un ejemplo sencillo, podemos extraer en cuestión de minutos las fallas regionales relacionadas a los metalotectos sedimentarios por edades y composición litológica (Figura3), lo cual permite definir la prospección de depósitos. En efecto podemos generar un mapa de tipo de caliza que al relacionarla con tipo de rocas ígneas permite ver explícitamente las posibilidades de exploración.

El uso de machine learning de la Carta Geológica permitirá precisar mejor los blancos exploratorios cuando interactúe con información del usuario. Así pues, la combinación de información entre litología fallas y ocurrencia mineral permite definir bloques exploratorios, en donde actualmente no hay depósitos minerales grandes, lo cual, complementado con otros campos de la geodatabase como medios paleogeográficos, arcos magmáticos, dominio tectónico, entre otros permite realizar exploraciones a partir de fundamentos teóricos para búsqueda de depósitos minerales ocultos. Un ejemplo, comprobado es el que se encuentra en la deflexión de Cajamarca. La combinación de litología, estructuras, ocurrencias minerales y análisis de la cuenca sedimentaria del Cretácico realizado por Wilson et al. (2000) muestra claramente corredores mineralizados en el borde de la subcuenca Cajamarca del Cretácico (Figura 4).

Las perspectivas para aumentar la inteligencia artificial de la Carta Geológica Nacional se basan en el incremento de toda la información pública del territorio nacional, así como bases de datos de depósitos minerales, hidrogeología, con el fin de que la Carta Geológica sea el resultado del conocimiento geológico en todas sus ramas. Por lo tanto, la máxima expresión del estado del conocimiento geológico actual.

6. Conclusiones

El Desarrollo de la Carta Geológica Nacional siempre tendrá problemas de empalme por el tiempo que demora su ejecución, esto es debido a que es realizada por diferentes geólogos con diferentes condiciones de trabajo y herramientas, las cuales varían en tiempo muy corto.

La integración del conocimiento geológico ha generado nuevas formas de trabajo y que permiten agilizar la elaboración de los mapas con mayor cantidad de información. Estos análisis serían casi imposibles de realizarlos de otra manera. Sin embargo, las herramientas como el machine learning, no reemplazan al geólogo, solo es una ayuda y el geólogo es quien toma la decisión en base a la calidad de la información que utiliza.

El robustecimiento de la inteligencia artificial es dinámico y los resultados son interpretaciones válidas para un determinado tiempo. El incremento de información validada permitirá definir nuevas interpretaciones más cercanas a la realidad, las mismas que abren nuevas posibilidades exploratorias.

Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento a todo el equipo de la Dirección de Geología Regional de Ingemmet por sus aportes de acuerdo al conocimiento de los Andes.

Referencias

LI Chaoling, LI Fengdan, LIU Chan, LIU Yuanyuan, LÜ Xia & Li Chaoling, 2016. Digital Geological Survey System Operation Manual – Beiging: Geological Publishing House, 2016.

FGDC Digital Cartographic Standard for Geologic Map Symbolization: Reston, Va., Federal Geographic Data Committee Document Number FGDC-STD-013-2006, 290 p., 2 plates.

WILSON, 2000 Structural development of the northern Andes of Peru - Lima Sociedad Geológica del Perú 2000 - p. 331-341

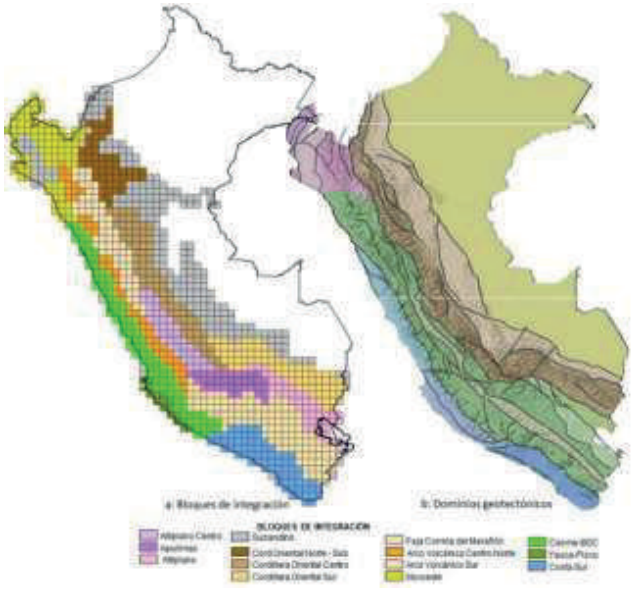
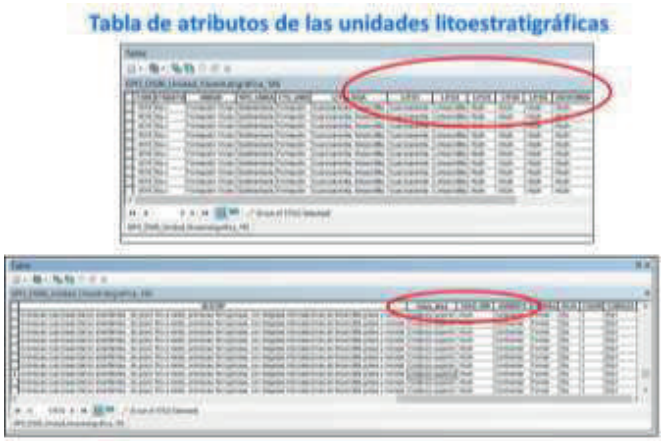


Figura 2: División de dominios geológicos (a) comparado con los dominios tectónicos del Perú.



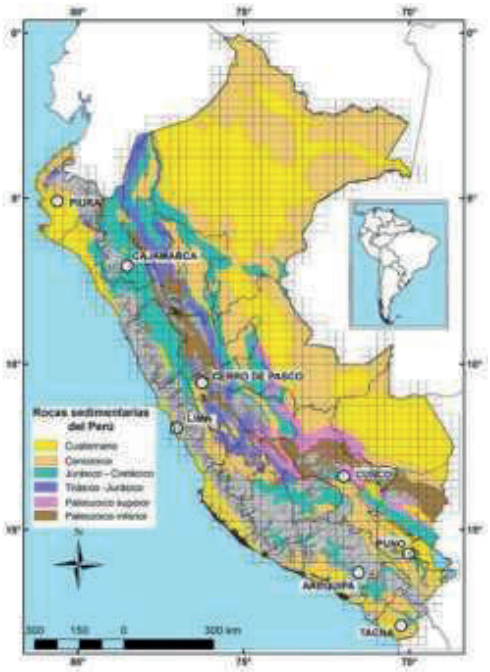


Figura 3. Representación esquemática de las virtudes del machine learning de la Carta Geológica a escala 1:50000. Se muestra la distribución de rocas sedimentarias por edades en el Perú.

Figura 4: Ejemplo de aplicación del machine learning de la Carta Geológica Nacional a la exploración minera. Arriba: Líneas magenta son pliegues; líneas negras, fallas. En el centro: Tonalidades de color celeste indican rocas del Jurásico; verdes, el Cretácico; amarillos, el Cenozoico y rojos, intrusivos. Abajo: Líneas negras son corredores de mineralización, los puntos rojos verde y azul son ocurrencias minerales.

Interpretación de Datos Magnetotelúricos de la Transecta del Sur del Perú y su Relación con la Metalogenia

Luis Ysaías Quispe-Rentería[1], Victor Torres-Bazán[1], Alonso Arturo Marchena Campos[1], Carlos Nicolas Fernández Geraldino[2] Jorge Acosta Ale[1], Darwin Calla[1], Rossmery Jacobo[1], Carlos Valencia [1]

[1] Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico, Av. Canadá #1470, San Borja, Lima

[2] Universidad Nacional de Ingeniería, Av. Tupac Amaru 210, Cercado de Lima

lquispe@ingemmet.gob.pe

Resumen/*Abstract* En este trabajo se presentan los resultados de la investigación magnetotelúrica (MT), realizada a lo largo de la Transecta P1, que se extiende desde Mollendo hasta Puno, en el sur de Perú. Al emplear este método, en combinación con data aeromagnética y grandes sistemas de fallas corticales del sur del Perú (Carlotto *et al.*, 2009), se desea destacar la importancia del método en identificar cuerpos resistivos, asociados a cuerpos ígneos, así como zonas poco resistivas, asociadas con grandes sistemas de fallas corticales y con zonas de intenso magmatismo e hidrotermalismo y su implicancia en definir Unidades Tectonoestratigráficas, las cuales albergan depósitos minerales de distintas características y edades, permitiendo así enriquecer el conocimiento del mapa Metalogenético (Acosta *et al.* 2009,2010).

This paper presents the results of the magnetotelluric (MT) research, carried out along Transect P1, which extends from Mollendo to Puno, in southern Peru. When using this method, in combination with aeromagnetic data and large systems of crustal faults of southern Peru (Carlotto et al., 2009), it is desired to highlight the importance of the method in identifying resistive bodies, associated with igneous bodies, as well as low-resistive zones, associated with large systems of crustal faults and with areas of intense magmatism and hydrothermalism and their implication in defining Tectonostratigraphic Units, which house mineral deposits of different characteristics and ages, thus allowing to enrich the knowledge of the metallogenic map of Peru (Acosta et al. 2009,2010).

1. Introducción

La magnetotelúrica (MT) es un método geofísico que utiliza como fuente la interacción natural de las ondas electromagnéticas con la Tierra. Esta interacción permite medir, de manera simultánea, los campos eléctricos y magnéticos. El cálculo de la relación de ambos campos permite obtener modelos de resistividad y/o conductividad eléctrica del subsuelo (Simpson & Bahr, 2005) que pueden ser correlacionados con las estructuras geológicas existentes en la zona de estudio, desde unas decenas de metros hasta cientos de kilómetros de profundidad.

2. Metodología

El área de estudio se determinó sobre la base de la información geológica, y se desplegó una red de 71 estaciones MT, la recolección de datos consistió en un registro continuo de lecturas por 48 horas en promedio con cada estación separada entre 4 a 5 km. Los datos y las series temporales se procesaron utilizando técnicas estándar, con referencia remota, corrección de desplazamiento estático y análisis del impacto estructural y dimensionalidad basado en la descomposición del tensor. El análisis utilizó una combinación de inversión MT 2-D para definir la estructura de resistividad eléctrica en profundidad. Los resultados a lo largo del SE-NO orientado a un perfil de 360 km lineales aproximadamente con una profundidad de investigación de ~110 km se interpretaron utilizando la información geológica y tectónica disponible. Se obtuvieron valores de resistividad entre el rango de 1-1000 Ohm-m.

El levantamiento Aeromagnético del Sur del Perú fue tomado del trabajo de Cooperación entre SAN –INGEOMIN-AEROSERVICE, levantada por Intera Aeroservice en 1975. Escala 1:100,000. reducido al Polo, con un espaciamiento de línea de 2.5 km.

3. Contexto Geológico-Tectónico.

El marco geológico de la transecta P1, comprende a las unidades Tectonoestratigráficas (Quispe *et al.*, 2019 & 2020), definidas en base a sus característi-

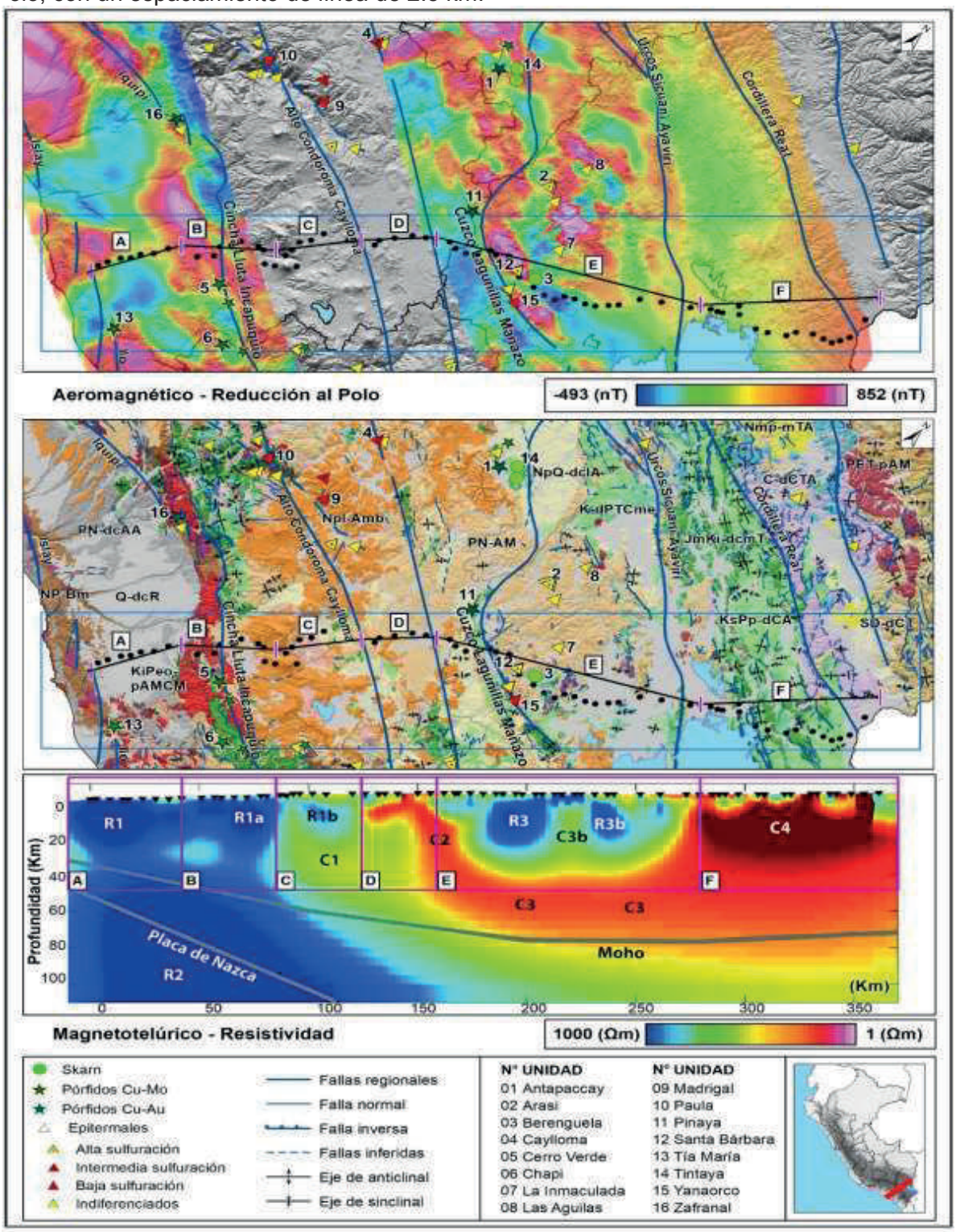


Figura 1. Transecta Magnetotelúrica de resistividad, interpretación Aeromagnética de reducción al polo, Unidades Tectonoestratigráficas y los principales yacimientos en la zona de influencia.

cas litoestratigráficas, ambientes tectónicos y separada por discontinuidades tectónicas regionales, estas son:

1. Basamento metamórfico del Mesoproterozoico al Neoproterozoico (MPNP-cBC)
2. Plutonismo de Arco magmático a Plutonismo de Cuenca Marginal del Cretácico Superior – Eoceno (KiPeo-pAM CM).
3. Arco Magmático del Barroso del Mioplioceno (Npl-Amb).
4. Magmatismo de Arco del Eoceno al Mioceno (PeoNm-AM).
5. Plutonismo de Arco Magmático del Eoceno -Mioceno (PeoNm-pAM).
6. Depósitos de plataforma y talud carbonata marina epicontinental de Cretácico (Kis-dPTCME).
7. Depósitos de Cuenca antepaís del Cretácico Superior al Paleógeno (KsPp-dCA).
8. Depósitos de cuenca de Trasarco del carbonífero (C-dCTA).
9. Magmatismo de Trasarco del Mioceno - Plioceno (Nmp-mTA).
10. Plutonismo de Arco Magmático del Permotriásico (PET-pAM).
11. Depósitos de Cuenca Marina somera del Cámbrico al Ordovícico Superior (CAOs-dcMS).

4. Interpretación Geológica de la Transecta Magnetotelúrica y Aeromagnética

La transecta P1 ha sido dividida en 6 sectores (Fig. 01) los cuales se describen a continuación:

Los **sectores A y B** comprenden las Unidades Tectonoestratigráficas ***MPNP-cBC***, representada por la anomalía de resistividad R1, y un alto magnético en el mapa de reducción al polo del campo total (RTP). Mientras que el cuerpo resistivo R1a asociado a ***KiPeo-pAM CM***, define un cuerpo altamente magnético de forma alargada de dirección NO-SE en el mapa RTP. Entre R1 y R1a se halla una zona de decaimiento de la resistividad de manera vertical (discontinuidad d1) y que en el mapa RTP estaría definiendo por una zona de transición magnética que sería la traza de la falla Sihuas (?) que pudo haber sido aprovechada posteriormente para el emplazamiento del Batolito de la Costa. Esta zona de decaimiento, expresada como una zona de debilidad, en un espesor cortical delgado, da potencial de mineralización de Fe-Cu-Au (IOCG y pequeños pórfidos del Jurásico - Cretácico). El **sector B** se encuentra delimitado por el sistema de fallas Cinta-Lluta-Incapuquio. Alineados a este corredor se tienen al proyecto Zafranal y a la mina Cerro Verde. El marcado control estructural que tiene el emplazamiento del batolito de la costa (R1a) en una transición hacia una corteza más gruesa le da potencial prospectivo por pórfidos de Cu (-Mo-Au), en los controles estructurales que lo delimitan, especialmente hacia el este (Ramos *et al.*, 2002, Carlotto *et al.*, 2009, Mamani *et al.*, 2010, Martinez *et al.*, 2017 & Marchena, 2019). Se encuentran en este tramo pórfidos de Cu tales como Chapi, Cerro Verde, en la franja metalogenética X.

Por otro lado, a una profundidad de 40 a 45 km se encuentra la anomalía de resistividad (R2), que se relacionaría a la placa de Nazca, la que se subduce por debajo de la Sudaméricana, en donde se ha podido definir la zona de discontinuidad de Moho, esta interpretación se asocia con la obtenida por Ma *et al.* (2014), Hayes *et al.,* (2012) y Phillips *et al.* (2012). En esta sección MT P1 se aprecia que la corteza continental se encontraría acortada y sobre engrosada, alcanzando en promedio > 60 km de espesor cortical. Esta anomalía R2 se ubica por debajo de las anomalías R1 y R1a, por lo que se considera que el actual frente de subducción se encontraría próximo a la ciudad de Arequipa, lo que genera fallas activas inversas como el sistema Incapuquio-Cinta-Lluta entre otros.

El **sector C**, se aprecian las consecuencias de la subducción de placas, lo que generarían arcos magmáticos por donde ascendieron los magmas y que podrían estar acompañados por fluidos hidrotermales a superficie a través de fallas profundas como se aprecia en la anomalía de conductividad (C1). Estos valores bajos, se prolongan en forma vertical por debajo del volcán Misti, estrechándose al llegar a la superficie pudiéndose interpretar como el conducto y su respectiva cámara magmática en profundidad, mientras que, la anomalía de resistividad (R1b), de valores de 50-100 Ohm-m estarían asociados a cuerpos subvolcánicos o posibles cámaras magmáticas antiguas que dieron origen al magmatismo de las unidades ***Npl-Amb*** y **PeoNm-AM**, respectivamente. Estas anomalías se encuentran abruptamente interrumpidas por el decaimiento de manera vertical de los valores de resistividad (1-10 Ohm-m) que se relaciona a la traza del corredor estructural Condoroma-Caylloma, el que marcaría el inicio del **sector D** en el que destacan las unidades tectonoestratigráficas

conformadas por el **PeoNm-AM**; la que se halla íntimamente ligada a la ocurrencia de yacimientos epitermales AS, IS y BS, como Selene, Orcopampa, entre otros. Esta unidad yace sobre un basamento compuesto por depósitos sedimentarias que van del Jurásico al Paleógeno, como son ***JmKi-dcmT***, unidad que agrupa a las rocas del Grupo Yura, seguido por los ***Kis-dPTCME***, formaciones Arcurquina, Chilcane y Puquín. Suprayaciendo a estos dos se encuentra la unidad ***KsPp-dCA***, representado por la Formación Huanca. En este dominio se tiene la anomalía de conductividad (C2) con rangos que van de 1 a 10 Ohm-m, siendo ésta una zona conductiva, que se halla desde los 25 a 30 km de profundidad que, además, se prolonga tanto en superficie como a niveles más profundos. Estas zonas conductivas se relacionan a las unidades tectonoestratigráficas antes descritas, conforman el Alto de Condoroma-Caylloma, caracterizadas por ser permeables y por poder almacenar los primeros km de profundidad que al norte se asociaría a una estructura de rumbo EO paralelas al sistema de fallas Iquipi-Calvelinas, que se prolonga en sentido ENE-OSO, esta zona de debilidad ha favorecido la migración de los fluidos mineralizantes en la intercepción con el Alto de Condoroma-Caylloma, dando lugar a la presencia de los depósitos epitermales Paula, Caylloma, entre otros, favoreciendo así esta zona a mineralización de Au-Ag Los sectores C y D se encuentran relacionados a la Franja de los Epitermales de Au-Ag del Oligoceno (Acosta *et al.* 2009,2010)

El **sector E**, se halla entre los sistemas de fallas Cusco Lagunillas Mañazo y Urcos-Sicuani-Ayaviri y comprende a la unidad ***PeoNm-pAM***, conformada por las rocas del Batolito Andahuaylas-Yauri, que da lugar a la formación de yacimientos tipo pórfidos de Cu -Au y skarn Cu-Mo, (Au,Zn) de la Franja XV. En la transecta, esta unidad se encuentra relacionada a las anomalías de resistividad (R3) y (R3b) que en el mapa aeromagnético corresponderían a altos magnéticos que se disponen como cuerpos alargados de dirección NO-SE; los que se hallan separados por un bajo magnético, delimitado por una zona de transición magnética y que en la sección MT se relacionaría a zona conductiva (C3b), corredor estructural profundo que se encuentra relacionado al emplazamiento de depósitos epitermales de Au-Ag y skarn (Pb-Ag-Zn-Cu±Au) como son: Inmaculada Santa Bárbara y Berenguela que estarían delimitados por dos posibles estructuras subverticales que llegan hasta los 20 km de profundidad controlando la mineralización en este alto estructural; estas se tratarían de fallas verticales profundas, ciegas u ocultas que serían importantes para la mineralización ya que permiten el acceso de magmas a niveles corticales someros (Hollister,1978; Titley, 1981; Kutina, 1998). Este alto estructural estaría compuesto por las rocas sedimentarias del Cretácico ***Kis-dPTCME*** y ***KsPp-dCA***, además, se encuentran cubiertas por ***PeoNm-AM***. Por su parte, la zona conductiva (C3) ubicada entre los 40 y 70 km de profundidad se relacionaría a la zona de transición entre la base de la corteza continental y el manto, con presencia de fluidos convectivos desplazándose en su interior.

El **sector F** se encuentra delimitado por las fallas Urcos-Sicuani-Ayaviri y Cordillera Real, en donde se presenta una zona conductiva (C4) más amplia entre los 5 y 30 km de profundidad por debajo de las unidades de ***Kis dPTCME*** y ***KsPp-dCA*** las que se relacionan con la zona de ocurrencias de U y Li. La zona conductiva C4 podría estar relacionada al basamento Paleozoico, que afloran a lo largo de la Cordillera Oriental sur; también se trataría de influencia del lago Titicaca al sur, así como la presencia de hidrocarburo asociado a las rocas calcáreas de la Formación Sipín. La característica conductiva de esta zona se debería a la posible circulación de materiales fundidos que llegan de la zona más profunda de la corteza continental y que alcanzan niveles más superficiales a través de los sistemas de fallas, así como por el aporte de agua y materiales conductivos desde la superficie (Valencia *et al.*, 2020). Por su parte, en el extremo Este se muestra una zona resistiva cuyos rangos van de 10 a 100 Ohm-m, que se halla desde los 0 a 10 km de profundidad que podría asociarse a la unidad tectonoestratigráfica ***Nmp-mTA***, constituida por las formaciones Quenamari, Picotani y Cayconi, las que se relacionan a la mineralización de U y Li .

5. Conclusiones

La anomalía resistiva R2 se asociaría a la Placa de Nazca que se subduce acortando y engrosando la corteza suprayacente (espesor > 60km).

En la sección MT se observa que el actual frente de sudbucción se encontraría próximo a Arequipa.

Se han reconocido 3 cuerpos resistivos importantes (R1, R1a y R3-R3b) que corresponden a las unidades tectonoestratigráficas ***MPNP-cBC, KiPeo-pAM CM*** y ***PeoNm-pAM***, correspondientes a unidades como el Complejo Basal de la Costa, Batolito de la Costa y Batolito Andahuaylas-Yauri, respectivamente. El cuerpo resistivo R1b correspondería a subvolcánicos o cámaras

magmáticas antiguas que dieron origen a las unidades ***Npl-Amb*** y ***PeoNm-AM.***

Las zonas conductivas se asocian principalmente en niveles profundos a la actividad magmática y en niveles someros a zonas de debilidad afectadas por intenso fallamiento profundo que alcanza ~20km; circulación de fluidos, especialmente al este de la sección (anomalía C4).

Las discontinuidades marcadas entre zonas resistivas/conductivas denotan la presencia de sistemas de fallas corticales profundas, de alto ángulo, evidenciándose en la transecta especialmente para la discontinuidad entre R1 y R1a (falla Sihuas), R1b y C2 (SF ACC) C2 y R3 (SF CLM) y R3b-C4 (SF USA). El tramo entre SF-USA y SF CR se encuentra intensamente fallado y plegado.

La data aeromagnética permite corroborar discontinuidades observadas con la transecta MT, tales como la discontinuidad R3-R3b que presenta un alto y un bajo magnético, entre los cuales se encuentra el Skarn de Berenguela.

Las discontinuidades entre zonas resistivas/resistivas (R1-R1a y R3 -R3b) presentan zonas verticales conductivas las que marcan áreas de interés prospectivo, al implicar la combinación de factores tales como presencia de cuerpos intrusivos (zonas resistivas) y zonas de debilidad (fallas) que favorecen circulación de fluidos (conductivas). Estas discontinuidades marcan potencial de mineralización de Fe-Cu-Au en espesores corticales delgados (R1-R1a), Cu (-Mo-Au) (extremo oriental de R1a, próximo a R1a-R1b), Au-Ag (R1b-C2) y Cu -Au -Mo, (Pb, Zn) (R3 - R3b).

6. Agradecimientos

Especial agradecimiento a los geocientistas de la Universidad de Alberta Canadá por su invaluable apoyo en el desarrollo de la transecta P1, así mismo al Bach. Carlos Nicolas Fernández Geraldino por su incondicional apoyo en el desarrollo del presente trabajo.

7. Referencias bibliográficas

Acosta Jorge, Rivera Raymond, Valencia Michael, Chirif Humberto, Huanacuni Dina, Rodríguez Italo, Villarreal Eder, Paico Deysi y Santisteban Alexander. (2009). Memoria Mapa Metalogenético del Perú 2009. En: Informe Técnico;N° A6485. INGEMMET URI: https://hdl.handle.net/20.500.12544/1957

Acosta Jorge, Quispe Jorge, Rivera Raymond, Valencia Michael, Chirif Humberto, Huanacuni Dina, Rodríguez Italo, Villarreal Eder, Paico Deysi y Santisteban Alexander. (2010) Memoria Mapa Metalogenético del oro en el Perú 2010. En: Informe Técnico;N° A6484. INGEMMET. URI: https://hdl.handle.net/20.500.12544/1888.

Carlotto, V.; Quispe, J.; Acosta, H.; Rodríguez, R.; Romero, D.; Cerpa, L.; Mamani, M.;Díaz-Martínez, E.; Navarro, P.; Jaimes, F.; Velarde, T.; Lu, S. & Cueva, E. (2009). Dominios Geotectónicos y metalogénesis del Perú. *Bol. Soc. Geol. Perú 103: 1-89*.

Dalziel, IWD (1986). Colisión y orogénesis cordillerana: una perspectiva andina. Sociedad Geológica, Londres, Publicaciones Especiales, 19 (1), 389–404.

Hollister, V. F., 1978, Geology of the porphyry copper deposits of the western hemisphere: New York, Am. Inst. Mining Metall. Petroleum Engineers, 219 p.

Kutina, J., 1998. The role of deep lithospheric structure in the genesis of giant ore deposits. Global Tectonics and Metallogeny, V. 6, Nº 3-4, Pt. 2.

Ma, Y. & Clayton, R.M. (2014). The crust and uppermost mantle structure of Southern Peru from ambient noise and earthquake surface wave analysis, *Earth and Planetary Science Letters, 395,* 61-70

Mamani, M.; Wörner, G. & Sempere, T. (2010). Geochemical variations in igneous rocks of the Central Andean orocline (13°S to 18°S): Tracing crustal thickening and magma generation through time and space. G*eological Society of America Bulletin, 22 no 1/2.;* p. 162-182.

Marchena, A. (2019). Caracterización petrográfica y litogeoquímica del magmatismo de los proyectos Tía María, Los Calatos y Chipispaya (Arequipa-Moquegua-Tacna). Tesis de grado, Universidad Nacional de Ingeniería, 279 p

Martínez, W.; Otero, J.; León, W. & Marchena, A. (2017). Estudio metalogenético de la faja magmática Jurásico-Cretácica, asociado a los depósitos minerales tipo IOCG y Pórfidos entre Ica, Arequipa, Moquegua y Tacna. Bloque Sur. INGEMMET, 2017

Ramos, V. A.; Cristallini, E.O. & Pérez, D.J. (2002). The Pampean flat-slab of the Central Andes. *Journal of South American Earth Sciences 15 (2002)*. 59-78.

Ramos, V.A., 2008, The basement of the Central Andes: The Arequipa and related terranes: Annual Review of Earth and Planetary Sciences, v. 36, p. 289–324, doi: 10.1146/annurev.earth.36.031207.124304.

Simpson, M. & Bahr, K. (2005). Practical Magnetotelluric. Cambridge University Press.

Titley, S.R., and Beane, R.E., 1981, Porphyry copper deposits, in Skinner, B.J., ed., Economic Geology Seventy-fifth Anniversary Volume, 1905- 1980: Economic Geology Publishing Co., p. 214-269. Titley, S.R., Thompson, R.C., Haynes, F.M., Manske, S.L.,

Valencia Carlos, Calla Darwin, Flores Rosmery, Huillca José, Valdivia Igor (2020). Informe Técnico Geofísico para la Transecta P01 Método Magnetotelúrico. INGEMMET.

Terminología Para Reportes De Recursos Minerales y Reservas De Mena

Heller Agustín Bernabé Tapia [1]

[1] Residencia: Leon XIII, H-11 Cayma, Arequipa (Heller-Bernabe@hotmail.com)

1. Abstract

Public Reports related to Exploration Results, Mineral Resources and Ore Reserves should only use the terms indicated in Figure 1.

Figure 1 establishes the framework for classifying tonnage and grade estimates to reflect different levels of geological confidence and different degrees of technical and economic evaluation. Mineral Resources can be estimated on the basis of geoscientific information with input from other disciplines. The Ore Reserves, which are a modified subdivision of the Indicated and Measured Mineral Resources (shown within the dashed boundary in Figure 1), require consideration of the Modifying Factors that affect extraction and should be estimated in most cases with input from a variety of disciplines. The 'Modifying Factors' are considerations that are used to convert Mineral Resources to Ore Reserves. These include, but are not limited to, mining, metallurgical processing, infrastructure, economic, marketing, legal, environmental, social, and government factors.

Los **Reportes Públicos** relacionados con Resultados de Exploración, Recursos Minerales y Reservas de Menas solo deben usar los términos señalados en la Figura 1.

La Figura 1 establece el marco para clasificar los estimados de tonelaje y ley para reflejar los diferentes niveles de confianza geológica y los diferentes grados de la evaluación técnica y económica. **Los Recursos Minerales** pueden estimarse sobre la base de información **geocientífica** con el aporte de **otras disciplinas**. **Las Reservas de Mena**, que son una subdivisión modificada de los Recursos Minerales Indicados y Medidos (mostrados dentro del borde discontinuo en la Figura 1), requieren consideración de los Factores Modificadores que afectan la extracción y que deberían estimarse en la mayoría de los casos con el aporte de una variedad de disciplinas.

Los 'Factores Modificadores' son consideraciones que se usan para convertir Recursos Minerales a Reservas de Mena. Estas incluyen, pero no se limitan a los factores de minado, procesamiento metalúrgico, infraestructura, económico, marketing, legal, ambiental, social y gubernamental.

Niveles de Confianza Geológica, Técnica y Económica. Factores Modificadores, para convertir Recursos Minerales a Reservas de Mena y su Reportabilidad.

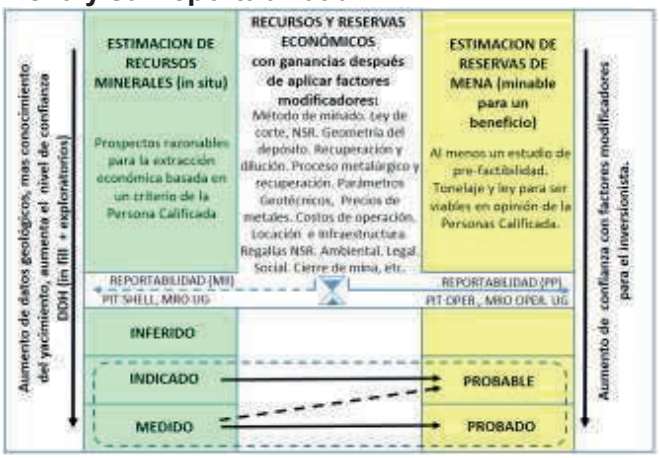


Figura 1. Relación General entre Resultados de Exploración, Recursos Minerales y Reservas de Mena, bajo factores modificadores para su Re portabilidad. Fuente JORC Code Modificado - 2021.

2. Introducción

Al planificar, implementar y dirigir cualquier trabajo de estimación, la persona competente QP debe garantizar y documentar que las prácticas seguidas se basen en una metodología generalmente aceptada en la industria y que se hayan cumplido las disposiciones de las pautas de mejores prácticas de exploración durante la fase de exploración que condujo a la delimitación del cuerpo mineral (Orebody).

Además de ayudar al QP en la preparación de la estimación RR&RR, estas "Directrices de mejores prácticas de estimación" tienen por objeto garantizar una alta calidad de trabajo y fomentar una mayor estandarización de la presentación de informes en documentos divulgados públicamente.

En todos los casos el tiempo considerado debería ser revelado y discutido por la Persona Competente. Cualquier ajuste a los datos con el propósito de hacer el estimado de Recurso Mineral, por ejemplo, al cortar o factorizar las leyes, debería ser claramente declarado y descrito en el Reporte Público.

Ciertos reportes (por ejemplo, reportes de inventario de carbón, reportes de exploración al

gobierno y otros reportes similares que no tienen la intención primaria de proveer información para propósitos de inversión) pueden requerir la total revelación de toda la mineralización, incluyendo algún material que no tiene expectativas razonables para eventual extracción económica. Tales estimados de mineralización no calificarían como Recursos Minerales o Reservas de Mena en términos del Código JORC.

Los Lineamientos de Mejores Prácticas para la Estimación de Recursos Minerales y Reservas de Mena del JORC Code y CIM (Lineamientos de Mejores Prácticas de MRMR) del Comité de Recursos Minerales y Reservas de Minerales del Instituto Canadiense de Minería, Metalurgia y Petróleo (CIM) como una guía general para ayudar a los geocientíficos (o equivalentes) e ingenieros (o equivalentes) profesionales a preparar estimaciones de alta calidad de MRMR que incorporen prácticas sólidas geocientíficas, ingeniería, evaluación y diseño. Se basan en principios bien establecidos de estimación y planificación de minas y están diseñados para proporcionar pautas generales de las mejores prácticas profesionales empleadas en la preparación de estimaciones de MRMR que debe cumplir con los requisitos del Instrumento Nacional, Estándares de Divulgación para Proyectos Minerales (NI-43-101).

Al menos una persona calificada (QP) debe asumir la responsabilidad de cada parte del proceso de estimación al divulgar públicamente los resultados.

3. Alcances de la Terminología de Recursos minerales y Reservas de mena

3.1. Declaración de Recursos Minerales

Recursos minerales, es una concentración u ocurrencia de material de interés económico intrínseco en o sobre la corteza de la Tierra en forma y cantidad en que haya probabilidades razonables de una eventual extracción económica. La ubicación, cantidad, ley, características geológicas y continuidad de un Recurso Mineral son conocidas, estimadas o interpretadas a partir de evidencias y conocimientos geológicos específicos. Los Recursos Minerales se subdividen según su grado de confiabilidad, en orden ascendente de la confianza geológica, en categorías de Inferidos, Indicados y Medidos (MII).

La reportabilidad de los recursos minerales debe tener "perspectivas razonables para una eventual extracción económica". Independientemente del enfoque específico utilizado o los procedimientos seguidos, los profesionales deben asegurarse de que todas las declaraciones de Recursos Minerales satisfagan el requisito de “perspectivas razonables para una eventual extracción económica” o “factores modificadores”.

Los factores modificadores para la viabilidad técnica y la viabilidad económica potencial deben ser considerados y declarados claramente al preparar declaraciones de Recursos Minerales. Estos incluirán elementos tales como:

- El tamaño y las condiciones legales de la tenencia de la tierra suficientes para encerrar completamente el recurso mineral.
- La selectividad de extracción para los métodos mineros considerados en relación con el tamaño y geometrías de las interpretaciones de los controles geológicos de mineralización.
- El método de procesamiento en consideración, la recuperación esperada del material extraído a un producto comercializable y el volumen de producción propuesto.
- Los precios de los metales, valor del producto y el mercado del producto a ese precio, y
- Los factores importantes para las leyes o valores de corte (por ejemplo, recuperación del proceso, pagabilidad de la fundición, cargos por tratamiento, costos operativos, regalías, etc.) utilizados para informar las estimaciones de recursos minerales.
- Para un recurso mineral, los factores modificadores importantes para la viabilidad técnica, económica, geotécnica y metalúrgica deben estar razonablemente desarrollados y basados en la práctica y experiencia de la industria generalmente aceptadas y para la reportabilidad es importante valorizar los bloques de minado económicamente viables, bajo algoritmos de un pit Shell económico y su ubicación física de la mina (Cono flotante o Lerch grossmann) para Open Pit y MRO (Mineable Reserves Optimimizer) para subterráneo. Los Recursos no deben ser declarados bajo Tierra, ello es un error que ninguna entidad financiera va aceptar, debe reflejar el nivel de información, conocimiento y etapa de desarrollo de la propiedad minera en ese momento. Las cifras de tonelaje y ley deben citarse únicamente hasta el nivel de exactitud y precisión de la estimación.

3.2. Concepto de tipos de Recursos Minerales

3.2.1 Recurso Mineral Inferido. Es aquella parte de un Recurso Mineral por la cual se puede estimar el tonelaje, ley y contenido de mineral con un bajo nivel de confianza. Se infiere a partir de evidencia geológica y se asume, pero no se certifica la continuidad geológica ni de la ley. Se basa en información inferida mediante técnicas apropiadas de localizaciones como pueden ser afloramientos,

zanjas, tajos, laboreos y sondajes que pueden ser limitados o de calidad y confiabilidad incierta.
Un Recurso Mineral Inferido tiene un nivel de confianza más bajo que el que se aplica a un Recurso Mineral Indicado y no se debe convertir a Reserva de Mena. Es razonable esperar que la mayoría de los Recursos Minerales Inferidos pudieran ser elevados a la categoría de Recursos Minerales Indicados como resultado de exploración continuada.
En circunstancias en las que la estimación del Recurso Mineral Inferido se presenta sobre la base de extrapolación más allá del espaciamiento nominal de muestreo y tomando en cuenta el estilo de mineralización, el reporte debe contener suficiente información para informar al lector de:

- ✓ la distancia máxima que el recurso es extrapolado más allá de los puntos de muestreo
- ✓ la proporción del recurso que se basa en datos extrapolados
- ✓ la base sobre la cual el recurso es extrapolado hasta estos limites
- ✓ una representación esquemática del Recurso Mineral Inferido que muestre claramente la parte extrapolada del recurso estimado.

3.2.2 Recurso Mineral Indicado. Es aquella parte de un Recurso Mineral para el cual puede estimarse con un nivel razonable de confianza el tonelaje, densidad, forma, características físicas, ley y contenido mineral. Se basa en información sobre exploración, muestreo y pruebas reunidas mediante técnicas apropiadas en ubicaciones como pueden ser: afloramientos, zanjas, rajos, túneles, laboreos y sondajes. Las ubicaciones están demasiado espaciadas o su espaciamiento es inapropiado para confirmar la continuidad geológica y/o de ley, pero está espaciada con suficiente cercanía para que se pueda suponer continuidad.
La evidencia geológica se deriva de exploración adecuadamente detallada y confiable, muestreo y pruebas recogidas a través de técnicas apropiadas de lugares tales como afloramientos, trincheras, pozos, labores y sondajes y es suficiente para asumir la continuidad geológica y de ley (o calidad) entre los puntos de observación donde se recogen los datos y las muestras.
Un Recurso Mineral Indicado tiene un menor nivel de confianza que el que se le aplica a un Recurso Mineral Medido y sólo puede ser convertido a una Reserva Probable.
3.2.3 Recurso Mineral Medido. es aquella parte de un Recurso Mineral para la cual la cantidad, ley (o cantidad), densidades, forma y características físicas se estiman con confianza suficiente para permitir la aplicación de Factores Modificadores para sustentar un planeamiento de minado detallado y la evaluación final de la viabilidad económica del depósito. Todos los reportes de Recursos Minerales deben satisfacer el requerimiento que existen expectativas razonables para una eventual extracción económica (es decir más probable que lo contrario), sin importar la clasificación del recurso.
La evidencia geológica se deriva de exploración detallada y confiable, muestreo y pruebas recogidas a través de técnicas apropiadas de lugares tales como afloramientos, trincheras, pozos, labores y sondajes y es suficiente para confirmar la continuidad geológica y de ley (o calidad) entre los puntos de observación donde se recogen los datos y las muestras.
Recurso Mineral Medido, tiene un mayor nivel de confianza que el que se aplica tanto a un Recurso Mineral Indicado como a un Recurso Mineral Inferido. Puede ser convertido a una Reserva de Mena Probada o bajo ciertas circunstancias a una Reserva de Mena Probable.

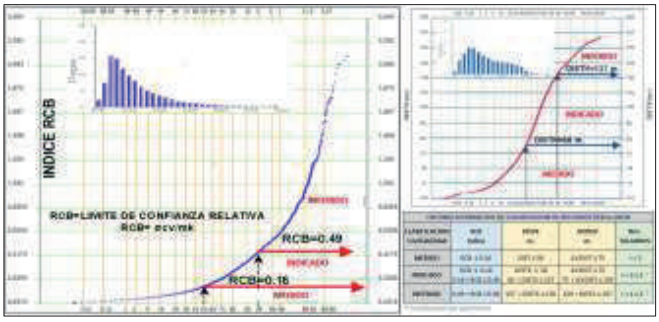


FIGURA 2. Clasificación de Recursos Minerales: a) la distancia máxima a la muestra más cercana (DISTK), b) distancia media de las muestras utilizadas para estimar el bloque (AVDIST), c) número de DDH utilizado en la estimación (NTAL) y por cada dominio. Como una alternativa, tenemos también mediante el uso del índice de RCB (Límite de Confianza Relativa) al 95% de confianza.

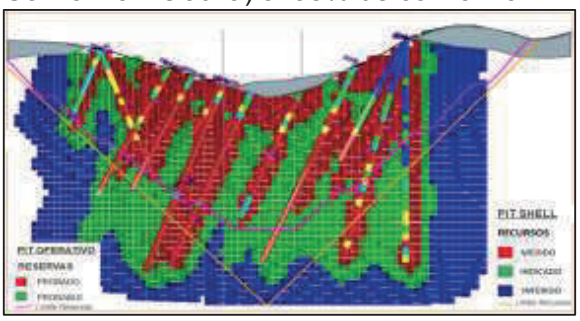


FIGURA 3. Niveles de confianza de Recursos (MII) y Reservas (PP), los reportes deben satisfacer el requerimiento que existen expectativas razonables para una eventual extracción económica dentro de una malla de perforación optimizada.

4. Reservas de Mena

Una "Reserva de Mena" es la parte económicamente explotable de un Recurso Mineral Medido y/o Indicado. Incluye dilución de materiales y tolerancias por pérdidas que se puedan producir cuando el material es minado o extraído y es definido por estudios apropiados a nivel de Factibilidad o Pre-Factibilidad que consideran la aplicación de Factores Modificadores y demuestran que, al momento de reportar, la extracción podría ser razonablemente justificada.

El punto de referencia en el cual se definen las Reservas, generalmente el punto donde el mineral es entregado a la planta de proceso, debe ser declarado. Es importante que, en todas las situaciones donde el punto de referencia sea diferente, como por ejemplo para un producto vendible, una declaración aclaratoria sea incluida para asegurar que el lector esté totalmente informado de lo que está siendo reportado.

Los supuestos claves y los resultados del Estudio de Pre - Factibilidad o Estudio de Factibilidad deben ser indicados al momento de reportar una Reserva de Mena nueva o que tenga una modificación material. Estudios de Pre–Factibilidad y de Factibilidad son definidos según el Código JORC.

Las Reservas de Mena se subdividen en orden creciente de confianza en **Reservas Probables** de Mena y **Reservas Probadas** de Mena.

Al reportar las Reservas de Mena, la información sobre los factores estimados de recuperación de procesamiento de mineral es muy importante, y siempre debería ser incluida en los Reportes Públicos.

Las Reservas de Mena son aquellas porciones de los Recursos Minerales que después de la aplicación de todos los Factores Modificadores, resultan en un tonelaje y ley estimados que, en opinión de la Persona Competente que hace la estimación, pueden ser la base de un proyecto viable después de tomar en cuenta todos los Factores Modificadores relevantes. La concepción de una Reserva de Mena sin un diseño de mina o un plan minero a través de un proceso de aplicación de un factor al Recurso Mineral es inaceptable.

Las Reservas de Mena son reportadas incluyendo material marginalmente económico y material de dilución entregado para tratamiento o despachado desde la mina sin tratamiento. El término "económicamente explotable" implica que la extracción de la Reserva de Mena ha demostrado ser viable bajo suposiciones financieras razonables.

Esto variará según el tipo de yacimiento, el nivel de estudio que ha sido realizado y el criterio financiero de la compañía individual. Por esta razón, no puede haber una definición fija para el término "económicamente explotable".

Para lograr el nivel requerido de confianza en los Factores Modificadores, se tienen que haber realizados estudios apropiados a nivel de Factibilidad o Pre–Factibilidad antes de determinar las Reservas de Mena. Los estudios habrán determinado un plan minero y una secuencia de producción que es técnicamente lograble y económicamente viable y a partir de los cuales las Reservas de Mena pueden derivarse.

5. Conclusiones

✓ Identificar la Tabla 1 del Código JORC como un conjunto mínimo de criterios y no como un esquema prescriptivo para la presentación del informe.

✓ Reconocer que la clasificación de Recursos Minerales resume todo el trabajo realizado por la Persona Competente del Orebody reportado.

✓ Los Recursos minerales y Reservas de mena siempre deben ser estimados con parámetros económicos, geotécnicos y metalúrgicos.

✓ La Reportabilidad de los Recursos, debe haber un prospecto razonable de una eventual extracción económica del Recurso mineral en cuestión. Este aspecto se ha incorporado a la estimación del Recurso Mineral, mediante los factores modificadores, la utilización del Pit Shell Económico busca maximizar el beneficio total del mineral dentro del pit, basado en el beneficio neto de cada bloque. Que a priori nos dará a conocer el potencial económico del yacimiento. Este pit Shell debe ser estimado usando los mismos parámetros económicos y técnicos que sustentan el estudio del proyecto incluyendo el mineral inferido (MII), para un estudio conceptual, pre factibilidad o factibilidad.

AGRADECIMIENTOS

Agradecer a ^{PRO}**EXPLO**2021, por la oportunidad de dar a conocer nuevos términos en los Reportes bajo el Código JORC y NI-43-101 de los RR&RR Minerales Confiables para el Desarrollo del Perú.

REFERENCIAS

✓ Australasian Code for Reporting of Exploration Results, Mineral Resources and Ore Reserves. The JORC Code 2012 Edition.

✓ Clasificación de Recursos de mineral, un enfoque alternativo. Por Abdullah Arik, Tucson Arizona USA.

✓ Comité de Recursos Minerales y Reservas de Minerales del Instituto Canadiense de Minería, Metalurgia y Petróleo (Comité MRMR de CIM).

✓ La Tierra, sus Recursos Minerales y Reservas de Mena. Heller Bernabé – 2021.

El ratio de descuento y el rol del riesgo en la toma de decisiones en minería

Alí Ivan Meres Vargas[1], Juan Manuel Mansilla Olivas[2], Fernando Enrique Sagastegui Ayala[3]

[1] Astay Systems, Lima, Peru (ameres@astay.pe)
[2] Astay Systems, Lima, Peru (jmansilla@astay.pe)
[3] Astay Systems, Lima, Peru (fsagastegui@astay.pe)

1. Abstract

La literatura existente sobre la evaluación de proyectos mineros es vasta, y sigue un principio que rige nuestra forma de hacer minería hasta ahora: Hay que considerar el riesgo en la toma de decisiones, dado que las condiciones donde se desarrolla esta industria no son constantes en el tiempo. Sin embargo, la forma en cómo se aborda este punto es un tema que ha sido revisado exhaustivamente, dejando en claro la existencia de posturas sobre la inclusión o no de los riesgos del proyecto como parte de su costo de capital y, finalmente, en el ratio de descuento con que se evalúa.
En el presente documento, los autores realizan una revisión de la literatura existente sobre el rol del riesgo y su inclusión en el ratio de descuento. Además, resaltan los principales riesgos que posee un proyecto minero y como estos varían de acuerdo con la etapa en el que se encuentra. Seguido a ello, se propone una forma de cuantificar un factor de ajuste a raíz de estos riesgos; de modo que, se pueden incluir en una metodología de evaluación que permita considerarlos dentro del proceso de toma de decisiones.

2. Costo ponderado de capital (WACC)

Un proyecto minero se financia, en la mayoría de los casos, con una combinación de deuda y el capital propio de los accionistas (equity en adelante). Deuda se refiere al dinero que puede ser obtenido con préstamos bancarios o la emisión de bonos corporativos. Equity, en cambio, es el dinero que proviene de los propios accionistas para la puesta en marcha del proyecto. Así, el Costo Ponderado de Capital (WACC por sus siglas en inglés) es la combinación de las fuentes de financiamiento junto al costo de cada una de ellas.

$$WACC = w_d . k_d . (1 - t) + w_e . k_e$$

Donde:

k_e es el costo del *equity*, w_e es el peso ponderado del *equity*.
k_d es el costo de la deuda, w_d es el peso ponderado de la deuda. t es la tasa de impuesto

Más allá de las fórmulas, el WACC es el mínimo ratio en los que los flujos de caja deberán ser descontados. Esto con la intención de reflejar un retorno mínimo de la inversión, el cual debe ser por lo menos equivalente al costo asociado al financiamiento. De esta manera, interpretar el rol de WACC en la metodología del flujo de caja descontado (DCF, por sus siglas en inglés) es bastante simple: un mayor WACC (léase financiamiento más caro) hace que el valor de los flujos de caja, al traerlos al presente, sea menor, resultando en un valor presente neto (NPV) menor. En cambio, un menor WACC (financiamiento más barato) hace que el valor de los flujos de caja, al traerlos al presente, sea mayor, resultando en un NPV mayor.
Por otro lado, es importante señalar que el costo de oportunidad de la deuda se obtiene a partir de como la entidad prestadora haya evaluado el proyecto. En cambio, el costo de oportunidad del equity requiere de un análisis más exhaustivo; debido a la complejidad que representa materializar las expectativas de los accionistas en montos acorde al mercado y al riesgo del proyecto.

3. Principales riesgos de un proyecto minero

Park (2012) plantea un algoritmo que resume los principales riesgos de un proyecto minero y como clasificarlos a fin de tener una visión integral de estos. En la actualidad, contamos con análisis de empresas consultoras que señalan los principales riesgos de las compañías mineras más grandes del mundo. Si bien los detalles que involucran riesgos que posee un proyecto minero está fuera del alcance del presente documento, la literatura reconoce los siguientes como los más importantes:

3.1 Riesgo geológico

El componente geológico hace que la evaluación de proyectos mineros sea diferente al de otras industrias. La geología define la localización del depósito mineral, las propiedades físicas y químicas del depósito, si este puede ser minado de una manera segura, y si es económicamente viable su explotación en escalas acorde a la política de la empresa. (Rendú, 2017)

El descubrimiento de depósitos con valor económico es el desafío inicial de las empresas de exploración. Considerando la baja probabilidad de éxito (en la mayoría de los casos muy baja) el alto nivel de recompensa por el logro es el principal atractivo. Una vez descubierto el depósito, las fases siguientes incurren en un gasto significativo para determinar el valor económico de este. En este punto, toda información recolectada sobre el depósito, y zonas circundantes a este, será fundamental dentro del proceso de toma de decisiones.

Son tres los aspectos más importantes de la información geológica:

- ✓ Deben ser medidas y registradas cumpliendo estándares que permitan asegurar la calidad de la información.
- ✓ Pueden variar en el espacio donde se encuentra. Un depósito mineral rara vez es completamente uniforme en tamaño y calidad.
- ✓ Son fijos en el tiempo; ya que, las condiciones geológicas toman gran cantidad de tiempo en modificarse.

3.2 Riesgo soberano o riesgo país

Hablar de riesgo soberano, o riesgo país, es referirse a factores propios del lugar donde se encuentra el proyecto minero. Estos factores incluyen, mas no se limitan, a la estabilidad civil, políticas económicas, liderazgo y estabilidad política, política tributaria, entre otros factores.

Smith (1995) clasifica estos riesgos en cuatro grandes categorías: el riesgo político, riesgo geográfico (el cual incluye factores como la infraestructura y el clima), riesgo económico y riesgo social.

Todos estos riesgos se capturan y cuantifican mediante índices de crédito generados por agencias como Moody's, Standard and Poor's y Fitch Group. La elección de uno u otro indice dependerá de la política empresarial.

3.3 Riesgo técnico

Los riesgos técnicos involucran, mas no se limitan, a factores como:

- ✓ Selección de ratios de producción.
- ✓ Precios unitarios.
- ✓ Construcción de infraestructura necesaria del proyecto.
- ✓ Influencia de la dilución, recuperación, eficiencias de minado y cambios operativos.

Indudablemente, los riesgos técnicos varían tanto en el tiempo y en el espacio. En el tiempo, debido a diversos factores y etapas del proyecto que hacen que estos riesgos varíen hacia valores propios de un escenario más optimista o pesimista; asimismo, en espacio, dado que, por ejemplo, los costos de carguío y acarreo dependerán de la ubicación del material que se esté extrayendo.

De acuerdo con lo descrito, la mayoría de los diversos riesgos tieden a variar en el tiempo. Esto como consecuencia de las variaciones del mercado, una mejor comprensión del depósito junto a otros *key* drivers que afectan la toma de decisiones. De esta manera, se hace necesario reflexionar sobre el uso de un único ratio de descuento durante la evaluación del proyecto en las diferentes etapas que irá a desarrollar.

4. El impacto del riesgo del proyecto en la tasa de descuento

Un asunto controversial en la evaluación de proyectos mineros es identificar la forma "más adecuada" de incorporar los factores de riesgo como parte de la evaluación. La literatura indica que incluir el riesgo en el costo del equity, no es igual al análisis de los riesgos del proyecto dentro del cálculo de su NPV. Esto se basa en el hecho que un incremento del costo del equity resultará en un incremento del WACC, subvaluando el proyecto en cuestión. De esta manera, es también válido en considerar los impactos de los riesgos inherentes del proyecto de forma separada del cálculo del WACC.

4.1. Impacto del riesgo en las etapas del proyecto minero

Cada etapa de un proyecto minero posee un nivel de riesgo diferente. Esto se debe, en mayor medida, a que cada etapa va agregando más información sobre los "*key drivers*" del proyecto. La

Figura 1 nos ayuda a mostrar como el valor del proyecto va reduciendo su variabilidad en cuanto este va superando etapas. Esta reducción se logra trabajando en las fuentes claves de riesgo y poniendo en valor la incertidumbre de las variables en la toma de decisión.

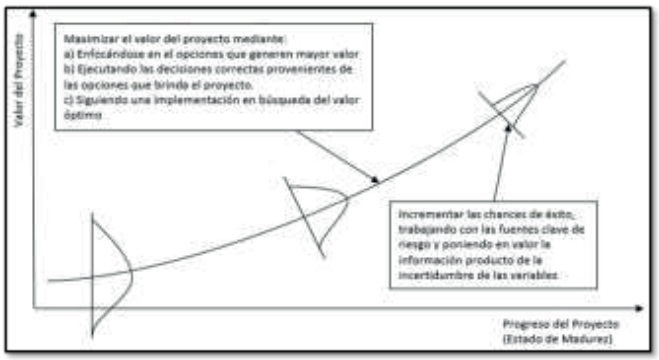


Figura 1: Incremento del valor del proyecto a través del progreso de éste. Adaptado de: "Application of Value Engineering Principles to Mining Studies", por Schrimpf & Bryan (2012)

Más información relacionada al proyecto también genera un sinceramiento de las expectativas del riesgo inherente afectando su valorización. Si el proyecto se encuentra en fase de exploración, el riesgo geológico será mayor; dado que se tiene limitada información sobre la calidad y volumen del yacimiento. Esta incertidumbre genera que el costo del financiamiento sea mayor, lo que produce una restricción al acceso del capital requerido para continuar con los estudios necesarios previos a la operación.

Superada la fase de estudios, el enfoque tradicional sugiere un ratio de descuento fijo en el tiempo aún cuando el proyecto se encuentra ya operando. Es decir, el costo de la deuda va a seguir siendo considerado más allá del horizonte de tiempo correspondiente a la deuda en sí. Este suceso ha sido estudiado por Lilford *et al* (2018), donde muestra el impacto de no considerar adecuadamente la deuda dentro del flujo de caja; asímismo, el utilizar solo un valor de ratio de descuento como parte de la evaluación integral del proyecto.

Lilford *et al* (2018) indica que el equity en una mina en operación, es mayor en proporción a la deuda tomada cuando la mina se encontraba como proyecto. Este cambio en el financiamiento hace que el ratio de descuento varíe en el tiempo. El impacto de este enfoque plantea; además, una nueva manera de realizar la evaluación de un proyecto minero. Este deberá darse mediante una mirada integral del financiamiento del proyecto no solo en su etapa de estudios, sino también cuando el proyecto sea una mina ya operando, e incluso se encuentre realizando el cierre correspondiente.

5. Metodología propuesta.

El riesgo de un proyecto minero ha demostrado tener un impacto en el ratio de descuento con el que se evalúa a través de sus distintas etapas. Smith (1995) fue uno de los pioneros en indicar que para proyectos en fase de exploración correspondería un nivel de riesgo del 20%, para proyectos de prefactibilidad alrededor de 15%, en casos de factibilidad 10%, finalmente, en una mina en operación tendría valores entre 5% y 8%. (Figura 2)

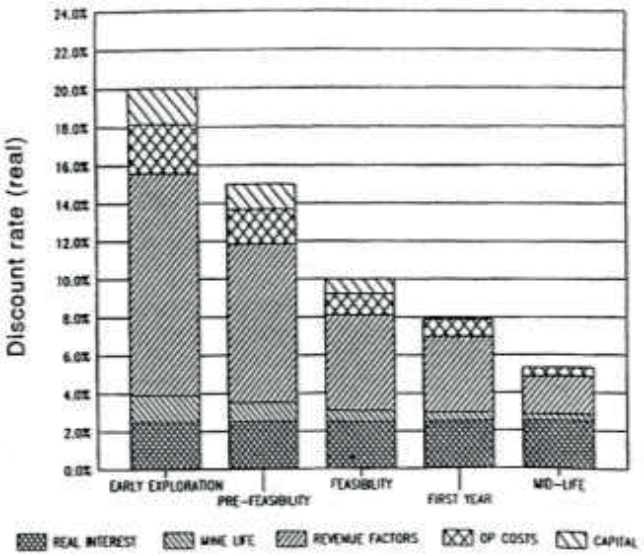


Figura 2: Tasas de descuento para un proyecto minero, según sus diversas etapas. Tomado de "Discount rates and risk assessment in mineral project evaluation" por Smith (1995)

Este enfoque ha sido avalado por autores como Davis (1995), Taheri et al (2009), Anderson (2000) y Tajirian (1997) donde señalan que la tasa de descuento, con la que se evalúa el proyecto, es el resultado del WACC junto a una prima del riesgo inherente a este; en cambio, autores como Sorentino (1994), Espinoza y Rojo (2017) indican que se debería considerar el impacto del riesgo como un flujo negativo adicional luego de impuestos.

Jones y Lilford (2019) plantea un enfoque diferente: considerar el impacto del riesgo separado al costo de capital (WACC). Así, se tendrán flujos independientes tanto al financiamiento del proyecto y el impacto de los riesgos inherentes a este. El enfoque plantea el uso del NPV de riesgo, el cual es la resta del resultado del valor obtenido descontando los flujos del proyecto a tasa WACC

con los flujos descontados a la denominada tasa de ajuste de riesgo (RADR por sus siglas en inglés).

$$NPV_{risk} = \sum(DCF_{WACC}) - \sum(DCF_{RADR})$$

$$NPV_{risk} = Valor_{WACC} - Valor_{RADR}$$

Definir un RADR depende de la política empresarial de quienes toman la decisión de continuar con el proyecto. Esta tarea suele ser complicada de realizar por las diversas metodologías que existen, cada una con sus ventajas, supuestos y limitaciones para su uso. Sin embargo, los autores han implementado una metodología a partir de los estudios desarrollados por Park (2012). De esta manera, el cálculo del NPV de riesgo tendrá un enfoque más certero al momento de considerar el riesgo del proyecto que se viene evaluando.

6. Caso Proyectosa S.A

Proyectosa S.A es una empresa minera que tiene a su disposición el proyecto Veta Karen (en adelante, El Proyecto) el cual se encuentra en exploración. El Proyecto está ubicado en la región norte del Perú y está contemplado para la explotación de minerales que contienen plomo, zinc y plata. Como parte de la evaluación se estimó un CAPEX inicial de USD 2.75 millones para un ritmo de producción de 115,000 Tn/año y un periodo de explotación de 10 años.

El proyecto tiene un NPV de USD 637,717 a una tasa de descuento de 10% y un TIR de 16%. (Figura 3). Es importante mencionar que la empresa cumple el rol de pequeño productor minero, por lo que no se contempla el costo de procesamiento en la evaluación. De esta manera, todo el material producido será vendido a un precio flat de 20 USD/Tn, lo que garantiza la continuidad de los ingresos durante la vida del proyecto; sin embargo, esto pone un gran énfasis en los costos de operación para poder generar la rentabilidad esperada por la empresa.

Las condiciones actuales de El Proyecto. establecen un marco referencial sobre sus riesgos. Actualmente, este se encuentra en exploración con un nivel limitado en cuanto cantidad y calidad de información. Sumado a esto, existen fuertes restricciones para la toma de deuda por parte de Proyectosa S.A, lo que exige un control de costos y gastos exigente para un inicio de operaciones viable. Lo mencionado son inputs suficientes y necesarios para considerarlos en la evaluación de su viabilidad; su inclusión se realizará de acuerdo con la metodología desarrollada por los autores.

Así, el objeto de estudio es determinar cómo el nivel del riesgo de El Proyecto genera un cambio en su NPV. De acuerdo con Jones y Lilford (2019), se procedió según lo descrito en la Figura 4. Los flujos de caja generados han sido descontados en primera instancia a tasa WACC para obtener el $Valor_{WACC}$ de USD 3.3 millones. Seguidamente, mediante un RADR de 3.0% (obtenido a partir de la metodología desarrollada por los autores) se obtuvo el Valor $_{RADR}$ de USD 3.0 millones.

Finalmente, el NPV_{risk} resultante es equivalente a USD 381,238.

7. Interpretación de Resultados

El NPV_{risk} generado indica que más de la mitad del NPV del proyecto estará comprometido si no se gestionan los riesgos de una manera eficiente. El RADR obtenido muestra un impacto fuerte del riesgo geológico y al difícil acceso a tomar deuda. Finalmente, si bien el RADR puede variar al usar otra metodología de cálculo, Proyectosa S.A deberá considerar parar los planes estipulados con El Proyecto y establecer una revalorización de este, a partir de cifras que muestren su potencial geológico y económico de una manera más certera.

8. Conclusiones

La búsqueda de cómo incluir las diversas fuentes de riesgo de un proyecto minero dentro de su evaluación es constante. La literatura muestra enfoques con argumentos sólidos que permiten tanto cuantificar estos riesgos e incluirlos en el proceso de toma de decisión. Sin embargo, la aplicación de estos argumentos está sujeto a supuestos, cuya aceptación dependerán necesariamente de quienes tomen la decisión de invertir o no en un proyecto minero. Proyectosa S.A y el proyecto Veta Karen representan el aporte de los autores hacia esta búsqueda. El caso descrito logra mostrar cómo una oportuna inclusión del riesgo en la toma de decisiones puede cambiar la forma en que hacemos minería, volviéndola mas eficiente, segura y responsable para todos.

8. Descargo de responsabilidad

El presente estudio se ha realizado sin financiamiento externo de ningún tipo. Los casos presentados no representan en lo absoluto a proyectos que hayan sido evaluados por Astay

Systems tanto en el pasado, presente o futuro cercano. Las opiniones expresadas en el documento son propiedad exclusiva de los autores, y no representan una comunicación formal o casual de controversia hacia Astay Systems o empresas afiliadas.

9. Referencias

- Anderson, R.C., Byers, S.S. and Groth, J.C. (2000) The cost of capital for projects: conceptual and practical issues, Management Decision, Vol. 38, No. 6, pp.384–393
- Davis, G.A. (1995). (Mis)use of Monte Carlo Simulations in NPV Analysis. SME Non Meeting Paper 94–309. Manuscript April 11, 1994.
- Espinoza, R.; Rojo, J. (2017). Towards sustainable mining (Part I) Valuing investment opportunities in the mining sector. Resources Policy.
- Jones, O. Lilford, E. Chan, F. (2019) The business of Mining. Mineral project valuation. CRC Press, Curtin University.
- Lilford, E.; Maybee B.; Packey D. (2018). Cost of capital and discount rates in cash flow valuations for resources projects. Resources Policy. https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2018.09.008.
- Park H.M. and Nelson M.G, (2013). Mining project evaluation process for investment decisions: Risk Variables in mining projects – part one, in Mining Engineering Magazine Oct. 2013 – SME. Pags (1-10)
- Park H.M. and Nelson M.G, (2013). Mining project evaluation process for investment decisions: Modeling and assessment of project risk – part two, in Mining Engineering Magazine Oct. 2013 – SME. Pags (1-7)
- Park H.M. and Nelson M.G, (2013). Mining project evaluation process for investment decisions: Demonstration of the risk assessment model – part three, in Mining Engineering Magazine Oct. 2013 – SME. Pags (1-3)
- Rendu, J. (2017). Risk Management in Evaluating Mineral Deposits. SME. p 99-121.
- Schrimpf & Bryan (2012) Application of Value Engineering Principles to Mining Studies
- Smith, L.D. (1995). Discount Rates and Risk Assessment in Mineral Project Evaluations. CIM Bulletin, 88(989), pp. 34–43, April 1995.
- Sorentino, C. Barnett, D. W. (1994). Financial risk and probability analysis in Mineral Valuation. Mineral Valuation Methodologies Conference. Sydney 1994
- Taheri M. Irannajad M. (2009) Risk adjusted discount rate estimation for evaluating mining projects. Jassa. The Finsia Journal of applied finance 2009.

Description	Units	Año 0	Año 01	Año 02	Año 03	Año 04	Año 05	Año 06	Año 07	Año 08	Año 09	Año 10	Total
Ingreso													
Ingreso por mineral	US$		1,730,340	1,721,700	1,723,860	1,724,040	1,723,680	1,733,220	1,731,240	695,592	695,592	695,592	14,174,856
Total ingresos	US$		1,730,340	1,721,700	1,723,860	1,724,040	1,723,680	1,733,220	1,731,240	695,592	695,592	695,592	14,174,856
Costos													
Perforación	US$		(31,928)	(32,172)	(31,922)	(31,952)	(32,177)	(32,239)	(31,828)	(12,732)	(12,732)	(12,732)	(262,417)
Voladura	US$		(42,987)	(43,292)	(42,978)	(43,016)	(43,300)	(43,382)	(42,863)	(18,348)	(18,348)	(18,348)	(356,860)
Carguío	US$		(414,191)	(418,548)	(414,457)	(414,926)	(418,529)	(418,998)	(412,564)	(164,875)	(164,875)	(164,875)	(3,406,836)
Acarreo	US$		(337,522)	(423,467)	(368,296)	(341,753)	(320,681)	(341,211)	(377,577)	(162,979)	(162,979)	(162,979)	(2,999,444)
Servicios auxiliares	US$		(149,195)	(150,765)	(149,291)	(149,460)	(150,758)	(150,927)	(148,609)	(59,389)	(59,389)	(59,389)	(1,227,175)
G&A	US$		(92,707)	(92,707)	(92,707)	(92,707)	(92,707)	(92,707)	(92,707)	(37,083)	(37,083)	(37,083)	(760,199)
CAPEX	US$	(2,750,000)											
Total costos	US$	(2,750,000)	(1,068,530)	(1,160,950)	(1,099,652)	(1,073,815)	(1,058,153)	(1,079,464)	(1,106,148)	(455,406)	(455,406)	(455,406)	(11,762,930)
TOTAL US$		**(2,750,000)**	**661,810**	**560,750**	**624,208**	**650,225**	**665,527**	**653,756**	**625,092**	**240,186**	**240,186**	**240,186**	**2,411,926**

Description	Units	Valor
Ingreso por Mineral	US$	20.0
VAN	10%	637,716.6
TIR		0.2

Figura 3: Flujo de caja proyecto Veta Karen de Proyectosa SA. Elaboración propia.

Año		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Flujo de Caja		661,810	560,750	624,208	650,225	665,527	653,756	625,092	240,186	240,186	240,186
WACC	10%	0.909	0.826	0.751	0.683	0.621	0.564	0.513	0.467	0.424	0.386
Flujo de Caja Descontado		601,646	463,430	468,977	444,113	413,240	369,028	320,771	112,049	101,862	92,602
Valor WACC	**637,717**										
RADR proyecto	3.00%	0.971	0.943	0.915	0.888	0.863	0.837	0.813	0.789	0.766	0.744
Flujo de caja descuento RADR		584,122	436,827	429,180	394,588	356,464	309,055	260,816	88,452	78,069	68,905
Valor RADR	**256,479**										

NPV RISK	**381,238**

Figura 4: Cálculo del NPV RISK del proyecto Veta Karen de Proyectosa SA. Elaboración propia

Evaluación de proyectos de inversión mediante riesgos e incertidumbre

Dr. Manuel Viera Flores[1]

[1] Ceo & Managing Partner Metaproject S.A Chile
Gerente General Metaproject Engineering SAC Perú
Presidente Cámara Minera de Chile

1. Abstract

El presente trabajo consiste en mostrar una metodología de como evaluar económicamente un proyecto de inversión, bajo escenarios de Riesgos e incertidumbre, para una correcta toma de decisión. Se mostrará un proyecto real evaluado con esta metodología, y como se decidió mediante una heurística de decisión su realización. La evaluación ex post para auditar los compromisos del proyecto una vez realizado es una correcta validación de la metodología.

La metodología se basa en una heurística de decisión utilizando value drivers y los economics tales como Valor esperado del VAN, Valor esperado de la TIR, Contenido de riesgo, Valor en Riesgo VAR, intervalo de confianza entre otros drivers. Con ello se demuestra que un proyecto minero debe modelarse en base a variables aleatorias y distribución de probabilidades haciendo justicia a la naturaleza del negocio minero.

This paper intends to present a method of evaluating the economics of a mining investment project capturing its risk and uncertainty, for a correct decision making. A real project was evaluated with this method to audit the quality of the decision against its actual performance.

The methodology is based on a probabilistic model and using economic parameters such as the expected value of the NPV and IRR, Risk component, Value at Risk and the confidence interval among other drivers. We demonstrate that the economics of a mining project must be modeled using the statistical distribution of the underlying variables and show the distribution of outcomes, doing justice to the nature of the mining business

2. Introducción

La metodología a mostrar se basa en una heurística de decisión como se puede apreciar en la figura N°1 utilizando value drivers y los economics tales como Valor esperado del VAN, Valor esperado de la TIR, Contenido de riesgo, Valor en Riesgo VAR, intervalo de confianza entre otros drivers. Con ello se demuestra que un proyecto minero debe modelarse en base a variables aleatorias y distribución de probabilidades haciendo justicia a la naturaleza del negocio minero.

En la figura N°1 se muestran los conceptos de un análisis de riesgo moderno basado en escenarios de riesgo e incertidumbre

Figura N° 1 Costos Incertidumbre, Valor de la Información, toma de decisión

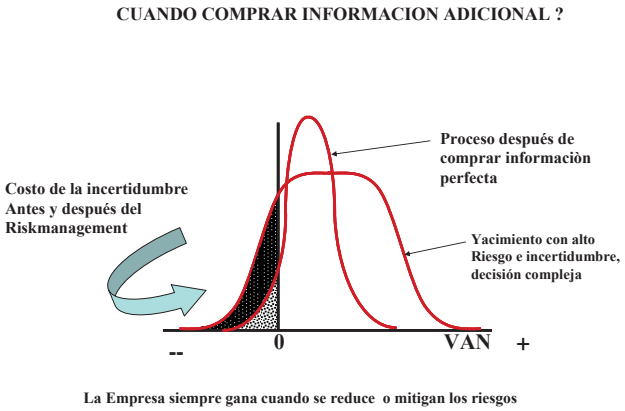


Figura N° 1 Costos Incertidumbre, Valor de la Información, toma de decisión

Se definen como Value Drivers en estudios de Análisis de Riesgo para la toma de decisiones estratégicas, a aquellas variables que son críticas y controlables.

Las más importantes son las siguientes:

a) Costo de Incertidumbre.
b) Costo de Irracionalidad.
c) Expected Value o Valor Esperado, ó llamada Esperanza Matemática.
d) Cantidad de Riesgo expresada como desviación estándar.
e) Valor de la información perfecta VIP.
f) Valor en Riesgo o VAR (Value at Risk).

Debido a que un proyecto minero es de larga maduración es imperativo evaluar correctamente su desempeño en base a los siguientes ámbitos:

- Que el proyecto sea técnicamente económico
- Económicamente rentable
- Financieramente que pueda pagar sus deudas
- Con Riesgos controlables
- En armonía con las comunidades
- Ambientalmente sostenible
- Ayuda a la descarbonización en base al uso de energías verdes
- Dignidad al planeta, a las comunidades y a las personas

En la valoración de empresas Mineras y en la toma de decisiones de inversión, el paradigma central ha sido por años el criterio del valor actual neto (VAN). Sin embargo, los métodos tradicionales de Evaluación como la técnica del flujo de fondos descontados (DCF, discounted cash flow) no permiten capturar el valor de factores que permanecen invisibles y que a veces representan un valor importante, considerado muchas veces en forma intuitiva por los inversores. Eso ha ido cambiando en los últimos años con la aparición de la técnica de la valuación de opciones reales (Emerix, 2002, Kesler S.E. 1994).

3. El riesgo y las decisiones de inversión, un Paradigma Minero

El estudio de factibilidad tiene como objetivo suministrar información que sea útil para decidir si se justifica explotar el yacimiento en un determinado proyecto de inversión. Los estudios de factibilidad manejan el problema en la forma siguiente: se determina cuáles son los factores (datos de entrada) importantes para el resultado final, se estima el valor más probable para cada uno de esos factores y se calcula el resultado final más probable, como lo explica Collins J.1

En la vida real, la mayoría de los factores que afectan el resultado final de una decisión de inversión no pueden ser pronosticados con certeza. En estas circunstancias, la probabilidad de obtener un resultado que corresponda efectivamente a la predicción es prácticamente nula, ya que es muy improbable que todos los factores (datos de entrada) vayan a asumir en forma simultánea sus valores más probables. Por lo tanto, el contenido de información al estudio de factibilidad depende en forma crucial del error predictivo probable que se le asigne al pronóstico del resultado final. Si el margen de error es relativamente pequeño, y si la conclusión permanece inalterada, sin importar cuál caso extremo (ya sea el mejor o el pero) vaya a ocurrir en la práctica, un cálculo único, como el que entrega la mayoría de los estudios de factibilidad, es suficiente para una decisión final. Si el margen de error es grande, sin embargo, un cálculo único (el más probable) puede ser útil, ya que los casos extremos podrían conducir a conclusiones opuestas, dejando al encargado de la decisión sin ayuda alguna para escoger entre ellas (Ver Viera M., 1993, Haim Levy, Marshalls, 1977).

Lo que es relevante para la toma de decisiones es la probabilidad relativa de diversos resultados posibles, tales como la probabilidad de pérdida y ganancias de distintas magnitudes. Un estudio de factibilidad que suministre estas probabilidades ofrece a los encargados de las decisiones información en la que pueden basarse decisiones racionales

¿Cuándo el problema de la incertidumbre se torna suficientemente importante para justificar su consideración explícita en la evaluación de proyectos? Una respuesta teórica podría ser que se le debe considerar en toda ocasión (Arooz K.J. y Lind R.C., 1979).

[1] "The New Tool In Finantial Decisión Making Under Uncertainty Cim 86, 1993.

Se mostrarán los distintos métodos para tratar la incertidumbre, tales como:

- Análisis de sensibilidad
- Elasticidad del VAN
- Arboles de decisión
- Simulación de Montecarlo Hipercubo latino
- Análisis de Riesgos
- Heurística de decisión
- Actitud frente al riesgo
- Perdida de oportunidad
- Valor de la Información
- Opciones reales entre otras

Por último, se mostrarán proyectos de cobre y de oro evaluados con esta metodología y una comparación con otras metodologías con sus indicadores y sus desviaciones.

N. Conclusiones

Dentro de las Conclusiones del estudio figuran:

a) La metodología aquí propuesta, demostró ser eficiente, versátil, y que sirve para estandarizar criterios en la Industria Minera. Puede perfeccionarse en base a incorporar flexibilidades que otorgan las empresas proveedores de insumos y de bienes de capital.

b) La Industria Minera le presenta un valioso desafío a la Ingeniería de Proyectos y a la Valoración Económica de Inversiones, esto es hacer diseños inteligentes que contengan las flexibilidades identificadas en las Ingenierías Conceptuales para tomar mejores y más acertadas decisiones. Con ello permitirá agregar valor al negocio.

c) El modelo de bloques, debe emplear opciones reales, flexibilidad, junto al analisis de riesgos para valorar correctamente los bloques dentro del Block models. Esta operación es una de las más delicadas del proceso de Valoración de activos mineros, etc

Agradecimientos

Agradecemos a Dr Prosper Lamothe y al Dr Patricio Morcillo por sus sabios consejos, a la Empresa Carolina Machilla, y a Codelco División el Teniente

Referencias

Amram M. y Kulatilaka N. “Real Options Strategic Investment in an Uncertain World”. Ed HBS Press. Estados Unidos 1998.

@Risk For Project Risk Análisis for Project Management. http://www.palisade.com, Octubre 2002

Collins J. a new tool in financial decision – making under uncertainty, Montreal: Canadian Institute of Mining an Metallurgy CIM 86.

Dudley, R.M. (1989) Real Análisis and Probability, 2da. Ed. Chapman&Hall, New York.

Haim L., Marshall S., Editors, Decision Making under Uncertainty Academic Press, 1977.

Harris D. Mineral Exploration Decision: A guide to Economic Analysis and Modeling. United States of America: Wiley – Interscience publication. 1990, 435 pp.

Arooz K.j. y Lind R.C. “Uncertainty and the Evaluation of Public Investiment Decision”, American Economic Review, junio 1970, pp.364-78

Foldes L.P. y Rees R., “A Note of the Arrow Lind Theorem”, American Economic Review, marzo 1977, pp.188-183.

Arooz K.j. y Lind R.C. “Uncertainty and the Evaluation of Public Investiment Decision”, 1979

Lamothe P., Viera M. (2006) “Desarrollo de una Metodología de Evaluación de Proyectos Mineros por Opciones Reales, Bajo Riesgo e Incertidumbre”, Informe Técnico, Metaproject / Codelco, Chile.

Merton R. (1970) “The Dinamic General Equilibrium Model of The Asset Market and its Application to The Pricing of the Capital Structure of the Firm”, Working paper, Sloan School of Management M.I.T., Reprinted as Chapter 11 in Merton (1992).

Viera M. / Lamothe P. “VII Jornada de Ingeniería de Minas”, 15 al 17 de Noviembre, Buenos Aires Argentina. “Valoración y Gestión de yacimientos Mineros mediante Opciones Reales bajo Escenario de Riesgo e Incertidumbre”

Viera M., (2002) “Gerenciamiento de Proyectos de Inversión”, Cátedra Proyectos Mineros, USACH – Santiago-Chile.

Viera M., (1993), “Análisis de Riesgo en Proyectos de Inversión”, Instituto de Ingenieros de Minas de Chile.

Viera Manuel, (1991) “Evaluación de Proyectos de Inversión Mediante Simulación Computacional”, Instituto de Ingenieros de Minas de Chile.

Viera M., Lamothe P., “Mining Ore Valuation by Real Option Ander Uncertainty and Risk”, Sixth Internacional Copper / Cobre Conference COM 2007, Toronto Canadá.

Tectónica salina y mineralizaciones polimetálicas de origen magmático-hidrotermal: el caso del distrito de Morococha

Silvana Stipetich[1], Abel Zorrilla[2], Erick Valencia [2], Julio Zarate[2], Pablo Valverde[1], Diego Benites[1], Lisard Torró[1], Jean Vallance[1]

[1] Facultad de ciencias e ingeniería, Especialidad Ingeniería Geológica, Pontificia Universidad Católica del Perú Av. Universitaria 1801, San Miguel, Lima 15088, Perú. E-mail: stipetich.s@pucp.pe
[2] Pan American Silver Perú SAC y Cia. Minera Argentum S.A., Av. la Floresta Nro. 497 Int. 301, Chacarilla del Estanque, San Borja, Lima 15037

1. Resumen

En Morococha, los cuerpos de anhidrita hospedados en las rocas carbonatadas de la base de la Formación Chambará, cerca al contacto con el Grupo Mitu, presentan indicios de haber sufrido deformación, movilización y ascenso producto de tectónica salina ("halocinesis") durante la Orogenia Andina. Estos cuerpos presentan comúnmente una asociación espacial, con cuerpos polimetálicos de remplazamiento tipo "cordillerano". Se propone que los cuerpos de anhidrita actuaron como capas impermeables focalizando los fluidos y favoreciendo la formación de cuerpos mineralizados, y eventualmente proporcionando una fuente adicional de azufre.

2. Abstract

In the Morococha district, anhydrite bodies hosted in the carbonate rocks at the base of the Chambará Formation, close to the discordant contact between Mitu and Pucará Groups, show signs of having undergone deformation, mobilization and ascent due to halokinesis during the Andean Orogeny. These evaporite bodies are often spatially associated with "Cordilleran" polymetallic replacement bodies. We propose that impermeable anhydrite bodies focused mineralizing fluids promoting carbonate replacement and could constitute a local additional S source.

3. Introducción

Los yacimientos espacialmente asociados a diapiros de evaporitas son típicamente del tipo Mississipi Valley (MVT), incluyendo ejemplos en China (Leach et al., 2017), Túnez (e.g. Bouhlel et al., 2016), Marruecos (e.g. Bouabdellah et al., 2015) y España (Perona et al., 2018). En Perú los yacimientos del tipo MVT potencialmente asociados con tectónica salina son: San Vicente (Fontboté y Gorzawski, 1990, Badoux et al., 2001) y, Cañón Florida del distrito de Bongará (de Oliveira et al., 2019). Ambos yacimientos tienen como roca de caja a los carbonatos del Triásico-Jurásico del Grupo Pucará (Rosas et al., 2007), una unidad geológica cuya base contiene evaporitas responsables de la formación de números domos salinos al este de la Cordillera Oriental (Sempere & Cotrina, 2018, Baby et al., 2019, Fiestas et al., 2019). Mientras en los yacimientos de tipo MVT las evaporitas están frecuentemente involucradas en el proceso de formación de la mineralización, en yacimientos formados por fluidos de origen magmático-hidrotermal dicho papel no ha sido evaluado. Presentamos aquí un primer ejemplo.

4. Marco Geológico

El distrito minero de Morococha se ubica 150 km al Noreste de Lima, en la terminación Norte del Domo de Yauli. Se trata de un yacimiento polimetálico "cordillerano" de Cu-Ag-Pb-Zn centrado en pórfidos tempranos de Cu-(Mo-Au) asociados a múltiples intrusiones del Mioceno tardío, y en particular al pórfido gigante de Toromocho (Catchpole et al., 2015a). Las vetas y cuerpos de reemplazamiento se hospedan en rocas volcánicas, intrusivos, rocas carbonatadas y skarns, siendo los estratos carbonatados de la Formación Chambará, en la base del Grupo Pucará, el principal encajonante (Catchpole et al., 2015b).

4.1. Geología Estructural

En Morococha, al norte del pórfido Toromocho, se presenta un anticlinal NNW-SSE abierto limitado al NE y el SW por, los cabalgamientos Potosí, de vergencia SW, y Gertrudis, de vergencia NE, respectivamente (Petersen, 1965, Fig. 1). El plegamiento y los cabalgamientos están asociados a la formación del cinturón plegado y corrido del Marañón entre el Cretácico Superior y el Eoceno (Mégard, 1984; Benavides-Cáceres, 1999; Scherrenberg et al., 2016). Las estructuras anticlinales y los sobreescurrimientos controlaron, en parte el emplazamiento de los cuerpos intrusivos del Mioceno relacionados a las mineralizaciones de tipo pórfido (Petersen,1965; Catchpole et al., 2015a). Las mineralizaciones polimetálicas posteriores fueron esencialmente controladas por un sistema de fallas NE-SW con fuerte buzamiento y de movimiento normal-dextral. En menor medida, también por los sobreescurrimientos Potosí y Gertrudis (e.g. Manto Ombla), los contactos de los intrusivos y el contacto Grupo Mitu-Grupo Pucará (Catchpole et al., 2015b).

4.2. El "Complejo de Anhidritas" de Morococha

En la base de la Formación Chambará, próximos a/o sobre el contacto discordante entre el Grupo Pucará y el Grupo Mitu, se hospedan cuerpos lenticulares de anhidrita (Haapala, 1953; Nagell, 1957). Denominados como el "Complejo de Anhidritas", estos cuerpos están compuestos por anhidrita (60-70%), rocas carbonatadas localmente eskarnizadas, y pizarras (Haapala, 1953).

Haapala (1953) atribuyo al Complejo un origen evaporítico con removilizaciones, mientras Nagell (1957), en base a observaciones de vetas con relleno de anhidrita cortando a los intrusivos del Mioceno, propuso un origen hidrotermal por remplazamiento de calizas. Estudios isotópicos de S realizados por Petersen (1972) apuntan a un origen sedimentario y sugieren una removilización parcial de las anhidritas. Estudios isotópicos posteriores de O, S, Sr, y Nd realizados por Kouzmanov et al. (2011), abalan este estudio concluyendo que se trataría de evaporitas del Triásico-Jurásico que sufrieron una parcial removilización asociada a la migración de fluidos activados por anomalías térmicas producto del magmatismo del Mioceno.

Secciones y descripciones presentadas por Haapala (1953) y Nagell (1957), registran cambios importantes en la potencia del "Complejo de Anhidritas". En su parte central, el complejo alcanza una potencia total de 150 m, con capas individuales de anhidrita de entre 5 y 30 m, y desaparece progresivamente hacia el este. Sobreyacen directamente a los volcánicos del Grupo Mitu o a las calizas de la Formación Chambará. El contacto superior del complejo es, a gran escala, concordante con las calizas de la Formación Chambará, con discordancias locales a escala métrica. El complejo presenta mayor potencia en la proximidad de intrusivos y fallas. A gran escala, el "Complejo de Anhidritas" sigue el plegamiento de la zona; sin embargo, los niveles carbonatados en el interior del complejo presentan una mayor deformación que las calizas ubicadas en su techo. Nagell (1957) atribuyó esta mayor deformación a la naturaleza plástica de la anhidrita, indicando además que la fuerte deformación estaría expresada por el intenso brechamiento presente en los contactos superior e inferior del complejo.

No existe registro de mineralización económica en el interior del complejo, pero sí una asociación espacial frecuente de cuerpos mineralizados en sus contactos en zonas donde está atravesado por las fallas NE-SW relacionadas a venas polimetálicas. Importantes leyes de cobre se han registrado en sus contactos con el stock Gertrudis (Nagell, 1957).

5. Resultados

5.1. Estructuras en Alapampa y San Antonio

El remapeo de detalle, de las zonas Alapampa y San Antonio por los geólogos de Pan American Silver, y los trabajos de perforación de la Veta Morro Solar desde superficie e interior de mina permitieron precisar el modelo estructural.

En Morococha, diferentes brechas, a gran escala concordantes con la estratificación, han sido descritas. La brecha Churruca se encuentra en la Formación Condorsinga. En la zona de Alapampa, Terrones (1949) describió dos niveles de esta brecha, ambos compuestos por fragmentos (semi)angulosos de calizas en una matriz calcárea; les atribuyó un origen sedimentario. Sin embargo, durante los trabajos de remapeo y de perforación, se notó que los clastos de esta brecha presentan frecuentemente venas de carbonatos que no se extienden en la matriz indicando una fase de brechamiento claramente post-litificación. En Toldojirca,

Perez (2009) realizó observaciones similares en una brecha ubicada en la misma formación, atribuyéndole un origen tectónico.

La brecha Toldo, ubicada en la base de la Formación Chambará, presenta similitudes con la brecha Churruca. Las dos brechas tendrían, por lo tanto, un origen tectónico, formando zonas de despegue, y en el caso de la brecha Churruca, duplicando localmente la secuencia sedimentaria (Fig. 2).

Los sobreescurrimientos Potosí y Gertrudis, cortan a la brecha Churruca debido a una acentuación del plegamiento original. La falla Morro Solar, que es una estructura de rumbo NE-SW, buzando al SE y que cuenta, con una extensión mayor a 3 km, separa dos bloques con diferentes intensidades de deformación en la zona San Antonio (Fig. 1). En el bloque SE el sobreescurimiento Potosí duplica la secuencia sedimentaria, mientras que este desaparece en el bloque NW dejando un simple anticlinal asimétrico (Fig. 1). Así, antes de ser una estructura mineralizada en el Mioceno (veta Morro Solar), la falla Morro Solar actuó como una *tear fault*.

5.2. Vetas y cuerpos de reemplazamiento asociados a anhidritas

En los últimos años, la profundización de las labores mineras en la Mina Morococha al norte del "Complejo de Anhidritas" ha permitido alcanzar el límite Mitu-Pucará donde se encontró un nivel continuo de evaporita (Figs. 1 y 2). La modelización, en base a mapeo de galería y perforación, reveló que los niveles de anhidrita contienen lentes tanto de calizas del Grupo Pucará como de material volcánico arrastrado del subyacente Grupo Mitu (Fig. 2). Se encontraron cuerpos mineralizados tipo mantos en los niveles de calizas intercalados en la anhidrita en aquellas zonas donde estos son cortados por vetas polimetálicas. Dichos cuerpos de remplazamiento presentan removilización de anhidrita incluyendo recristalización, inyecciones en calizas y en las mismas vetas, así como remplazamiento local por grandes cristales de yeso. El Manto Ivette es uno de esos cuerpos teniendo como *feeder* a la veta Morro Solar en la zona Alapampa (Figs. 2 y 3). La mineralización metálica en estas dos estructuras incluye abundante pirita, esfalerita, galena y cobres grises, proporciones menores de calcopirita y cantidades traza de arsenopirita, hübnerita y fases de Ag (Valverde, 2020). Un primer estadio de mineralización de cuarzo-pirita fue seguido por un estadio de cristalización de minerales de metales base y subsecuentemente por un estadio rico en carbonatos hidrotermales acompañados por sulfosales y telururos ricos en Ag.

Cuarenta metros por encima del Manto Ivette se encuentra el Cuerpo Esperanza (Figs. 2 y 3). Este cuerpo se hospeda en niveles de calizas dolomitizadas enriquecidas en materia carbonosa y tiene su raíz en uno de sus ramales techo de la veta Morro Solar. El Cuerpo Esperanza, comprende dos cuerpos mineralizados circulares de 40 m de diámetro con altas leyes de Cu y Zn recubriendo un cuerpo de anhidrita (Vallance, 2015). La mineralización presenta una zonación horizontal bien marcada, compuesta por un núcleo de pirita fina a gruesa fuertemente reemplazado por una zona rica en Cu (calcopirita-tetraedrita), seguida por una zona distal rica en Zn y Ag (esfalerita-tetraedrita). La transición de los cuerpos mineralizados hacia su roca de caja techo es i) directa, con nódulos de anhidritas en las calizas; o ii) progresiva, marcada por brechas con clastos de caliza (algunos delineados por ribetes de carbonatos y menores sulfuros) y cementados por anhidrita. La anhidrita está presente en la Veta Morro Solar desde el Manto Yvette hasta el ramal techo constituyendo la raíz del Cuerpo Esperanza. Esta observación sugiere que estas vetas fueron los *feeders* del Cuerpo Esperanza tanto para la anhidrita como para la mineralización posterior.

6. Discusión

La tectónica salina o "halocinesis" ha sido ampliamente evocada en el Oriente Peruano (Sempere & Cotrina, 2018) y en menor cantidad en el Perú Central (Fiestas et al., 2019). En cambio, hasta la fecha no ha sido descrita en la Cordillera Occidental.

En Morococha, i) las variaciones de potencia de las capas de anhidritas; ii) las discordancias locales en la base y en el techo del complejo, asociadas a zonas de brechas y de inyección de sulfatos en la caliza; iii) la gran deformación de las intercalaciones de caliza en su interior; y iv) la presencia de escamas de rocas volcánicas del Grupo Mitu indican que los niveles de anhidrita actuaron como un nivel de despegue. La brecha tectónica Toldo, que ocupa la misma posición estratigráfica que el "Complejo de Anhidrita" representa un tramo libre de anhidrita de esta zona de despegue. El Cuerpo Esperanza presenta dos pequeños diapiros producto de la migración de anhidrita desde la capa de anhidrita infrayacente a través

de la falla Morro Solar y bifurcando después hacia un ramal techo explicando así la ausencia de sulfatos en los niveles superior de la vena Morro Solar. Se propone que la circulación de los fluidos mineralizantes durante el Mioceno habrían focalizado a través de las mismas zonas de drenaje, conduciendo al emplazamiento de la mineralización por remplazamiento de la zona de contacto discordante y probablemente brechada entre los diapiros y la roca caja carbonatada. Se infiere que la anhidrita podría haber representado una fuente adicional de azufre para la mineralización mediante reacciones de termoreducción.

6. Conclusiones

El estudio del "Complejo de Anhidritas" de Morococha representa una oportunidad excepcional para entender el papel de la tectónica salina en yacimientos polimetálicos "cordilleranos". La morfología de los cuerpos de anhidrita sugiere que las evaporitas fueron depositadas entre el Grupo Mitu y el Grupo Pucará y que fueron posteriormente deformadas y movilizadas. Estas ascendieron localmente como diapiros a lo largo de *tear faults* durante la Orogenia Andina. Los cuerpos impermeables de anhidrita focalizaron los fluidos mineralizantes hacia trampas estratigráficas o estructurales. Se infiere que la anhidrita ha podido constituir localmente una fuente adicional de azufre mediante termoreducción controlada por la materia carbonosa de las calizas dolomitizadas. Análisis isotópicos de S, C y Sr en sulfuros, carbonatos y anhidrita está en curso para corroborar esta hipótesis.

El reconocimiento de las estructuras generadas por el movimiento de las evaporitas abre un nuevo campo prospectivo en el distrito de Morococha, con potencial para aplicarse en otros yacimientos con contenidos importantes de niveles de evaporita.

Agradecimientos

Este trabajo ha contado con la financiación del Banco Mundial CONCYTEC-FONDECYT (107-2018-FONDECYT-BM-IADT-AV) y del Programa de Apoyo al Desarrollo de Tesis de Licenciatura (PADET) de la Pontificia Universidad Católica del Perú y la colaboración de Pan American Silver Corp. Agradecemos especialmente a Rubén Díaz y Jessica Huamantalla por su asistencia profesional y constante colaboración.

References

Baby, P., Calderón, Y., Hurtado, C., Louterbach, M., Espurt, N., Brusset, S., Roddaz, M., Brichau, S., Eude, A., Calvès, G. 2019. The Peruvian sub-ean forel basin system: Structural overview, geochronologic constraints, unexplored plays: Am Assoc Pet Geol, 117, p. 87–116.

Benavides-Cáceres, V. 1999. Orogenic evolution of the Peruvian Andes: the Andean Cycle. Soc Econ Geol Spec Pub 7: p. 61-107.

Bouabdellah, M., Niedermann, S., Velasco, F. 2015. The Touissit-Bou Beker Mississippi Valley-type district of northeastern Morocco: Relationships to the Messinian salinity crisis, Late Neogene-Quaternary alkaline magmatism, buoyancy-driven fluid convection: Econ Geol, v. 110, p. 1455–1484.

Bouhlel, S., Leach, D.L., Johnson, C.A., Marsh, E., Salmi-Laouar, S., Banks, D.A. 2016. A salt diapir-related Mississippi Valley-type deposit: The Bou Jaber Pb-Zn-Ba-F deposit, Tunisia: Fluid inclusion isotope study: Miner Dep, v. 51, p. 749–780.

Catchpole, H., Kouzmanov, K., Bendezú, A., Ovtcharova, M., Spikings, R., Stein, H., Fontboté, L. 2015a. Timing of porphyry Cu-Mo base metal Zn-Pb-Ag-Cu mineralisation in a magmatic-hydrothermal system—Morococha district, Peru. Miner Dep, v. 508, p. 895–922.

Catchpole, H., Kouzmanov, K., Putlitz, B., Seo, J. H., Fontboté, L. 2015b. Zoned base metal mineralization in a porphyry system: Origin evolution of mineralizing fluids in the Morococha District, Peru. Econ Geol, v. 1101, p. 39–71.

de Oliveira, S.B., Leach, D.L., Juliani, C., Monteiro, L.V.S., Johnson, C.A. 2019. The Zn-Pb mineralization of Florida canyon, an evaporite-related Mississippi valley-type deposit in the Bongará district, northern Peru. Econ Geol, v. 114, p. 1621–1647.

Fiestas, J., Berrospi, R., Leach, D., Sempere, T. P. A. 2019. Tectónica salina e hidrocarburos como guías de exploración. de yacimientos MVT: Zn-Pb en los es del Perú central. Instituto de Ingenieros de Minas del Perú, proEXPLO 2019.

Haapala, P. S. 1953. Morococha Anhydrite. Boletín de la Sociedad Geológica del Perú 26: 21-32.

Kouzmanov, K., Ovtcharova, M., von Quadt, A., Guillong, M., Spikings, R., Schaltegger, U., Fontboté, L., Rivera, L. 2008. U-Pb $^{40}Ar/^{39}Ar$ age constraints for the timing of magmatism mineralization in the giant Toromocho Porphyry Cu-Mo deposit Central Peru. XIII Geological Congress of Peru, 1–6.

Kouzmanov, K., Chiaradia, M., Fontbote, L., Spangenberg, J. 2011. Origin of massive anhydrite bodies in the Morococha district, central Peru: insights from stable O, S radiogenic Sr, Nd isotope geochemistry. SGA 11th Biennial Meeting: Antofagasta, Chile, p. 405–407.

Leach, D.L., Song, Y.C., Hou, Z.Q. 2017. The world-class Jinding Zn-Pb deposit: Ore formation in an evaporite dome, Lanping basin, Yunnan China: Miner Dep, v. 52, p. 281–296.

Mégard, F. 1984. The Andean orogenic period and its major structures in central and northern Perú. J Geol Soc London v. 141, p. 893-900.

Nagell, R. H. 1957. Anhydrite Complex of the Morococha district, Peru. Econ Geol, 5210, 632–644.

Perez, J. 2009. Mineralization, structure geochemical characteristics of the Toldojirca prospect the San Andrés vein, Morococha district, Miocene polymetallic belt, Peru. Université de Genéve. Master Thesis, 89 p.
Perona, J., Canals, À., Cardellach, E. 2018. Zn-Pb mineralization associated with salt diapirs in the Basque-Cantabrian basin, Northern Spain: Geol, geochemistry, genetic model: Econ Geol, v. 113, p. 1133–1159.
Petersen, U. 1965. Regional Geol Major Ore Deposits of Central Peru. Society of Econ Geologist, 60, 407–476.
Petersen, U. 1972 Nuevas Investigaciones de Yacimientos Peruanos. Bol Soc Geol Perú, v. 42, p. 36-52.
Rosas, S., Fontboté, L., Tankard, A. 2007. Tectonic evolution paleogeography of the Mesozoic Pucará Basin, central Peru. J South Am Earth Sci, v. 241, p. 1–24.
Scherrenberg AF, Konh BP, Holcombe RJ, Rosenbaum G 2016. Thermotectonic history of the Marañón Fold-Thrust Belt, Peru: Insights into mineralisation in an evolving orogeny: Tectonophysics 667:16-36
Sempere, T., Cotrina, J. 2018. An overlooked giant salt basin in peru. IX INGEPET 2018, 2018, 1–18.
Terrones, A. 1949. La estratigrafía del Distrito minero de Morococha. Sociedad Geológica Del Perú, Jubilar.
Vallance J. 2015. Informe de visita al Cuerpo Esperanza nivel 160, Zona Alapampa, mina Morococha, y del estudio de 6 secciones pulidas y 19 láminas delgadas. Informe para Compañia Minera Argentum S.A., 300 p.
Valverde, P. 2020. Distribución de metales estratégicos In, Ge y Ga en vetas y cuerpos de reemplazamiento polimetálicos del distrito de Morococha, Junín, Perú. Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, 156 p.

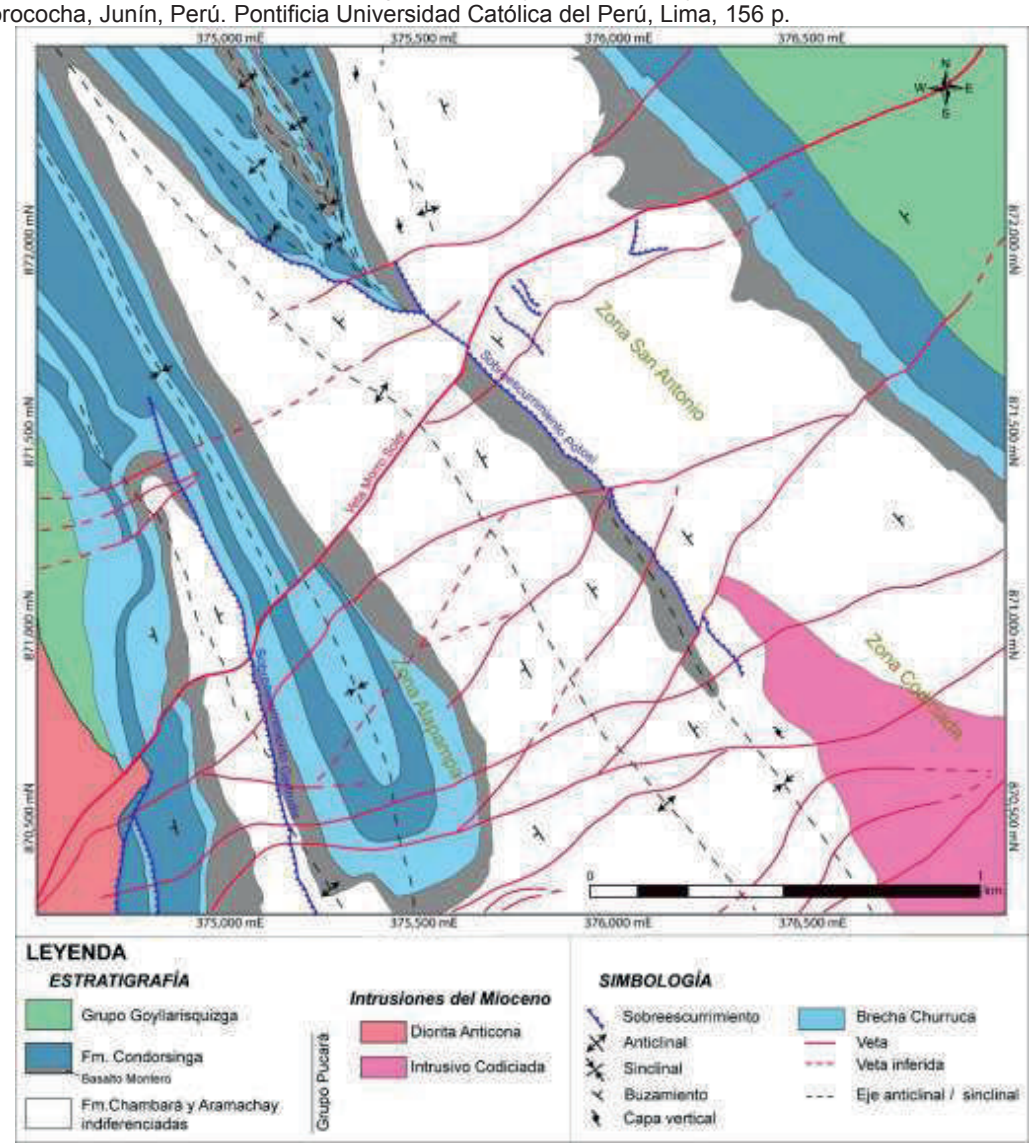


Fig. 1. Mapa geológico simplificada del Distrito de Morococha, al Norte del Pórfido Toromocho.

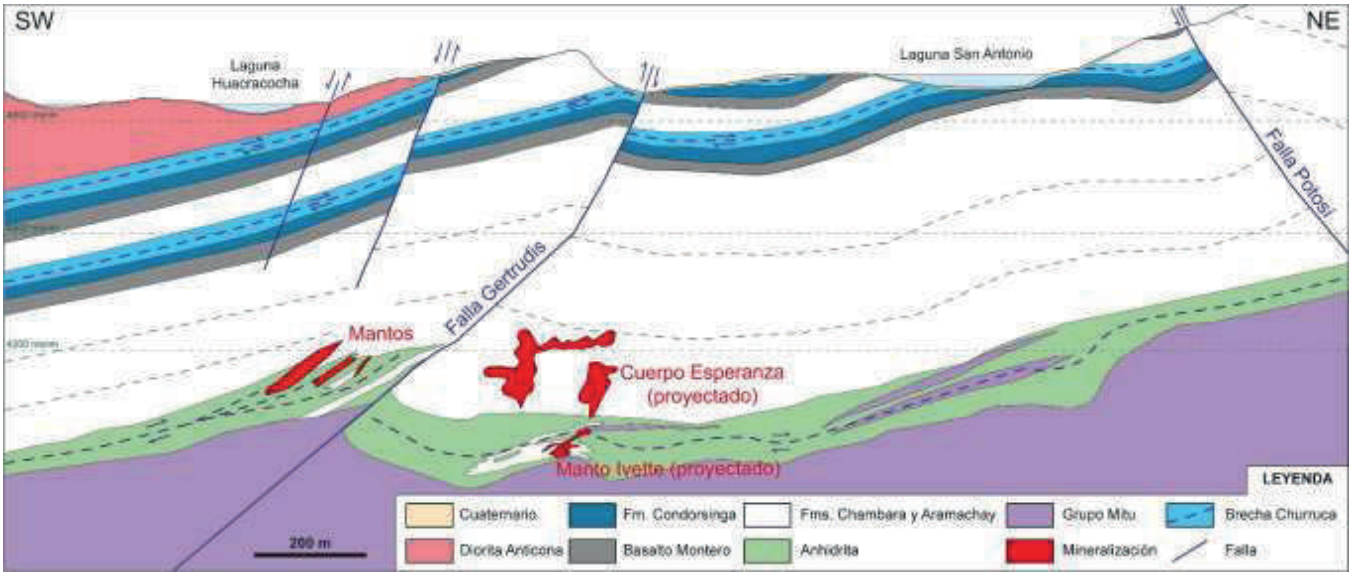


Fig. 2. Sección longitudinal de la veta Morro Solar con proyección del Cuerpo Esperanza y del Manto Ivette.

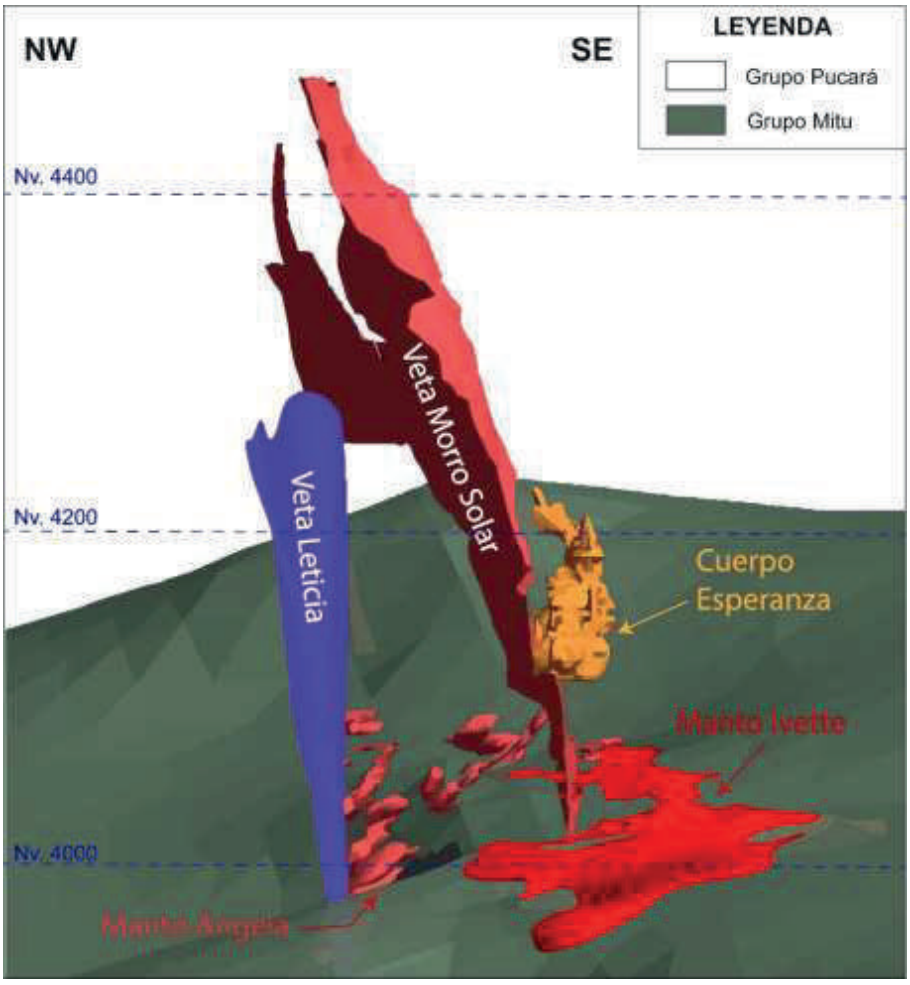


Fig. 3. Vista tridimensional, mirando al NE, de la veta Morro Solar en la zona del Cuerpo Esperanza y del Manto Ivette.

Nuevos conceptos de exploración en el Distrito Minero de Uchucchacua – Perú Central

Rolando Ligarda[1], Edwin Arias[2], Ronald Callupe[3], Juan Carlos Salazar[4], José Luis Aquino[5], María del Pilar Ventura[6]

[1] Cía. de Minas Buenaventura S.S.A., Lima, Perú, (rolando.ligarda@buenaventura.pe)
[2] Cía. de Minas Buenaventura S.S.A., Lima, Perú, (edwin.arias@buenaventura.pe)
[3] Cía. de Minas Buenaventura S.S.A., Lima, Perú, (ronald.callupe@buenaventura.pe)
[4] Cía. de Minas Buenaventura S.S.A., Lima, Perú, (juan.salazar@buenaventura.pe)
[5] Cía. de Minas Buenaventura S.S.A., Lima, Perú, (jose.aquino@buenaventura.pe)
[6] Cía. de Minas Buenaventura S.S.A., Lima, Perú, (maria.ventura@buenaventura.pe)

1. Abstract

The Uchucchacua mining district is located in the Western Andean Cordillera of Central Peru, at an altitude between 4,300 and 5,000 m.a.s.l. Geologically, it is located in the faulted and folded Marañón belt. The Uchucchacua mine, containing more tan 410 M oz Ag (historical production + Reserves-Resources), is the most important underground silver mine in Peru. Another 40 M oz Ag, recently discovered at the Yumpag Project, 6 km northeast of Uchucchacua, have been added to these reserves and resources. The ore bodies are hosted in limestones of the Jumasha formation, particularly in pure limestones, with bioclastic packstone to grainstone facies of the Mid Jumasha at Uchucchacua, and similar facies at the base of the Upper Jumasha (βeta and Gastropod horizons) at Yumpag. In all cases, the presence of impermeable levels has been crucial to trapping the mineral in favorable rocks. At Uchucchacua, veins, multi-directional bodies or sub-vertical mantles occur in the short limb of the core of the N-S striking anticline. However, the mineralization was controlled by the Colquicocha (NS) and Cachipampa (NE-SW) faults, of cortical reach, considered as “thick skin faults”. Dacitic porphyritic stocks are emplaced where these faults meet, showing Pb-Zn-(Cu) skarn halos, grading to Ag-Mn mineralization in its distal periphery. At Yumpag, the Camila vein which is a mineralized Reidel structure related to the movement of the Cachipampa fault, when crossing the βeta or sub-horizontal Gastropod horizons, has allowed the formation of high-grade silver mineralized bodies, which also grade from a distal halo of Ag-Mn towards a proximal mineralization enriched in Pb-Zn-(Cu), following the plunge to the southwest. The source of the mineralization remains unknown, but is presumed to come from below the coverage of the Casapalca formation.

2. Introducción

En este artículo se van a discutir brevemente los nuevos conceptos de exploración utilizados por el equipo de exploraciones de Cía. de Minas Buenaventura S.A.A. para potenciar el éxito en la búsqueda de nuevos depósitos de Ag-(Pb-Zn) en el distrito minero de Uchucchacua en el Perú Central.

La mina Uchucchacua es la más importante mina subterránea productora de plata en el Perú. En el año 2019 su producción fue de 10.6 M oz Ag (1.3 Mt @ 9.1 oz/t Ag). Las Reservas y Recursos Medidos + Indicados son 109.8 M oz Ag (12.3 Mt @ 8.9 oz/t Ag), habiéndose producido más de 300 M oz Ag (25.4 Mt @ 15.3 oz/t Ag) desde 1975.

Aspectos de importancia, como la comprensión de los controles estructurales, la lito-estratigrafía identificada con el estudio de microfacies de la formación Jumasha, huésped de la mineralización y zoneamiento de la mineralización, han confluido para descubrir el nuevo yacimiento de alta ley de plata en Yumpag, 6 km al noreste de Uchucchacua que a la fecha tiene 40 M oz Ag (1.7 Mt @ 23.6 oz/t Ag). Además, se van a aportar nuevas edades radiométricas U/Pb sobre zircón (realizadas en Geochronex Analytical Services & Consulting –

Canadá) de los diferentes pulsos magmáticos en el distrito; Figura 1.

3. Contexto geológico

El distrito Minero de Uchucchacua está localizado en la faja corrida y plegada del Marañón (Mégard, 1979). La secuencia estratigráfica comienza con la Fm. Oyón (Tithoniano-Berriasiano) constituida por lutitas, areniscas de color gris y carbón. Lo cubre el Gr. Goyllarisquizga (Berriasiano-Aptiano) al cual pertenecen las Fms. Chimú de ortocuarcitas, Santa de calizas y margas grises, Carhuaz de areniscas y lutitas beige y Farrat de areniscas cuarzosas blancas. Sobre este grupo aparecen los carbonatos de las Fms. Pariahuanca (Albiano inferior) de calizas más margas y Chulec (Albiano medio) de calizas, margas y calizas arenosas. La Fm. Pariatambo (Albiano medio) de calizas y lutitas negras es el paso hacia las calizas de la Fm. Jumasha (Albiano superior-Turoniano). La Fm. Jumasha en la zona de estudio se subdivide en tres miembros: Jumasha inferior, medio y superior. Los límites de estas tres unidades presentan niveles de referencia conocidos como *"markers"* de tonalidad marrón-amarillenta, que actúan como horizontes marcadores o guía. Suprayaciendo a la Fm. Jumasha se encuentran las calizas y margas de colores beige y rojo de la Fm. Celendín (Turoniano-Coniaciano). Al techo de la Fm. Celendín se superponen discordantemente las areniscas y lutitas rojas de la Fm. Casapalca (Cretácico-Terciario). Finalmente, los volcánicos Atalaya compuestos de riolitas, dacitas, andesitas hasta basaltos, de edades Oligoceno (24.5 Ma) a Mioceno terminal (5.5 Ma), cubren o intruyen a la pila sedimentaria (Bissig et al 2008; Romaní 1982), siendo equivalentes a los volcánicos Calipuy; Figura 1.

La estructura más prominente es el gran anticlinal volcado N-S de Uchucchacua, en cuyo núcleo se hallan la mayor parte de los cuerpos mineralizados de Uchucchacua. A este anticlinal se asocian cabalgamientos y pliegues menores como parte del sistema corrido y plegado. Pero desde el punto de vista de la mineralización, hay dos estructuras que dominan el distrito minero: Una es la gran falla N-S Colquicocha, que va paralela inmediatamente al oeste del gran anticlinal, y la otra es la falla trasandina N40 Cachipampa. Ambas son de alcance litosférico, llegan hasta la cámara magmática, han canalizado intrusiones y mineralización subsecuente.

4. Controles de la mineralización.

4.1. Control estructural y eventos magmáticos

La faja corrida y plegada del Marañón, se formó durante la tectónica Inca en el Eoceno-Oligoceno (43–30 Ma), como parte de la tectónica compresiva andina (Mégard, 1979; Carlotto, 2014). Sin embargo, muchas de las fallas N-S de alcance cortical —que previamente controlaron la sedimentación, durante el Mesozoico, con juegos polifásicos— durante el acortamiento de los Andes, generaron una importante inversión tectónica traducida por fuerte plegamiento, cabalgamientos y/o fallas de propagación, además de la instalación de la cuenca intra-montañosa de antepaís Casapalca. Las fallas más profundas configuran escamas gruesas (Mc Clay, 1992) conectadas a cámaras magmáticas, como es el caso de las fallas Colquicocha, Anamaray, o más al este, en el altiplano, la falla longitudinal entre Cerro de Pasco y Colquijirca. En este estadio la falla NE Cachipampa se comportó como falla transformante con movimiento dextral, separando el bloque norte con menor deformación o corrimiento respecto del bloque sur.

En Uchucchacua, en la confluencia de las fallas Colquicocha y Cachipampa de edad Oligoceno tardío, en el inicio de la fase tectónica Quechua 1, se emplazaron diferentes stocks de pórfidos dacíticos que han generado skarn de Pb-Zn-(Cu) cuyas edades U/Pb en zircones obtenidas por nosotros, van de 26.68 ± 0.34 Ma (stock Luz) a 25.08 ± 0.21 Ma (stock Oeste), corroborando una edad U/Pb en zircón obtenida por Bissig et al (2008) de 25.28 ± 0.44 Ma (dique Sandra). Estos stocks son casi coetáneos con el emplazamiento en Yumpag del lacolito de microdiorita estéril de 27.43 ± 0.25 Ma canalizado por la falla Cachipampa.

Durante el Mioceno, al finalizar la tectónica Quechua 1, en cerro Yumpag la falla Cachipampa controla la intrusión de un stock de diorita que genera un skarn prógrado seco, cuya edad U/Pb es de 15.97 ± 0.32 Ma, que altera a hornfels al lacolito de microdiorita suprayacente. Posteriormente, la actividad magmática se intensifica con el emplazamiento de un dique de cuarzodiorita que arroja una edad U/Pb de 12.07 ± 0.13 Ma y del dique de andesita porfirítica "Mequías" que da una edad U/Pb de 11.75 ± 0.17 Ma. El dique Mequías de dirección N60, es pre a intra-mineral, ubicándose en paralelo y adyacente a la veta Camila, a la cual controla; por ende, la edad máxima del mineral en Camila sería del orden de

11.75 ± 0.17 Ma. De otro lado, edades U/Pb en rocas de Uchucchacua y Yumpag, dan edades recurrentes entre 8.70 ± 0.17Ma y 8.10 ± 0.29 Ma, coincidente con la tectónica Quechua 3 del Mioceno, que está relacionada a los eventos magmáticos más jóvenes en el distrito (Anamaray y Atalaya), pero se desconoce su relación con la mineralización; Figuras 1 y 3.

En Uchucchacua es evidente que el *continuum* tectónico entre ambas fallas, aparte de controlar los múltiples pulsos intrusivos, crea un terreno fértil en el anticlinal con estructuras tensionales multi-direccionales, las cuales, con el subsiguiente ascenso de fluidos hidrotermales, han formado vetas, cuerpos o mantos en determinados niveles del Jumasha medio y Jumasha superior. Prevalecen los cuerpos o mantos verticales en el flanco corto del anticlinal. Así, a la falla Cachipampa se asocian el sistema de vetas Gina-Socorro que aportan el 80% del mineral extraído en Uchucchacua, mientras en Yumpag, la estructura mineralizada N60 "Camila" es un plano Reidel relacionado a la falla Cachipampa N40; Figuras 1 y 3.

4.2. Control litológico

Por años se pensó que sólo el Jumasha medio era el huésped de la mena en Uchucchacua, sin embargo, el descubrimiento de un cuerpo mineral en la estructura Camila en un horizonte del Jumasha superior en Yumpag rompe ese paradigma; Ligarda, et al (2017). A raíz de esto se viene estudiando mejor las características de las rocas hospedantes con la elaboración de columnas lito-estratigráficas y estudios de facies calcáreas al microscopio. De ello se desprende que las unidades estratigráficas con características para albergar mineralización y a su vez comportarse como trampas impermeables, son:

4.1.1. Jumasha medio:

De al menos 400 m de espesor. Compuesto por calizas beige mudstone en bancos gruesos intercaladas con calizas puras packstone-grainstone masivos y con calizas nodulares wackestone-packstone, ambas con foraminíferos y gasterópodos centimétricos de concha gruesa. Presenta niveles de calizas con granos de cuarzo con envueltas algares intercalados con algunos niveles mudstone laminares margosos. Alberga al menos el 90% del mineral en Uchucchacua; Figura 1.

4.1.2. Marker superior

Tiene una potencia de 25 m y está compuesto por intercalaciones de estratos delgados de calizas grainstone con gasterópodos de concha gruesa y foraminíferos, mudstone margosos laminares y calizas margosas mudstone-wackestone nodulares con bitumen. Se comporta como roca sello para los fluidos que generaron mineralización en las calizas de Jumasha medio.

4.1.3. Jumasha superior:

Se divide en tres horizontes (del piso al techo):

-*Horizonte de gasterópodos*: Tiene una potencia de 150 m. Litológicamente es idéntico al Jumasha medio. Sus bancos son menos potentes y la ocurrencia de calizas de aspecto nodular es mayor. En cuanto a fauna y composición, ambas litologías son indistinguibles, con presencia de foraminíferos y gasterópodos centimétricos de concha gruesa. En Yumpag alberga el mineral de la estructura Tomasa y parte de la estructura Camila; Figura 1.

-*Horizonte prospectivo βeta:* Tiene una potencia de 50 m en Yumpag y 35 m en Uchucchacua, en las inmediaciones de la estructura Gina-Socorro. Presenta una alternancia de calizas puras mudstone-wackestone con foraminíferos y fragmentos de conchas y calizas margosas negras masivas, margosas nodulares y bioclásticas packstone. En el "Horizonte βeta" de Yumpag está el 90% del mineral de la estructura Camila. Separado por un nivel de 15 m de calizas margosas, aparece otro horizonte favorable conformado por calizas wackestone puras claras masivas y fosilíferas denominado "Horizonte Alfa" de 15 m de espesor, que ha sido pobremente mineralizado; Figura 1.

-*Horizonte margoso:* Su potencia es de 80 m. Es una secuencia cíclica rítmica de calizas margosas negras masivas intercaladas con calizas margosas nodulares oscuras y niveles delgados de calizas puras decimétricas. Este horizonte en Yumpag no ha sido mineralizado, pero se ha comportado como trampa estratigráfica o sello permitiendo la precipitación de la mena en el horizonte prospectivo subyacente.

4.3. Mineralización, paragénesis y zoneamiento

Si bien la mineralización en el distrito es el resultado de los diferentes pulsos de actividad magmática e hidrotermal, a la fecha no tenemos una edad exacta de la mineralización, pero a grandes rasgos, en Uchucchacua se percibe un zoneamiento de valores de Cu-Pb-Zn asociado a skarn alrededor de stocks dacíticos de edades entre 26.68 ± 0.34 Ma y 25.08 ± 0.21 Ma que grada

a un halo distal rico en Ag-Mn-(Au) de filiación epitermal de baja sulfuración. No es claro si esto se debe a dos eventos mineralizadores (skarn y epitermal) en un intervalo de tiempo largo o es la evolución del evento skarn hacia un evento epitermal; sin embargo, al menos sabemos que el mineral asociado al evento skarn tiene una edad máxima de 26.68 ± 0.34Ma. En Yumpag, este mismo zoneamiento se evidencia en la estructura Camila, donde el mineral con altos valores de Ag-Mn del extremo noreste distal grada hacia un núcleo caliente con Zn-Pb-(Cu) al suroeste, cuya fuente se desconoce.

4.3.1. Paragénesis:

La compleja secuencia paragenética ha sido identificada en base al logueo de testigos de perforación, mapeo subterráneo y estudios microscópicos de muestras de los cuerpos minerales Gina-Socorro en Uchucchacua y Camila en Yumpag. Cuatro principales estadíos de precipitación de mineral han sido reconocidos: alabandita-sulfosales de plata (E1), esfalerita-galena (E2), sulfosales de plata-pirita (E3) y arsenopirita-oro (E4). Esto se corrobora con la asociación geoquímica de elementos que se puede apreciar mediante componentes principales (PC).

Vetas, cuerpos y mantos muestran texturas de reemplazamiento y de relleno de espacios abiertos como bandas y brechas. En general, donde se presenta variedad de texturas es donde ocurrió mineralización de alta ley. Los principales minerales de ganga son calcita, rodocrosita, rodonita y en menor proporción cuarzo.

4.3.2. Zoneamiento mineral:

Las variaciones en la composición mineral y el contenido metálico de vetas y otros cuerpos minerales asociados a la falla Camila, muestran una zonificación sub-horizontal concordante con el Horizonte βeta, y sub-vertical concordante con fallamiento-fracturamiento relacionado al eje del anticlinal o a litología favorable en el flanco corto sub-vertical del anticlinal en la estructura Gina-Socorro.

Dos secciones a lo largo de las estructuras mineralizadas Camila y Gina-Socorro muestran un patrón similar de zoneamiento de mineral; Figura 2.

La estructura Camila de 1.3 km de longitud reconocida, ± 50 m de alto, ~ 8 m de potencia, contiene 40 Moz Ag. Los mayores contenidos de Ag están distribuidos principalmente en la parte central y por debajo de la cota 4,250 m. El Zn-Pb incrementan hacia el suroeste en la dirección del *plunge*, por el contrario, el As-Au se encuentran principalmente en la parte central, probablemente asociados a estructuras alimentadoras aún no identificadas.

La estructura Gina-Socorro con una longitud de 1.8 km y desarrollo vertical de 1000 m, de al menos 102 Moz Ag (histórico + reservas), da los mejores contenidos de Ag en la parte central, entre las cotas 3,800 y 4,250 m. El Zn-Pb-Cu tiene mayor desarrollo hacia el oeste donde están los stocks porfiríticos con halos de skarn y por debajo de la cota 4,000 m; el Au-As se distribuyen erráticamente en la parte central, sin embargo, hacia el oeste y por debajo de la cota 3,900 m se distribuyen con un zoneamiento más consistente.

No obstante, las similitudes en ensambles mineralógicos, presencia de Pb-Zn-(Cu), la ubicación del cuerpo mineral Camila, sugiere una fuente magmática hidrotermal distinta a la de Gina-Socorro, la cual, se presume se ubique al suroeste según el *plunge*, bajo la cobertura de las Fms. Casapalca y Celendín.

5. Conclusiones

De lo expuesto se puede concluir que en el distrito de Uchucchacua hay tres controles importantes para la mineralización: el primero es estructural, expresado por la presencia de fallas profundas (escamas gruesas) que permitieron el ascenso de stocks y diques porfiríticos y también la mineralización; la mineralización ha precipitado en la porosidad secundaria generada en el núcleo del anticlinal en forma de vetas y cuerpos o en forma de mantos en determinados niveles del Jumasha medio en el flanco corto del mismo en el caso de Uchucchacua.

En efecto, el segundo control es el litológico, constituido por niveles donde priman calizas puras de textura packstone a grainstone, que conforman horizontes prospectivos en el Jumasha medio para el caso de Uchucchacua; mientras que en Yumpag los fluidos mineralizantes ascendieron por la falla Camila formando cuerpos minerales en la intersección con los horizontes βeta y de Gasterópodos del Jumasha superior. En ambos casos se ha evidenciado que estos horizontes favorables necesitan una trampa estratigráfica impermeable que permita la precipitación del mineral.

El tercer control, es un claro zoneamiento del mineral desde un núcleo caliente asociado a skarn enriquecido en Pb-Zn-Cu hacia una periferie distal rica en Ag-Mn hacia el noreste en Uchucchacua; mientras que en Yumpag se percibe la misma gradación, pero sólo se ha visto que el halo distal

con mineral de Ag-Mn va gradando a un mineral enriquecido en Pb-Zn-(Cu) a medida que la estructura mineralizada Camila avanza al suroeste en la dirección del *plunge* aunque todavía no se conoce la fuente, pero se sospecha que está debajo de la cobertura Casapalca en la altiplanicie entre Uchucchacua y Yumpag.

Agradecimientos

A los Ings. Javier Rendón, Alejandro Gomez, Julio Samaniego, Hernán Tanabe, Tony Gómez, Alvaro Cárdenas, Jackson Arriola, Huber Uzuriaga y Fernando Lizárraga. A las Srtas. Denise Chávez y Ana Villar. A todo el equipo de Exploraciones y Asuntos Sociales del proyecto Yumpag de Buenaventura.

Referencias

Bissig, T., Ullrich, T. D., Tosdal, R. M., Friedman, R. & Ebert, S. (2008). The time-space distribution of Eocene to Miocene magmatism in the central Peruvian polymetallic province and its metallogenetic implications. Journal of South American Earth Sciences 26, p. 16–35.

Carlotto, V. (2014). Revisión sobre la Geología: Sedimentología y tectónica en los alrededores de Uchucchacua. Reporte interno, Cía. de Minas Buenaventura S.A.A., 50 p.

Ligarda, R., Arias, E., Sabán, C., Salazar J. C., Calderón, C. y Bermúdez, C. (2017). El Proyecto Yumpag: Un nuevo yacimiento de alta ley de plata en el Perú Central. Importancia de la identificación de facies carbonatadas en la formación Jumasha y controles estructurales para su descubrimiento. Resumen., X Congreso Internacional de Prospectores y Exploradores., 5 p.

Mc Clay, K. R. (1992). Thrust Tectonics. Department of Geology Royal Holloway and Bedford New College University of London. Chapman & Hall., 447p.

Mégard, F. (1979). Estudio geológico de los Andes del Perú Central. Inst. Geol. Min. Metal. Bol. Ser. D: Est. Esp. 8, 227 p.

Romaní, M. (1982). Géologie de la région miniere Uchucchacua-Hacienda Otuto, Pérou: Unpub. thesis, 3rd cycle D, France, Univ. Grenoble, 120 p.

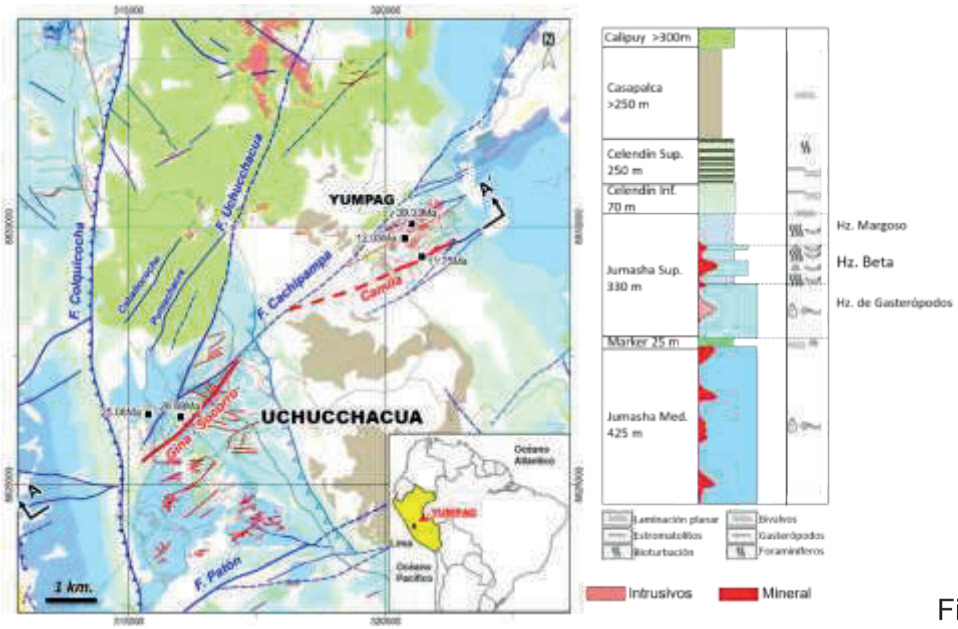


Figura 1. Mapas de ubicación y geológico; columna estratigráfica

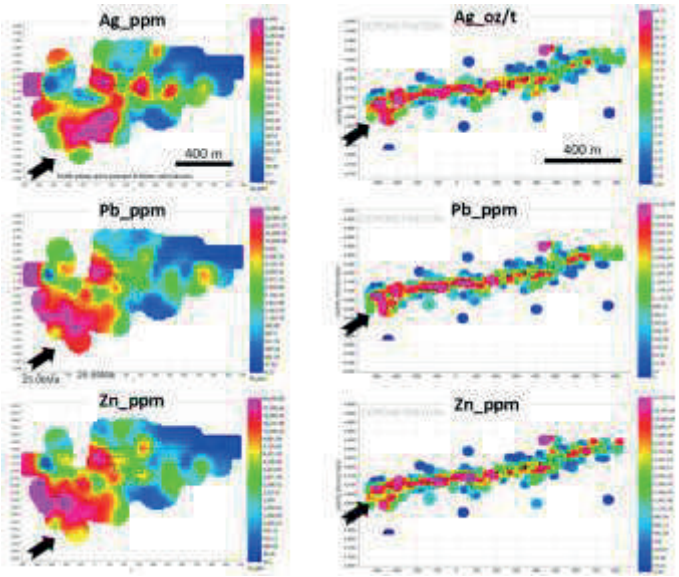


Figura 2. Secciones longitudinales de las estructuras Gina-Socorro en Uchucchacua (Izquierda) y Camila en Yumpag (Derecha), donde se muestra el zoneamiento de un núcleo de alta temperatura (Zn-Pb) que grada a un halo de Ag.

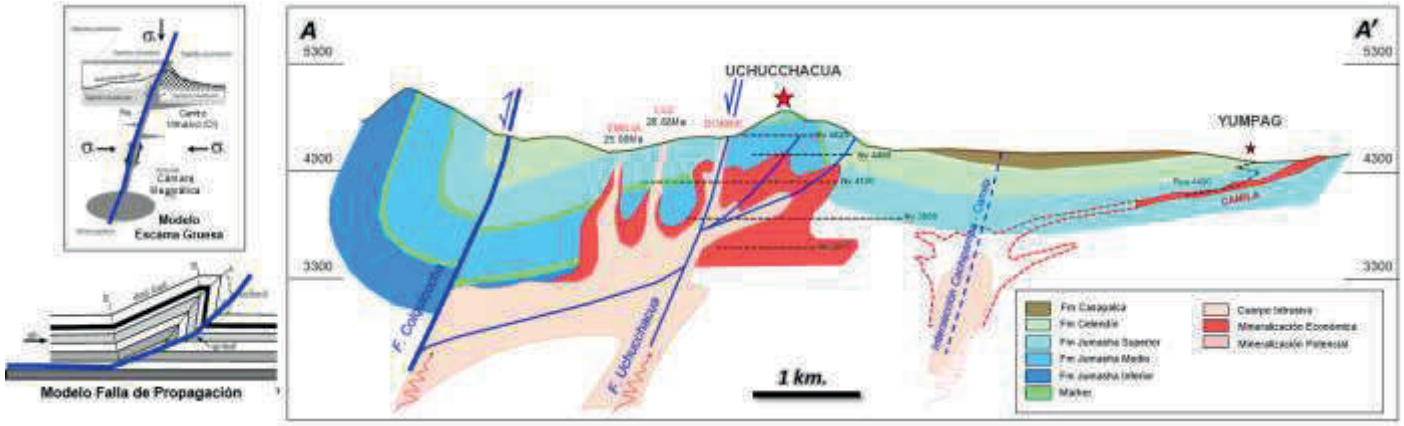


Figura 3. Sección longitudinal esquemática entre las estructuras Gina-Socorro (Uchucchacua) y Camila (Yumpag).

The Puagjanca Zn-Pb(-Ag) pipe in the Miocene Santander-Chungar district, Central Peru.

César Farfán[1], Luis W. Loyola[1], Rafael Bernaola[1], José A. Enríquez[1], Ronner Bendezú[1], Lluís Fontboté[2]

[1] Volcan Compañía Minera S.A.A., Lima, Perú
[2] University of Geneva, Geneva, Switzerland (lluis.fontbote@unige.ch)

1. Abstract

The Puagjanca pipe in the Miocene Santander-Chungar district, Central Peru, is a classic example of Zn-Pb-(Ag) mineralization associated with skarn. The ore consists of Fe-rich sphalerite, and galena overprinting calc-silicates. The deposit is largely a distal skarn developed in Cretaceous carbonate rocks. Available dating elsewhere in the district suggests that Puagjanca has a late Miocene age.

2. Introduction

Significant mining in the Chungar area (Fig. 1) dates back mainly to the second half of the twentieth century and up to 1971 when a massive landslide into the Yanawayin Lake stopped production of the mine exploiting the Chungar Zn-Pb-Cu-Ag skarn deposit (11°07′27″S 76°31′56″W, Soler and Bonhomme, 1988). In 2015, Volcan Compañía Minera acquired the property and explored several targets identified by a previous owner. Of these, the Puagjanca pipe (11°09'44"S 76°31'02"W) was defined at 14.5 Mt with 4.63% Zn, 2.72% Pb, 42.1 g/t Ag (measured, indicated, and inferred resources at Zn equivalent cut-off of 2 %, December 2019). The similarities of the Zn-Pb-Ag skarn-related deposits and ore showings in the Santander (Kingsley et al., 2019) and Chungar areas were already noted by Petersen (1965) and Noble and McKee (1999) and allow to use, as part of the Miocene polymetallic belt of Central Peru (Noble and McKee, 1999), the term Santander-Chungar District that from south to north includes the Zn-Pb-(Ag-Cu) deposits of Santander, Magistral (only active mine presently), Puagjanca, and Chungar, as well as Don Miguel and other ore showings (Fig. 1). Main host rock are Cretaceous carbonate rocks. NNW-SSE-trending strike-slip faults, and parallel West-plunging overthrust faults and tight anticlines and synclines, as well as NE trending steep faults are the major structures in the District. Late Miocene (~13 to 10 Ma, Soler and Bonhomme, 1988; Bissig et al., 2008, see details below) granitic and granodioritic intrusions post-date the main deformation. In the district occur also minor andesitic sills and dykes. One of them, trending NNW-SSE, located 250 m East of the Chungar granite, was dated by Soler and Bonhomme (1988) at 25.1±1.6 Ma (K-Ar, whole rock).

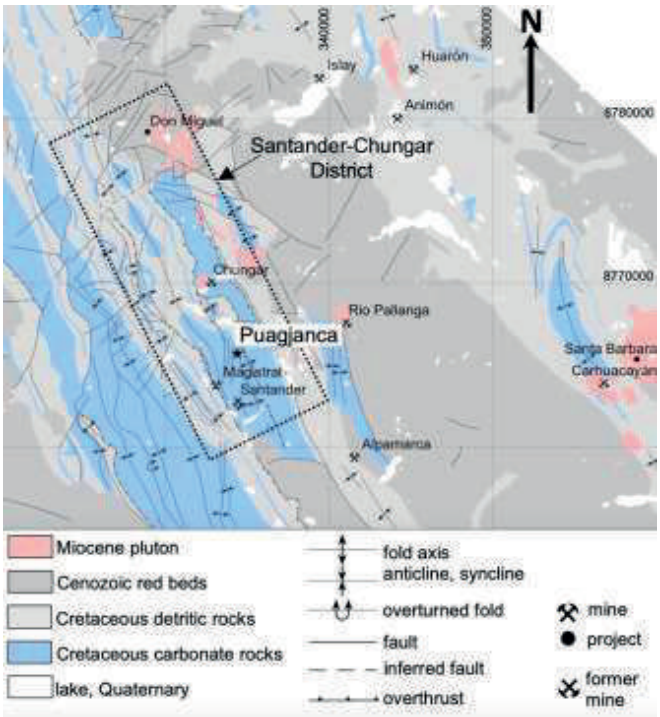


Fig. 1 Simplified geological map of the Santander-Chungar District and nearby areas.

3. The Pugjanca pipe

The Puagjanca pipe is emplaced sub-vertically down 650 m from a surface outcrop at 4950 in the axis of a NNW trending anticline formed by Cretaceous carbonate, marls, and siliciclastic sedimentary rocks whereby the skarn replaces mainly clean limestones (Fig. 2). The pipe is zoned with Fe-rich sphalerite – galena ratios decreasing from a deep portion with Zn:Pb ratios >10 to the middle and upper portions, that make up the main

part of the ore, where the Zn-Pb ratios are around 3 to 1 (Fig. 2). Silver contents in the ore body are fairly proportional to the abundance of galena. Mineralization is open at depth where it occurs as Fe-rich sphalerite veins predominantly devoid of galena.

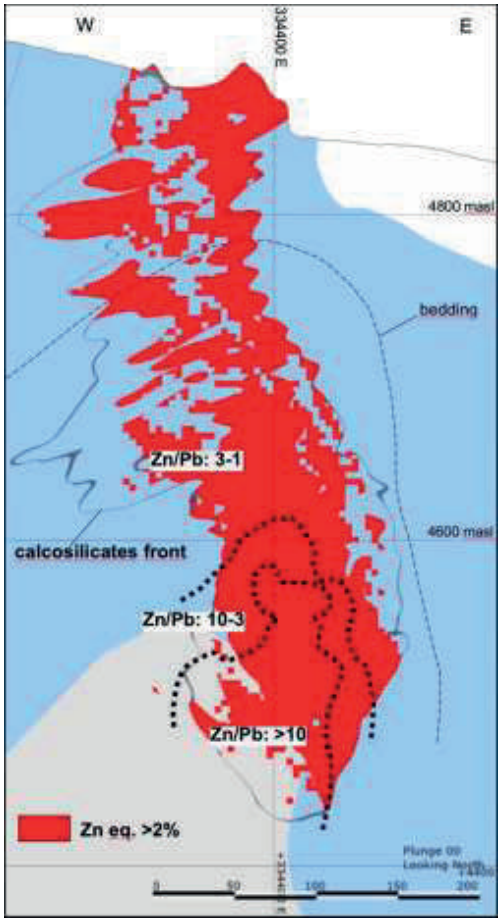


Fig. 2 Schematic W-E cross section of the Puagjanca pipe.

Similarly to the Santander deposit with which it shares its pipe morphology and position in the axis of an anticline, no major intrusive rocks directly connected to the skarn mineralization have been observed so far except for a monzonite dyke less than two meter thick. However, in the near inactive Zn-Pb-(Cu-Ag) Chungar mine (Fig. 1), Soler and Bonhomme (1988) described a granite in contact with skarn mineralization with similar mineral assemblages as in Puagjanca. This granite was dated by Bissig et al. (2008) at 12.88 ± 0.36 Ma (Ar/Ar biotite plateau age), age consistent with less precise previous biotite K-Ar ages around 13.3-13.5 Ma by Soler and Bonhomme (1988). These authors dated also the Chalhuacocha granodiorite at 10.0± 0.3 Ma (K-Ar on biotite), located 1 km of the Don Miguel Zn-Pb-Ag prospect (11°03'00"S, 76°33'25" W) 8 km north of the Chungar Mine). These ages and those between 11.42±0.06 and 10.88±0.0 Ma (Re-Os in molybdenite) in quartz-molybdenite veins in the Santander Mine property obtained by Kingsley et al. (2019) suggest that the Puagjanca pipe has a similar late Miocene age.

A low-sulfidation assemblage consisting mainly of Fe-rich sphalerite, pyrrhotite, galena, minor amounts of chalcopyrite, as well as chlorite and minor amphibole and serpentine overprints garnet and other calc-silicates and makes up the majority of the ore (Figs. 3 to 6). In places, coarse-grained, partly idiomorphic pyrite comparable to that of "stage B" in many Cordilleran polymetallic deposits (Rottier et al., 2016, 2018; Fontboté, 2020) overprints the low-sulfidation mineral assemblages (Fig. 6). Replacement of pyrrhotite by marcasite ("intermediate product" of Ramdohr, 1982) is also frequent in this Stage B. Intermediate-sulfidation assemblages comparable to Stage C with Fe-moderate sphalerite, Ag-bearing sulfosalts, Fe-Mn carbonates, and sericite occur in thin veins. Minor supergene alteration with development of smithsonite and Zn bearing clays is observed along certain faults in the upper part of the pipe.

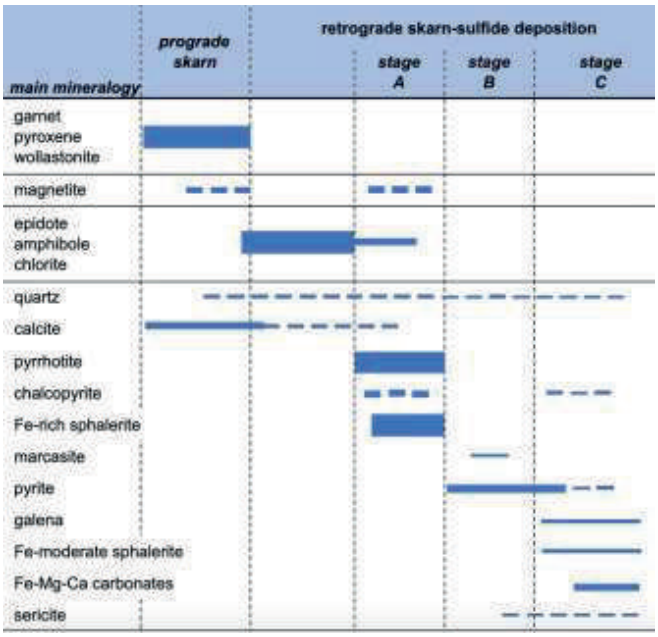


Fig. 3 Simplified paragenetic sequence of the Puagjanca pipe. Stage terminology according to Fontboté (2020).

4. Discussion and conclusion

The mineral sequence of the retrograde assemblages of Puagjanca is reminiscent of the three-stage evolution of numerous Cordilleran

polymetallic deposits (Fontboté, 2020), whereby here, as typical for Zn-Pb-Ag distal skarns, he first low-sulfidation stage dominates. Recognition during logging and field work of "stage B" partly idiomorphic coarse-grained pyrite overprinting the previous low-sulfidation assemblages is key to trace the evolution of the system and to explore transitions to Cordilleran deposits, as observed, for example, in the nearby Carhuacayán polymetallic deposit (Bernaola et al., 2019)

Fig. 4 Massive ore consisting mainly of Fe-rich sphalerite typical for the richest portions of the Puagjanca pipe. Drill core width: 6.3 cm

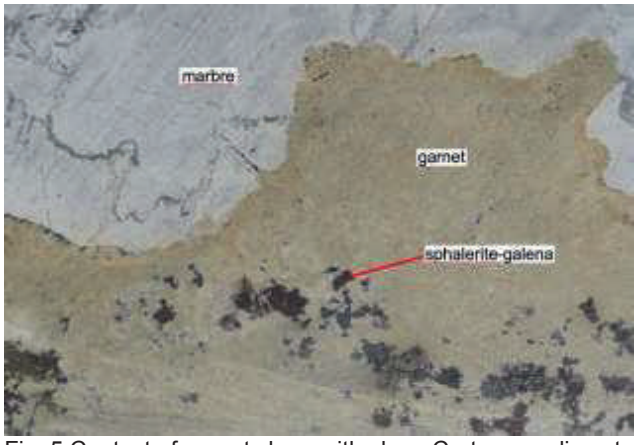


Fig. 5 Contact of garnet skarn with clean Cretaceous limestone affected by contact metamorphism. Image width: 6 cm.

The size and grade of the Puagjanca ore body and its similarity with other structurally-controlled polymetallic deposits in the Santander-Chungar district, underlines the potential of the area for porphyry related polymetallic skarn and Cordilleran mineralization.

Acknowledgement
We thank the geologists of the Romina project for their contributions and Volcan Compañía Minera for authorization of publication.

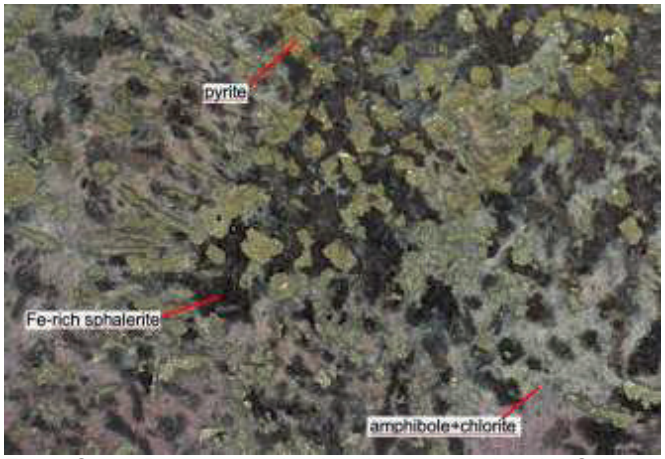


Fig. 6 Stage B coarse-grained pyrite overprinting the Stage A low-sulfidation assemblage with Fe-rich sphalerite, amphibole and chlorite that makes up most of the Pugjanca ore. Image width: 4 cm.

References

Bernaola, R., Díaz, M., Espinoza, S., Figueroa, O., Farfán, C., Fontboté, L. 2019. Mineralization stages at La Tapada in the Cordilleran polymetallic deposit of Carhuacayán, Central Peru: Applications for Resource Modelling and Exploration. SEG2019 Conference, Santiago de Chile, proceedings, P123, 4 p.

Bissig, T., Ullrich, T.D., Tosdal, R.M., Friedman, R., Ebert, S. 2008. The time-space distribution of Eocene to Miocene magmatism in the central Peruvian polymetallic province and its metallogenetic implications. Journal of South American Earth Sciences v. 26, p. 16–35.

Fontboté, L. 2020. Systematic trends in the evolution of porphyry-related Zn-Pb-(Ag) deposits. Swiss Geoscience Meeting, Zurich, Proceedings, p. 40-41.

Kingsley, T., Rosell, E., Espinoza, W., Requelme, J. C., and Bourassa, Y. 2019. Re-Os Dating of Molybdenite Mineralisation from the Santander Pb-Zn-Ag Carbonate Replacement Deposit, Peru. SEG 2019 Conference Proceedings, 2 p.

Noble, D. C. and McKee, E. H. 1999. The Miocene metallogenic belt of central and northern Peru. In: Geology and ore deposits of the Central Andes. Special Publication SEG, v. 7, p. 155–193.

Petersen, U. 1965. Regional geology and major ore deposits of Central Peru. Economic Geology, v. 60, p. 407–476.

Ramdohr, P. 1980. The ore minerals and their intergrowths. (2nd Ed) Pergamon Press, Oxford, 1205 p.

Rottier, B., Kouzmanov, K., Wälle, M., Bendezú, R., Fontboté, L., 2016, Sulfide replacement processes revealed by textural and LA-ICP-MS trace element analyses: Example from the early mineralization stages at Cerro de Pasco, Peru: Economic Geology, v. 111, no. 6, p. 1347–1367.

Rottier, B., Kouzmanov, K., Casanova, V., Wälle, M., Fontboté, L. 2018. Cyclic dilution of magmatic metal rich hypersaline fluids by magmatic low-salinity fluid: A major process generating the giant epithermal polymetallic deposit of Cerro de Pasco, Peru. Economic Geology, v. 113, p. 825–856.

Soler, P., & Bonhomme, M. G. 1988. Oligocene magmatic activity and associated mineralization in the polymetallic belt of Central Peru. Economic Geology v. 83, p. 657-663.

VIERNES 26

ROL Y DESAFÍOS DE LA GEOMETALURGIA OPERACIONAL EN CERRO CORONA, CAJAMARCA, PERÚ

Julio Castro [1], Anthony Julian[2], Edwin Ayala[3], Gabriel Becerra[4]

[1] Geometalurgista Senior, Hualgayoc, Cajamarca, Perú (Julio.Castro@goldfields.com)
[2] Supervisor General Geometalurgia, Hualgayoc, Cajamarca, Perú (Anthony.Julian@goldfields.com)
[3] Jefe de Geología Mina, Hualgayoc, Cajamarca, Perú (Edwin.Ayala@goldfields.com)
[4] Gerente de Servicios Técnicos, Hualgayoc, Cajamarca, Perú (Gabriel.Becerra@goldfields.com)

Resumen

La clasificación geometalúrgica del yacimiento es extremadamente importante para la predicción del desempeño metalúrgico en el procesamiento y está dirigida a maximizar el beneficio económico. La definición de UGMs (Unidades Geometalúrgicas) basadas en la litología, alteración, caracterización estructural, mineralogía y parámetros metalúrgicos, permite pronosticar las recuperaciones, tonelaje procesado, concentración de elementos contaminantes y consumo de reactivos. El desarrollo de estrategias de producción basada en modelos geometalúrgicos beneficia a la empresa mejorando los planes de minado, planes de mantenimiento, mitigación del efecto de impurezas y la consecuente optimización del proceso.

Palabras claves: Metalurgia, recuperación, tonelaje procesado, modelo geometalúrgico y unidades geometalúrgicas (UGMs).

Abstract

ROLE AND CHALLENGES OF OPERATIONAL GEOMETALLURGY IN CERRO CORONA, CAJAMARCA, PERÚ

Geometallurgical ore deposit classification is extremely important for prediction of metallurgical performance in processing aimed at maximizing economic benefit. The definition of GMUs (Geo Metallurgical Units) based on lithology, alteration, structural characterization, mineralogical and metallurgical parameters allow the forecasting of recoveries, throughput, concentration of pollutants and reagents consumption. Production strategies based on geometallurgical models benefit the company by improving mining plans, maintenance plans, impurities effect mitigation and consequently process optimization. Keywords: Metallurgy, recovery, throughput, geo-metallurgical model and geometallurgical units.

1. Introducción

Cerro Corona es una operación minera a Tajo abierto que se encuentra ubicada en el departamento de Cajamarca en el norte del Perú (Figura 1), se trata de un yacimiento tipo Pórfido cobre-oro desarrollado en diorita (14.4 a 13.35 millones años) que intruye a la formación calcárea Yumagual del cretácico (Uzátegui, 2016).

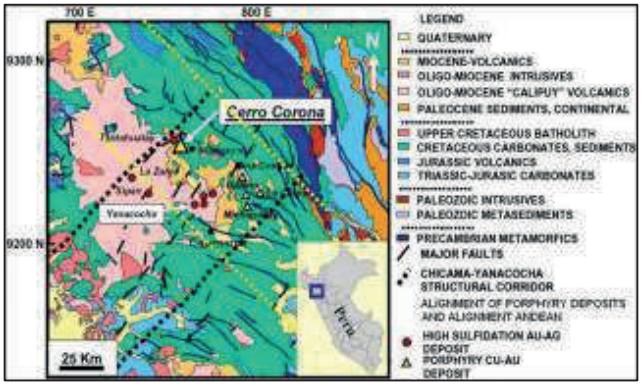


Figura 1.- Ubicación de la mina Cerro Corona y la geología regional

Es operada por Gold Fields La Cima S.A. desde el año 2008. A diciembre del 2019, se cuenta con recursos minerales, dentro del cono económico, en el orden de 107.22Mt @ 0.58g/t Au y 0.36% Cu.

La planta consta de un circuito de chancado primario/secundario, molienda SABC-B y celdas de flotación para recuperar concentrados de cobre con contenidos de oro como mineral accesorio. La planta empezó a operar el año 2008 con materiales mixtos (transicionales) y supérgenos de competencia mecánica suave (arcillas) y con leyes altas de cobre (zonas de enriquecimiento supergénico); el 2012 se crea el Departamento de Geometalurgia, con el objetivo de maximizar las ganancias y mejorar el proceso metalúrgico.

2. Mejoras en las etapas del proceso

2.1. Fragmentación

La competencia mecánica del mineral alimentado a planta ha cambiado, aumentando a medida que se profundiza el minado y está relacionado a la distribución espacial de las alteraciones.

A partir de noviembre del 2017 se observó un incremento del ingreso de minerales competentes y sobredimensionados en la alimentación a las chancadoras, lo cual causaba frecuentes atoros del equipo, ya que estas no cuentan con un sistema de selección de tamaño previo (Figura 2).

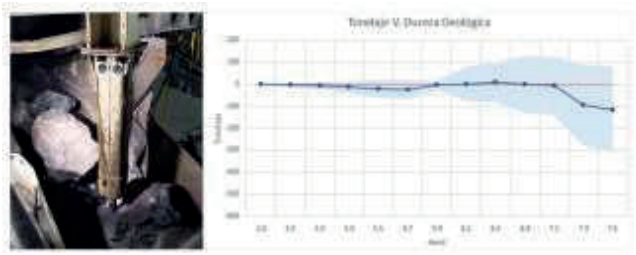


Figura 2.- Fotografía de Chancadora con material sobredimensionado y gráfico de tonelaje vs competencia mecánica.

Para mejorar la fragmentación se definieron tres nuevas configuraciones de mallas triangulares de voladura de acuerdo a un rango de competencia mecánica *en función de las alteraciones,* las cuales se muestran en la Figura 3.

COMPETENCIA MECANICA	MPA
D3	R3 25 – 50 Mpa
D4	R4 50 - 100 Mpa
D5	R5 100 - 175 Mpa
D6	R6 >175Mpa

Figura 3.- Rangos de competencia mecánica

Además, se está trabajando en la creación de unidades geológicas de fragmentación (UGFs) según Canchaya (2016), con la finalidad de simular el producto granulométrico de la voladura y optimizar el factor de carga; teniendo en cuenta que el tonelaje ya se ve influenciado desde un F80 mayor a 5.5 pulgadas (Figura 2).

2.2. Alimentación a planta

La meta de alimentación a molienda es 830 tph, pero cuando se procesan minerales de alta competitividad como la alteración potásica y silicificada (zonas con alta densidad de venillas de cuarzo), solo se pueden lograr 600 tph. El sistema de chancado tiene dos componentes, un chancado primario que consiste en una lokotrack (trituradoras de mandíbulas) y en el chancado secundario una sizer (trituradora de rodillo). Para poder cumplir el plan de procesamiento de mineral se alimenta los minerales más finos y de baja competencia en stocks para su alimentación directa al sizer y evitar así el sobre consumo de energía. Se considera como variables de análisis: la competitividad, la performance metalúrgica, control de ley, contaminantes y consumibles. Los minerales son manejados en stocks dinámicos (Figura 4).

Figura 4.- Stocks dinámicos para disponer mineral según UGMs

2.3. Cinética de flotación

En la planta se obtienen concentrados de cobre-oro provenientes del proceso de flotación, los minerales son alimentados con “blending” planificado por las áreas de geometalurgia, planeamiento mina, grade control y operaciones procesos, para obtener la mejor performance, siendo la recuperación metalúrgica, una variable de análisis para el “blending”. En los análisis de datos se ha identificado que la recuperación es dependiente de las áreas de procesamiento en el PIT. La recuperación de cobre evidencia una alta correlación directa con las especies de sulfuros primarios, como la calcopirita y bornita disponibles en ciertos dominios; y baja correlación cuando los sulfuros secundarios, que se presentan en forma de pátinas, o también en sulfuro asociado a arcillas (esmectítica); además los cobregrises impactan también en la concentrabilidad de cobre, estos últimos tienen una alta acidez (Figura 5) y generan inestabilidad en el pH de la pulpa de flotación y por tal motivo son altamente consumidores de cal. De forma análoga para la recuperación de oro, se encuentran zonas de poca asociación con los minerales de cobre, lo que implica una disminución en la recuperación de oro.

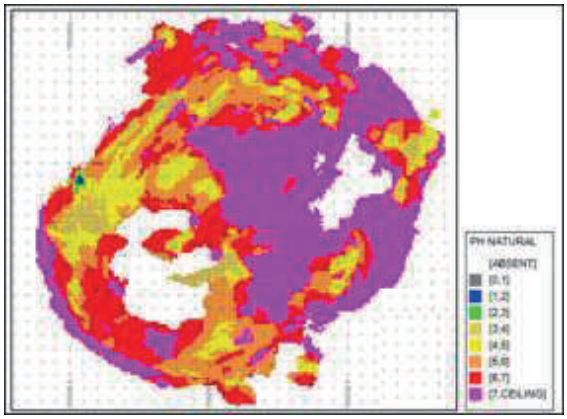


Figura 5.- Distribución espacial de pH natural

2.4. Elementos contaminantes (Arsénico).

El minado de nuevas fases del tajo representó un reto: manejar el contenido de arsénico en contenidos permitidos para su comercialización. El arsénico, está presente en leyes bajas en todo el yacimiento, salvo en la zona oeste del tajo, donde se presenta enargita y tenantita; que, debido a la flotabilidad natural de éstos, son más fáciles de concentrar en el proceso y no existe forma de reducir el impacto en la concentración. Debido a esto, en las mezclas es de mucha ayuda el modelo de concentrabilidad de arsénico para controlar el arsénico en el concentrado final (Ver Figura 7.).

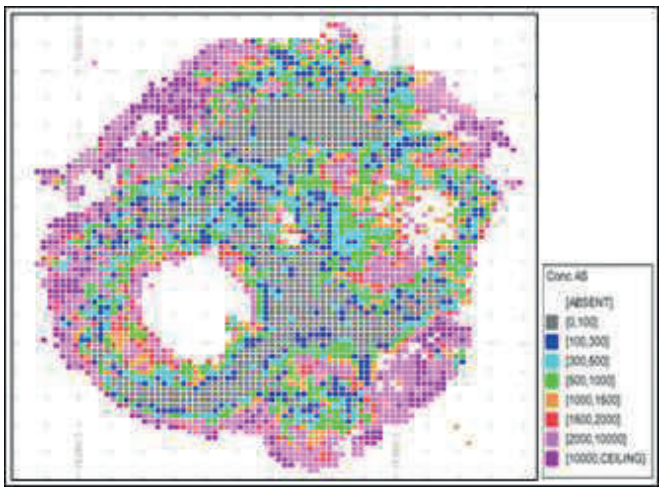


Figura 6.- Distribución espacial de la concentración de arsénico en el tajo

3. Geometalurgia Operacional

Se basa en mejorar el conocimiento de los diferentes tipos de mena de un recurso en operación, considerando toda la información disponible. Es importante contar con un adecuado soporte de caracterización geológica y metalúrgica, además de la gestión integral de la base de datos tanto para drillholes como para blastholes; con esta información se define los dominios de las diversas UGMs. Su desarrollo es importante para dar solución a situaciones que no fueron identificadas en la etapa de proyecto.

En la sección 2 se ha mostrado cómo la identificación de las diversas características del mineral influye en los procesos.

3.1. Caracterización de UGMs

Para definir las UGMs se tomó como base la litología, alteración y tipo de mineralización; de forma que estas representen las diversas características de competencia mecánica, recuperaciones y elementos contaminantes del material a procesar.

La competencia mecánica del material considera zonas de alta y baja frecuencia de venillas de cuarzo (stockwork), resultados de ensayos de carga puntual, SPI, Wi y abrasión.

La recuperación de cobre está relacionada directamente a la presencia de calcopirita; se utiliza el método de cobre secuencial para inferir la presencia de cobre secundario y óxidos (Figura 7).

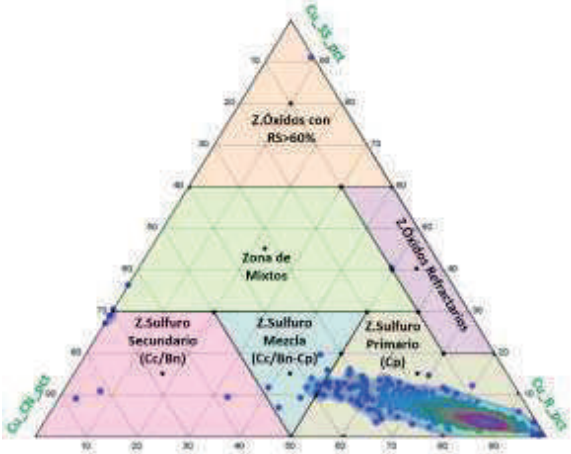


Figura 7.- Diagrama ternario de análisis de cobre secuencial para identificar especies de cobre y su influencia en la recuperación de cobre

La recuperación de oro está en función de la asociación del oro con sulfuros; si el oro está asociado con la calcopirita, tiene buena recuperación; pero si el oro está asociado a piritas, arcillas y cuarzo, la recuperación no es buena ya que este oro se pierde en la etapa de limpieza Además, se ha identificado una zona en el PIT donde el oro está asociado a piritas micro cristalinas y enargita (Figura 8), esta zona presenta baja recuperación de oro y alta concentración de arsénico (zona oeste del PIT).

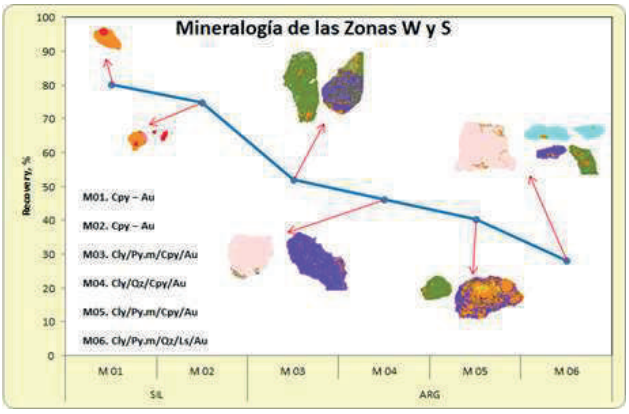


Figura 8.- Especies minerales asociadas a recuperaciones de oro

La concentrabilidad de arsénico tiene buena correlación con el ratio cobre/arsénico en la cabeza de mineral con el que se ha realizado un modelo matemático, y este producto muestra una buena reconciliación y nos ayuda a una buena planificación controlando este contaminante.

3.2. Modelos Geometalúrgicos

El modelo Geometalúrgico es la representación tridimensional de los diferentes tipos de mineral en el yacimiento, considerando diversas propiedades. Ello permite tener el control de todo el yacimiento de modo que el rendimiento metalúrgico y el posterior valor económico quedan determinados mucho antes de que el mineral ingrese a la planta metalúrgica.

El modelo de recuperación geometalúrgico de Cerro Corona inicialmente se basó en ecuaciones (Brittan,2006), usando como variables los resultados de pruebas metalúrgicas de sondajes de exploración, este modelo sirvió para la planificación de la planta y los primeros años de operación. Actualmente está en curso una actualización usando UGMs (Figura 79), como dominios de interpolación y alimentado con una campaña de pruebas de flotación en muestras de sondajes.

Así mismo contamos con un modelo de recuperación de menor resolución alimentado con resultados de pruebas de flotación de compósitos de material de los taladros de voladura, este producto sirve para mejorar el pronóstico del rendimiento de la planta.

Adicionalmente, la actualización de los modelos del 2020 contempla a otras variables geometalúrgicas como el tonelaje horario, SPI, BWi, etc, todas ellas estimadas usando las mismas UGMs anteriormente descritas.

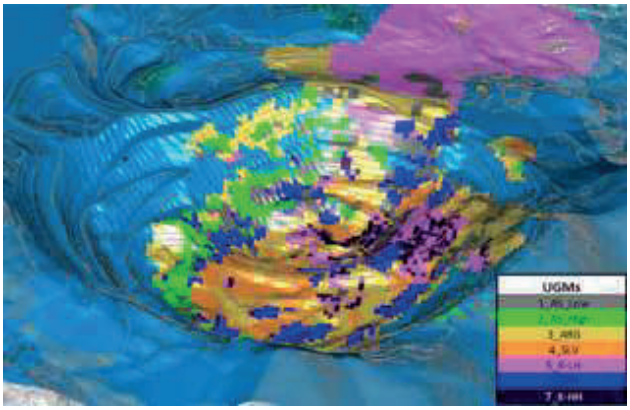


Figura 9.- Distribución de las UGMs en Cerro Corona

4. Beneficios

La geometalurgia cumple un rol importante en el procesamiento de minerales. En Cerro Corona hemos optimizado los siguientes aspectos:

- El modelo de “Throughput” y el control de la granulometría del material de ingreso, desde la optimización de la malla de voladura en función a la competencia mecánica, hasta la concepción de un modelo de tonelaje horario para optimizar el proceso en la molienda.
- La caracterización mineralógica para determinar las asociaciones de los metales recuperables (cobre y oro), y mitigar el ingreso de materiales problemas mediante mezclas.
- El modelo de concentrabilidad de arsénico nos permite controlar la concentración final y así minimizar el impacto y las penalidades.
- La concepción de las UGMs, ha sido de gran ayuda como dominios de interpolación de las variables geometalúrgicas. Estas se basan en características geológicas, concentración de arsénico, competencia del material y en la mineralogía.

6. Referencias

Uzategui, A., Azan, J. y Rios, H., (2016). Mineralización y fases intrusivas en el pórfido de cobre-oro-molibdeno de Cerro Corona: XVIII Congreso Peruano de Geología, resúmenes extendidos, Sociedad Geológica del Perú, 03 p.

Brittan, M.2006 Cerro Corona Recovery Models. Memorandum Internal Review of Plant Recovery Estimation; Hualgayoc – Perú

Canchaya, S. 2019 Geometallurgical block model based on mineralogical-textural assemblages (MTA) and geological fragmentation units (GFU). Procemin-GEOMET 2019; Santiago de Chile.

Deepening an old, verticalized pit: rock slope instability hazard assessment using a “digitally augmented” structural database (Flône limestone quarry, Belgium).

Authors :

E. C. Frets, Tractebel Engie, Boulevard Simón Bolívar 34-36, 1000 Brussels (Belgium), erwin.frets@tractebel.engie.com

A. Gauffriau, Tractebel Engie, Boulevard Simón Bolívar 34-36, 1000 Brussels (Belgium), antoine.gauffriau@tractebel.engie.com

N. Coussaert, Tractebel Engie, Boulevard Simón Bolívar 34-36, 1000 Brussels (Belgium), nicolas.coussaert@tractebel.engie.com

J. Vanneste, Lhoist Western Europe, Rue Granbonpré 11, 1435 Corbais (Belgium), julien.vanneste@lhoist.com

Abstract:

We present the methodology and results used to assess the rock slope instability hazard of the Flône pit (Belgium) by means of a deterministic kinematic stability analysis. This study’s particularity resides in the “digital augmentation” of the field mapping structural database (by a factor 5), based on semi-automatic point cloud analysis. Our data show that the main instability hazard is flexural toppling on the northern and southern fronts of the actual pit. Wedge sliding constitutes a moderate hazard on the western and eastern fronts. Planar sliding, although minor in the current situation, will constitute a significant hazard for interbench rupture during future excavation, due to the presence of an anticline structure at depth inferred from 2D interpreted geological cross-sections. Our georeferenced, augmented structural database has enabled to generate a synthetic rock slope instability hazard map that constitutes the basis for recommending targeted monitoring solutions during future excavation works.

Key Words: Point clouds, Drones, Laser scanning, 3D, Pit stability Monitoring

Profundización de un antiguo pozo verticalizado: peligro de inestabilidad de roca utilizando una base de datos estructural “aumentada digitalmente” (cantera de caliza de Flône, Belgica)

Presentamos la metodología y los resultados utilizados para evaluar el peligro de inestabilidad de la roca del pozo Flône (Bélgica) mediante un análisis determinista de estabilidad cinemática. La particularidad de este estudio reside en el "aumento digital" de la base de datos estructural de mapeo de campo (por un factor 5), basado en el análisis semiautomático de nubes de puntos. Nuestra data muestra que el principal peligro de inestabilidad es la caída de la flexión en los frentes norte y sur del pozo real. El deslizamiento de cuña constituye un peligro moderado en los frentes occidental y oriental. El deslizamiento plano, aunque menor en la situación actual, constituirá un peligro significativo para la ruptura entre bancos durante la excavación futura, debido a la presencia de una estructura anticlinal en profundidad inferida de las secciones transversales geológicas interpretadas en 2D. Nuestra base de datos estructural aumentada georreferenciada ha permitido generar un mapa sintético de peligro de inestabilidad de la pendiente de roca que constituye la base para recomendar soluciones de monitoreo específicas durante futuros trabajos de excavación.

1. Introduction

With increasing environmental awareness, optimizing available resources is key to ensure future sustainable extraction activities. Nonetheless, optimizing resources by deepening a pit and verticalizing its fronts may go along with increased instability hazard. Lhoist Group plans to further exploit the limestone resource of its Hermalle quarry —a 2.5 km long for only 300 m large elongated pit bordering the Meuse river in Belgium (Figure 1) — by deepening its westernmost part (the "Flône" pit). The pit had not been exploited since 2007, and since then the 3 upper benches are set in their "final" position (i.e. 20 m vertical each, with 5 m interbench distance). Although no major instability hazard has occurred since this time, it was imperative for security reasons to (i) assess the instability hazard in such narrow and steep conditions, and (ii) have a view on the resource at depth, prior to restarting extraction activities in the Flône pit.

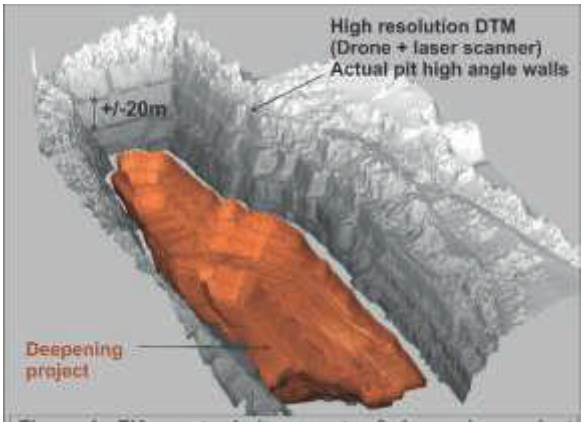


Figure 1 : Flône actual pit geometry & deepening project

2. Geological context

The Hermalle quarry exploits visean limestones and dolomites near the contact with a major tectonic suture, the Midi Eifel thrust zone. The sedimentary succession in the quarry is thus strongly deformed, in general either steeply S-dipping with normal polarity, or steeply N-dipping with reverse polarity in the south and the north of the pit, respectively. The northern front also shows a tight, upright fold, with an axial surface dipping towards the pit.

3. Methodology

3.1 Digitally augmented structural database

The high-density point cloud has been constructed by merging a fix station laser scanning acquisition from the base of the pit, with an aerial (drone) photogrammetric survey. This dual acquisition has allowed us to increase and homogenize point density, especially in scanning dead angles for geological and geotechnical study purposes.

Our structural database based on (i) field mapping (157 DGPS stations, 211 planes – S0, S1, fractures, faults– and 24 lines – slickensides, fold axes) and (ii) Lhoist archives integration (pit photographs, own structural database) has been digitally augmented by semi-automatic, point-cloud based picking of ~1000 plane orientations using *CloudCompare* software (Figure 2).

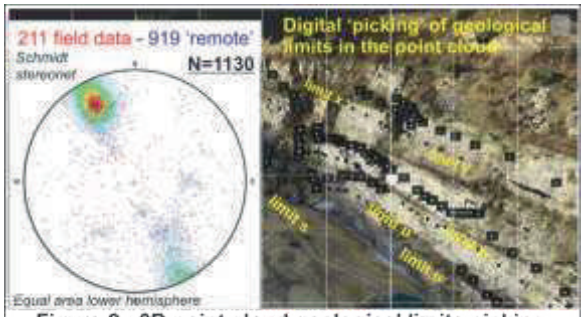


Figure 2 : 3D point cloud geological limits picking and results of field & remote structural data base

The georeferenced point cloud not only allows to retrieve data from inaccessible areas such as of each of the three 20 m high, verticalized fronts of the Flône pit, but also enables to refine the geological model and perform targeted detailed kinematic slope stability analyses precisely locating the subsets of problematic structures directly in GIS. Remote data measurement is reliable, efficient and a powerful methodology for both geological and geotechnical studies.

3.2 Interpretive geological cross-sections

In order to evaluate simultaneously the evolution of the limestone resource at depth and the instability hazard during excavation of the future pit, 4 interpretative cross-sections have been produced. These allowed discussing the instability hazard in function of the structural uncertainties still remaining at depth and making recommendations for monitoring and additional investigations, as well as general recommendations regarding future pit design and excavation.

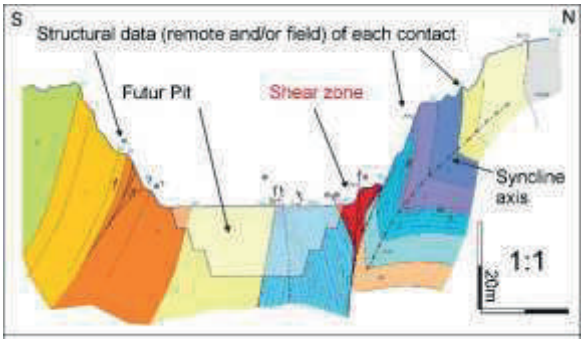


Figure 3 : structural cross section enhanced by remote structural data

3.2 Rock slope kinematic stability analysis

Three rock slope instability hazards have been investigated (planar sliding, wedge sliding and flexural toppling) by means of rock kinematic stability analysis using *Rocscience* software suite. Investigation of general failure mode was not part of this study, considering the overall strong character of the exploited limestones and dolomites.

For each front (South, North, West and East) we have computed plane, wedge and flexural toppling kinematic stability analysis based on >1000 planes covering the 4 mapped tectonic units. To perform the kinematic stability analyses based on the Markland's test (Hoek and Brey, 1981), we have considered an average slope dip of the quarry fronts of 75°, a friction angle of 30°, 222 augmented, georeferenced structural database, we have then been able to produce detailed instability hazard maps.

4. Results

4.1 Geological – Structural mapping and cross-sections

Our new data have highlighted a more complex structure than was previously known in the Flône pit, in particular the yet unknown presence of high angle thrusts and backthrusts crosscutting the $S_{0/1}$, and recumbent folds and intense shearing affecting the western- and easternmost part of the pit. We have defined 4 tectonic units in the Flône pit, each characterized by a different degree of deformation: UT-1 is composed by dominant $S_{0/1}$ planes, UT-2 is in addition crosscut by 1 family of high angle (back-) thrust faults, UT-3 shows complex (recumbent) fold geometries and is cut by 2 or more fracture/fault orientations, and UT-4 corresponds to decameter scale, steeply dipping deformation zones (e.g. inverted flower structures) where $S_{0/1}$ is no longer visible.

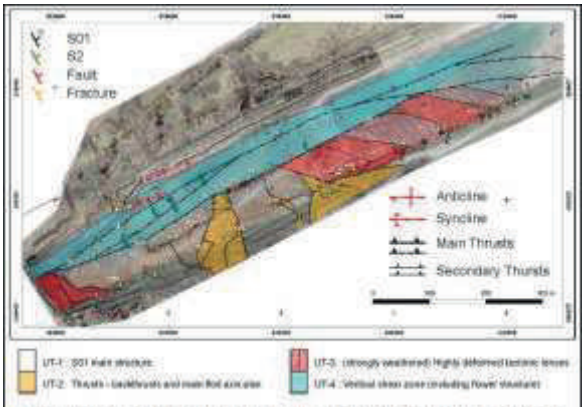


Figure 4 : Structural map and Tectonic Units 1 to 4

4.2 Instability hazard assessment

Rock kinematic stability analysis (deterministic approach) based on a near comprehensive georeferenced structural database – Figure 5- has shown that the main rock instability hazard in the Flône pit concerns flexural toppling on the North and

South fronts (46 and 47% respectively). The East and West fronts, which are dominated by UT-2 and UT-3, only show moderate wedge failure hazard (11%), mainly where $S_{0/1}$ intersects (back-) thrusts.

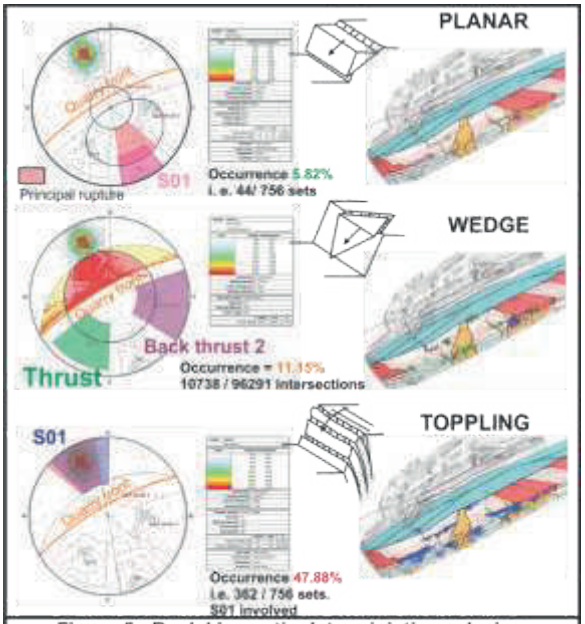


Figure 5 : Rock kinematic deterministic analysis- Results and GIS localisation of the involved planes

Planar sliding hazard is generally low (2 to 10%) on all fronts, but our interpretative cross-sections have highlighted that this hazard may significantly increase during future excavations – Figure 6. In particular on the northern front, where some uncertainties remaining on the geometry of an anticline at depth, when deepening the pit, generate significant inter-bench rupture hazard (see example cross-section).

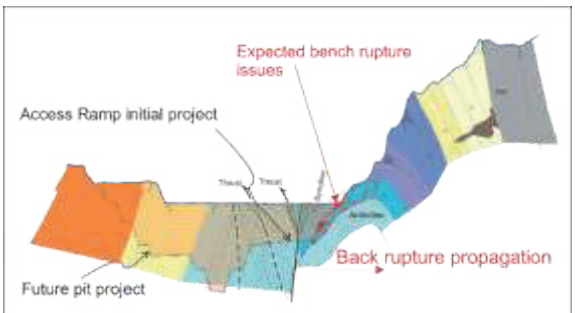


Figure 6 : Planar sliding along the anticline flanc

5. Discussion

Point cloud based structural data acquisition has enabled augmenting (x5) our field mapping database in the Flône quarry to assess geological model and support rock instability hazard (planar and wedge sliding, flexural toppling) with a high degree of confidence. However, this very powerful geometric approach should always complement – but not replace – the geological/geotechnical field expertise, as instability hazard not only relies on geometric parameters. Our combined geological and geotechnical surface analysis has enabled anticipating future hazard defining a targeted monitoring program depending on the locations of the instability hazards identified across the pit.

6. Conclusion

Digitally augmented structural databases based on georeferenced point cloud analyses now enable performing deterministic rock kinematic stability analysis at the scale of a pit with a high degree of confidence due to the enormous amount of robust structural data that can be gathered in an efficient way, but field geological mapping and rock mass characterization should prevail to make a consistent stability assessment.

7. References

Hoek, E. and Bray, J.W. (1981). Rock slope Engineering. The Institute of Mining and Metallurgy, London, England, 358 p.

CloudCompare (version 2.11) [GPL software]. (2019). Retrieved from http://www.cloudcompare.org/

Dips 5.0 Rocscience Inc. 1998, Dips Version 5.0 - Graphical and Statistical Analysis of Orientation Data. www.rocscience.com, Toronto, Ontario, Canada.

Evaluación del impacto social y análisis de conflictos socioambientales en un proyecto minero en el sur del Perú usando modelos matemáticos

Social impact assessment and environmental conflicts analisis in a mining project in southern Peru using mathematical models

Solange Guiuliana Ríos Angulo

Pontificia Universidad Católica del Perú, Av. Universitaria 1801, San Miguel, Lima 15088, Perú (solange.rios@pucp.pe)

1. Abstract

The social aspect has become a key factor for the viability of projects in Latin America, and Peru is no exception. In this study, I applied the integration of the grey grouping and entropy-weight method to evaluate the social impact (SIA) and to analyze the possible socio-environmental conflicts (ECA), respectively. The case study was a lithium mining project located in southern Peru, in which the overall result was a social impact ranging from normal to negative for the stakeholder groups.

Keywords: stakeholders; Grey Clustering; Shannon entropy

2. Introducción

Las actividades humanas pueden generar conflictos entre las personas que participan en ellas, debido a su naturaleza interactiva. Por esta razón, el gobierno, las empresas y los ciudadanos deben estar en la capacidad de hacer acuerdos asertivos que les permitan ganar conjuntamente (Y. Liu, 2018). Así, los intereses de las tres partes estarán alineados hacia un mismo objetivo (Bebbington, 2014). En el Perú, el tipo de conflicto que más se produce es el socioambiental, el cual representó un 67.7% en mayo de este año (Defensoría del Pueblo, 2020). De este porcentaje, el 64% está relacionado a la minería, lo que demuestra que hay una fuerte negativa a su desarrollo, a pesar de ser una de las actividades económicas más antiguas e importantes del país. Esto puede resultar paradójico, ya que, a pesar del eficiente desempeño social y ambiental de las empresas mineras formales, los conflictos siempre han estado presentes (Bebbington, 2014). La oposición predomina sobre todo en el sur del país, siendo Puno el cuarto departamento con mayor índice de conflictividad social relacionado a dicha industria (Observatorio de Conflictos Mineros en el Perú, 2018).

El caso de estudio de este trabajo es un proyecto ubicado en Puno, el cual tiene la particularidad de pretender comercializar litio y uranio, aun cuando, en el Perú, la legislación para la explotación de dichos elementos está todavía en proceso. Así, esta falta de reglamentación dificulta la obtención de los permisos otorgados por parte del Estado.

El objetivo de este artículo es evaluar los impactos sociales (SIA) y analizar los posibles conflictos socioambientales (ECA) que podrían surgir durante la implementación de un proyecto minero, mediante el uso de modelos matemáticos.

3. Metodología

Los métodos aplicados en este trabajo han sido desarrollados en un marco nacional e internacional en diferentes casos de estudios de diversas disciplinas. Estos métodos fueron Grey Clustering basado en CTWF (center-point triangular whitenization weight functions) y la entropía de Shannon, ya que la integración de ambos proporcionó una metodología eficiente llamada "Integration of the grey clustering and entropy-weight" (IGCEW), la cual permitió clasificar el impacto social para cada grupo de stakeholder y determinar los criterios que presenten mayor probabilidad de generar un conflicto socioambiental. A continuación, se explicará detalladamente este modelo matemático (E.O. Fagbote et al., 2014; S. Liu & Lin, 2010).

3.1. Step 1: Criterios and grey clases

En este primer paso, se definen los grupos de stakeholders “m”, los criterios "n" y un conjunto de

intervalos o grey clases "s" según las características del proyecto minero elegido.

3.2. Step 2: Funciones CTWF y el coeficiente de clusterización global

Los valores de las CTWF para cada grupo de stakeholders se calculan mediante la Ecuación (1).

$$f_j^k(x_{ij}) = \begin{cases} 0 \quad , & x \notin [\lambda_{k-1}, \lambda_{k+1}] \\ \dfrac{x-\lambda_{k-1}}{\lambda_k-\lambda_{k-1}}, & x \in [\lambda_{k-1}, \lambda_k > \\ \dfrac{\lambda_{k+1}-x}{\lambda_{k+1}-\lambda_k}, & x \in [\lambda_k, \lambda_{k+1}] \end{cases} \quad (1)$$

Los resultados se mostrarán en una matriz compuesta de criterios y grey clases. Por otra parte, el coeficiente de clusterización global $\boldsymbol{\sigma_i^k}$ para el grupo de stakeholder G_i (i=1, 2, ..., m) con respecto a la grey clase k (k=1, ..., s) se calcula utilizando la Ecuación (2).

$$\sigma_i^k = \sum_{j=1}^{n} f_j^k(x_{ij}).\eta_j \quad (2)$$

3.3. Step 3: Evaluación del Impacto Social (SIA)

La evaluación del impacto social (SIA) de cada grupo de stakeholders se calcula con un sistema de porcentajes (Chang & Qisen, 2009) , definido por los valores porcentuales α_1, α_2, α_3,..., y α_s, donde α_s=100, α_1=100/s, $\alpha_2=\alpha_1+\alpha_1$, $\alpha_3=\alpha_1+\alpha_2$,...,y $\alpha_{s-1}=\alpha_1+\alpha_{s-2}$. Por último, los resultados del SIA vienen dados por la Ecuación (3).

$$z_j^i = \sum_{k=1}^{s} f_j^k(x_{ij}).\alpha_k \quad (3)$$

Dónde:

- $f_j^k(x_{ij})$ es el CTWF de la grey clase k con respecto al criterio C_j
- α_k es el valor porcentual de cada grey clase.

Finalmente, los resultados se representan por la matriz Z, como muestra la Ecuación (4)

$$Z = \{z_{ij}, i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n\} \quad (4)$$

3.4. Step 4: Método del peso entrópico

En este paso, la matriz Z se normaliza para cada criterio C_j (j=1, 2, ..., n). Los valores normalizados P_{ij} se calculan mediante la Ecuación (5). Posteriormente, los valores de H_j, div_j y w_j se hallaron con las Ecuaciones (6), (7) y (8).

$$P_{ij} = \frac{z_{ij}}{\sum_{i=1}^{m} z_{ij}} \quad (5)$$

$$H_j = -k \sum_{i=1}^{m} P_{ij} ln(P_{ij}) \quad (6)$$

$$div_j = 1 - H_j \quad (7)$$

$$W_j = \frac{div_j}{\sum_{j=1}^{n} div_j} \quad (8)$$

3.5. Step 5: Análisis de Conflictos Socioambientales (ECA)

Finalmente, el ECA se determinó para los grupos de stakeholders G_i (i=1, 2, ..., m) con respecto a cada criterio C_j (j=1, 2, ..., n) mediante la Ecuación (9).

$$Q_{ij} = w_j z_{ij} \quad (9)$$

Donde:

-w_j es el peso entrópico de cada criterio C_j

-z_{ij} es el resultado de la evaluación del impacto social (SIA) para cada grupo de stakeholders G_i (i=1, 2, ..., m)

4. Caso de estudio

El caso de estudio del presente artículo es un proyecto minero situado en la provincia de Carabaya, departamento de Puno, Perú. Los stakeholders y las variables de este proyecto los determiné en un estudio previo (Ríos & Delgado, 2019), los cuales son mencionados a continuación:

4.1. Grupo de Stakeholders

Los grupos de stakeholders del área de influencia directa son cinco, los cuales fueron corroborados in situ y encuestados acerca del proyecto. El tamaño de la muestra en cada grupo se estableció por el principio de saturación de discurso, el cual estipula que se debe poner fin a la recopilación de información cuando los encuestados proporcionen puntos de vista similares (Corbetta, 2007).

4.1.1. Autoridades comunales (G_1)

Este grupo estuvo compuesto por “ronderos” que dirigen y administran a la comunidad, de los cuales fueron entrevistadas 50 personas.

4.1.2. Ganaderos de alpaca (G_2)

La ganadería de alpaca es la principal actividad económica en las zonas rurales cercanas al lugar del proyecto. En la Figura 1, se muestra un conjunto de fotografías con algunos ganaderos de alpacas. En total fueron 58 encuestados.

Figure 1 Solange Ríos con algunos ganaderos de aplacas

4.1.3. Gobierno local (G_3)

Este grupo estuvo compuesto por 32 entrevistados que ocupaban cargos de tenientes alcaldes, representantes de direcciones, asesores, entre otros.

4.1.4. Comerciantes (G_4)

Conformado por los dueños y trabajadores de negocios, tales como restaurantes, bodegas de abarrotes, útiles, entre otros. En este grupo, se entrevistaron a 34 personas.

4.2. Variables y Criterios

Las variables también se determinaron en un artículo anterior (Ríos & Delgado, 2019), en el cual se obtuvieron siete, las cuales fueron la base para definir los criterios como una medida de cuantificación (ver Tabla 1).

Table 1. Criterios identificados en el caso de estudio

Variables	Criterios	Código	Descripción
Contaminación	Nivel de radiactividad del litio	C_1	El grado de radiactividad del litio en las zonas cercanas al proyecto
Pobreza	Ratio de pobreza	C_2	La tasa de pobreza anual en la zona de influencia
Empleo	Tasa de empleo	C_3	La tasa de empleo por año en la zona de influencia
Salud	Número de habitantes por doctor	C_4	El número de habitantes por médico por año en la zona de influencia
Economía	PBI per cápita	C_5	El PIB per cápita en soles por mes (promedio anual) en la zona de influencia
Acceso al agua	Tasa de acceso al agua potable	C_6	La tasa de acceso a agua potable por año en la zona de influencia
Seguridad	Número de delitos reportados	C_7	El número de delitos denunciados por año en la zona de influencia

5. Resultados y discusiones

5.1. Sobre el caso del estudio

En primer lugar, el método IGCEW ayudó a identificar las percepciones generales de los grupos de stakeholders con respecto al proyecto minero. En la Figura 2, se muestra la puntuación de la evaluación del impacto social (SIA) para los grupos de stakeholders G_1, G_2, G_3 y G_4.

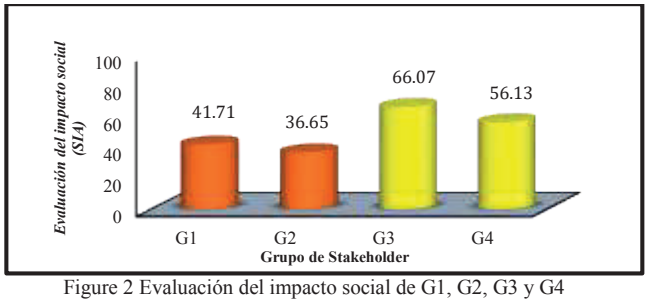


Figure 2 Evaluación del impacto social de G1, G2, G3 y G4

Estos resultados arrojan que, para los grupos G_1 y G_2, el impacto social del proyecto sería negativo; mientras que, para los grupos G_3 y G_4, el impacto sería normal, siendo el grupo G_3 el que tendría un mayor grado de aceptabilidad con respecto al proyecto minero. Asimismo, los grupos G_1 y G_2, presentaron opiniones similares y algo adversas, lo que podría generar una alianza entre ambos en contra de la ejecución del proyecto. Por último, para el grupo G_4, el proyecto no tendrá un impacto negativo ni positivo.

Por otro lado, en la determinación del ECA, mediante el método del peso entrópico, fue posible identificar los criterios más divergentes, los cuales indican las causas más potenciales de conflictos entre grupos de stakeholders. La Figura 3 muestra que el criterio C_3 es el que presente una mayor divergencia debido a que se forman dos polos opuestos: grupos G_1 y G_2 versus los grupos G_3 y G_4. Esto puede ocasionar un desacuerdo entre ambos bandos, ya que los grupos G_1 y G_2 no percibirían los mismos beneficios de generación de empleo como los otros dos grupos de stakeholders.

Desde otra perspectiva, todos los grupos convergen más en el criterio C_1, por lo que, este sería un buen punto en común para acercarse a los cuatro grupos de stakeholders de manera asertiva, y comenzar a resolver sus dudas respecto a la contaminación.

Finalmente, si se analiza globalmente, los grupos más divergentes son G_2 y G_3, especialmente en los criterios C_2, C_3, C_4 y C_5. Por lo tanto, estos cuatro criterios deben ser considerados en el Plan de Gestión Social de la empresa, al momento de aplicar medidas de prevención de posibles conflictos socioambientales.

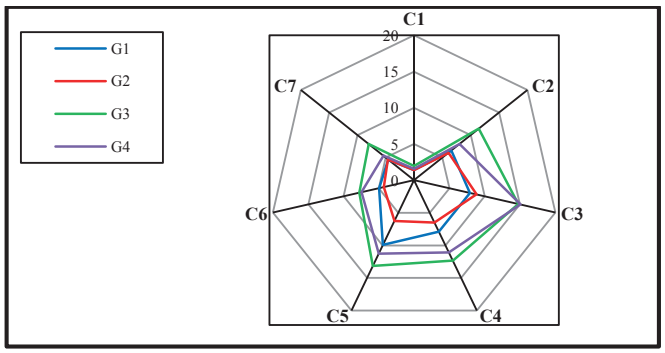


Figure 3 ECA para cada criterio de los grupos G1, G2, G3 and G4

5.2. Sobre la metodología

La metodología IGCEW brindó los resultados esperados ya que se utilizaron grey clases de impacto "muy negativo", "negativo", "normal", "positivo" y "muy positivo". Por otro lado, como cualquier otra metodología, IGCEW presenta

ventajas y limitaciones, las cuales son mencionados en la Tabla 2.

Table 2 Ventajas y desventajas del método IGCEW

Ventajas	Limitaciones
Los sistemas grises y los enfoques de la entropía de Shannon se complementaron entre sí de manera efectiva.	No se puede eliminar al 100% el aspecto subjetivo, ya que está presente en las encuestas realizadas en campo durante la recopilación de información
Los cálculos se obtienen fácilmente si se utiliza un simple sistema informático programado.	Como se trata de un método nuevo, es necesario validarlo en otros contextos para mejorar su eficiencia.

6. Conclusiones

En primer lugar, se concluye que el SIA es un Instrumento de Gestión Social que pudo ser cuantificado correctamente mediante el método IGCEW, el que a su vez permitió también determinar numéricamente el ECA. Asimismo, en otras palabras, se finiquita que la información cualitativa recolectada por medio de encuestas ha sido cuantificada con éxito por el método IGCEW, permitiendo así hallar objetivamente los valores del impacto social que el proyecto podría ocasionar (SIA), y determinar los criterios más divergentes con mayor probabilidad de generar conflictos socioambientales entre los grupos de stakeholders (ECA).

Adicionalmente, se concluye que los resultados obtenidos ayudarán a los analistas sociales de la empresa minera y del gobierno peruano a buscar medidas preventivas y adecuadas para evitar posibles conflictos socioambientales relacionados al proyecto minero del caso de estudio.

Por otro lado, se concluye que, en futuras investigaciones, será viable aplicar el método IGCEW en otros tipos de proyectos (de construcción civil, industriales, etc), con la finalidad de determinar el SIA y el ECA de forma cuantitativa. Ello permitirá elaborar Planes de Gestión Social adecuados y eficientes para cualquier proyecto.

Finalmente, IGCEW también presenta alto potencial de ser utilizado por profesionales del Ministerio de Energía y Minas del Perú, a fin de cuantificar el impacto social (SIA) y predecir conflictos socioambientales (ECA) en los proyectos mineros del país basado en un sustento numérico.

Agradecimientos

Para algunos grupos de stakeholders, fue necesaria la traducción de las preguntas al idioma quechua, por lo que se consideró la colaboración de un traductor; y quiero reconocer su valiosa participación durante algunas entrevistas. Asimismo, quiero agradecer a todas las personas de la comunidad que participaron en las encuestas, sin su cooperación habría sido imposible realizar mi trabajo de investigación.

Referencias

Bebbington, A. J. (2014). Socio-environmental conflict: An opportunity for mining companies. *Journal of Cleaner Production*, *84*(1), 34. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.08.108

Chang, Z., & Qisen, Z. (2009). The assessment of the social, economic, and environmental impacts of expressway construction projects based on the DFGF Algorithm. *International Conference on Management and Service Science*.

Corbetta, P. (2007). *Metodología y Técnicas de Investigación Social* (J. M. Cejudo (ed.); 1st ed.). McGRAW-HILL Interamericana de España. https://diversidadlocal.files.wordpress.com/2012/09/metodologc3ada-y-tc3a9cnicas-de-investigacic3b3n-social-piergiorgio-corbetta.pdf

Defensoría del Pueblo. (2020). *Reporte de Conflcitos Sociales N° 195 Mayo 2020* (Vol. 15170). https://www.defensoria.gob.pe/wp-content/uploads/2020/06/Reporte-Mensual-de-Conflictos-Sociales-N°-195-mayo-2020.pdf

E.O. Fagbote, E.O. Olanipekun, & Uyi, H. S. (2014). Water quality index of the ground water of bitumen deposit impacted farm settlements using entropy weighted method. *International Journal of Environmental Science and Technology*, *11*(1), 127–138. https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs13762-012-0149-0

Liu, S., & Lin, Y. (2010). *Grey Systems: Theory and Applications* (Springer (ed.)). https://doi.org/10.1007/978-3-642-16158-2

Liu, Y. (2018). Research on the Influence Factors of the Policy Tools in NIMBY Conflict Management—A Study Based on 25 Cases in China. *Open Journal of Social Sciences*, *06*(09), 164–174. https://doi.org/10.4236/jss.2018.69011

Observatorio de Conflictos Mineros en el Perú. (2018). *Reporte N° 22 Primer semestre 2018*.

Ríos, S., & Delgado, A. (2019). Stakeholders and Criteria on a Mining Project using AHP and Entropy-Weight Methods. *International Journal of Recent Technology and Engineering*, *8*(4), 1933–1942. https://doi.org/10.35940/ijrte.c5694.118419

Lithocaps y su conexión a estructuras: de los datos abiertos a la prospección puntual de un sector del suroeste de Perú

Aldo Bendezú Juárez[1] y Cesar Cabellos Roncal[2]

[1] Maskhay Consultores E.I.R.L, Lima, Perú (aldobendezujuarez@gmail.com)
[2]West Mountain Company S.R.L, Lima, Perú (cecabellos@gmail.com)

1. Resumen

La exploración por *lithocaps* es vectorizada identificando sus rasgos mineralógicos, geofísicos, geoquímicos y elementos críticos de estructuras de escala regional genéticamente asociadas. *Lithocaps* de las franjas metalogenéticas del Mioceno, en la región suroeste de Ayacucho, son minados por Au+/-Ag, presentan ocurrencias minerales o anomalías importantes de metales. En esta región se documentó una familia principal de estructuras orientados ESE-ONO. Un grupo de estructuras de esta familia esbozan un corredor de ~180 km de largo cuyo ancho es muy estrecho (<10 km). Dentro del corredor, las estructuras están distribuidas en *échelon* cuyos segmentos miden decenas de kilómetros. Los segmentos "enlazan" *lithocaps* extensos (<30 km2) que hospedan cuerpos de alteración argílica avanzada y vetas polimetálicas marginales. Los cuerpos de argílica avanzada son conformados por sílice, alunita, natroalunita, dickita, pirofilita y minerales del grupo APS. Estos cuerpos presentan un control estructural, orientaciones sistemáticas y son análogos entre los *lithocaps*. La relación angular (20°- 40°) entre las orientaciones de la familia principal de estructuras y el paleoesfuerzo principal máximo indica que las estructuras estuvieron favorablemente orientadas para un movimiento sinestral. Las orientaciones de los cuerpos de alteración argílica avanzada son consistentes con ese movimiento. Estas características, y la relaciones espaciales y angulares sugieren que las estructuras ESE-ONO controlaron el desarrollo de los *lithocaps* en zonas locales de transpresion bajo un régimen de *strike-slip*.

2. Introducción

Los *lithocaps* son áreas extensas, comúnmente mayor a 20 km^2, de alteración argilica con núcleos de alteración argilica avanzada (Sillitoe, 1995) relacionados al desarrollo de sistemas de pórfidos de Cu (Hedenquist et al., 1998). Estos son de interés por su potencial para hospedar diferentes tipos de mineralización de Au, Ag, Cu, Mo y metales base. Los tipos de mineralización asociados incluyen depósitos de: alta sulfuración de Au+/-Ag+/-Cu, ápices de stocks de pórfidos de Cu+/-Au +/-Mo y depósitos polimetálicos de sulfuración intermedia (Sillitoe, 2010).

Para vectorizar la exploración, es fundamental identificar las estructuras regionales que están relacionadas genéticamente al origen de *lithocaps*. Esa relación es pobremente entendida y escasamente documentada en la literatura. Sin embargo, la filiación genética puede ser inferida por la relación espacial entre estructuras y el *footprint* de *lithocaps*. Complementariamente, las orientaciones de estructuras subsidiarias dentro de los *lithocaps,* deben de ser consistentes con los movimientos de las estructuras regionales. Una identificación efectiva de esas estructuras se logra con el análisis refinado de: imágenes satelitales, procesamiento de imágenes DEM y estudios geofísicos.

A escala regional, los *footprints* mineralógicos de los *lithocaps* pueden ser detectados mediante sensores remotos Landsat y Aster (Hedenquist, et al. 2000; Robert et al, 2007). A escala del *lithocap* la mineralogía y su zonamiento se puede confirmar y refinar con análisis por espectrometría (e.g. PIMA, TerraSpec y Raman).

Anomalías geoquímicas concomitantes a *footprints* de alteración argílica avanzada pueden ser reveladas en el análisis de sedimentos de quebradas, donde anomalías de P son característicos (Sillitoe, 1995). Por otro lado, aunque las anomalías de Au y Ag son los mejores indicadores de potenciales cuerpos mineralizados dentro de *lithocaps,* se deben analizar otros importantes indicadores geoquímicos de la "*suite"* epitermal (John et al, 2018).

Otros factores geológicos asociados a *lithocaps* son las marginales ocurrencias de mineralización con estados de sulfuración intermedia y sus

pathfinders derivados (Sillitoe, 2010; Chang et al, 2011; Rainbow, 2009). *,(esta parte no se entiende bien, cual es el mensaje*.

En este estudio integramos los elementos geológicos descritos, más nuestras observaciones de campo, con el fin de revelar la conexión genética estructuras-*lithocaps*. Explotamos la información de plataformas de datos abiertos (datos GIS) para generar un marco conceptual del modelo. La principal fuente de datos usada fue del portal GEOCATMIN. Esto implica un programa de exploración rápido y de bajo costo.

El sector explorado en este estudio es un segmento de los cinturones metalogenéticos del Miocénico del suroeste de Ayacucho. En esa región, lithocaps han sido reconocidos, explorados y explotados. Las características e información de esta región brindan una oportunidad excelente para evaluar la relación estructuras-*lithocaps*. Proponemos que la actividad de las estructuras de escala regional es un control de primer orden en la localización de *lithocaps* y la focalización de cuerpos silíceos dentro de estos. Esa actividad es correlacionada con estudios estructurales en los alrededores (Ayala, 2015) y estudios a escala de lithocaps (Garcia, 2017). Asi, la vectorización de la exploración a lo largo del rumbo de estructuras favorables resultaría en un modelo de exploración altamente predictivo.

3. Geologia Regional

El área de estudio se extiende sobre la región suroeste de Ayacucho cubriendo un área de ~180x60 km. Un resumen de la geología es proporcionada abajo, para más detalles deben consultarse las publicaciones: Olchauski (1980), Montoya et al. (1994), Brandmeier (2014) y Ayala (2015).

La litología en esta región incluye unidades desde el Jurasico al Mio-Plioceno. La unidad más antigua es el Grupo Yura del Jurásico-Cretácico, caracterizado por secuencias siliciclasticas (Fms. Puente, Cachios, Labra y Hualhuani) intercalada con una unidad intermedia carbonatada (Fm. Gramadal). En discordancia sobre el Grupo Yura sobreyacen las calizas del Cretácico Superior de la Fm. Arcurquina. Intruyendo estas unidades son reconocidas las Superunidades Incahuasi y Tiabaya, del Batolito de La Costa. Sobre estas reposan unidades volcano-sedimentarias del Eoceno al Mioceno temprano, del más antiguo al más joven: Fm. Para, Fm. San Pedro, Gp. Tacaza, y la Fm. Castrovirreyna. Sobreyaciendo estas unidades se depositaron varias secuencias predominantemente piroclásticas conformadas por las Fm. Puquio, Fm. Huaylillas y Gp. Nazca. En discordancia sobre estas unidades se encuentran lavas más jóvenes, pertenecientes al Mio-Plioceno, del Gp. Barroso.

La geología estructural de región no está estudiada en detalle. Es ampliamente aceptado que tres procesos principales de deformación ocurrieron a escala regional. Las dos primeras (la Fases Peruana e Incaica) generaron plieges y sobreescurrimientos notables en las rocas pre Oligocenicas, y la Fase Quechua 1 que generó plieges suaves en las unidades pre Miocénicas Medio. El último evento documentado, de edad post Mioceno Temprano, son fallas de rumbo regionales bajo un régimen de *strike-slip.*

Desde el punto de vista metalogenético el área de estudio abarca parte de los cinturones de Cretácicos y Mioceno (Fig. 1A).

4. Metodología de trabajo

El método de trabajo consistió en compilar toda la información disponible del portal GEOCATMIN, además de la obtención del DEM a partir de imágenes ALOS PALSAR obtenidas del portal de ASF (Alaska Satellite Facility) con las cuales se realizó el análisis de sombras. Un resumen grafico es mostrado en la figura 1B. Tres categorías de análisis fueron consideradas: (I) Reconocimiento de estructuras de escala regional y distrital; (II) Elementos asociados a la actividad hidrotermal; y (III) Análisis de estructuras dentro de los *lithocaps*. Dentro de la primera categoría fueron consideradas cinco capas de información para definir las estructuras: (1) Imágenes aéreas de Bing Maps; (2) Imágenes de sombras en las 4 direcciones habituales E-O, N-S, NE-SO y NO-SE; (3) Imagen reducida al polo de magnetometría; (4) Imagen de la señal analítica de magnetometría y (5) Estructuras regionales identificadas. Con estos datos se procesó un mapa de densidad de fracturas para determinar las áreas de mayor permeabilidad.

Para la segunda categoría se consideraron los elementos asociados a la actividad hidrotermal: Imágenes Landsat (áreas con alteración), minas, proyectos de exploración, ocurrencias minerales y aguas termales.

Para la tercera categoría se analizaron los *lithocaps*, minas y proyectos conocidas para definir anomalías geoquímicas relacionadas (la “suite” epitermal) y sus características estructurales. Esta

última es clave, estas deberían ser consistentes con el movimiento de las estructuras que las alojan.

La composición final de las tres categorías fue usada para reconocer las estructuras mayores que alojan la mayoría de potenciales *lithocaps*. Esta relación espacial implicaría un control de la actividad de las estructuras coetánea con procesos hidrotermales. Bajo esa hipótesis se evaluó el ángulo de reactivación (Sibson, 1985) de las estructuras con respecto al paleoesfuerzo principal máximo (σ1). Así, es establecido el marco tectono-hidrotermal para definir que estructuras focalizaron los *lithocaps.*

5. Resultados: Estructuras y Lithocaps

Las anomalías geofísicas de la señal analítica de rumbo ESE-ONO coinciden con *sets* de fracturas que cortan las rocas del Gp. Nazca, además, trazas de estas desplazan horizontalmente unidades geológicas del Mio-Plioceno. Las relaciones de corte indican que la actividad de estas estructuras fue post Mioceno Temprano. Esas estructuras son paralelas a las fallas sinestrales cartografiadas en las cercanías de la región. Este movimiento es consistente con los esfuerzos regionales, las estructuras estuvieron favorablemente orientados a la dirección del esfuerzo principal mayor (~20°-40°) para una reactivación durante todo el Mioceno Medio y Tardio, época del desarrollo de los belts metalogenéticos en ese sector.

Las estructuras ESE-ONO mas resaltables forman un corredor con la misma orientación de ~180 km de largo y ancho menor a 10 km. Este corredor focaliza los *lithocaps* más grandes, minas productivas, muchas áreas mineralizadas y algunas fuentes termales (Fig. 1C). Dentro del corredor, las estructuras delinean una distribución en *échelon* cuyos segmentos miden decenas de kilómetros y "enlazan" *lithocaps* (Fig. 1C). Las orientaciones de los cuerpos silíceos tabulares dentro los lithocaps son consistentes con el movimiento sinistral de las estructuras ESE-ONO (Fig 1D).

Actividad hidrotermal reconocida en este corredor, previo a este estudio, son las minas Breapampa y Huamanloma (y su *lithocap* asociado), el *lithocap* de Pampas Galeras, muchas minas pequeñas y fuentes termales. Además, dentro de este corredor dos nuevos lithocaps fueron reconocidos y analizados en este estudio: los *lithocaps* de Minaschayoc y de Candente. Un resumen de las características de los *lithocaps* se ofrece a continuación de noroeste a sureste:

5.1. Lithocap Minaschayoc *[rango 3]*

Está ubicado en el extremo noroeste del corredor. La alteración ocupa un área de ~10 km^2. Varios cuerpos de sílice residual son flanqueados por alteración cuarzo-alunita y un halo exterior más extenso de alteración argílica. Análisis por TerraSpec indican que los principales minerales de la alteración argilica avanzada son: sílice, alunita, natroalunita, dickita, pirofilita y caolinita (Alva, 2020). Se caracteriza por una área resaltante de anomalía de molibdeno (< 183 ppm) de forma semicircular de una diámetro de 1.3 km que fue revelado con una campaña de exploración geoquímica. Las estructuras más importantes son de rumbo, dextrales y sinestrales, y estan orientados en dos familias principales: NE-SO y NNO-SSE.

5.2. Lithocap Pampas Galeras

Este *lithocap* está ubicado al sureste de la reserva Pampas Galeras. Ocupa un área ~30 Km^2. Es claramente reconocido en imagenes de Landsat. Presenta centros siliceos bordeados por arcillas blancas pulvurelentas. En sus márgenes existen unas minas pequeñas que producen Au. Las principales estructuras y lineamientos tienen rumbos N-S y NE-SO.

5.3. Lithocap Candente

Este *lithocap* se ubica 25 km al sursureste del *lithocap* Pampas Galeras. Tiene un área aproximada de 20 km^2. Es caracterizado por abundantes cuerpos de sílice residual y sílice-alunita con un fuerte control estructural que están configurados como *networks*. Estos son tabulares cuyas longitudes alcanzan varias centenas de largo hasta 1.4 km y sus anchos varían de unas decenas de centímetros hasta 15 m. Análisis de espectrometría Raman indican la presencia de alunita y minerales APS. Este *lithocap* exhibe importantes anomalías de Mo de hasta 299 ppm. Las estructuras silíceas están preferentemente orientadas NE-SO y los lineamientos NNO-SSE.

5.3. Lithocap Huamanloma [rango 3]

El *lithocap* Huamanloma hospeda mineralización epitermal tipo HS y produjo Au-Ag (Garcia, 2017). Tiene un forma alargada de orientación N-S ocupando un área de ~32 km^2. Los principales minerales de alteración son sílice residual, alunita y arcillas. Los cuerpos de alteración y mineralización están orientados principalmente entre NS y NNO-SSE. Estructuras menores tienen orientaciones NE-SO y ESE-ONO.

5.4. Otras ocurrencias hidrotermales

La mina Breapampa, cae dentro de este corredor a 30 kilómetros de Huamanloma. Este yacimiento

es epitermal del tipo *HS*, los minerales de alteración principal son sílice, alunita y caolinita; Au y Ag estan relacionados a oropimente y pirita; enargita ocurre marginalmente (Alatrista, 2018). Cerca al extremo sureste del corredor son ubicadas fuentes termales de baja a moderada temperatura y distribuidas a lo largo del rumbo ESE-ONO. En el sector sureste más extremo del corredor dos minas artesanales (mina Luicho) producen Au de estructuras orientadas NE-SO cuyas longitudes alcanzan unas centenas de metros.

6. Conclusiones

Lithocaps de los cinturones metalogenéticos del Miocénico en Ayacucho presentan un fuerte control estructural consistente con un régimen de *strike-slip*. Estos fueron controlados por sistemas de estructuras de escala regional orientados ESE-ONO las cuales constituyen un control de orden principal. Dos nuevos *lithocaps* fueron reconocidos en este estudio. Estos carecen de valores significantes de Au y Ag pero presentan altos valores de elementos guía (e.g. Mo, etc). La actividad y tipo de movimiento de las estructuras relacionadas a los *lithocaps* deben de ser consistentes con el marco tectono-hidrotermal en un lapso de tiempo definido. Comprobar el rol y relación de estructuras de escala regional con la formación de *lithocaps* permite vectorizar en un programa de exploración. Así, es fundamental la identificación precisa de estructuras favorables que focalizaron *lithocaps* para una exploración eficaz dentro de un modelo altamente predictivo. (el sentido de esta frase tampoco es claro, explicar mejor).

Referencias

Alatrista, M.E., 2018. Estudio geologico y control estructural empleando espectrómetro en la Unidad Minera Breapampa, Parccaorcco–Parinacochas Ayacucho.

Alva, L., 2020. Geoquímica, características mineralógicas y modelo en 3D del proyecto Minaschayoc: Exploración sistemática en *lithocaps* (Tesis de ingeniero-en proceso).

Ayala, L., 2015. Sedimentología, estratigrafía y tectónica de la cuenca puquio, departamento de Ayacucho, Peru (Tesis de Ingeniero).

Brandmeier, M., 2014. A remote sensing and geospatial statistical approach to understanding distribution and evolution of ignimbrites in the Central Andes with a focus on Southern Peru (Doctoral dissertation).

Chang, Z., Hedenquist, J.W., White, N.C., Cooke, D.R., Roach, M., Deyell, C.L., Garcia Jr, J., Gemmell, J.B., McKnight, S. and Cuison, A.L., 2011. Exploration tools for linked porphyry and epithermal deposits: Example from the Mankayan intrusion-centered Cu-Au district, Luzon, Philippines. Economic Geology, 106(8), pp.1365-1398.

Garcia, V., 2017. Prospección y exploración en el yacimiento epitermal de alta sulfuración de Au Huamanloma, Lucanas -Ayacucho, Perú (Tesis de Ingeniero).

Hedenquist, J.W., Arribas, A.Jr, and Reynolds, T.J., 1998, Evolution of an intrusion-centered hydrothermal system: Far Southeast-Lepanto porphyry and epithermal Cu-Au deposits, Philippines: Economic Geology, 93, 373-404.

Hedenquist, J.W., Arribas, A., and Gonzalez-Urien, E., 2000. Exploration for epithermal gold deposits. Reviews in Economic Geology, 13(2), pp.45-77.

John, D.A., Vikre, P.G., du Bray, E.A., Blakely, R.J., Fey, D.L., Rockwell, B.W., Mauk, J.L., Anderson, E.D. and Graybeal, F.T., 2018. Descriptive Models for Epithermal Gold-Silver Deposits; USGS Scientific Investigation Report 2010-5070-Q.

Montoya, M.A., García, W. and Caldas, J., 1994. Geología de los cuadrángulos de Lomitas, Palpa, Nasca y Puquio, USGS, Boletín 53A.

Olchauski, E., 1980. Geología de los cuadrángulos de Jaquí, Coracora, Chala y Cháparra, INGEMMET, Boletín 34A.

Rainbow, A., 2009. Genesis and evolution of the Pierina high-sulphidation epithermal Au-Ag Deposit, Ancash, Perú (Doctoral dissertation).

Robert, F., Brommecker, R., Bourne, B.T., Dobak, P.J., McEwan, C.J., Rowe, R.R. and Zhou, X., 2007. Models and exploration methods for major gold deposit types: Proceedings of exploration 07: Fifth decennial international conference on mineral exploration.

Sibson, R.H., 1985. A note on fault reactivation. Journal of Structural Geology, 7(6), pp.751-754.

Sillitoe, R.H., 1995. Exploration of porphyry copper lithocaps. In Pacrim Congress 1995 'Exploring the Rim' , Aust. Inst. MiningMetall., p. 527-532.

Sillitoe, R.H., 2010. Porphyry copper systems. Economic geology, 105(1), pp.3-41.

Ilustraciones

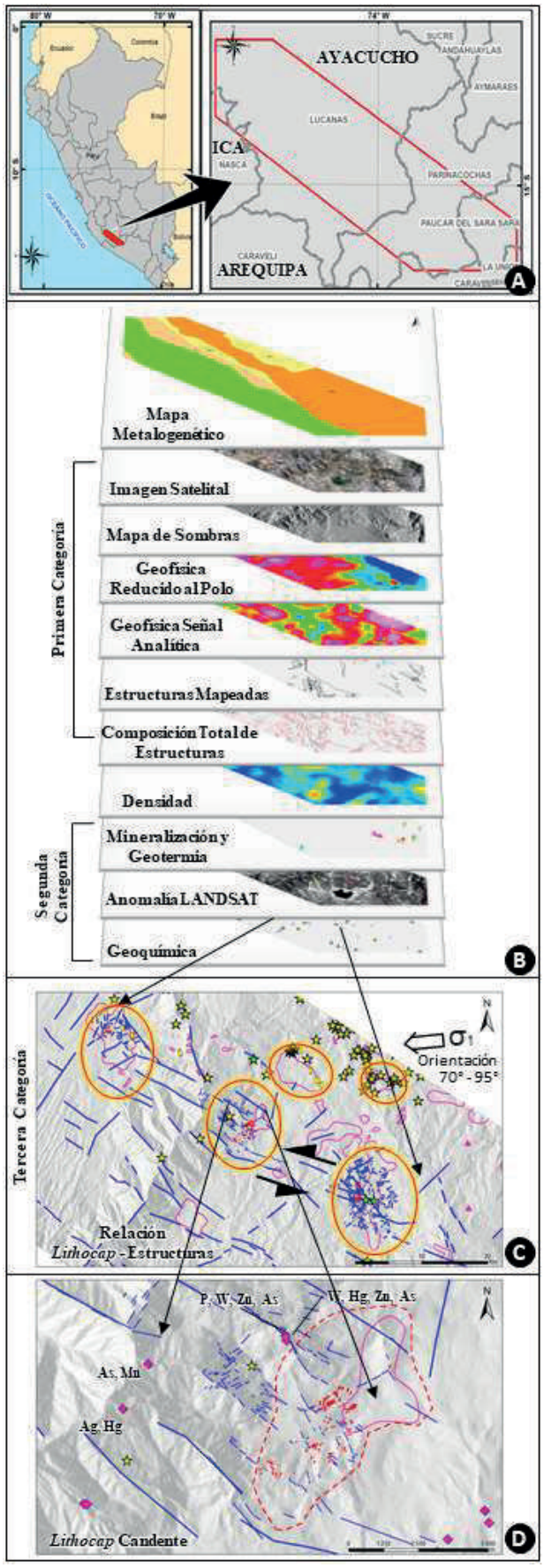


Figura 1. Resumen gráfico del análisis sistemático para ubicar *lithocaps* en el suroeste de Ayacucho.

Evolution and along-strike variations in the Arequipa-Tarapacá Basin structure at 21°S: Implications for Geological Exploration Models in Southern Perú and Northern Chile

Guillermo Fuentes[1,2], Sebastián Perroud[2,3], Salvador Cortez [3], Alejandra Acuña[1], Brian Townley[3], Walter Garrido[1,2] and Fernando Martínez[4]

[1] Escuela de Geología, Facultad de Ingeniería, Universidad Santo Tomás, Ejército 146, Santiago, Chile (josefuenteses@santotomas.cl)
[2] Incaic Exploration SpA, Paseo Ahumada 236, Santiago, Chile (sebastian@incaicexplo.com)
[3] Departamento de Geología, Universidad de Chile, Plaza Ercilla 803, Santiago, Chile
[4] Departamento de Ciencias Geológicas, Universidad Católica del Norte, Angamos 0610, Antofagasta, Chile

1. Abstract

The southern Peru and northern Chile Paleocene – Eocene porphyry copper metallogenic belt is mostly concealed by post-mineral cover. Mineral exploration in these areas are highly complex and expensive, requiring new strategies and approaches to minimize generative exploration failure. We used geological and geophysical data to determine geology beneath post-mineral cover in Northern Chile (~21°S), paying special attention in the relationship between the Arequipa-Tarapacá Basin structure and known mineral occurrences. 2D seismic reflection sections interpretation shows partially inverted graben and half-graben structural arrays, dominated by high angle inverted faults and related inversion anticlines. Extensional and contractional growth strata allow us to establish an extensional phase (Jurassic to Lower Cretaceous), an inversion phase (since Upper Cretaceous) and a contractional phase (since Upper Oligocene). Along strike variations in the Tarapacá Basin structure is closely associated by pre-orogenic structures. Spatial and temporal correlation between mineral deposits and long-lived structures presented in this work, permit us to propose a structural exploration model/strategy for post-mineral cover zones along Southern Peru and Northern Chile.

2. Introduction

One of the most fertile metallogenic belts in Southern Peru and Northern Chile is the Paleocene - Eocene porphyry copper belt, that contains world class porphyry copper deposits such as Cerro Verde, Cuajone, Cerro Colorado, Spence and Lomas Bayas (Fig. 1). However, most of the extension is concealed by sedimentary and pyroclastic deposits produced by erosion of the Western Andean Mountain Front, covering ~60% of the total metallogenic belt area (Fig. 1). This scenario increases the difficulty to find new deposits in areas with post-mineral cover and potentially associated to this metallogenic belt. As the market projections for copper (associated to high demand in upcoming efforts towards electro mobility, as well as increasing demand for technology and construction) will surely increase, discovery and determination of new resources is imperative (Kerr, 2014), therefore exploration of covered terrains has become a priority.

First approaches for optimized exploration in concealed zones were related to the understanding of post-mineral cover thickness (García *et al.*, 2017; Labbé *et al.*, 2019), establishing low thickness areas as potential target zones. Also, Fuentes *et al.* (2018) showed main structural arrays and styles that could be considered as conduits for ore-forming fluids. Notwithstanding these advances, it is highly necessary to better constraint these prospective zones.

In order to contribute to this exploration problem, we present a structural exploration model based on structures that exert a high control on secondary permeability and could act as pathways for magmatism and hydrothermal fluids, focusing on the evolution of the pre-orogenic structures (Arequipa-Tarapacá Basin) that could have been reactivated during the evolution of the metallogenic belts.

3. Methods

In order to understand the evolution and along-strike variations of the Tarapacá Basin beneath the Upper Oligocene to recent deposits, we used W-E

oriented 2D seismic reflection sections acquired by ENAP (Empresa Nacional del Petróleo) close to 21°S. Seismic interpretation was calibrated by well and drill-hole data and rock outcrops, and validated by restoring the structural sections with the StructureSolver software. Lateral structural variations were investigated using 3D visualization and analysis of geological and geophysical data with Andino 3D and Leapfrog softwares.

4. Results

Based on the seismic interpretation, integrated with well and rock outcrop data, four seismic horizons were correlated with geological units previously established (Fig. 2).

4.1. Geology below post-mineral cover

4.1.1. ***Basement***

Chaotic reflectors characterize the basement, where high amplitude reflectors mark the contact between the basement and the Syn-rift unit. Integrated to rock outcrops and well data, the basement is correlated to the Upper Carboniferous granitoids (Fig. 2).

4.1.2. ***Syn-rift unit***

Semi-continuous to continuous reflectors represent the Syn-rift unit, with variable frequency showing fan patterns close to lateral breaks in the seismic stratigraphy and onlap contact relations against basement. This unit is correlated with the Jurassic to Lower Cretaceous marine and continental sedimentary sequences (Fig. 2).

4.1.2. ***Syn-inversion unit***

Parallel and continuous reflector packages characterize the Syn-inversion unit, with moderate to high amplitude and high frequency reflectors overlying the Syn-rift unit in a low angular unconformity, showing contractional growth strata through anticline folds limbs. This syn-inversion unit is correlated with Upper Cretaceous volcano-sedimentary sequences (Fig. 2).

4.1.2. ***Syn-contractional units***

Parallel and continuous reflectors, with intercalations between moderate to high frequency and amplitude ones represent the Syn-contractional units. The internal tectono-stratigraphic architecture shows fan geometries and growth strata close to anticline limbs, indicating synchronic deposition with compressive deformation. Syn-contractional units are correlated with the Upper Oligocene to recent sedimentary sequences (Fig. 2).

4.2. Structures

Main structures exposed in surface correspond to the Chintaguay and Longacho anticline, affecting the overall syn-contractional units and controlling homonymous hills.

Interpretation of seismic sections reveal that the sub-surface principal structures are west-verging with moderate to high angle inverted faults, developing inversion anticlines in their hanging walls (harpoon shape), affecting syn-rift and syn-inversion units. The Chintaguay and Longacho folds are spatially associated with the propagation of these pre-existing structures located over inversion anticlines.

4.3. Structural evolution and inherited extensional architecture

Extensional and contractional growth strata allow us to establish:

(i) the extensional phase associated to the Tarapacá basin formation, during the Jurassic to Early Cretaceous.

(ii) the inversion phase related to the tectonic inversion of the Tarapacá basin, since the Upper Cretaceous.

(iii) the contraction phase associated to repeated reactivation in a reverse kinematic sense of long-lived inherited structures, during the Upper Oligocene to recent (Fig. 2).

4.4. Along strike variations in the Tarapacá Basin structure

Main structures and syn-rift depocenters present a N-S orientation and along-strike variations are reflected as changes of polarity and vergence. These latitudinal variations were controlled by inherited pre-orogenic structures, implying an original segmented extensional basin.

5. Discussion and final remarks

5.1. Long-lived structures and neotectonics importance in mineral exploration

Recently McCuaig and Hronsky (2014) and Piquer *et al.* (2019), remark the importance of fundamental basement faults in the spatial location of ore bodies.

In this applied research, we could recognize several structures active from Jurassic times. In addition, these structures were subsequently reactivated in reverse kinematic displacements since the Upper Cretaceous. In this context, the Tarapacá Basin corresponds to a partially inverted segmented basin, presenting lateral variations and developing accommodation and transfer zones, which could include local transtensional and transpressional areas. These structural features have been widely recognized and established as key features in mineral occurrences (Love *et al.*, 2004; Kyne *et al.*, 2019). Because of subsequent reactivation of these long-lived structures, Neogene deformation has been highly influenced by the pre-existing structural configuration (Tarapacá Basin faults).

In Northern Chile, the Challacollo district (Fig. 1; ~21°S) evidences close relationships between mineral occurrences, veins and intrusive bodies, and long-lived faults affecting the overall syn-rift, syn-inversion and syn-contractional units, and latitudinal variations in the structural features (Fig. 2). Meanwhile in southern Perú, the Incapuquio fault system is one of the most important structural features in Cuajone, Toquepala, Quellaveco and Cerro Verde mineral deposits (Fig. 1; Carlotto *et al.*, 2009; Acosta *et al.*, 2010). These authors have proposed a structural evolution similar to the one recognized in this study, with an extensional phase and subsequent compressive phases since the Upper Cretaceous, including basin inversion.

Following this rationale and taking in account that most of the Paleogene and Eocene metallogenic belt is concealed, new mineral exploration strategies must consider not only the post-mineral thickness distribution, but also the Neogene structural kinematics, spatial location associated to older structures and lateral variations, paying attention in fault tip points and structural intersections.

As expressed, knowledge of the structural configuration and evolution of back-arc basins has several implications for porphyry and epithermal deposits exploration, as well for IOCG and VMS deposits in the Andean tectonic and metallogenic context.

Acknowledgements

We gratefully acknowledge the Empresa Nacional del Petróleo (ENAP) for permission to use seismic reflection profiles and well data. Authors are thankful for financial support provided by Universidad Santo Tomás Regular Investigation Funds. La.Te. Andes S.A., Seequent and Nunns and Rogan LLC kindly provided us Andino 3D, Leapfrog and StructureSolver softwares, respectively.

References

Acosta, H., Alván De la Cruz, A. A., Oviedo, M. J., Rodríguez, J. P. 2010. Actividad tectónica del sistema de fallas Cincha-Lluta Incapuquio durante la evolución de la cuenca Arequipa en el Jurásico. In Congreso Peruano de Geología, 15, Cusco, PE, 27 setiembre-1 octubre 2010, Resúmenes extendidos. Sociedad Geológica del Perú-SGP.

Carlotto, V., Quispe, J., Acosta, H., Rodríguez, R., Romero, D., Cerpa, L., Mamani, M., Díaz-Martínez, E., Navarro, P., Jaimes, F., Velarde, T. 2009. Dominios geotectónicos y metalogénesis del Perú. Boletín de la Sociedad Geológica del Perú, 103, pp. 1-89.

Fuentes, G., Martínez, F., Bascuñan, S., Arriagada, C., Muñoz, R. 2018. Tectonic architecture of the Tarapacá Basin in the northern Central Andes: New constraints from field and 2D seismic data. Geosphere, 14, pp. 2430-2446.

García, M., Maksaev, V., Townley, B., Dilles, J. 2017. Metallogeny, structural evolution, post-mineral cover distribution and exploration in concealed areas of the northern Chilean Andes. Ore Geology Reviews, 86, pp. 652-672.

INGEMET, 2016. Mapa Geológico del Perú : versión digital. Dirección de Geología Regional, Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico. Escala 1 :1.000.000, Lima.

Kerr, R. A. (2014). The coming copper peak. Science, 343 (6172), pp. 722-724.

Kyne, R., Torremans, K., Güven, J., Doyle, R., & Walsh, J. (2019). 3-D modeling of the lisheen and silvermines deposits, County Tipperary, Ireland: insights into structural controls on the formation of Irish Zn-Pb deposits. Economic Geology, 114(1), pp. 93-116.

Labbé, N., García, M., Simicic, Y., Contreras-Reyes, E., Charrier, R., De Pascale, G., Arriagada, C. 2019. Sediment fill geometry and structural control of the Pampa del Tamarugal basin, northern Chile. Bulletin, 131(1-2), pp. 155-174.

Love, D.A., Clark, A.H., Glover, J.K. 2004. The Lithologic, Stratigraphic, and Structural Setting of the Giant Antamina Copper-Zinc Skarn Deposit, Ancash, Peru. Economic Geology, 99(5), pp. 887-916.

McCuaig, T. C., Hronsky, J. M. 2014. The mineral system concept: the key to exploration targeting. Society of Economic Geologists Special Publication, 18, pp. 153-175.

Piquer, J., Yáñez, G., Rivera, O., Cooke, D. R. 2019. Long-lived crustal damage zones associated with fault intersections in the high Andes of Central Chile. Andean Geology, 46(2), pp. 223-239.

SERNAGEOMIN, 2003. Mapa Geológico de Chile: versión digital. Servicio Nacional de Geología y Minería, Publicación Geológica Digital, No. 4 (CD-ROM, versión1.0, 2003). Escala 1:1.000.000, Santiago.

Figures

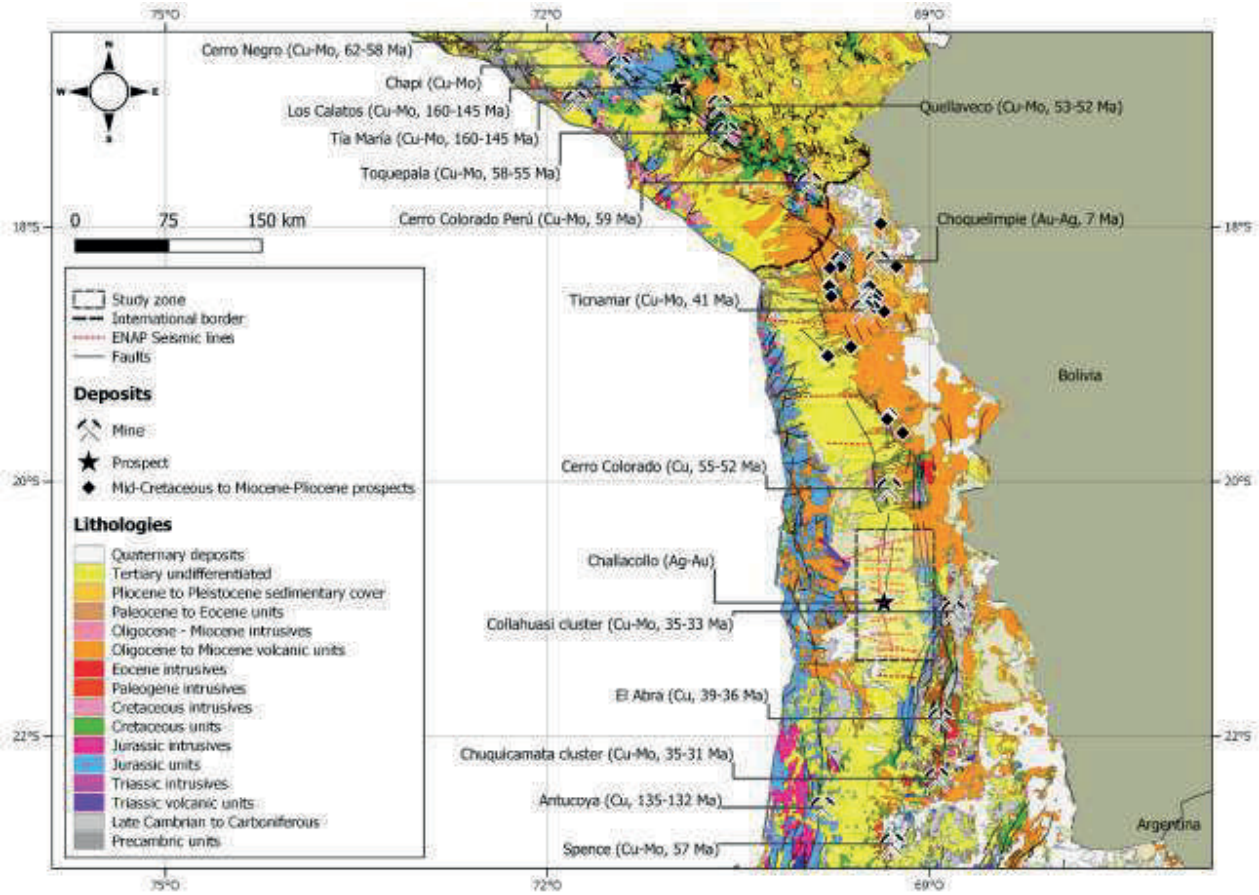


Figure 1. Simplified geological map, showing the main mineral deposits from Southern Perú to Northern Chile. Based on 1:1.000.000 regional map from SERNAGEOMIN (2003), 1:1.000.000 regional map from INGEMMET (2016). Other information from García *et al.*, (2017) and Porter GeoConsultancy Database available on http://www.portergeo.com.au/database/index.asp.

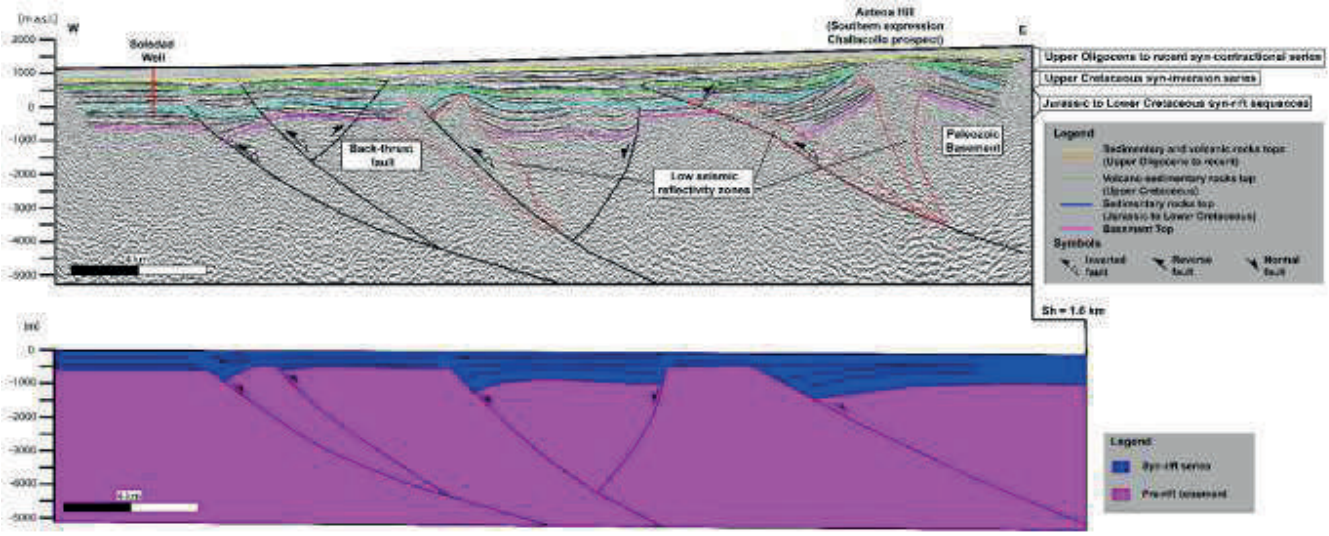


Figure 2. Seismic reflection section 99-9 interpretation (above) and structural restoration previous to tectonic shortening (below). Note the low seismic reflectivity zones (above) potentially associated to igneous intrusions and its relation with structural features.

Características Metalogenéticas del Mioceno de las Regiones Cajamarca - La Libertad

Luis Ysaías Quispe-Rentería[1], Alonso Arturo Marchena Campos[1], Víctor Raúl Torres-Bazán[1], Carlos Nicolás Fernández Geraldino[2]

[1] Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico, Av. Canadá #1470, San Borja, Lima (lquispe@ingemmet.gob.pe, amarchena@ingemmet.gob.pe, vtorres@ingemmet.gob.pe)
[2] carlosfernandezgeraldino@gmail.com

Metallogenetic Characteristics of the Miocene from Cajamarca and La Libertad Regions

Abstract In Cajamarca and La Libertad regions, north of Perú, are located important mineral deposits like Tantahuatay, Cerro Corona, Yanacocha, Minas Conga, La Arena and others; which belong to metallogenic belts XXI-A, XXI-B and XX. The present research has been developed based on the information collected in the field, as well as the geochemical, isotopic and geochronological data of the main deposits, and compiled information from various papers of several authors; using all of this information it has been determined the main metallogenetic epoch between 20 to 8 Ma., associated to the tectono-stratigraphic units Eocene – Pliocene Magmatic Arc (PeoNp-AM) from the tectono-stratigraphic map units, which is an important criteria for the understanding and integration of the geoscientific information generated.
Key Words: Metallogeny, Tectono-stratigraphic units, geochronology, geochemistry, metallogenic belts

Resumen: En las regiones Cajamarca y La Libertad del norte del Perú se emplazan importantes yacimientos minerales como Tantahuatay, Cerro Corona, Yanacocha, Minas Conga, La Arena, entre otros, ubicadas en las franjas metalogenéticas XXI-A, XXI-B & XX. El presente trabajo se ha desarrollado en base a la información recolectada en campo, así como los datos geoquímicos, isotópicos y dataciones geocronológicas de los principales yacimientos recopilados de los estudios realizados por distintos autores, con la que se ha determinado que la principal época de mineralización se encuentran entre 20 a 8 Ma., asociados a la unidad tectono-estratigráfica Magmatismo de Arco del Eoceno - Plioceno (PeoNp-AM) del mapa de las unidades tectono-estratigráficas, demostrando ser un criterio que facilita la integración y compresión de toda la información geocientifica generada.
Palabras clave: Metalogenia, unidades tectono-estratigráficas, geocronología, geoquímica, franjas metalogenéticas.

1. Introducción

El presente trabajo se llevó a cabo bajo el marco del proyecto denominado "Características Metalogenéticas de los depósitos tipo pórfido y epitermales de la Cordillera Occidental" del INGEMMET; se han establecido las características Metalogenéticas en base al estudio de unidades tectono-estratigráficas, controles estructurales, reinterpretación geoquímica, estudios petromineragráficos, geocronológicos, isotópicos y otros, llevados a cabo en las principales minas y proyectos de las regiones de Cajamarca y La Libertad, en los que destacan Tantahuatay, Cerro Corona, Yanacocha, Minas Conga, Lagunas Norte, La Arena, entre otros. Las principales franjas Metalogenéticas presentes en el área de estudio son, la franja XXI de pórfidos de Cu-Mo (Au), skarns de Pb-Zn-Cu (Ag) y depósitos polimetálicos relacionados con intrusivos del Mioceno, en la que se han reconocido tres eventos magmáticos (Acosta *et al.*, 2009); de éstos, el segundo evento (18-13 Ma.) está asociado a pórfidos de Cu-Au, vinculados a intrusiones máficas a intermedias, como es el caso de Minas Conga (El Perol y Chailhuagón, hospedados en calizas y margas), y Cerro Corona. Noble et al., (2004) en Minas Conga reporta edades de alteración y mineralización que van de 15.80 ± 0.09 y 15.58 ± 0.12 Ma. 40Ar/39Ar (roca con alteración potásica y ortoclasa) para Perol y Chailhuagón, respectivamente.

También se tiene la franja XXIA de epitermales de Au-Ag del Mioceno hospedados en rocas volcánicas cenozoicas del Grupo Calipuy. Entre los

principales depósitos de alta sulfuración se tienen los yacimientos de Yanacocha (12.5-11.8 Ma.) y Tantahuatay.

La franja XXIB de Epitermales de Au-Ag del Mioceno hospedados en rocas sedimentarias alberga yacimientos como Lagunas Norte y La Arena, epitermales de alta sulfuración alojados en las areniscas cuarzosas de la Formación Chimú del Grupo Goyllarisquizga.

2. Metodología

Para el desarrollo de esta investigación, se elaboró una recopilación de datos bibliográficos como información geoquímica de roca total, geoquímica de sedimentos, isotópica y dataciones geocronológicas de los principales yacimientos en la zona de estudio, a partir de artículos, boletines, mapas, tesis e informes técnicos e internos brindados por compañías privadas. Se generaron mapas preliminares. Durante los trabajos de campo, se tomaron muestras selectivas de sondajes diamantinos y *rock chips*, así como muestreo para estudios petromineragráficos, arcillas e isotópicos, además del respectivo mapeo geológico y estructural. Posteriormente, se enviaron las muestras al laboratorio y se validaron los resultados para su interpretación.

3. Unidades Tectono-estratigráficas de las regiones de Cajamarca y La Libertad

Se define como una Unidad Tectono-estratigráfica a una unidad geológica definida en base a sus características litoestratigráficas, ambientes tectónicos y separada por discontinuidades tectónicas regionales.

Los yacimientos más relevantes de las regiones Cajamarca y La Libertad se encuentran en la Unidad Tectono-estratigráfica definida como «Magmatismo de Arco Eoceno - Plioceno (PeoNp - AM)», eventos magmáticos iniciados entre el Eoceno y Oligoceno, debido a la convergencia de placas (Somoza & Ghidella, 2012). Por su parte, Navarro *et al.* (2010) identifica al menos tres eventos magmáticos a) Oligoceno superior (~28-24 Ma.), b) Mioceno inferior (~23-17 Ma.) y c) Mioceno medio (~17-10 Ma.) Figuras 1 y 2.

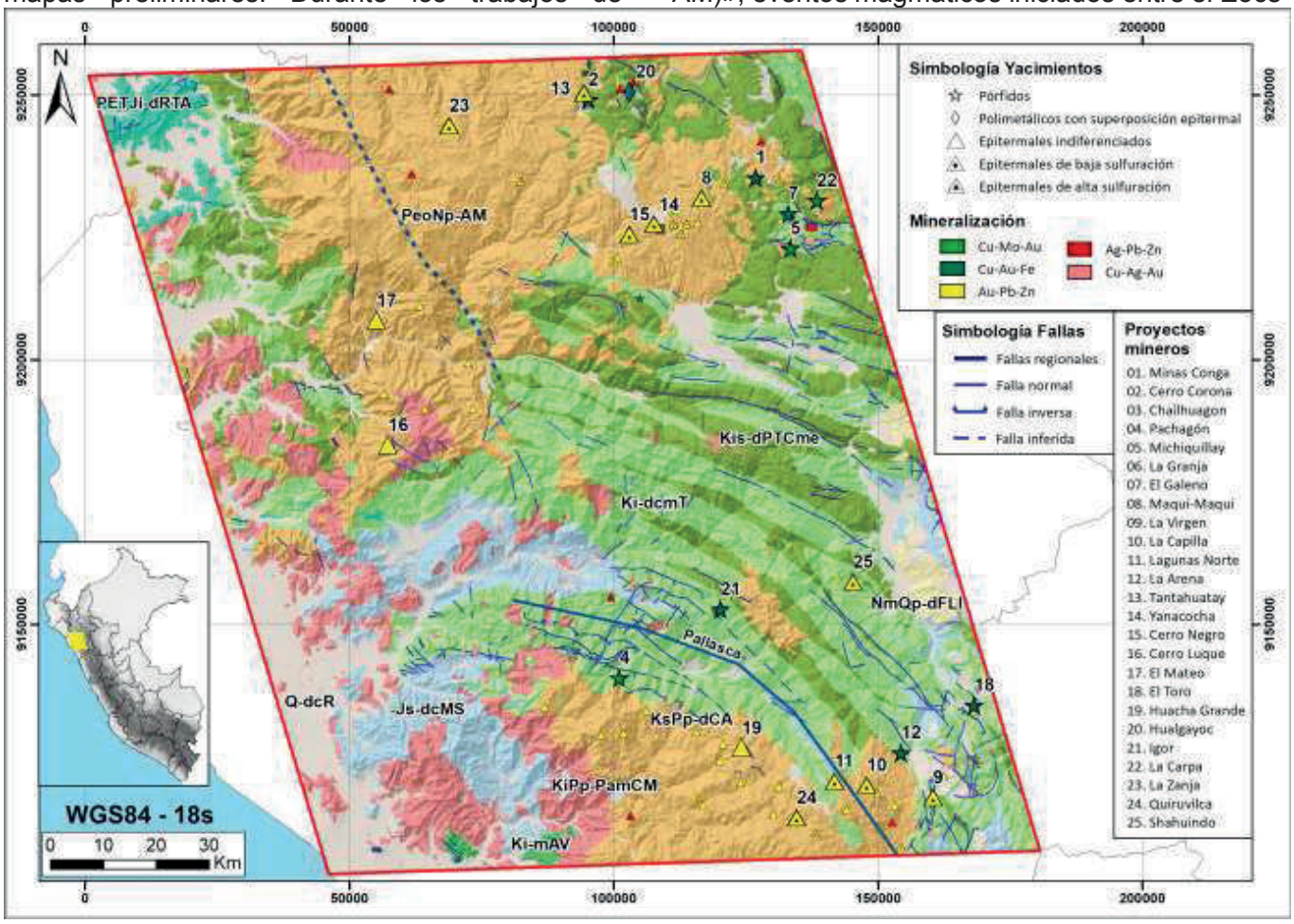


Figura 1. Unidades tectono-estratigráficas y yacimientos determinados en la zona de estudio

Estos episodios magmáticos afloran a lo largo de la Cordillera Occidental de los Andes del Perú y fueron emplazados entre aproximadamente 55 y 10 Ma. Estos depósitos lávicos y piroclásticos fueron

San Pablo, Chilete, Tembladera, entre otras y en grupos, como Calipuy, además se tiene cuerpos subvolcánicos asociados.

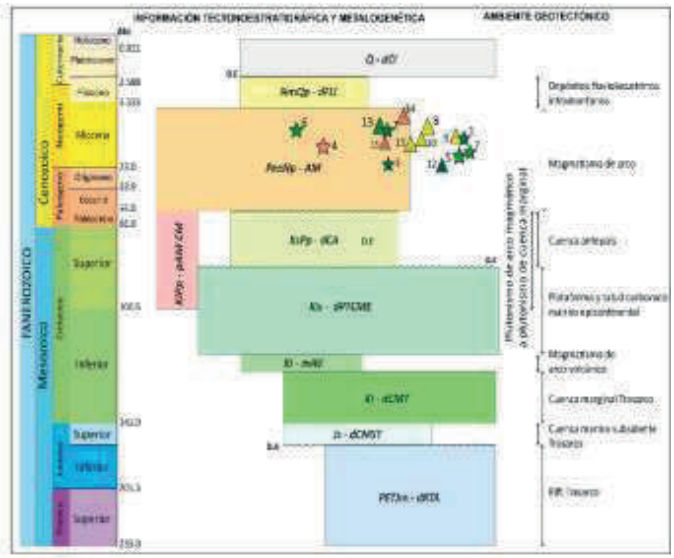


Figura 2. Cuadro Tectono-estratigráfico de la zona.

4. Interpretaciones geocronológicas

Una síntesis de las edades geocronológicas se da en la figura 3.

Región Cajamarca

a. Distrito Minero Yanacocha

Longo (2005) señala que la actividad volcánica eruptiva se inició entre los 14.52 ± 0.13 Ma. con las lavas andesíticas del Yanacocha inferior y finaliza a los 11.22 ± 0.08 Ma. con la erupción de las ignimbritas dacíticas de San José, cambiando composicionalmente de unas dacitas oxidadas a unas de composición riolítica, caracterizadas por el emplazamiento de domos e intrusiones porfiríticas aisladas, finalizando con las ignimbritas riolíticas de Negritos de edad 8.43 ± 0.04 Ma. (Longo, 2005; Rivera, 2008).

La actividad hidrotermal se inicia al oeste del distrito, en los cerros Negro y Quillish; esta fue datada por el método Ar-Ar en alunitas entre los 13.56 ± 0.24 a 12.64 ± 0.61 Ma., evidenciando una migración hacia el este. En Yanacocha, la actividad magmático hidrotermal se centra desde 9.25 ± 0.10 a 8.22 ± 0.46 Ma. (Longo, 2005; Rivera et al, 2008).

b. Minas Conga

Las dataciones más antiguas registradas pertenecen a la granodiorita de Chailhuagón con 23.20 ± 2.10 Ma. por K-Ar en biotita (Llosa et al, 2000). Las dataciones en alunita de (Longo, 2005) arrojaron una edad de 16.11 ± 0.18 Ma. por el método Ar-Ar.

c. Cerro Tantahuatay

James (1998) obtuvo una edad de 13.20 ± 0.20 Ma. (Zr_U-Pb), mientras que la datación del domo alterado realizadas por Macfarlane *et al*., (1994) en minerales de alunita por el método K-Ar fue de 12.40 ± 0.40 Ma.

Región La Libertad

a. Lagunas Norte

Montgomery (2012) propone que la mineralización epitermal de alta sulfuración de Lagunas Norte se desarrolla entre los 16.5 a 17.1 Ma, esto en base a múltiples dataciones de alunita por el método de Ar-Ar en las zonas de alteración. La edad de la mineralización es coetánea con la fase de mayor engrosamiento cortical del Oligoceno superior a Plioceno.

b. La Arena

Gauthier *et al.* (1999), realizó dataciones K-Ar en roca total de las dioritas y tonalitas, obteniéndose edades de 24.60 ± 0.8 y 25.70 ± 0.9 Ma., respectivamente.

5. Nuevos aportes a la Litogeoquímica de las regiones Cajamarca y La Libertad

La firma litogeoquímica de intrusivos vinculados a yacimientos tipo pórfido es distintiva en ciertos parámetros, tales como un La_N/Yb_N>20 (Bissig *et al*., 2017). Du Bray (2016), menciona que no hay relaciones demostrables entre la composición de las rocas volcánicas, y la génesis de depósitos epitermales. Sin embargo, las cercanas relaciones espaciales y temporales entre las rocas volcánicas y los depósitos epitermales sugieren una relación genética. Se han asignado a las muestras ubicadas en un radio menor a 2 km de cualquier yacimiento, el nombre del correspondiente depósito, considerándolas como potencialmente asociadas a los eventos que generaron dichos yacimientos, especialmente a las muestras asociadas temporalmente.

La Figura 4 muestra el Sr/Y vs Y para las muestras relacionadas a los yacimientos del área de estudio. Se observa que las muestras del Distrito Minero Yanacocha se encuentran en su mayoría en rangos adakíticos, viniendo la transición desde el campo de composición de arco normal. Lo ideal para una nube de puntos es que sea continua, extensa y que se dé la transición desde el campo no adakítico hacia el campo adakítico, de manera que los cambios mineralógicos en la base de la corteza generen la acumulación y posteriormente, liberación de fluidos. Se observa que las muestras del Mioceno verifican este requisito, lo que indica que es un magmatismo fértil. Las muestras de Minas Conga también se encuentran en rangos adakíticos, así como las de Cerro Corona y Amaro muestran una transición hacia el campo adakítico. El caso de las muestras de Michiquillay y Tantahuatay se debe a remoción del Sr por altera-

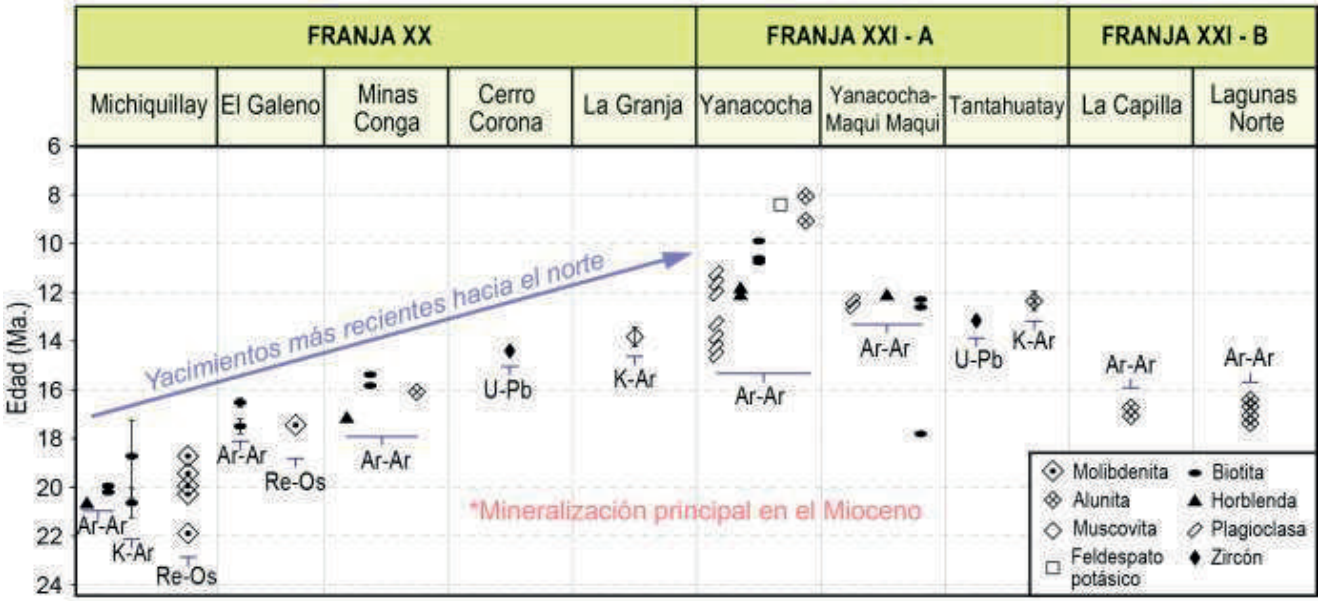


Figura 3. Cuadro resumen de las edades geocronológicas de cristalización, alteración y mineralización de los principales yacimientos de las regiones Cajamarca y La Libertad, según franja metalogenética.

ción, ya que los valores muy bajos de Y no son coherentes con valores tan bajos de Sr, al menos no para rocas ígneas. La intensidad de la firma adakítica es mayor para los yacimientos epitermales que para los pórfidos en este sector Norte.

6. Conclusiones

Las unidades tectono-estratigráficas son un criterio que facilita la integración y mejor comprensión de la información geocientífica así como de los procesos geológicos que han sido precursores y generadores de los procesos de mineralización, además estas unidades son una excelente herramientas para generación de mapas metalogenéticos.

Las principales edades de mineralización se encuentran entre 20 a 8 Ma. (Michiquillay, Yanacocha, Minas Conga, Tantahuatay, Lagunas Norte, entre otros), relacionados a la unidad Magmatismo de Arco del Eoceno - Plioceno (PeoNp-AM). La mayoría de depósitos epitermales y pórfidos se dan entorno a los valores más altos de parámetros litogeoquímicos que indican magmas fértiles.

La mayoría de los depósitos epitermales se encuentran al oeste de las anomalías litogeoquímicas, mientras que los pórfidos se encuentran al este. El hecho que determinados yacimientos bordeen la misma anomalía litogeoquímica sugiere que podría haber alguna relación genética entre ellos.

Agradecimientos

Queremos agradecer a: la Presidencia Ejecutiva, la Coordinación de Geología y Laboratorios, a la Dirección de Recursos Minerales y Energéticos del Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, por las facilidades y el apoyo para la consecución del presente trabajo de investigación.

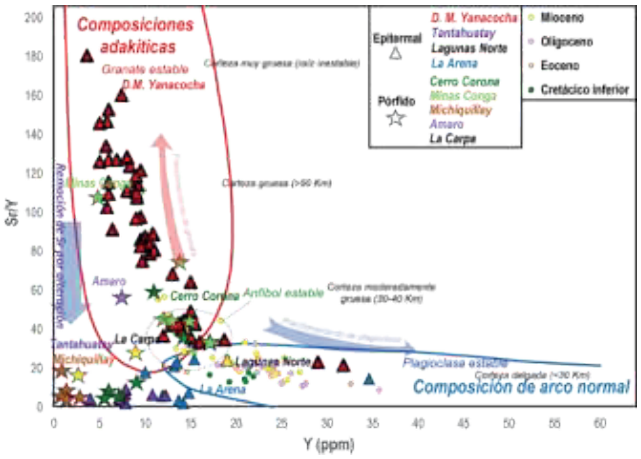


Figura 4. Sr/Y vs Y para las muestras de la zona Norte.

Referencias

Acosta, J., Rivera, R., Valencia, M., Chirif, H., Huanacuni, D., Rodríguez, I., Santisteban, A. (2009). Memoria Mapa Metalogenético del Perú; 17 pp.

Bissig, T., Leal-Mejía, H., Stevens, R., & Hart, C. (2017). High Sr/Y Magma Petrogenesis and the Link to Porphyry Mineralization Revealed by Garnet-Bearing I-Tyoe Granodiorite Porphyries of the Middle Cauca Au-Cu Belt, Colombia. Econ. Geol.. Vol. 112, 551-568.

Du Bray, E. (2016). Geochemical characteristics of igneous rocks associated with epithermal mineral deposits- A review. Ore Geology Reviews. Vol. 80, 59.

Gauthier, A., Diaz, N., & Quirita, V. (1999). Yacimiento La Arena - Virgen, Huamachuco, La Libertad - Peru. En: Congreso Internacional de Prospectores y Exploradores, 1, Lima, 1999, Primer volumen de monografias de yacimientos minerales peruanos: historia, exploracion y geologia. Lima.73-92.

James, J. (1998). Geology, alteration and mineralization of the Cerro Corona porphyry copper-gold deposit, Cajamarca province, Perú. Unpubl. MSc Thesis, University of British Columbia, Vancouver, Canada. 266.

Llosa, F., Georgel, M., & Veliz, J. (2000). Geología, alteración y mineralización de los pórfidos de Au-Cu de Minas conga, norte del Perú (Cajamarca). X Congreso Peruano de Geología. Resúmenes, Sociedad Geológica del Perú, Lima. 248.

Longo, A. (2005). Evolution of volcanism and hydrothermal activity in the Yanacocha mining district, northern Peru. Unpub PhD. Thesis, Oregon State University. 503.

Macfarlane, A. W., Prol-Ledesma, R.-M., & Conrad, M. E. (1994). Isotope and fluid inclusión studies of geological and hidrotermal processes, northern Peru. Internacional Geology Review, vol. 36, 645-677.

Montgomery, A. (2012). Metallogenetic controls on Miocenhigh-sulphidation epithermal gold mineralization alto Chicama district, La Libertad, Northern Perú: (Tesis), 455.

Navarro, P., Monge, R., & Rivera, M. (2010). Geología y Metalogenia del Grupo Calipuy (Volcanismo Cenozoico) Segmento Santiago de Chuco, Norte del Perú. Boletín N° 28 Serie D – INGEMMET. 192.

Noble, D. C., Vidal, C., Perelló, J., & Rodríguez, O. (2004). Space-time relationships of some porphyry Cu-Au, epithermal Au, and other magmatic-related mineral deposits in northern Peru. In: Sillitoe, R.H., Perelló, J. & Vidal, C., eds. Andean metallogeny: new discoveries, concepts, and updates. 313-318.

Rivera, M., Navarro, P., Monge, R., & Rolin, D. (2006). Evolución del Volcanismo Cenozoico en el norte del Perú: departamento de La Libertad (7° 45' - 8° 25' S): XIII Congreso Peruano de Geologia. Resúmenes Extendidos Sociedad Geológica del Perú, 304-307.

Somoza, R., & Ghidella, M. (2012). Late Cretaceous to recent plate motions in western South America revisited. Earth and Planetary Science Letters, 331-332, 152–163. doi:10.1016/j.epsl.2012.03.003.

proexplo.com.pe

RESÚMENES EXTENDIDOS DE PÓSTERS

proEXPLO2021
Año del Bicentenario

TÓTEM 1

GEOLOGÍA ECONÓMICA

Pegmatitas, aplitas, greisen y anomalías de estaño en el leucogranito triásico de Paita, Piura

Alvaro Espinoza, Silvana Stipetich, Rodrigo Hurtado de Mendoza, Jorge Sáez y Jean Vallance

Especialidad de Ingeniería Geológica, Pontificia Universidad Católica del Perú,
Av. Universitaria 1801, San Miguel 15088, Lima, Perú. alvaro.espinozao@pucp.pe

1. Resumen

El Granito de Paita, en el norte del Perú, es un plutón peraluminoso, de tipo S, de edad triásica, el cual ha intruido a una secuencia metasedimentaria de edad paleozoica. El plutón muestra una evolución desde facies de leucogranito de biotita-muscovita hacia facies de turmalina-muscovita. Este complejo granítico alberga una serie de cuerpos miarolíticos, zonas de borde con textura de solidificación unidireccional y diques de pegmatitas, aplitas y bandas de aplita-pegmatita. Todos estos cuerpos ígneos presentan anomalías de Sn (8–15 ppm) y el desarrollo de alteración hidrotermal tipo greisen parece ser coetáneo a las pegmatitas miarolíticas tempranas, llegando a presentar un enriquecimiento en Sn, de hasta 31 ppm. Hasta la actualidad, no se ha observado la casiterita, y se infiere que el Sn está principalmente hospedado en las micas.

2. Abstract

The Paita Granite in northern Peru is a composite peraluminous S-type Triassic pluton that has intruded into a series of paleozoic metasedimentary rocks. The pluton shows an evolution from biotite-muscovite to tourmaline-muscovite bearing leucogranite facies. This granite complex hosts a series of pegmatite, aplite, layered aplite-pegmatite bodies of miarolitic, to unidirectional solidification textures, and dike geometry. All these igneous bodies show Sn anomalies (8 to 15 ppm). The development of greisen-type hydrothermal alteration appears to be coeval with the early miarolitic pegmatite and is related to a Sn enrichment up to 31 ppm. During an ongoing study, no cassiterite was observed and it is inferred that Sn is mainly hosted in micas.

3. Introducción

Las mineralizaciones económicas de Sn y W están esencialmente relacionadas a intrusiones graníticas peraluminosas de tipo S (Blevin and Chapell, 1995; Černy et al., 2005). Ejemplos de estos depósitos se encuentran en distritos históricos como Cornwall (Gran Bretaña), Erzgebirge (Alemania) y en el cinturón estannífero Peruano-Boliviano (Triásico).

El Granito de Paita, departamento de Piura, es un granito peraluminoso de dos micas, de tipo S y con contenidos anómalos de Sn (Bellido et al., 2009; Espinoza y Stipetich, 2019), características que sugirieren la posible presencia de mineralizaciones a Sn ± W.

En esta publicación se presentan los avances, de un estudio en curso sobre el granito de Paita, que comprenden las descripciones petrográficas y geoquímicas de las diferentes facies de granitos, pegmatitas y aplitas, y de las alteraciones sódica y greisen identificadas.

4. Marco Geológico

4.1. Geología Regional

En la costa norte del Perú afloran rocas metasedimentarias, de diferentes grados de metamórfismo (filitas, esquistos, gneises y migmatitas); cuyas edades abarcan desde el Precámbrico hasta el Pérmico, y que conforman el Dominio Geotectónico Amotape-Tahuín (Caldas et al., 1980; Palacios, 1994; Bellido et al., 2009)

Intruyendo a los metasedimentos, se encuentran diferentes cuerpos ígneos de edad triásica clasificados, según su nivel de emplazamiento, en catazonales y epizonales (Bellido et al., 2009). Los primeros son granitoides que no se separaron totalmente de su fuente de fusión, mientras que los segundos son más someros y desenraizados.

4.2. Geología Local

En el Macizo de Paita, la secuencia metasedimentaria está conformada por pelitas con intercalaciones de estratos decimétricos a métricos de areniscas fuertemente plegadas y asociadas al

desarrollo de al menos dos foliaciones sucesivas (Espinoza y Stipetich, 2019). Estos autores pusieron en evidencia dos principales eventos metamórficos: un primer evento regional M1 responsable de la formación de pizarras de facies de clorita; y un evento térmico M2 asociado al emplazamiento del Granito de Paita y responsable de la neoformación de biotita y porfidoblastos de cordierita y andalucita.

El Granito de Paita es un pequeño plutón de edad triásica (Bellido et al., 2009; Sánchez et al., 2006). La facie principal es de monzogranito peraluminoso, de dos micas, de grano fino, de tipo S, con indicios de deformación. Los contactos con la roca metasedimentaria de caja son subverticales, y la presencia de enclaves angulosos, métricos a decamétricos, de roca caja en la parte sur del plutón indica un emplazamiento por *stopping* magmático.

5. Cuerpos magmáticos

5.1. Granitos

Se han reconocido al menos siete facies de granito en base a granulometría, textura, mineralogía, y presencia o ausencia de deformación, y enclaves biotíticos; con la característica común de ser equigranulares entre las facies. La facie principal es monzogranito de biotita-muscovita de grano fino localmente intruido por una facie de mineralogía similar, pero de grano medio, produciendo zonas de mezcla heterogénea (*mingling)* con el primero. Ambas facies presentan una foliación resaltada en el alineamiento de biotita (granito “gneisificado” de Palacios, 1994). Las otras facies de granito son posteriores y no presentan tales deformaciones. Se identificaron: un granito de biotita-muscovita de grano fino con abundantes enclaves biotíticos (<5 cm), un granito de biotita-muscovita de grano fino a medio con pocos fenocristales de feldespato potásico, un granito marginal de muscovita-biotita de grano fino a medio y un granito fino de turmalina-muscovita.

Bajo el microscopio, los granitos de dos micas presentan composiciones monzograníticas a sienograníticas con cuarzo, feldespato potásico (microlina>ortoclasa), plagioclasa, biotita, muscovita; accesorios de apatito y zircón, y trazas de granate y topacio. Las texturas son hipidiomórficas con frecuentes intercrecimientos micrográficos. La muscovita es tardía formando cristales intersticiales localmente esqueléticos y a veces interestratificados con biotita.

El granito de turmalina-muscovita, sin biotita, es de grano fino con textura hipidiomórfica, con cuarzo, plagioclasa > feldespato potásico, muscovita, turmalina, y con granate y zircón de accesorios. Este granito no presenta texturas micrográficas y las turmalinas forman granos subhedrales a euhedrales con inclusiones de zircón.

5.2. Pegmatitas y Aplitas

Diferentes cuerpos de aplita, pegmatita, y aplopegmatita bandeada cortan a todas las facies graníticas antes mencionadas. Las pegmatitas son de tres tipos: miarolíticas, marginales con textura de solidificación unidireccional y diques. Las pegmatitas miarolíticas son cuerpos irregulares (<30 cm) presentes, esencialmente, en los granitos de biotita-muscovita, pero también en el granito de turmalina-muscovita, donde están concentradas hacia el contacto con su encajonante. Las pegmatitas marginales son cuerpos discontinuos de extensión métrica y de potencia menor a 20 cm, ubicados en el contacto entre los granitos de dos micas y la caja metasedimentaria, y presenta textura de solidificación unidireccional con los típicos feldespatos potásicos plumosos extendiéndose desde la caja hacia el intrusivo. Los diques de pegmatita son tardíos ya que intruyen de manera cortante a todas las facies graníticas. Estos diques presentan una orientación ONO-ESE con buzamiento subvertical, su extensión puede alcanzar los 100 m y potencias menores a 0.5 m.

La mineralogía de las pegmatitas y aplitas comprende cuarzo, feldespatos, turmalina, muscovita, y como accesorios apatito y granate. El tamaño de los granos puede alcanzar los 10 cm y se puede observar frecuentemente una zonación con muscovita hacia el exterior, pasando a feldespato potásico y turmalina, y cuarzo masivo ocupando la parte central; localmente se observaron zonas gráficas. La muscovita puede ser primaria o producto de alteración del granito encajonante, particularmente en el caso de las pegmatitas miarolíticas.

Las aplitas se presentan en diques de potencia menores a 1 m, son paralelas y espacialmente asociadas a los diques de pegmatita. Pueden presentar una textura homogénea o bandeada con cristales de turmalina, de hasta 3 cm, con crecimiento perpendicular a los hastiales de los diques, pasando a una zona interna libre de turmalina. Las aplitas presentan una mineralogía constituida por cuarzo, plagioclasa > feldespato potásico, turmalina, muscovita; además de apatito, granate y topacio como accesorios.

Los cuerpos de aplopegmatita forman localmente sills compuestos por lechos rítmicos y subhorizontales de pegmatita y aplita ubicados en el contacto entre dos facies graníticas. Tienen una potencia de hasta 1 m y extensiones de hasta 10 m. Los cuerpos de aplopegmatita más frecuentes, sin embargo, son diques tardíos, cuya mineralogía y orientación es la misma que los diques de aplita y de pegmatita, sugiriendo una génesis sincrónica. Su potencia puede alcanzar hasta los 2 m y comprenden una alternancia de lechos de aplita y pegmatita paralelos a las paredes con capas de aplita concentradas hacia las paredes y capas de pegmatita hacia el centro.

6. Alteraciones Hidrotermales

6.1. Albitización

La albitización corresponde a un reemplazamiento parcial a total de ortoclasa y microlina por una plagioclasa sódica con macla tipo *chessboard*. La albita hidrotermal, está presente tanto en los granitos de dos micas, como en las pegmatitas y sobre todo en las aplitas.

6.2. Greisenización

La manifestación greisen más frecuente corresponde a pequeñas bandas (<3 cm, excepcionalmente 20 cm) de remplazamiento de las facies de granito de dos micas por muscovita de grano medio a grueso y cuarzo. Esas bandas adoptan frecuentemente una morfología sinuosa y anastómosada, ocasionalmente similar a un *stockwork*. Las bandas más potentes son más rectilíneas.

Localmente se pudo observar una transición continua desde los halos de muscovita de las pegmatitas miarolíticas hacia las bandas de alteración greisen, tanto dentro de las facies de granito de dos micas como en los contactos externos del granito de turmalina, sugiriendo contemporaneidad entre la fase pegmatítica miarolítica y la alteración hidrotermal.

Bajo el microscopio, se notó un remplazamiento total de los feldespatos por granos de muscovita de hasta 5 mm, con preservación del cuarzo y del apatito magmático, y con presencia excepcional de turmalina. Lateralmente esta alteración pasa a unos halos de sericita y clorita poco desarrollados en los granitos encajonantes, alteración que afecta también a las diferentes facies de granito en casi todo el macizo, aunque de manera muy débil. No se observaron cristales de casiterita, wolframita o de sulfuros en el greisen.

7. Geoquímica

Todas las facies ígneas presentan un índice de aluminosidad (A/CNK; Shand 1927) >1.1 (A/CNK: 1.16-1.29, Fig. 1 y Tabla 1) sugiriendo que son granitos fuertemente peraluminosos de tipo S (Chappell y White, 1974; Sylvester,1998). Este carácter fuertemente peraluminosos se traduce por la presencia de muscovita y de trazas de granate en los granitos tanto como en las aplitas y pegmatitas.

La disminución del contenido de TiO_2 y los ratios Nb/Ta, Zr/Hf, K/Rb, así como el incremento de la ratio Rb/Sr desde los granitos de dos micas hacia el granito de turmalina-muscovita y las aplitas (Tabla 1), son indicadores de una creciente diferenciación magmática. En el greisen, los ratios Nb/Ta y Zr/Hf son muy similares a los granitos de dos micas ya que son elementos inmóviles poco afectados por la alteración hidrotermal. Sin embargo, hay variaciones notorias en los ratios Rb/Sr y K/Rb en el greisen debido a la destrucción de los feldespatos remplazados por muscovita.

Las concentraciones de Sn son relativamente constantes, de una facie granítica a otra (10 a 15 ppm) y disminuyen en las aplitas (7 a 8 ppm). Es el greisen que presenta la mayor concentración de Sn de todos (31 ppm), lo cual indica un proceso de concentración durante la fase hidrotermal.

7. Discusión y conclusión

En el granito de Paita, las facies las más antiguas contienen dos micas y presentan una transición hacia una facie tardía de granito de turmalina-muscovita. Esta evolución corresponde a un proceso de cristalización fraccionada de biotita y muscovita causando una reducción del contenido de TiO_2 y del ratio Nb/Ta (Stepanov et al., 2014). La reducción drástica del TiO_2 permitió la cristalización de la turmalina en lugar de la biotita, siendo el TiO_2 un inhibidor de su cristalización (Nabelek, 2019). Los resultados de estos mismos parámetros, junto con los ratios Zr/Hf, K/Rb y Rb/Sr, indican una diferenciación aún más importante en los diques aplíticos.

Los valores de Sn registrados en los granitos son muy superiores al valor promedio de la corteza continental superior (2.1 ppm, Rudnick y Gao, 2004) y equivalentes a las concentraciones de fondo encontradas en granitos relacionados a sistemas estanníferos como los granitos del Batolito Cornubiano en Gran Bretaña (Charoy, 1986; Manning y Hill, 1990) o el granito de San Rafael en Perú (Clark *et al.*, 1990).

No se notó una correlación positiva entre las concentraciones de Sn y el grado de diferenciación entre las diferentes facies encontradas, siendo el Sn constante e invariante entre las facies graníticas, apreciándose incluso una reducción en las aplitas. Esta evolución es compatible con un control de las micas en las concentraciones de Sn en magmas subsaturados con respecto a la casiterita (Lehmann, 1990). La disminución en la abundancia de micas desde las facies graníticas de dos micas hacia las aplitas explicaría así esta evolución. El tungsteno muestra un comportamiento similar al estaño, pero con factores de enriquecimiento menores, con valores de 1 a 3 ppm en granitos y aplitas, alcanzando 5 ppm en el greisen (1 ppm W en la corteza continental superior; Rudnick y Gao, 2004).

El greisen es globalmente contemporáneo a las fases de pegmatita miarolítica y anterior a la formación de los enjambres de diques aplo-pegmatíticos, indicando fases de cristalización de magma en presencia de fluidos. Como las litologías greisen presentan las mayores concentraciones de Sn, pero sin presencia de casiterita, se infiere que el contenido de Sn es controlado por la muscovita que es un mineral que puede contener hasta varias centenas de ppm de este elemento (*e.g.* Legros *et al.*, 2018).

A la fecha no se han encontrado minerales como casiterita, wolframita o sulfuros en el granito de Paita. La distribución esparcida del greisen, y la presencia de pegmatitas y aplitas sugiere que en el Macizo de Paita se tiene un sistema profundo y/o las raíces de un sistema fuertemente erosionado. Se requiere entonces análisis de inclusiones fluidas y geoquímica más amplia para evaluar la profundidad de emplazamiento del sistema y evaluar el potencial por estaño, tungsteno y posiblemente metales raros como Nb, Ta y Be.

Agradecimientos

Este aporte es el producto de algunas investigaciones realizadas y en proceso, en el Macizo de Paita, financiadas por el Programa de Apoyo a la Iniciación en la Investigación (PAIN) y el Programa de Apoyo al Desarrollo de Tesis de Licenciatura (PADET) de la Pontificia Universidad Católica del Perú.

Referencias

Bellido, M., Valverde, P., Jaimes, F., Carlotto, V. y Díaz, E. 2009. Datación y caracterización geoquímica de los granitoides peralumínicos de los cerros de Amotapes y de los macizos de Illescas y Paita (noroeste del Perú). Boletín de la Sociedad Geológica del Perú, v. 103, p. 197-213.

Blevin, P.L., and Chappell, B.W. 1995. Chemistry, origin, and evolution of mineralized granites in the Lachlan fold belt, Australia: The metallogeny of I- and S-type granites. Economic Geology, v. 90, p. 1604-1619.

Caldas, J., Palacios, O., Pecho, V. y Vela, C. 1980. Geología de los cuadrángulos de: Bayovar, Sechura, La Redonda, Pta. La Negra, Lobos de Tierra, Las Salinas y Morrope. Boletín Nº 32. Serie A: Carta Geológica Nacional. INGEMMET. Perú.

Černy, P., Blevin, P.L., Cuney, M., London, D. 2005. Granite-related ore deposits. Society of Economic Geologists, 100th Anniversary, p.337-370.

Chappell, B.W. y White, A.J.R. 1974. Two contrasting granite types. Pacific Geology, Circum-Pacific Plutonism, 8, p. 173–174.

Charoy, B. 1986. The genesis of the Cornubian batholith (southwest England): the example of the Carnmenellis pluton. Journal of Petrology, v. 27, p. 571–604.

Clark, A.H., Farrar, E., Kontak, D.J., Langridge, R.J., Arenas, M.J., France, L.J., McBride, S.L., Woodman, P.L., Wasteneys, H.A., Sandeman, H.A., Archibald, D.A. 1990. Geologic and geochronologic constraints on the metallogenic evolution of the Andes of southeastern Peru. Economic Geology, v. 85, p. 1520-1583.

Espinoza, A. y Stipetich, S. 2019. Análisis Mineralógico, Petrológico y Geoquímico de los Afloramientos Ígneos y Metamorficos del Macizo de Paita: Eventos, Facies Metamórficas y Magmatismo. Informe de Programa de Apoyo a la Iniciación en la Investigación (PAIN). Repositorio Institucional de la Pontifica Universidad Católica del Perú.

Lehmann, B. 1990. Metallogeny of Tin. Springer Berlin Heidelberg, 212 p.

Legros, H., Marignac, C., Tabary, T., Mercadier, J., Richard, A., Cuney, M., Wang, R., Charles, N., y Lespinasse, M.Y. 2018. The ore-forming magmatic-hydrothermal system of the Piaotang W-Sn deposit (Jiangxi, China) as seen from Li-mica geochemistry. American Mineralogist, v. 103, p. 39–54.

Manning, D. A., y Hill, P. I. 1990. The petrogenetic and metallogenic significance of topaz granite from the southwest England ore field. Geological Society of America Special Paper, v. 246, p. 51– 69.

Nabelek, P. 2019. Petrogenesis of leucogranites in collisional orogens. Geological Society, London, Special Publications, 491, p. 179-207

Rudnick, R. L. y Gao, S. 2004. Composition of the Continental Crust. Treatise on Geochemistry, v. 3, p. 1-64.

Palacios, O. 1994. Geología de los cuadrángulos de Paita, Piura, Talara, Sullana, Lobitos, Quebrada Seca, Zorritos, Tumbes y Zarumilla. Boletín Nº 54. Serie A. Carta Geológica Nacional. INGEMMET, Perú.

Sánchez, J., Palacios, O., Feininger, T., Carlotto, V. y Quispesivana, L. 2006. Puesta en evidencia de granitoides triásicos en Los Amotapes-Tahuín: Deflexión de Huancabamba. XIII Congreso Peruano de Geología, Resúmenes extendidos, Publicación Especial, v. 7, p. 312-315.

Shand, S.J. 1927. Eruptive Rocks Their Genesis, Composition, Classification, and Their Relation to Ore-deposits with a Chapter on Meteorites. 1st Edition, Thomas Murby and Company, London, England.

Stepanov, A., Mavrogenes, J.A., Meffre, S. y Davidson, P. 2014. The key role of mica during igneous concentration of tantalum. Contributions to Mineralogy and Petrology, v. 167, p. 1009.

Sylvester, P.J., 1998. Postcollisional strongly peraluminous granites, Lithos, v. 45, p. 29–44.

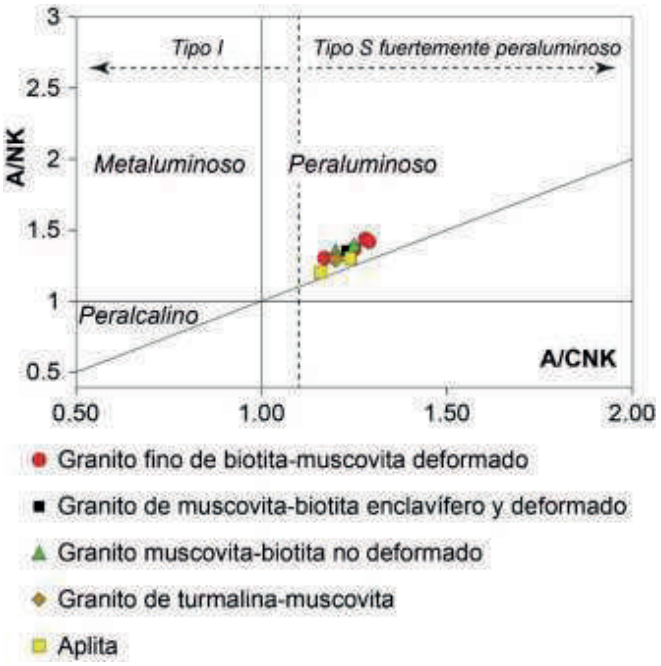


Figura 1. Diagrama de saturación de alúmina de Shand (1927), con la ubicación del limite entre granitoides de tipo I y granitos fuertemente peraluminosos de tipo S según Chappell y White (1974) y Sylvester (1998). Índices de saturación de alumina (relaciones molares): A/NK = $Al_2O_3/(Na_2O+K_2O)$; A/CNK = $Al_2O_3/(CaO+Na_2O+K_2O)$

Tabla 1: Análisis geoquímicos y relaciones molares de índice de saturación en alúmina de Shand (1927) para los granitos, aplitas y greisen del Granito de Paita. NA: no analizado.

Referencia	Litología	A/NK	A/CNK	Nb/Ta	Zr/Hf	K/Rb	Rb/Sr	TiO_2 % peso	Sn ppm	W ppm
Espinoza y Stipetich (2019)	Granito fino de biotita-muscovita deformado	1.30	1.17	7.70	30.8	148.2	4.25	0.17	10	3
		1.37	1.25	7.77	30.4	147.6	4.65	0.17	10	3
		1.44	1.28	8.15	31.9	143.9	4.24	0.23	10	2
Bellido et al. (2009)		1.42	1.29	9.93	33.0	142.5	3.87	0.17	14	NA
Presente Trabajo	Granito de muscovita-biotita enclavífero y deformado	1.36	1.23	7.05	26.5	138.5	4.60	0.14	15	3
	Granito de muscovita-biotita no deformado	1.36	1.20	9.47	28.3	158.4	3.49	0.19	9	2
		1.40	1.25	7.21	29.6	157.7	3.85	0.16	13	1
	Granito de turmalina-muscovita	1.29	1.20	5.86	23.6	129.7	7.30	0.06	13	3
	Aplita	1.31	1.24	2.08	16.7	108.1	11.03	0.04	7	2
		1.20	1.16	2.14	13.8	87.1	15.42	0.01	8	2
	Greisen	-	-	6.66	27.8	104.0	78.10	0.13	31	5

DISTRITO URANÍFERO DE MACUSANI: MODELO DE MINERALIZACIÓN USANDO ISÓTOPOS ESTABLES

MACUSANI URANIUM DISTRICT: MINERALIZATION MODEL USING STABLE ISOTOPES

Guido Arroyo Pauca

Sociedad Minera Austria Duvaz. Tte. Arístides del Carpio 1355, Lima, Perú (garroyo.gap@gmail.com)
Palabras clave: Meta-autunita, Pechblenda, vidrio volcánico, toba, volátiles.

1. Abstract

En las rocas volcánicas de la Fm. Quenamari (Puno), hay mineralización de U: meta-autunita, que es el producto final por oxidación de la pechblenda, debido a la profundización del relieve. Los isotopos estables explican el paso continuo de la mezcla del $\delta^{18}O$ e $\delta^{2}H$, de la pechblenda hasta la meta-autunita. Durante la evolución del vulcanismo que rellena la depresión tectónica de Macusani, se forma una flexura que controla los principales depósitos de uranio.

In volcanics rocks of Fm. Quenamari (Puno), there is U mineralization: meta-autunite, which is the final product by oxidation of pitchblende, due to the deepening of the relief. The stable isotopes explain the continuous passage of the mixture of $\delta^{18}O$ e $\delta^{2}H$, from pitchblende to meta-autunite. During the evolution of the volcanism that fills the Macusani tectonic depression, a flexure is formed that controls the main uranium deposits

2. Introducción

El Distrito Uranífero de Macusani (*DUM*), se ubica en la provincia de Carabaya, región Puno, al SE del Perú, a una cota promedio de 4400 m.s.n.m.; accesible por la Carretera Interoceánica; a una distancia de ≈220 Km al NNW de la ciudad de Puno.

Existen publicaciones desde 1970; el Instituto Peruano de Energía Nuclear (IPEN), descubre Uranio en el plateau volcánico de Quenamari en 1978. Los estudios son de Geología, Petrogénesis, Mineralización, dataciones, isotopos estables, etc.

3. Geología

El DUM se encuentra en la Cordillera Oriental; donde la Fm. Quenamari yace en discordancia sobre rocas de edad paleozoica:

GRUPO MITU; constituido por cuarcitas (*blancas*), areniscas, limolitas (*rojas*), y volcánicos andesíticos, tienen amplia distribución al E de la depresión (*nevado Allin Ccapac*); se depositó en un ambiente continental árido, de edad Pérmico superior a Triásico inferior; yace en discordancia angular sobre rocas metamórficas del paleozoico inferior.

FORMACIÓN QUENAMARI; es una secuencia de tobas e ignimbritas riolíticas, constituidas por cuarzo bipiramidal, sanidina, biotita, muscovita; andalucita, sillimanita, obsidiana (*0.01 a 4 mm*), monazita, apatito, turmalina, etc.; así como lapillis de diversos tamaños.

También hay en Macusani obsidianas de diámetro 5.0 a 10.0 cm, llamada "MACUSANITA".

Estructuralmente la Fm. Quenamari tienen amplia distribución en el flanco occidental de la Cordillera Oriental; está controlada por depresiones tectónicas: Macusani, Crucero y Picotani; estas depresiones son de carácter tensional (*graven*) de dirección andina: SE - NW, con fallas conjugadas E - W, las que han sido obliteradas por las últimas etapas del vulcanismo

Es una sucesión de unidades de enfriamiento o ciclos volcánicos; que corresponden a dos fases:

- FASE EXPLOSIVA, origina depósitos tipo lluvia de piroclásticos; forma en el terreno superficies de pendiente suave; con la presencia de lapillis, pómez de naturaleza riolítica las que gradan de la base al tope; igualmente de la cercanía a los focos de emisión (*proximal*) hacia los bordes (*distal*); así como líticos.
- FASE NUBE ARDIENTE, da lugar a rocas tipo ignimbritas; típicas por la disyunción columnar, con presencia de lapillis.

4. Información Geoquímica

Las tobas riolítas y los vidrios de obsidiana; han sido estudiados por 2 equipos: A. Clark y M. Pichavant; indican que las tobas son:

Fuertemente peraluminosas
A/CNK, incluido Li = 1.19 - 1.35
Corindón normativo superior a 2
Corindón normativo: tobas = 3
Macusanitas = 3 a más de 5
FeO_t/MnO y $Na_2O/K_2O > 1$

La presencia de obsidiana o MACUSANITA, es muy importante; se ha demostrado que las tobas y la Macusanita son equivalentes, pero no coetáneas, porque corresponden a las últimas erupciones que han sido erosionadas.

Además dan información relevante de la composición del magma.

4.1. Volátiles; se observa que la macusanita presenta más volátiles que la toba, excepto por el agua.

Pichavant	**Macusanita** (%)	**Toba (%)**
P_2O_5	0.50	0.36
B_2O_3	0.54	0.03
Li_2O	0.76	0.17
F	1.34	0.41
CO_2	0.08	0.00
H_2O	0.44	1.51

Explica la desgasificación de las tobas explosivas, al emplazarse lo hacen a una temperatura más baja sufrieron un enfriamiento muy violento al estar en contacto con la atmósfera; que origina la alteración argílica de la matriz.

Las tobas efusivas o nube ardiente, se habrían desgasificado parcialmente manteniendo aún volátiles, se emplazaron a una temperatura mayor que las tobas explosivas.

4.2. Fertilidad de Uranio; se observa que las obsidianas, tienen valores altos en U, en tanto el Th está empobrecido; esto quizá se deba a que la macusanita, corresponde a un vulcanismo más joven.

	Fm. Quenamari				**Macusanita**		
U (ppm)	5.6 - 18.0	10.2	10.0 - 30.0	8.10 - 11.30	18.44	6.8	19.55 - 27.40
Th (ppm)	8.6 - 13.3	3.7		9.80 - 11.85	2.27	3.0	0.09 - 2.00
	IPEN	Arribas	A. Clark	Pichavant	IPEN	Arribas	Pichavant

4.3. Isotopos Estables; se tienen resultados de $\delta^{18}O$ e $\delta^{2}H$, de la meta-autunita; y la obsidiana o "macusanita", que refleja la composición del fluido silicatado del magma; por lo tanto refleja la composición isotópica del U^{+4} disperso en la matriz de las tobas efusivas tipo nube ardiente.

Se observa (*fig. 1*) que hay una gran dispersión de los valores de $\delta^{18}O$ y $\delta^{2}H$, en la meta-autunita de los diferentes prospectos mineralizados, que refleja los diversos estadios de mezcla con el agua meteórica que han oxidado la pechblenda para transformarse en meta-autunita. En tanto en la macusanita en $\delta^{18}O$ tiene muy poca dispersión.

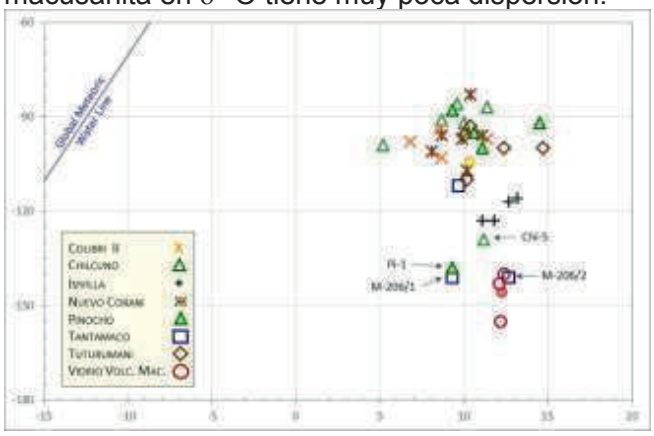


Fig. 1. Composición isotópica de la Meta-autunita; y de la obsidiana o "macusanita".
NOTA: los círculos llenos son promedios: Meta-autunita (*amarillo*) y Vidrio (*rojo*)

La muestra de Tantamaco (M-206/2) aún tiene los valores similares a la macusanita, lo que implica que hay una mezcla incipiente con las aguas meteóricas; las muestras (M-206/1) de Tantamaco y (Pi-1) de Pinocho están ligeramente empobrecidas en $\delta^{18}O$, que denota una mezcla inicial con las aguas meteóricas.

5. Mineralogía

En la CNEA (Argentina), se identificó la meta-autunita, es mineral predominante; posteriormente la Weeksita en forma subordinada; se ha observado ocurrencias de U asociado a Mn.

En Pinocho se observó pechblenda, donde la presencia de Fe, se debe a la alteración de la pirita y de la pechblenda (*por ello se observa en forma pulverulenta*), o sea la transformación de Fe^{+2} a Fe^{+3} y de U^{+4} a U^{+6}, de pechblenda – gummita – meta-autunita; notar también la presencia de Be y Li.

	Pinocho	**Chilcuno**	**Isivilla**	**Nuevo Corani**	**Tantamaco**	**Colibri II**	**Fuente**
	Pi-2	**Chi-6-1**	**Is-2**	**Mac-207/202**	**Mac-206**	**Clb-2-1**	**V. Li**
Fe_2O_3 %	0.59	0.09	0.21	0.05	0.48	0.1	Table 4.3-6
Be *ppm*	3,785	3,137	210	235	249	1,977	Table 4.8
Li ppm	177	7	10	121	135	6	Table 4.8
Mn ppm	68	170	21	161	131	29	Table 4.8

En C° Calvario se encontró meta-Autunita con hábito botroidal, los esferulitos alcanzaban hasta 2.00 cm; se trata de un pseudomorfismo, en este caso la meta-Autunita tiene el hábito típico de la pechblenda.

6. Controles de la Mineralización del Uranio

6.1. Estructural; las tobas Quenamari yacen en niveles sub-horizontales, con una inclinación hacia el NE (< *10*°), en el borde oriental presenta una

inclinación inversa (*2° a 5°*) hacia el SW; hay una flexura que es paralela a las fallas Antajahua (*oriental*) y Corani (*N*); que se origina por la subsidencia de los volcánicos en la depresión de Macusani y que a su vez da origen a fallas inversas de bajo ángulo.

6.2. Litológico; la mineralización de U está asociada a la fase efusiva o nube ardiente. Se tiene cuarzo ahumado (*negro*), debido a la radiactividad, que es una guía de la mineralización.

6.3. Fracturamiento; la mineralización está asociada a fracturas de dos tipos:

- SUB-VERTICALES; que constituyen los prismas de disyunción columnar; que agrupados forman un alineamiento estructural (¿tectónica precoz?), caso de Chapi Alto, donde es SSW - NNE
- SUB-HORIZONTALES; son fallas inversas y se generan próximos a la falla Antajahua, como Pinocho y Chilcuno VI.

6.4. Inclusiones Fluidas; se reportan "temperaturas de homogenización de 226 – 285 °C, ricas en CO_2 en las paredes de las fracturas" (V. Li, pag. 128); esta temperatura, da información relevante a la precipitación de la pirita y pechblenda; el fluido (*de origen volcánico, durante el enfriamiento de las tobas efusivas*) lixivió de la matriz de las tobas el U y Fe, donde la desvitrificación depende de la Temperatura y la Salinidad del fluido; así mismo alteró a arcillas la matriz; donde se han identificado illita y esmectita.

7. Modelo de Mineralización

En el emplazamiento, la FASE EXPLOSIVA, "pierde volátiles", por contacto con la atmósfera; se enfría más rápido, y la matriz se altera a arcillas.

La FASE EFUSIVA durante el ascenso de la columna y su posterior deposición por fluidez del sistema, "pierde pocos volátiles", su emplazamiento es a mayor temperatura, por tanto hay dos componentes intrínsecos: la Temperatura y el contenido de Volátiles.

Los volátiles ($S^{=}$, F^{-}, B^{-}, CO_2, H_2O, *etc.*), por la pendiente de emplazamiento, comienza a fluir en el nivel de la toba efusiva; a una velocidad lenta, los volátiles comienzan a poner en solución los cationes de mayor movilidad: U, Fe, etc., así como a desvitrificar a las obsidianas de la matriz; mientras los fluidos avanzan a favor de la pendiente; las tobas se van enfriando, y comienzan a formarse las diaclasas de enfriamiento o disyunción columnar, al arribar a estas aberturas los fluidos comienzan a ebullir, el solvente se evapora, pero el soluto se precipita, el Fe con el S, forma la pirita, proporcionando el medio reductor y de esta forma se precipita la pechblenda; la mineralización primaria es: U – Py; posteriormente cuando viene la erosión; el sistema se torna oxidante y empieza la transformación de la pechblenda en meta-autunita; el Fe migra más rápido que el U, en la fractura se transforma en meta-autunita y comienza a dispersarse en la toba que es la dispersión del mineral tal como se observa en la actualidad.

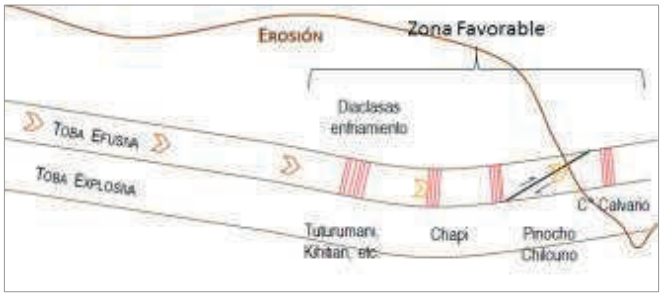


Fig. 2 Migración del fluido post-volcánico, hacia la flexura; formación de las diaclasas de enfriamiento y fallas inversas, donde se precipita el U.

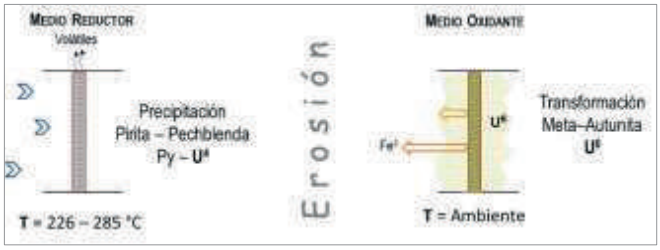


Fig. 3 Precipitación de pirita - pechblenda, en las fracturas (*medio reductor*); después de la erosión; se emplaza el medio oxidante, transformando la pechblenda en meta-autunita; en esta etapa el Fe se desplaza a mayor distancia que el U, aún se observa óxidos de Fe en Pinocho, Chapi Bajo, etc.

El sistema es tipo post-volcánico, y la asociación U – Py, se observa en Pinocho (*Huiquiza*), en Chapi Bajo. En Cº Calvario se encontró meta-autunita con el hábito de la pechblenda (*pseudomorfismo*).

La evolución se puede observar en los isótopos de $\delta^{18}O$ e $\delta^{2}H$, para ello se usan los promedios (Fig. 4)

8. Edad

Se ha encontrado mineralización en tres niveles y hay un cuarto nivel con mineral de alta ley (1.80% U_3O_8) las rocas han sido datadas:

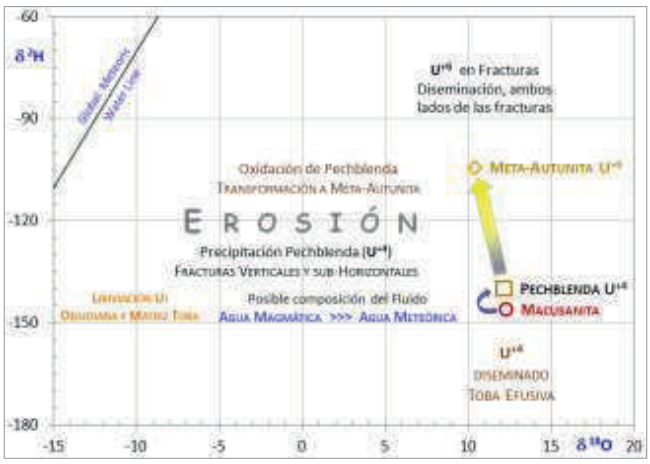


Fig. 4 Evolución usando los promedios de la dispersión isotópica

Nivel Mineralizado	Edad (Ma)	Fuente
Chapi Alto, C° Concharrumioc	6,9 - 6,8	Cheilletz-Arroyo
C° Calvario, Pinocho, Chilcuno, Quychine, quebrada Amariza o Calvario 3, etc.	7,5	Cheilletz-Arroyo
Chapi Bajo, Revancha	7,8	Cheilletz-Arroyo
Kihitian (*100 m. debajo rio Macusani, DDH PT-CH4-V*)	10,0	V. Li - Henkle

Se han realizado dataciones en 6 prospectos:

Nuevo Corani	> 500 ka	*Chilcuno*	*400 ka*
Pinocho	*220 y 160 ka*	Tuturumani	220 ka
Colibri	210 y 110 ka	Tantamaco	140 ka

Estas edades indican la transformación de la pechblenda (U^{+4}) en meta-autunita (U^{+6}).

Reflejan la evolución geomorfológica, por efecto del clima; son edades de los diferentes episodios de erosión de los valles en el plateau volcánico; profundización de los cauces por los grandes periodos pluviales; tal como se observa en las edades de Pinocho y Chilcuno.

8. Consideraciones finales

Se propone un modelo, que incrementa el potencial de uranio, en la flexura y ambos lados del eje paralelo a la falla Corani y Antajahua.

La presencia de U por debajo del río Macusani (DDH PT-CH4-V), es una evidencia del modelo de mineralización propuesto.

9. Conclusiones

- Existen 4 niveles mineralizados.
- La mineralización primaria: U – Py tendría una edad post vulcanismo de la toba efusiva.
- La mineralización primaria es de U – Py (U^{+4}); posteriormente se tiene la erosión que determina la transformación a Meta-autunita (U^{+6}).
- La información isotópica de $\delta^{18}O$ e $\delta^{2}H$, confirma esta hipótesis.
- Se propone un modelo de mineralización.

Fig. 5 Modelo de mineralización; ubicación de la flexura y prospectos; la zona sombreada es el área más favorable para la ocurrencia mineralización de Uranio (Geología: INGEMMET)

- La existencia de mineralización por debajo del río Macusani, corrobora el modelo.
- Se determina el área favorable en el sector oriental del campo volcánico de Macusani.

10. Agradecimientos

A la Dra. Maria Lau, por revisar; a la información científica de la Universidad de Queen's, Canadá; de Plateau Uranium Inc.; de CNRS-Francia e IPEN.

Referencias

Arribas, A. & Figueroa, E. Las mineralizaciones de uranio en las rocas volcánicas de Macusani (Peru), 41, Estudios Geológicos, 323

Cheilletz A.; Clark A.; Farrar E.; Arroyo G.; Pichavant M.; Sandeman H. (1992). Volcano-stratigraphy and $^{40}A/^{39}A$ geochronology of the Macusani field: monitor of the Miocene geodynamic of the Andes of southeast Peru. Tectonophysics, 205 (1992), 307-327

IPEN; inf. Internos; G. Arroyo; J. Barreda; E. Figueroa; G. Flores; W. Herrera; C. Kihien; C. Rogovich; F. Rosado; J. Valencia; etc.

Li V.; Queen's University, Kingston, Canada. The U Mineralization of the Macusani District, Southeast Peru: Mineralogy, Geochemistry, Geochronology and Ore-Genetic Model. PHD; april 2016.

O'Connor T., Stefan L., Plateau Uranium Inc; Clark A., Kyser K., Li V., Queen's University, Kingston, Canada; Macusani Uranium Deposits, Puno, Peru: Products of Episodic Late Pleistocene Periglacial Flooding. IAEA (URAM-2018)

M. Pichavant; J. Valencia; S. Boulmer; L. Briqueu. J.L. Joron; L. Marin; A. Michard; et al (1987). The Macusani glasses, SE. Peru: evidence of chemical fractionation in peraluminous magmas. Geochemical Society Special Publication.

Barnes V. E.; Edwards G.; Mclaughlin W.A.; Friedmann L.; Joensuu O.; 1970. Macusanite occurrences; age and composition, Macusani Peru. Geol. Soc. Am. Bull., 18; 1539–154

ISÓTOPOS DE Pb EN LOS DEPÓSITOS DE LA FRANJA DE EPITERMALES DE LOS VOLCÁNICOS DE LA CORDILLERA OCCIDENTAL AL OESTE DE HUANCAVELICA, PERÚ

Michael Valencia[1*], César Chávez[2,3] , Alex Santisteban[1***]**

[1] Instituto Geológico Minero y Metalúrgico – INGEMMET. Dirección de Recursos Minerales y Energéticos. Av. Canadá N° 1460. San Borja. Lima – Perú.) **mvalencia@ingemmet.gob.pe ***asantisteban@ingemmet.gob.pe.*
[2] Universidade de Brasilia – UnB. Laboratorio de Geocronología y Estudios Geodinámicos. Campus Darcy Ribeyro. Ciudad Universitaria. Brasilia DF - Brasil.**cchavezmac@gmail.com
[3]Southern Copper Corporation – Agencia en Chile – SCC. Exploraciones Chile. General Borgoño 934. Antofagasta – Chile. ***achavez@southerncopper.cl*

Palabras Clave: *Isotopos de Pb, Epitermales, Codillera Occidental.*

Abstract

Huancavelica epithermal deposits are located in the volcanics of the Western Cordillera of the Central Andes, and present an isotopic signature of Pb of the terrains and their metallogenetic relationships. The Bethania mineralizing fluids have a strong interaction with the Jurassic-Cretaceous silicoclastic rocks, which generate mineralization in the form of bodies and depth mantles. In La Virreyna, hydrothermal fluids interact with the Oligo-Miocene volcanic rocks, thus generating veins and bodies scattered in depth as well. While in Cahuiña they are strongly affected by the coastal batholith, generating enrichment in Cu, where it is expected to develop porphyry in depth.

Resumen

Los depósitos epitermales de Huancavelica se encuentran emplazados en los volcánicos de la Cordillera Occidental de los Andes Centrales, y presentan una signatura isotópica de Pb relacionada con el substrato, y posiblemente una injerencia del Terreno Paracas. Los fluidos mineralizantes de Bethania interaccionan con las rocas silicoclásticas Jurásico-Cretáceas, generadoras de mineralización. En La Virreyna, los fluidos hidrotermales interaccionan con las rocas volcánicas del Oligo-Mioceno, generando de esta manera vetas y cuerpos diseminados en profundidad. Mientras en Cahuiña están fuertemente afectados por el batolito de la costa, generando el enriquecimiento en Cu, donde se podría haber desarrollado pórfídos en profundidad.

1. Introducción

El margen oeste de Sudamérica está en subducción continua desde el Cambriano hasta la actualidad (Ramos & Aleman, 2000; Boeckhout *et al*., 2012, 2015; Loewy *et al.,* 2004; Ramos, 2010, 2018), donde los arcos magmáticos generaron depósitos minerales, en diferentes épocas metalogenéticas (Acosta et al., 2017; Perelló et al., 2003). Diversos trabajos han establecido la signatura isotópica del Pb del basamento y su interacción con cuerpos intrusivos (Musaka et al., 1990; Tosdal *et al*., 1999). El Pb es fácilmente medible en depósitos minerales, considerando las concentraciones - intrínsicamente bajas- de U con respecto al Pb y la composición similar del Pb en el mineral y el fluido hidrotermal (Tosdal *et al*., 1999). Los isotopos de Pb de sulfuros son ampliamente usados para estudios de fuentes de Pb (Tosdal *et al.,* 1999; Richards *et al.,* 1991). Así, este trabajo busca determinar las relaciones entre la mineralización de los yacimientos de este sector de la Cordillera y el posible substrato-fuente.

2. Marco Geológico Regional

Los yacimientos se localizan en la Cordillera Occidental, entre las provincias de Castrovirreyna y Paucar del Sara Sara (Figura 1). El substrato comprende rocas mesozoicas del Triásico al Cretáceo Superior, conformadas por la Fm. Chocolate de lavas andesíticas y niveles volcano-sedimentarios (Spikings *et al.,* 2016), estas son cubiertas por unidades silicoclásticas y carbonatadas del Jurásico-Cretáceo (Grupo Yura-Grupo Goyllarisquizga) y finalmente las capas rojas de la Formación Casapalca (Cenozoico). Las secuencias sedimentarias del basamento están

cubiertas por las formaciones Castrovirreyna y Caudalosa, y Gpo. Barroso (Salazar & Landa, 1993), todas estas unidades predominantemente volcánicas.

Bethania y La Virreyna forman parte de la Franja XXIII de depósitos epitermales de Au-Ag del Mioplioceno; mientras que Cahuiña de la Franja X de depósitos de pórfidos de Cu-Mo del Cretáceo Superior (Acosta et al., 2017). Los estudios petromineralógicos, en éstos yacimientos, nos muestran una mineralogía similar (Valencia *et al*.,2020).

silícea con biotita ligeramente alterada. La mineralización se encuentra en una veta de cuarzo con pirita, galena y esfalerita (Muestra 27m-MMT-012; Tabla 1).

Cahuiña: Emplazada en andesitas y meta-andesitas grises, porfiríticas, con niveles de *hornfels y están* cortadas por vetas de cuarzo con esfalerita, calcopirita, y pirita (Muestra 28m-MMT-018; Tabla 1). Las rocas corresponden a los Volcánicos María Elena, que se correlacionan con la Fm. Copara del Cretáceo Inferior, sobreyacidas por la Fm. Chúlec y el Gpo. Sacsaquero (De la Cruz. & Jaimes, 2003). El prospecto se encuentra

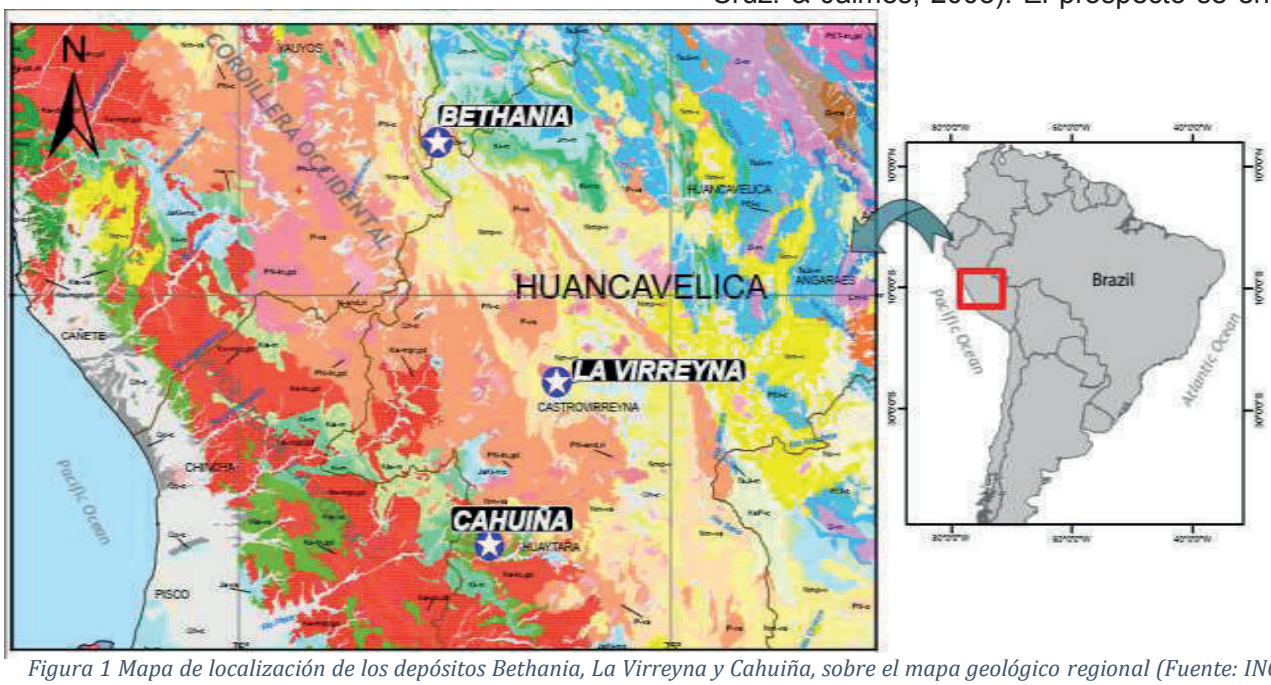


Figura 1 Mapa de localización de los depósitos Bethania, La Virreyna y Cahuiña, sobre el mapa geológico regional (Fuente: INGEMMET, Valencia et al., 2020). En rojo-rosado:intrusivos ; naranja-amarillo:volcánicos cenozoicos ;verde-azul : volc-sedimentarios mesozoicos

Sample	Lat.	Long.	Target	Unidad	Mineral	$^{206}Pb/^{204}Pb$	Error	$^{207}Pb/^{204}Pb$	Error	$^{208}Pb/^{204}Pb$	Error
26l-RMT-002	-12.636	-75.5318	Bethabia	Gpo Barroso	Galena	18.7376	0.003	15.6467	0.001	38.717	0.003
27m-MMT-012	-75.2538	-13.2093	La Virreyna	Fm Caudalosa	Galena	18.6627	0.003	15.6173	0.001	38.631	0.003
28m-MMT-018	-13.564	-75.417	Cahuiña	Fm. Sacsaquero	Galena	18.5323	0.003	15.6375	0.001	38.514	0.003

Tabla 1: Cuadro con la información general y ratios de $^{206}Pb/^{204}Pb$, $^{207}Pb/^{204}Pb$ y $^{208}Pb/^{204}Pb$ de las muestras analizadas en el presente trabajo.

4. Geología de los Depósitos

Bethania: Está emplazada en las tobas del Centro Volcánico Huayta (Grupo Barroso), que recubren a volcánicos de la Formación Alpabamba (correlacionable con la Formación Castrovirreyna), consisten en tobas de cristales de cuarzo y plagioclasa, en una matriz argilizada. La mineralización consiste en vetas de sulfuros con galena, calcopirita y pirita (Muestra 26l-RMT-002; Tabla 1). Regionalmente se advierte la presencia de rocas Jurásico-Cretáceas al este y norte

La Virreyna: Se encuentra en tobas riolíticas, de la Formación Caudalosa, con fenocristales de feldespatos argilizados (caolinita) en una matriz

al este del batolito de la costa (Figura 1).

5. Metodología

Se muestreó las estructuras mineralizadas de los yacimientos para la determinación de las fuentes de los metales, como: Au, Ag, Cu, Pb y Zn, a través de los isótopos de Pb; asumiendo que provienen del mismo fluido hidrotermal, por poseer un comportamiento geoquímico similar (Tosdal *et al,,* 1999; Henley *et al.,* 1984). Las muestras de galena (Tabla 1) fueron disueltas en ácido nítrico, las soluciones secadas y las sales purificadas usando un cromatógrafo de intercambio de iones (Thibodeau et al., 2012; Thibodeau et al., 2013).

Las medidas se tomaron en un espectrómetro de masa multicolor con el procedimiento descrito en Kamenov *et al.* (2004). Los errores reportados fueron calculados monitoreando la variación de NIST 981 menores de 0,003 (2Sigma) para estos valores (Tabla 1). Se utilizó el estándar NBS para control de errores: 206Pb/204Pb= ± 0.003; 207Pb/204Pb= ± 0.001; 208Pb/204Pb= ± 0.003.

6. Resultados

Los isótopos de Pb en galena (Tabla 1), del yacimiento Betania, presentan un *trend* de pendiente moderada (Figura 2). Los sulfuros de Bethania (26l-RMT-002), contenidos en el Gpo Barroso muestran un ratio $^{206}Pb/^{204}Pb$=18.73, más radioactivo respecto a los otros ratios ($^{207}Pb/^{204}Pb$=15,64 y $^{208}Pb/^{204}Pb$=38.71) que son moderados. El incremento del valor de $^{206}Pb/^{204}Pb$ podría deberse a un aporte de Pb de las rocas Jurásico-Cretáceas que afloran en este sector. La galena de Cahuiña (28m-MMT-018), en la Formación Sacsaquero, presenta valores menos radiactivos de $^{206}Pb/^{204}Pb$ =18.53 y se relacionan a un intrusivo; mientras que los valores de $^{207}Pb/^{204}Pb$=15,63 y $^{208}Pb/^{204}Pb$=38.51 son bajos y podrían obedecer a una potencial interacción entre granitoides carboníferos, y en menor proporción a rocas paleozoicas en profundidad. La galena de La Virreyna (27m-MMT-012) presenta valores intermedios de $^{206}Pb/^{204}Pb$= 18,66; $^{207}Pb/^{204}Pb$ = 15,6173 y $^{208}Pb/^{204}Pb$=38.631, éstos muestran claramente una interacción con un substrato posiblemente de edad Paleozoica, que no ha sido reconocida en la zona.

7. Discusión

En un sistema pórfido–epitermal, la composición isotópica del Pb se incrementa desde el núcleo del pórfido hacia la parte externa, en consecuencia los sistemas epitermales muestran valores altos de isótopos de Pb respecto a los valores en los pórfidos; sin embargo, existen sistemas muy complejos como consecuencia de la interacción de fluidos de fuentes variables (Bouse *et al.,* 1999; Richards *et al*., 1991, Tosdal *et al.,* 1999). En Bethania (26l-RMT-002) hay una fuerte interacción del substrato, de rocas Jurásico-Cretáceas, por su valor de $^{206}Pb/^{204}Pb$, con una segunda fuente de rocas sedimentarias paleozoicas (Figura 2). Esto sugiere una potencial precipitación de sulfuros en los niveles silicoclásticos y calcáreos debido a la porosidad y permeabilidad que poseen, además del contenido de materia orgánica (Wang, 2010). Los valores de los isotopos de Pb, obtenidos en este estudio, son similares a los obtenidos por Tosdal et al. (1999) para yacimientos epitermales.

En La Virreyna (27m-MMT-012), los valores isotópicos intermedios de los ratios $^{206}Pb/^{204}Pb$,

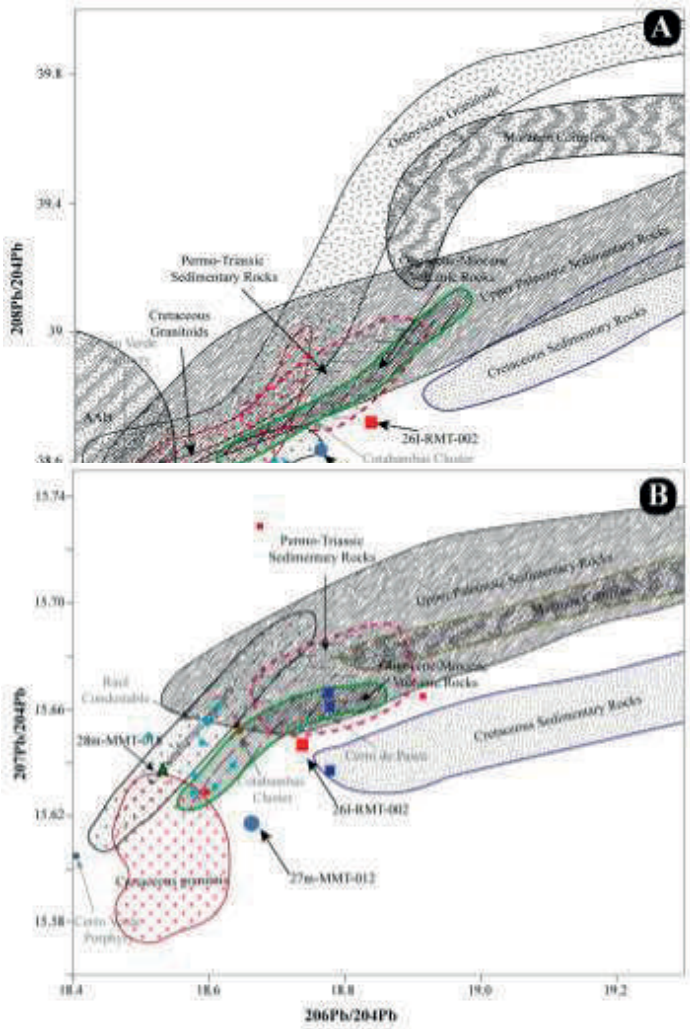


Figura 2: A, Campo Thoriogénico para $^{208}Pb/^{204}Pb$ vs $^{206}Pb/^{204}Pb$ y B, Campo Urogénico $^{207}Pb/^{204}Pb$ vs $^{206}Pb/^{204}Pb$ muestran los diagramas de evolución y sus potenciales fuentes que afectan los epitermales de Huancavelica. Se muestran los campos para rocas intrusivas sedimentarias y metamórficas. Thomson et al., 2004 ; Tosdal et al., 1999 ; Mamani et al., 2010 ; Mukasa, 1986 ; Loewy et al., 2004.

muestran un *trend* vertical, que nos indicaría la interacción del fluido mineralizante con las rocas volcánicas del Oligoceno. Como una segunda fuente tendríamos la interacción de los fluidos mineralizantes con rocas intrusivas carboníferas (Figura 2A), probablemente alojadas en profundidad.

En Cahuiña (28m-MMT-018) se tendría la interacción del Batolito de la Costa (posiblemente relacionada a un sistema porfirítico en profundidad) con fluidos hidrotermales, esto corroborado por la presencia de los proyectos cercanos de Corihuarmi, Coripampa, Cori-Huacollo, donde este último corresponde a un sistema pórfido-epitermal (Valencia *et al*.,2020), estos proyectos se ubican en

la Franja X de depósitos de pórfidos de Cu-Mo del Cretáceo Superior.

Chiaradia (2014) concluye que el enriquecimiento mineral está vinculado directamente al espesor de la corteza continental, basado en los valores isotópicos encontrados para Cerro Verde (Musaka *et al.,* 1990), donde las intrusiones relacionadas a la mineralización se encuentran directamente influenciadas por el Terreno Arequipa-Antofalla, cuyas causas serían el espesor de corteza y/o a la composición de la misma (Ramos, 2010). Para el área de estudio el responsable sería el Terreno Paracas (Ramos, 2008).

8. Conclusiones

-Los fluidos mineralizantes de Bethania muestran una fuerte interacción con las rocas silicoclásticas (Jurásico-Cretáceas), lo cual podría generar mineralización en cuerpos.

-En el caso de La Virreyna, los fluidos hidrotermales poseen una fuerte relación con las rocas volcánicas del Oligo-Mioceno, habiendo generado la mineralización encontrada.

-Los fluidos mineralizantes del yacimiento Cahuiña parecen estar fuertemente relacionados al batolito de la costa, éste habría generado el enriquecimiento en Cu con la presencia de calcopirita, esfalerita y pirita (Valencia *et al.*2020).

-El sistema epitermal localizado en la zona de Cahuiña podría estar relacionado a un sistema porfirítico en profundidad, debido a la interacción de los fluidos hidrotermales con el Terreno Paracas, como se ha reconocido en el *cluster* de depósitos en la región (Valencia *et al.*2020)

Agradecimientos

Se agradece el respaldo del Instituto Geológico Minero y Metalúrgico- INGEMMET para la ejecución del presente trabajo..

Referencias

Acosta, J., & Sempere, T. 2017. Evolución Tectónica & Metalogénesis del Perú. Horizonte Minero Perú. p: 1-4.

Boekhout, F., Roberts, N.M.W., Gerdes, A., Schaltegger, U., 2015. A Hf-isotope perspective on continent formation in the south Peruvian Andes. Geol. Soc. London, Spec. Publ. 389, 305–321. https://doi.org/10.1144/SP389.6

Bouse, R., Ruiz, J., Titley, S., Tosdal, R., Wooden, J., 1999. Lead isotope composition of the Late Cretaceous and early Tertiary igneous rocks and sulfide minerals in Arizona: Implications for the sources of plutons and metals in porphyry copper deposits: Economic Geology. 94: 211-244.

Chiaradia, M. 2014. Copper enrichment in arc magmas controlled by overriding plate thickness. Nature Geosci 7 : 43–46

De la Cruz, N. & Jaimes, F. (2003) - Memoria descriptiva de la revisión y actualización del cuadrángulo de Santiago de Chocorvos (28-m), Escala 1:50 000.

Henley, R.W. Truesdell, A.H., Barton, P.B., Whitney, J.. 1984. Fluid-mineral equilibria in hidrothermal systems : Society of Economic Geologists, Reviews in Economic Geology. 1 : 267p

Kamenov, G. D., Mueller, P. A., and Perfit, M. R., 2004, Optimization of mixed Pb-Tl solutions for high precision isotopic analyses by MC-ICP-MS: Journal of Analytical Atomic Spectrometry, v. 19, no. 9, p. 1262-1267.

Loewy, S.L., Connelly, J.N., Dalziel, I.W.D., 2004. An orphaned basement block: The Arequipa-Antofalla Basement of the central Andean margin of South America. Bull. Geol. Soc. Am. 116, 171–187. https://doi.org/10.1130/B25226.1

Mamani, M., Wörner, G., Sempere, T., 2010. Geochemical variations in igneous rocks of the Central Andean orocline (13°S to 18°S): Tracing crustal thickening and magma generation through time and space. Bull. Geol. Soc. Am. 122, 162–182.

Musaka, S.B. 1986. Common Pb isotope compositions of the Lima, Arequipa and Toquepala segments in the Coastal batholith, Perú: Implications for magmagenesis. Geochemica et Cosmochimica Acta. 50: 771-782.

Mukasa, S.B., Vidal, C. E. & Injoque-Espinosa, J., 1990.Pb isotope bearing on the metallogenesis pf sulfide ore deposits in central and southern Peru: Economic Geology, 85: 1438-1446.

Perelló, J., Carlotto, V., Zárate, A., Ramos, P., Posso, H., Neyra C., Caballero A., Fuster, N., Muhr, R. 2003. Porphyry-Style Alteration and Mineralization of the Middle Eocene to Early Oligocene Andahuaylas-Yauri Belt, Cuzco Region, Peru. Economic Geology ; 98 (8): 1575–1605.

Ramos,V.A., Aleman, A., 2000. Tectonic evolution of the Andes. In: Cordani, U.G., Milani, E.J., Thomaz Filha, A., Campos, D.A (Eds.), Tectonic Evolution of South America. 31st International Geological Congress, Rio de Janerio, pp. 635–685

Ramos, V.A., 2018. Tectonic Evolution of the Central Andes: From Terrane Accretion to Crustal Delamination. Am. Assoc. Pet. Geol. 1–34.

Ramos, V. 2010. The Grenville-age basamento the Andes. Journal South America Earth Sciences 29 :77-91.

Ramos, V.A., 2018. Tectonic Evolution of the Central Andes: From Terrane Accretion to Crustal Delamination. Am. Assoc. Pet. Geol. 1–34.

Richards, J., McCulloch, M., Chappell, B., Kerrich, R. 1991. Sources metals in the Porguera gold deposits, Papua New Guinea: Evidence from alteration, isotope and noble gas geochrmestry: Geochimica et Cosmochimica Acta, 55: 565-580.

Salazar, H. & Landa, C. (1993) - Geología de los cuadrángulos de Mala, Lunahuaná, Tupe, Conayca, Chincha, Tantará y Castrovirreyna. INGEMMET. Boletín. Serie A: Carta Geológica Nacional, 44, 96 p.

Spikings, R., Boekhout, F., Chiaradia, M., 2016. Characterization of Triassic Rifting in Peru and implications for the early disassembly of western Pangaea. Gondwana Research, 35:124-146.

Thibodeau, A. M., Chesley, J. T., and Ruiz, J., 2012, Lead isotope analysis as a new method for identifying material culture belonging to the Vázquez de Coronado expedition: Journal of Archaeological Science, v. 39, no. 1, p. 58-66.

Thibodeau, A. M., Habicht-Mauche, J. A., Huntley, D. L., Chesley, J. T., and Ruiz, J., 2013, High precision isotopic analyses of lead ores from New Mexico by MC-ICP-MS: implications for tracing the production and exchange of Pueblo IV glaze-decorated pottery: Journal of Archaeological Science, v. 40, no. 7, p. 3067-3075.

Tosdal, R., Wooden, J., Bouse, R., 1999. Pb isotopes, Ore deposits and Metallogenic Terranes. In Application of Radiogenic Isotopes to Ore Deposits Research and Exploration. Society Economic Geologits, p. 1-26.

Valencia, M., Santisteban, A., Marchena, A., León, L. 2020. Características Geológicas y Geoquímicas de los depósitos minerales de la Faja Magmática Cretáceo-Paleógena entre Huancavelica y Tacna – Bloque Norte. INGEMMET. Boletín. Serie B: Geología Económica, 168 p. < https://www.ingemmet.gob.pe/programa-de-metalogenia1>

Wang, Y., 2010. Physical and chemical characteristics of the host rocks in controlling the mineralization of the Chinkuashih high-sulfidation gold–copper deposits, northeastern Taiwan. Journal of Geochemical Exploration 10, 61-68

Depósito de oro y plata en unidades sedimentarias, caracterización local y alcances generales de exploración (Shahuindo - Cajamarca, Perú)

Gold and silver deposit in sedimentary units, local characterization and general scopes of exploration (Shahuindo - Cajamarca, Peru)

Freddy Huisa[1], Cesar Alvarez[1], Alejandro Manrique[1], Nilton Chariarse[1]

[1] Pan American Silver Perú SAC, Av.Floresta 497, Oficina 301, San Borja, Lima 27, Perú

1. Resumen

En Shahuindo, el análisis de lineamientos estructurales, ha permitido plantear la existencia de al menos dos sistemas de deformación, Algamarca con una mineralización del oligoceno y Shahuindo con una mineralización del Mioceno. Estos esfuerzos con movimiento combinado sinestral y dextral en las componentes E-W, reactivaron los lineamientos precursores NE-SW y NW-SE para la deposición de las distintas secuencias de mineralización.

De acuerdo a los 130 mil metros de perforación, la asociación geoquímica señala la posible existencia de dos sistemas mineralizados en sobreimposición (polimetálico - epitermal), éste último asociado a una silicificación el cual ayuda a que las secuencias pelíticas del Carhuaz sean favorables a ser mineralizados.

En la búsqueda para la ampliación de recursos con perforación de las principales estructuras mineralizadas como Santa Rosa, San José, Huangamarca; actualizaron las reservas probadas a 1201.4 Koz Au, con ley de 0.50 g/t; ratio promedio Au/Ag de 12/1 en la zona de óxidos.

2. Abstract

In Shahuindo, the analysis of structural lineaments has allowed to establish the existence of at least two deformation systems, Algamarca with an Oligocene mineralization and Shahuindo with a Miocene mineralization. These tectonic stresses, combined with dextral and sinestral movement in the E-W components, reactivated the precursor lineaments NE-SW y NW-SE for the deposition of the different mineralization sequences.

According to the 130 thousand meters of drilling, the geochemical association points out the possible existence of two mineralized systems in superimposition: polymetallic and epithermal. The second one associated with a silicification, which helps to the Carhuaz pelitic sequences to be favorable for a mineralization.

In the search for the expansion of resources with drilling in the main mineralized structures such as: Santa Rosa, San José, Huangamarca; proved reserves were updated to 1201.4 Koz Au, with a grade of 0.50 g / t; Average Au / Ag ratio of 12/1 in the oxide zone.

3. Introducción

Los trabajos de exploración realizados a lo largo del arco volcánico y subvolcánico andino, mostraron el descubrimiento de varios y grandes yacimientos de oro, oro-plata y cobre–oro, *en ambientes volcánicos* los yacimientos epitermales de alta sulfuración, Yanacocha, Tantahuatay, Sipan y La Zanja; y al Sur, *en ambientes sedimentarios* de la franja mesozoica los yacimientos como Santa Rosa, La Virgen, El Toro, La Arena y ahora incluido también Shahuindo, alojados en rocas silicoclásticas, aunque de menor volumen.

Shahuindo, un yacimiento poco común, que se encuentra principalmente en rocas de la Fm Carhuaz, unidad que en varias zonas del Perú actúa como rocas nada favorables para la mineralización, ahora es tomado como un nuevo metalotecto para la búsqueda de nuevos recursos.

4. Entorno geológico

Shahuindo se encuentra a 60 km al sureste de la ciudad de Cajamarca, dentro de la franja sedimentaria mesozoica de los andes del norte del Perú. En esta franja, diversos prospectos con mineralización epitermal de metales preciosos (Au) están asociados a zonas de cizallamiento compresivo (Jacay J).

En la Acumulación Shahuindo (agrupación de concesiones), las secuencias sedimentarias, presentan estructuras principales y secundarias por efecto de las distintas tectónicas acaecidas en la región, las cuales definen zonas de mineralización

de sistemas distintos. El análisis sugiere la ocurrencia de al menos 2 eventos importantes:

Un primer, donde se generan las estructuras que hospedan a las vetas de Algamarca al NE; la generación de estas estructuras corresponde a un evento tectónico importante, que como hipótesis, se le ha asignado al momento tectónico Inca III, a finales del Oligoceno; durante esta etapa se genera la deformación de la secuencia sedimentaria representada por plegamientos y estructuras de imbricación NW-SE; además de la incidencia de la generación de las estructuras que hospedan la mineralización en Ag-Au-Cu, en una serie vertical dentro de las unidades del Chimú (Algamarca); mientras que las otras estructuras de segundo orden como las tipo E-W y N-S, corresponden a series conjugadas (Fig N° 1).

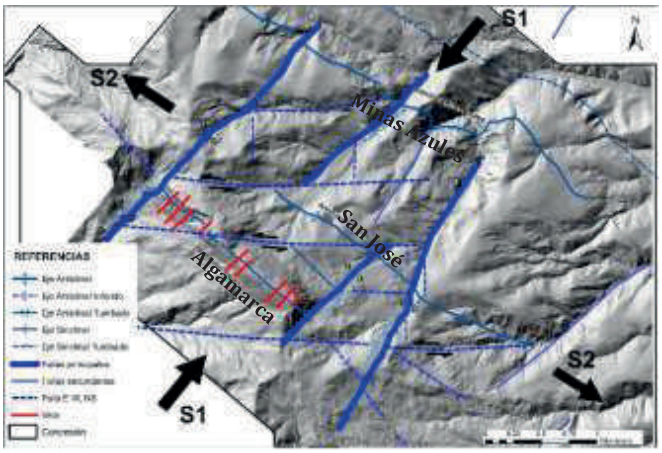


Fig. 1. Un primer evento, causante de las principales estructuras generadas por compresión que controlan la mineralización de las vetas del cerro Algamarca (similar a un arreglo Riedel Sinestral (Transpresivo).

La segunda etapa, corresponde a un cambio en la componente de los esfuerzos. De acuerdo a la orogenia incaica IV, los pulsos involucrados en el emplazamiento, cortan a las series mineralizadas del Chimú, representadas por la diorita 26 Ma (Amireault, 2009). En el Quechua I, dentro de la misma región, se desarrollan grabens y zonas de depresión, además de la reactivación de los planos axiales de los principales pliegues y planos de falla inversa, el cual es aprovechado por la ascensión de pulsos calcoalcalinos como la dacita 16 Ma (Hodder, 2011), que es el responsable del fracturamiento y brechamiento las rocas del Carhuáz. Y a finales de la misma orogenia, se produce la migración de fluidos mineralizantes de la serie Au-Ag, que se hospedan en los planos axiales de San José (Shahuindo) y Minas azules (Fig N° 2).

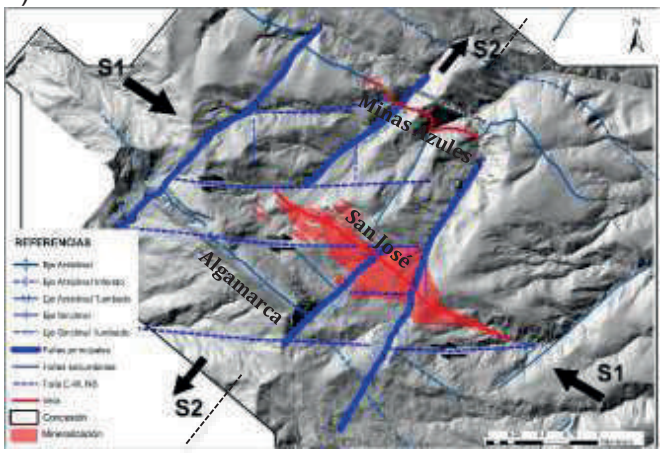


Fig. 2. Un segundo evento, causante de las principales estructuras mineralizadas, generadas por compresión de tendencia NW-SE que controlan la mineralización de la zona de Shahuindo (similar a un arreglo tipo Riedel, dextral (Transpresivo).

De acuerdo a las observaciones de campo y de sondajes, la serie de este último evento mineralizante es la responsable de cortar a todo el sistema.

El corredor principal Shahuindo, está bien controlado por una falla de basamento de rumbo NW-SE, que además controla la orientación de estructuras principales en la franja de plegamiento-escurrimiento.

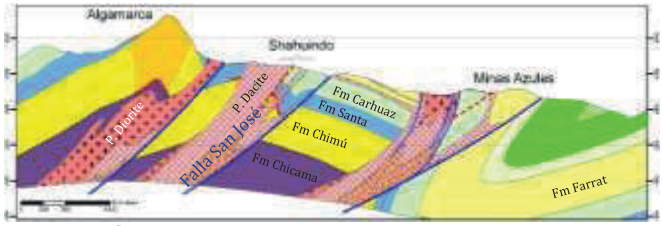


Fig. 3. Sección geológica transversal, exponiendo las ocurrencias de mineralización.

5. Mineralización de oro.

5.1. Visión general

Shahuindo es una mina de oro a cielo abierto con lixiviación en pilas. La producción comercial comenzó en el 2016 con una vida útil de la mina actualmente estimada hasta el 2028. Los controles de mineralización incluyen fallas, contactos ígneos (Lado NW), diques, brechas y fracturas, algunos que son relacionados a características geométricas de pliegues (limbos escarpados), superficies axiales. La principal franja mineralizada de Shahuindo fue controlada por una zona de falla escarpada de rumbo NW-SE (San José, Santa Rosa, Huangamarca), intersectada por fallas

transversales NE-SW (Choloque y La Cruz) y otros conjugados N-S (Chalarina y San Lorenzo). La presencia de dichas fallas permite una mineralización de óxidos y sulfuros, los cuales se alojan en las unidades más permeables. El oro se extrae desde las areniscas y limolitas de la Fm. Carhuaz y Farrat.

La alteración se produce generalmente en forma de un ensamble de sílice, pirofilita y sericita, el cual sugiere una interpretación de sulfuración intermedia (Hodder, 2010).

La oxidación está asociada a jarosita, hematita y goetita, estos óxidos son el producto de la alteración supérgena de sulfuros primarios tales como pirita, esfalerita, tetraedrita y covelita; el oro se libera mediante este proceso y ocurre como diseminaciones y rellenando fracturas.

El análisis de los 130 mil metros de perforación realizados dentro del tajo por el método, Au+ICP+Hg (ICP - multielementos), muestra una correlación positiva en *óxidos* del Au, con el As, Sb, que reflejan las evidencias de la escorodita. Una segunda asociación con Fe señala la presencia de Jarosita y hematita. Otros asociados Zn y Cd, indicando una posible asociación con un sistema polimetálicos. La correlación en *sulfuros* el Au-As, Fe-S, Ag-Sb, seguidos de Hg y Cu, señala la presencia de pirita, arsenopirita, tetraedrita, calcopirita. Una segunda asociación conformada por Cd, Zn y Pb que sugiere una proximidad polimetálica profunda preexistente (Fig. N° 4).

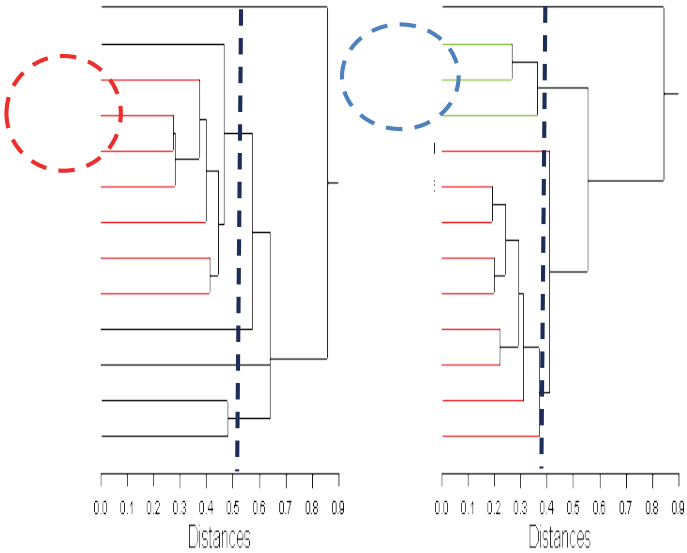


Fig. 4. Agrupación jerárquica Pearson para la zona de Óxidos (izquierda) y Sulfuros (derecha).

5.2. Mineralización de Oro y Plata.

En la zona de óxidos, el oro y la plata se asocian a la silicificación en presencia de la jarosita y hematita. En la zona de reducción, el oro es típicamente de grano extremadamente fino. La pirita de grano fino forma una asociación cercana con la mineralización de oro y se presenta como diseminaciones, vetillas y cuerpos semi-masivos de reemplazo. La Tetrahedrita, esfalerita, galena, arsenopirita, estibina, y covelina también han sido reportados, adheridos a la zona de piritas (Hodder 2010). Aunque la plata nativa ha sido identificada en la zona de San José y en la histórica mina Shahuindo, estos generalmente se encuentra en sulfosales.

El ratio de la plata en proporción al oro tiene un promedio de 12/1 en la zona de óxidos del depósito, y de 35/1 dentro de la zona de reducción. Este ratio es reflejado por la lixiviación fuerte de la plata en los óxidos, cerca de la superficie, generando un enriquecimiento supergénico en la base de la oxidación (Fig. N° 5).

Trazas de arsenopirita, calcopirita, esfalerita, y galena están mejor desarrolladas a lo largo de la zona de reducción.

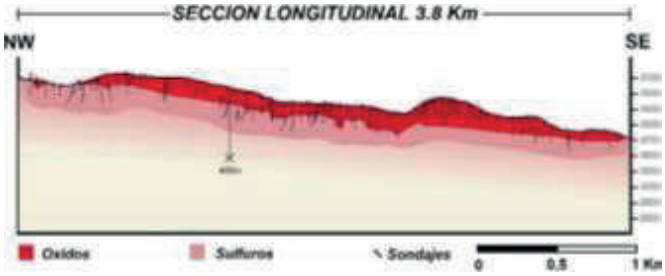


Fig. 5. Sección longitudinal con estados de mineralización en profundidad.

6. Búsqueda y ampliación de recursos.

La anomalía de oro en el yacimiento Shahuindo alcanza hasta los 6km de longitud, y en la perforación se ha encontrado la mineralización aurífera hasta a un poco más de 400 mts de profundidad. Las dimensiones de la zona de recursos abarcan una longitud de casi 4km, hasta 400 mts de ancho, y una profundidad de 150mts, mayormente en la zona de Óxidos.

En las campañas de perforación realizadas en los últimos años, actualizaron las reservas, la última publicación con datos oficiales al 30 de Junio del 2020 en la web, señalan 1201.4 Koz Au, con ley de 0.50 g/t y de 16.1 Koz Ag con ley promedio de 7 g/t en reservas probadas; además de 750.6 Koz Au con ley de 0.47 g/t y de 10.4 Koz Ag con ley promedio de 7 g/t en reservas probables.

Estas actualizaciones son el resultado de las perforaciones, que apuntaron a la búsqueda de la continuidad de las principales estructuras mineralizadas (San José, Santa Rosa y Huangamarca), en especial debajo de la fase final del Tajo (Fase 8), que en su momento estuvieron colgadas.

A nivel local, los pozos cortaron estructuras con promedio de tendencia N125°, donde los sedimentos de la Fm. Carhuáz y Farrat, presentan plegamientos con mineralización alojada en la charnela y enraizadas en acuñamientos progresivos hacia niveles profundos. Estas estructuras prolongan de alguna manera el nivel de óxidos a escala local.

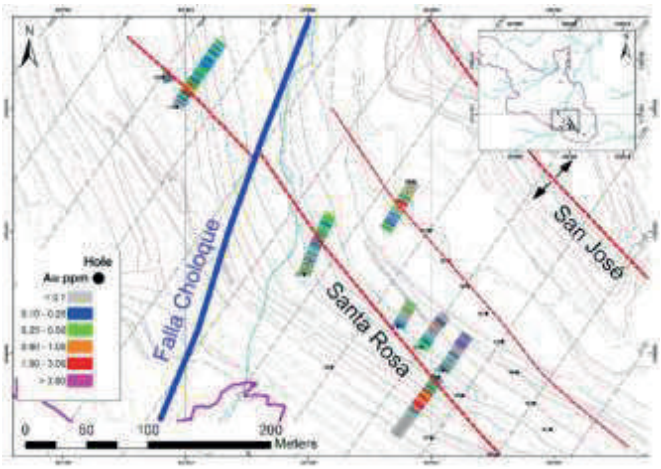


Fig. 6. Cortes de la Estructura principal del sistema Santa Rosa.

.

7. Discusión y conclusiones.

A nivel regional, El depósito de Shahuindo, se encuentra dentro de un dominio de escamas tectónicas que incluye una franja de cizalla generadas por compresión, que posteriormente asociado a una actividad magmática durante el Mioceno dio como resultado una franja de mineralización con importancia en las unidades de areniscas y limolitas de la Formación Carhuáz, especialmente en anticlinales tectonizados bajo un régimen transpresivo

En el sector central del depósito, la zona de contacto entre el cuerpo porfirítico dacítico asociado a la falla San José con las rocas sedimentarias del Carhuáz, controla la mayor parte de la mineralización de Au. Como se había mencionado anteriormente, las intersecciones de fallas transversales con estructuras paralelas al rumbo andino son importantes; por ejemplo, la mineralización de más altas leyes ocurre en la falla La Cruz que intersecta a la falla San José.

El yacimiento Shahuindo, abre las puertas para el estudio detallado más acerca de la formación Carhuáz como un nuevo metalotecto positivo muy a parte de la formación Chimú, el cual podría ser usado como guía de exploración de oro a nivel regional.

Las muestras de sondajes, señalan una mineralización económica predominante, en la zona de óxidos, los “clusters” van definidos por Au, As, Sb y la zona de sulfuros con un incremento de Cd, Pb, Zn. Esto define una diferencia de sistemas, con orígenes distintos como el epitermal sobreimpuesto al sistema polimetálico.

Los pozos de la última campaña 2020 muestran una mineralización controlada exclusivamente por los lineamientos de primer orden con cierres progresivos a profundidad (Sulfuros). De haber una segunda etapa de explotación, la extracción sería en subterraneo.

Referencias.

David Dávila, Estratigrafía y sedimentología del proyecto Shahuindo Au-Ag, 21p. Mayo 2012

Hodder, R.W, The Shahuindo epithermal gold occurrence Cajabamba Province, Peru: Petrographic reconnaissance & interpretation of shape and size, consulting report Prepared for Sulliden Exploration Inc, 98p. Mayo 31, 2010.

Dr. Steven Bussey and Dr. Eric P. Nelson, Plunge view of Algamarca anticline from Pampa de Arena; central zone of mineralized Shahuindo corridor seen below left of anticline, 69p. 2009.

Jacay J, Estilo estructural de los yacimientos minerales en la franja Huamachuco-Cajabamba: andes norperuanos

Perú: SEG Especial Publicación 11, pp. 313-318. Rivera, L., R., 1980, Geología de los Cuadrángulos de Cajamarca, San Marcos y Cajabamba, Boletín No. 31, Serie A. Carta Geología Nacional, Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, Lima, Perú, 67p.

Sistemas de inversión tectónica y su relación con los yacimientos minerales (6° - 8°30'S) de la Cordillera Occidental
Tectonic inversion systems and their relationships to the mineral deposits (6° - 8° 30'S) of the Western Cordillera

Javier JACAY[1], Freddy GOMEZ[2], Jaime GOMEZ[3], Ricardo PACHAS[4] e Israel SANGAY[1]

1 UNMSM: EAP Ingeniería Geológica, Av. Venezuela cd 34 s/n, Ciudad Universitaria, Lima - Perú. (jjacayh@unmsm.edu.pe; israel.sangay@gmail.com)
2 Geólogo de Exploraciones, Av thomas Marsano 2009, Lima-Perú. (huvergomez04@gmail.com).
3 INGEOSERMIN SRL. Urb. Hurtado Miller H-14, Cajamarca, Perú (Jaime.gomez@ingeosermin.com)
4 Compañía Minera los Andes Gold, Av. La Encalada 1388-805, lima, Perú (r_pachas@hotmail.com)

1. Resumen

La Cordillera Occidental de la parte norte de los andes peruanos está mayoritariamente estructurada en rocas cretáceas con cobertura volcánica cenozoica y forma parte de la Deflexión de Cajamarca, que presenta un sistema plegado y donde la mineralización del Mioceno se entrampo en estructuras (anticlinales) de inversión tectónica, previamente formadas durante el Paleoceno – Eoceno y allí se emplazó un sistema porfirítico, donde una unidad sedimentaria sirvió de receptáculo y otra de sello.

Palabras clave: inversión tectónica, geología estructural, estratigrafía, yacimientos minerales.

Abstract

The Western Cordillera of the northern part of the Peruvian Andes is mainly structured in Cretaceous rocks with Cenozoic volcanic coverage andf is part of the Cajamarca Deflection, which presents a folded system and where the Miocene mineralization is entrapped in tectonic inversion structures (anticlines) previously formed during Paleocene-Eocene and there a porphyritic system was located, where a sedimentary unit served as a receptacle and another as a seal.

Keyword: inversion tectonic, structural geology, stratigraphy, mineral deposits.

2. Introducción

La región norte del Perú (departamentos de Cajamarca y La Libertad) tiene una producción aurífera cercana al 50% de la producción nacional provenientes de yacimientos en terrenos volcánicos y/o sedimentarios, especialmente presentes en la Cordillera Occidental. La mayoría de los yacimientos tienen un minado a cielo abierto.

Esta región que comprende la parte septentrional de la Cordillera Occidental de los andes peruanos (Fig. 1) y alcanza una altitud entre 3500 a 4000msnm, muestra una sucesión estratigráfica que va desde el Jurásico Superior hasta el Neógeno Superior y es afectado por estructuras de inversión tectónica, que han generado fallas inversas asociadas a cabalgamientos y a una serie de anticlinales y sinclinales.

Esta inversión tectónica positiva ocurre cuando las fallas extensionales que limitan cuencas sedimentarias, en este caso la Cuenca Occidental, cambian el sentido de movimiento durante la tectónica compresiva cenozoica (Cobbing et al 1981, Noble et al 1990, Eude 2014) y parte de la Cuenca Occidental resulta elevada en diferente grado, a partir de diversos mecanismos de inversión tectónica, definiendo asi un cambio de elevación estructural relativo a nivel regional (Cobbing et al 1981, Eude 2014, Bazán 2017). Durante este proceso las fallas extensionales previas, de alto ángulo de buzamiento, son reactivadas como fallas compresivas (falla el Punrre).

En este trabajo se presentan los modelos de inversión tectónica mostrando su estilo estructural y su posible relación con algunos sistemas de mineralización de la región (Hilorico, Igor, Calamaca, entre otros).

3. Marco Geológico

La parte septentrional de los andes peruanos se caracteriza por presentar una gruesa sucesión sedimentaria mesozoica (Triásico, Jurásico y Cretácico), desarrolladas en una cuenca extensional de fuerte subsidencia durante su sedimentación (Cobbing, et al., 1981, Jaillard,1990).

3.1. Estratigrafía

Regionalmente se reconocen dos unidades tectonoestratigráficas una comprendida en el sector de la cuenca occidental y la otra en la región altiplánica disectada, cada una con una sucesión estratigráfica diferente.

Entre las unidades litoestratigráficas (Benavides 1956, Jaillard 1990) comprendidas en el sector de la cuenca occidental se pueden reconocer al Grupo Chicama, Grupo Goyllarisquizga, formaciones Inca, Chulec, Pariatambo y Jumasha (o equivalentes como las formaciones Yumagual, Mujarrun, Romiron, Coñor, Cajamarca y Celendín); de manera discordante al Eoceno, sobre unidades más antiguas y sobre la Formación Celendín, se tiene a las Capas Rojas de la Formación Chota; asimismo, discordantemente desde el Eoceno, se tiene al Grupo Calipuy siguiendo un rumbo generalmente andino. Toda esta sucesión sedimentaria y/o volcánica es cortada por numerosos cuerpos intrusivos del Neógeno.

3.2. Características estratigráficas del Grupo Goyllarisquizga

La franja comprendida entre 6° a 8°30' S. donde según Cossio (1964), Reyes (1980), y Wilson (1984), predominan afloramientos de secuencias siliciclásticas del Grupo Goyllarisquizga, los que tectónicamente son afectadas por un sistema de fallas inversas de rumbo sureste – noroeste a este – oeste e intruidos por numerosos cuerpos magmáticos, con edades entre 25 - 17 Ma (Navarro 2007 y 2014, Montgomery 2012). Estos intrusivos están relacionados a sistemas de mineralización, en los que la roca caja pertenece a diferentes niveles del Grupo Goyllarisquizga (Fig. 2).

La unidad litoestratigráfica del Grupo Goyllarisquizga, de esta parte de los andes norperuanos, es divisible en cuatro formaciones (Chimú, Santa Carhuaz y Farrat) las que litológicamente se componen de materiales competentes e incompetentes, es así como la Formación Chimú se compone de areniscas cuarzosas de granos grueso a medio, en estratos de hasta un metro de espesor, hacia la parte superior de esta unidad el espesor de los bancos de arenisca disminuyen y se intercalan con niveles delgados de limolitas y limolitas carbonosas para pasar transicionalmente a la Formación Santa que se compone de una intercalación de limolitas y margas con algunos delgados niveles de areniscas de granulometría fina; la Formación Carhuaz que es la más potente consta de una intercalación de potentes gruesos bancos de arenisca con limolitas, siendo una de las características en los niveles inferiores es la presencia de fósiles de gasterópodos, en la parte superior del Grupo Goyllarisquizga se puede observar un conspicuo nivel de areniscas cuarzosas que resalta en la topografía y representa a la Formación Farrat.

Al tope, sobre el Grupo Goyllarisquizga, se tiene a la Formación Pariahuanca donde se reconocen dos secuencias de orden menor; la inferior, compuesta de niveles delgados de areniscas cuarzosas de grano fino y de coloración marrón con presencia de laminaciones onduladas y rizaduras de corriente, y la parte superior, corresponde a limolitas con ocasionales niveles delgados de areniscas de granulometría fina.

4. Geología Estructural

Paleogeográficamente la sedimentación carbonatada del Cretáceo Superior (Turoniano), en la región norte de los andes peruanos, muestra un detritísmo, que da lugar al término de la plataforma carbonatada del Cretáceo Superior y el inicio de una sedimentación margosa correspondiente a la Formación Celendín del Coniaciano – Santoniano (Jaillard 1990) que es sobrepuesto discordantemente por la Formación Chota del Eoceno Inferior-Medio(?) (Noble et al 1990, Eude 2014)).

Las manifestaciones de los eventos magmáticos, se observan ya desde el Eoceno Inferior y corresponden estos a los niveles basales del volcanismo Cenozoico, formaciones Llama y Porculla (Grupo Calipuy), cuyas bases han sido datadas en 54.8 Ma (Noble et al 1990) y en 40.1 ± 2.6 Ma (Aude 2014) respectivamente; así mismo, los intrusivos porfiriticos ocurren entre el Paleoceno Superior-Eoceno Inferior, en la región de Minas Conga, donde los cuerpos intrusivos se emplazan entre 57 y 43 Ma (Llosa et al 1996). Un evento posterior en la franja de Santiago de Chuco a Huamachuco, corresponden a un episodio de emplazamiento comprendido entre 29 – 17 Ma., el que se prolonga a la región de Conga – Hualgayoc, donde los episodios son incluso más jóvenes (8.3 a 6.2 Ma).

El análisis de la carta geológica (Cossio 1964, Reyes 1980, Wilson 1984), imágenes satelitales, cartografiado local y las observaciones de campo, pone en evidencia un sistema estructural compuesto de pliegues (anticlinales y sinclinales), fallas inversas, cuyas trazas a diferentes escalas son muy continuas, esto responde a su estructuración en una rampa tectónica de alto ángulo (Dahlstrom 1969, Boyer & Elliot 1982). El sistema que es cortado en diferentes zonas por fallas cortas norte-sur o suroeste a noreste.

Los afloramientos muestran que los pliegues anticlinales asociados a estas fallas inversas (caso del anticlinal de Galeno), tienen un plano axial cercano a la vertical, con fuerte cizallamiento tectónico en las unidades superiores (Fm. Farrat) del frente de falla inversa; el núcleo de los anticlinales, que generalmente es la Formación Chimú, presentan sistemas de fracturas oblicuas y perpendiculares al eje de los pliegues (anticlinales de Galeno, Simbron, Igor, entre otros).

Asociado a este sistema de fallas inversas que constituyen la Deflexión de Cajamarca (Rousse et al 2003, Bazán 2017, Bazán y Lagos 2018) se emplazan cuerpos intrusivos (pórfidos), con una geometría elongada y paralela a las fallas inversas, los que están relacionados a la mineralización, sea al contacto con las rocas encajonantes o en una estructura anticlinal.

Discusión

Para determinar la edad de las estructuras tectónicas ligadas a la mineralización, entre los 6° y 8°30', se tiene los siguientes argumentos:

- Durante el Turoniano Superior el incremento de detritísmo da lugar a un cambio en el régimen de sedimentación, iniciándose la depositación de la Formación Celendín, lo que indica un proceso de levantamiento, en los sectores más occidentales;
- En el Eoceno Inferior (base de la Formación Chota), la presencia de clastos de rocas volcánicas en las areniscas de la Formación Chota, es un indicativo de un sistema de exhumación, que ocurría en los sectores occidentales para dar sus productos de erosión al sector oriental
- En el Mioceno, época del inicio de la estructuración mayor de los andes (Megard 1984), se tiene el emplazamiento de cuerpos intrusivos, los que se ubican en diferentes niveles estratigráficos y/o de manera cortante en las unidades del Grupo Goyllarisquizga.

La estructuración previa de anticlinales en la región ligada a sistemas de inversión tectónica, creo el entrampamiento de los fluidos mineralizantes en las rocas y en aquellas zonas de brechas, del frente de inversión intensamente fracturadas. Estas zonas tuvieron al tope niveles litológicos de lutitas y/o limolitas que jugaban el papel de sello al momento del entrampamiento de los fluidos hidrotermales.

Es así que se tiene una roca intrusiva, del Mioceno, generadora de fluidos hidrotermales y "portadora de la mineralización" y una roca "huésped", las areniscas (con porosidad primaria y/o secundaria de fracturas) del Grupo Goyllarisquizga y una roca sello, con niveles de lutitas y/o limolitas, de las formaciones Santa o Inca, según corresponda (Fig. 2).

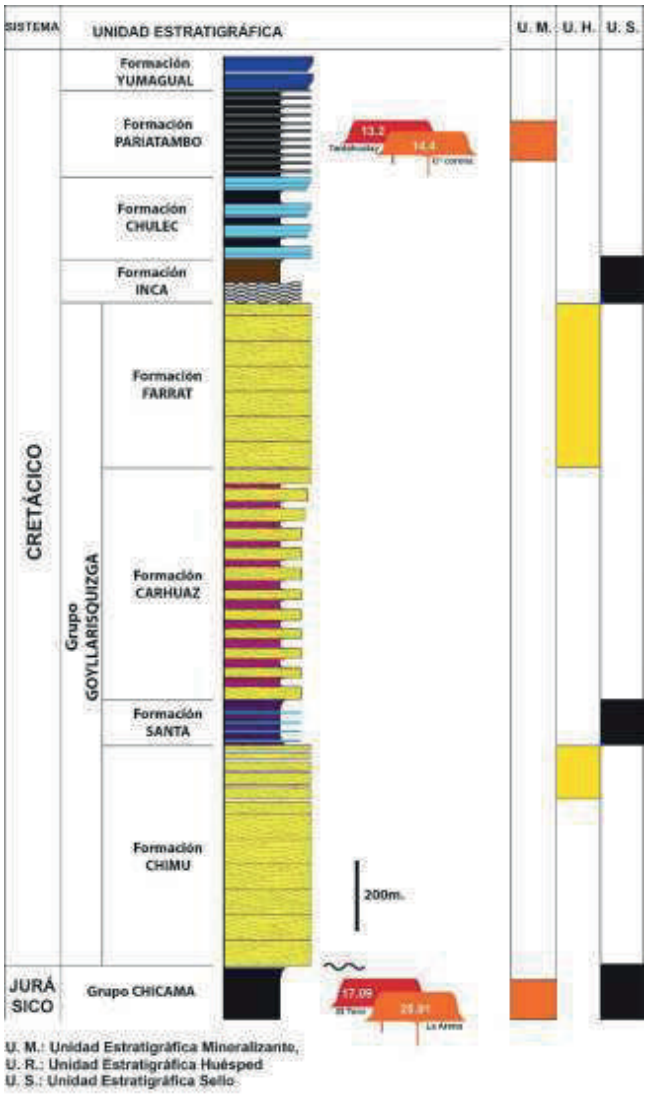


Figura 2: Columna estratigráfica para el Cretáceo Inferior, que muestra los niveles estratigráficos de emplazamiento de los cuerpos intrusivos relacionados a la mineralización, niveles de roca huésped de la mineralización y roca sello.

Conclusiones

Las estructuras cerradas (anticlinales) se habrían estructurado cuando menos durante el Eoceno.

Las unidades estratigráficas que presentan porosidad primaria y de fractura corresponden a la parte superior de la Formación Chimú y a la Formación Farrat; mientras que las formaciones Santa e Inca, por sus características litológicas (mayoritariamente lutitas y limolitas), habrían jugado como roca sello durante el proceso hidrotermal.

Los intrusivos (pórfidos) del Mioceno (portadores de la mineralización) se entramparon en las estructuras anticlinales, y generaron la mineralización dentro de éstas (trampa estructural).

Así se tiene un "sistema de mineralización", compuesto por un intrusivo (portador de la mineralización), una roca previamente estructurada (anticlinal, con porosidad primaria y/o secundaria) y una roca "sello" (impermeabilizante) que permite el entrampamiento de las soluciones hidrotermales y la consecuente formación del yacimiento.

Agradecimientos

Se agradece al Dr. Cesar Muñoz por la revisión de este resumen y al Departamento de Geología de la UNMSM por permitir la publicación de este trabajo, así mismo a Alcides Gallardo, por sus sugerencias previas al manuscrito.

Referencias

Bazan O. (2017) Evolución geotectónica de la Deflexión de Cajamarca y su implicancia en la Metalogenia del Norte del Perú. Publicación Especial N° 12, Resúmenes ampliados del XVIII Congreso Peruano de Geología. pp: 241-245.

Bazan O. y Lagos A. (2018) Fallamiento en Bloques y Desacople Cortical en la Deflexión de Cajamarca Durante la Tectónica Andina. XIX Congreso Peruano de Geología. Resúmenes Extendidos. Sociedad Geológica del Perú. 4p.

Benavides V. (1956) Cretaceous system in northern Peru. *Bulletin of the American Museum of Natural History* 108 (4), 353-494

Boyer S.E., & Elliott D. (1982) Thrust systems: *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, v. 66, p. 1196-1230.

Cobbing E. J., Pitcher W. S., Wilson J. J., Baldock J. W., Taylor W. P., McCourt W. J., and Snelling N. J., 1981. The Geology of the Western Cordillera of northern Peru, *Inst. Geol. Sci. Overseas* Mem. No. 5, p. 1-143.

Cossío A. (1964) Geología de los cuadrángulos de Santiago de Chuco y Santa Rosa. *Comisión Carta Geológica Nacional, Boletín*, 8, 69 p.

Dahlstrom C.D.A. (1969) Balanced cross sections. *Canadian Journal of Earth Sciences*, v6: p. 743-757.

Eude A. (2014) La croissance des Andes centrales du nord du Pérou (5-9°S): Propagation d'un prisme orogénique dans un contexte d'héritage tectonique et de subduction plane. These Doc. de l'Université de Toulouse, 322p.

Jaillard E. (1990) Evolución de la margen Andina en el norte del Perú desde el Aptiano superior hasta el Senoniano. *Boletín de la Sociedad Geológica del Perú*, 81, 3 - 13.

Llosa F, Lescuyer JL, Milesi JP (1996) Minas Conga: descubrimiento, exploración y marco geológico de los pórfidos Au-Cu en la región de Cajamarca. Segúndo Simposio Internacional del Oro, Comite Aurífero, Sociedad Nacional de Minería y Petroleo, Lima, pp 275–283.

Mégard, F. (1984) The Andean orogenic period and its major structures in central and northern Peru. J. Geol. Soc. Lond., 1, 893–900.

Montgomery, A.T. (2012) Metallogenetic controls on Miocene High- Sulphidation Epithermal Gold Mineralization, Alto Chicama District, La Libertad, Northern Perú. Ph.D thesis, Queen's University Kingston, Ontario, Canada, 455 p.

Navarro P. (2014) Correlación espacial, temporal y metalogénetica del magmatismo cenozoico del Grupo Calipuy del norte del Perú en base a nuevas dataciones. Boletín de la Sociedad Geológica del Perú, v. 109, pp. 7-11.

Navarro, P. (2007) - Características metalogenéticas de los yacimientos asociados al Grupo Calipuy en el norte del Perú, departamentos de la Libertad y Ancash. Boletín de la Sociedad Geológica del Perú, n. 102, pp. 79-100.

Noble D., McKee E., Mourier T. and Megard F. (1990) Cenozoic Stratigraphy, Magmatic Activity, Compressive Deformation, and Uplift in Northern Peru, *Geol. Soc. Am. Bull.*, 102(8), 1105-1113.

Reyes L. (1980) Geología de los cuadrángulos de Cajamarca, San Marcos y Cajabamba. *Bol. INGEMMET* N° 31, 67 pp.

Rousse S., Gilder S., Farber D., McNulty B., Patriat P., Torres V., and Sempere T. (2003) Paleomagnetic tracking of mountain building in the Peruvian Andes since 10 Ma, Tectonics, 22, 1048, doi:10.1029/2003TC001508

Wilson J. (1984) Geología de los cuadrángulos de Jayanca, Incahuasi, Cutervo, Chiclayo, Chongoyape, Chota, Celendín, Pacasmayo, Chepen. Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, Bol. 38, Serie A, carta geológica nacional, 104p.

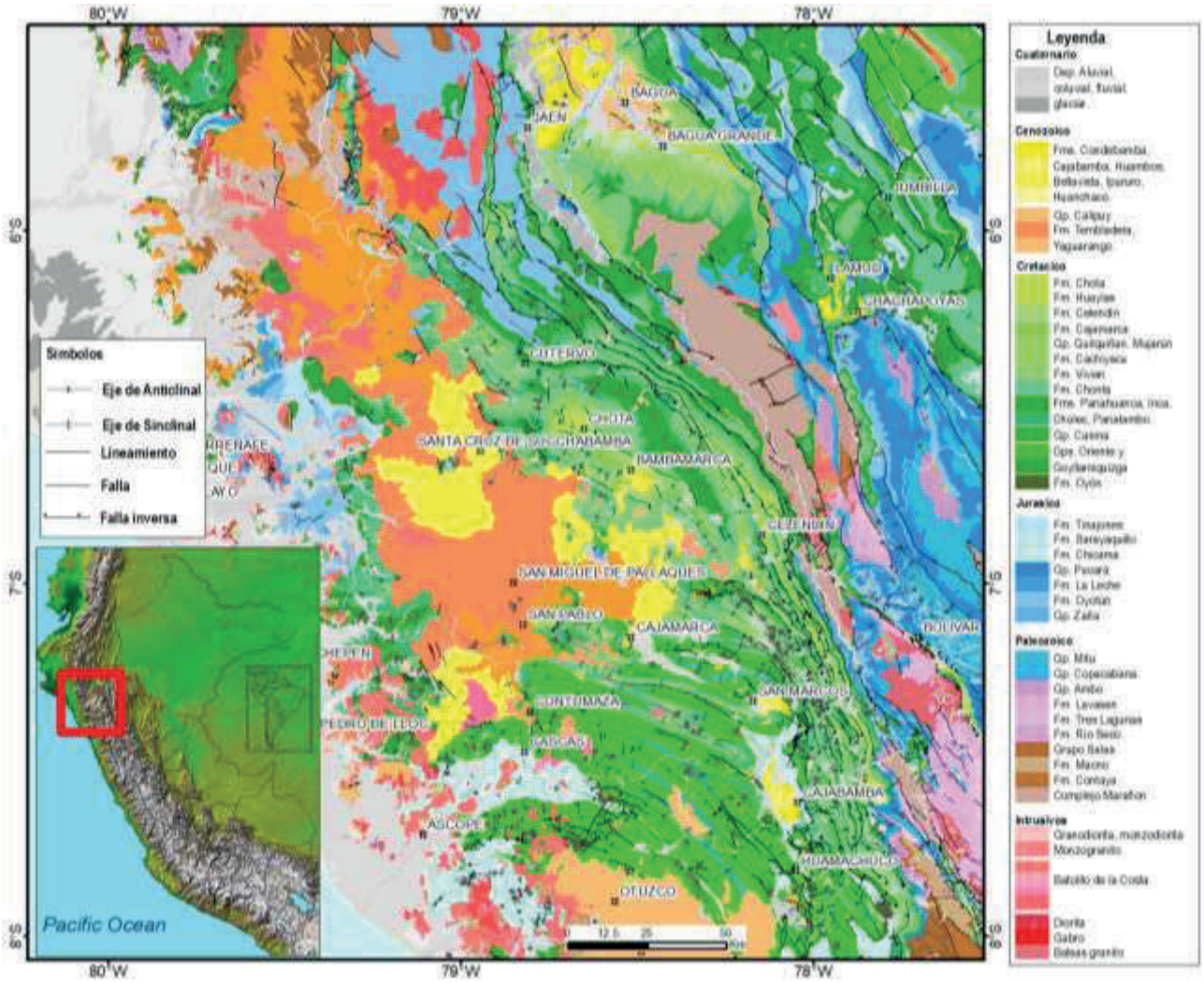


Figura 1: mapa de ubicación de la región estudiada (tomado de GEOCATMIN – INGEMMET).

GENERANDO VALOR EN EL YACIMIENTO TIPO VMS EN LA UNIDAD MINERA CERRO LINDO A TRAVÉS DE LA BÚSQUEDA DE NUEVOS DOMINIOS GEOLÓGICOS (VOLCÁNICO MINERALIZADO)

Jean Paul Bueno Carreón[1], Nickol Ivan Estrada Ramos[2], Jhonatan Lopez Alvarez[3]

[1] Nexa Resources S.A.A., dirección, Lima, Perú (jbueno@nexaresources.com)
[2] Nexa Resources S.A.A., dirección, Lima, Perú (nickol.estrada@nexaresources.com)
[3] Nexa Resources S.A.A., dirección, Lima, Perú (jhonatan.lopez@nexaresources.com)

1. Abstract

The mineralized volcanic is a new domain with economic value in the VMS-type deposit which is located between the sterile box rock and the massive sulfide; characterized by containing high values in Ag, Pb (Argentine Galena) and acceptable values in Zn (Sphalerite) and Cu (Chalcopyrite).
This new domain is being recognized by means of diamond drilling and mining work where a sufficient number of samples are obtained to be able to carry out a geometallurgical study that corroborates the viability of the exploitation of the mineralized volcanic in daily production.
Based on the results obtained, it is concluded that by exploiting this new domain it will not affect any process of the operation, obtaining good results in the recovery and quality of the mineral treatment.

El volcánico mineralizado es un nuevo dominio con valor económico en el yacimiento tipo VMS, que se emplaza entre la roca caja estéril y el sulfuro masivo; caracterizado por contener valores altos en Ag, Pb (Galena argentífera) y valores aceptables en Zn (Esfalerita) y Cu (Calcopirita).
Este nuevo dominio está siendo reconocido por medio de sondajes diamantinos y laboreo minero donde se obtiene la suficiente cantidad de muestras para poder realizar un estudio geometalúrgico que corrobore la viabilidad de la explotación del volcánico mineralizado en la producción diaria.
En base a los resultados obtenidos, se llega a la conclusión que al explotar este nuevo dominio no afectará a ningún proceso de la operación, obteniendo buenos resultados en la recuperación y calidad en el tratamiento del mineral.

2. Introducción

El área de estudio se ubica en la parte Sur occidental del Perú, en la provincia de Chincha, departamento de Ica, a 175 kmSE de Lima. El depósito de Cerro Lindo es caracterizado por una mineralización polimetálica Zn-Pb-Cu-Ag-Ba tipo sulfuro masivo vulcanogénico (VMS) de clase mundial con una producción promedio de mineral de 21,500Tn/día.
El presente trabajo se realizó con el fin de dar a conocer al nuevo dominio geológico que aportará nuevos recursos en la Unidad Minera Cerro Lindo. El dominio volcánico era considerado en su totalidad una zona estéril, pero al realizar una estimación a este dominio nos dio un NSR interesante y se empezó a realizar estudios para disminuir la incertidumbre y hacer viable su explotación. Para diferenciar esta zona estéril con la que tiene mineral, se le denominó Volcánico Mineralizado (VM) por tener leyes considerables.
El VM es un dominio Geológico que no fue considerado en modelos anteriores al 2019, por lo tanto no estaba incluido en los recursos ni en las reservas, debido a que se tenía una alta incertidumbre en tonelaje y leyes debido a su naturaleza; sin embargo, los estudios realizados demuestran que existe viabilidad para su explotación.

3. Objetivo

Identificar, zonificar y caracterizar el nuevo dominio considerado como Volcánico Mineralizado (VM) en el yacimiento tipo sulfuro masivo vulcanogénico (VMS) en la Unidad Minera Cerro Lindo, así como

muestra la ubicación de los cuerpos mineralizados en la Figura N°1, con la finalidad de implementar un modelo y estimación del nuevo dominio para poder incrementar los recursos y explotación en la operación.

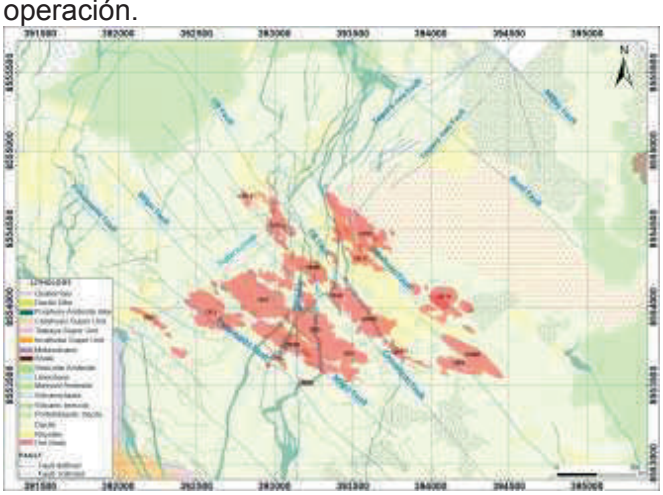


Figura N° 1: Ubicación de los cuerpos del Yacimiento Tipo VMS de la Unidad Minera Cerro Lindo

Para lo cual se va determinar la presencia de volcánico mineralizado en los cuerpos mineralizados existentes en el yacimiento mediante la perforación diamantina y el logueo de los sondajes, donde nos brindarán información valiosa para poder identificar este nuevo dominio que fue considerado como estéril. Por último, se va realizar el estudio geometalúrgico del volcánico mineralizado para demostrar que existe la viabilidad para su explotación en la operación de Cerro Lindo.

4. Metodología Aplicada

Se aprovecharon los sondajes infill que se realizaban a los tajos que entrarán producción en meses posteriores y los sondajes para realizar recategorización de los cuerpos mineralizados con la finalidad de poder cuantificar y zonificar al volcánico mineralizado (VM), mediante el logueo geológico. Véase en la Figura N°2

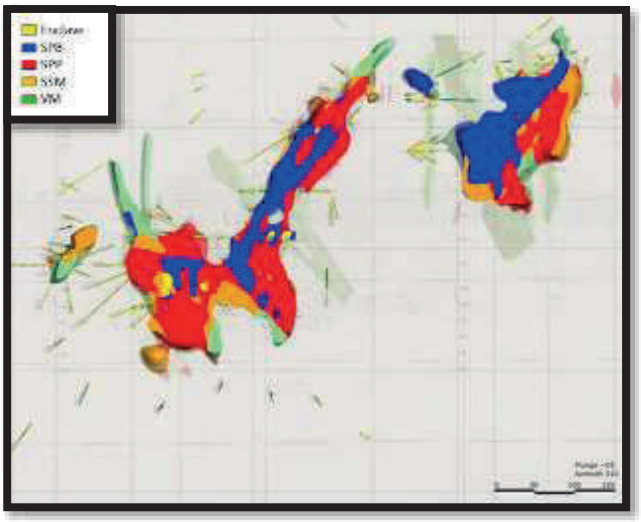


Figura N° 2: Zonificación de Volcánico Mineralizado.

Macroscópicamente se notó con características totalmente diferentes a la muestras de mineral que contienen sulfuro; es decir, presentaba una matriz volcánica con parches de esfalerita, calcopirita, galena y cobres grises, dando un valor económico rentable para su explotación. Este dominio es caracterizado por sus altos valores de plata y plomo. Cabe resaltar que en ciertas ocasiones se puede observar la esfalerita como material fino en la matriz volcánica.

Se sacaron muestras para ser analizadas en el Laboratorio de Certimin S.A. donde se formaron un compósito (LDFC-03) para poder realizar estudios geometalúrgicos como conminución (dureza del mineral), flotación, análisis mineralógico en los concentrados y en el relave.

En total se tomaron 400 muestras entre sondajes y muestra de comunes (frentes de avance en mineral y de tajos en producción), que fueron analizadas y distribuidas en el yacimiento como se muestra en la Figura N°3.

Finalmente se realizó un modelamiento del nuevo dominio volcánico mineralizado (VM) al finalizar los estudios geometalúrgicos.

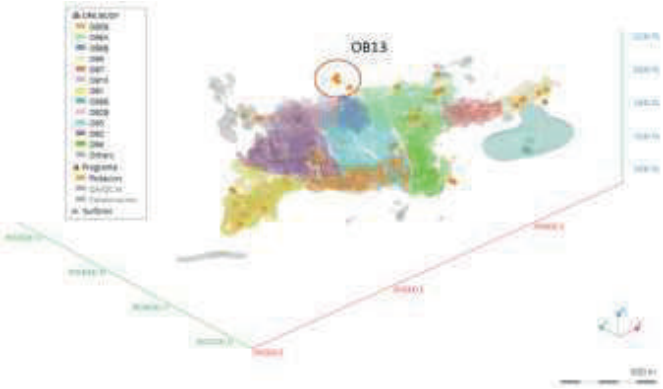


Figura N° 3: Distribución espacial de las muestras.

5. Geometalurgia del Volcánico Mineralizado

5.1. Conminución

Indica la reducción de tamaño de las partículas de mineral, mediante trituración, chancado, molienda y otros. (Camiper, 2019).

Se realizó el compósito LDFC-03 con las muestras representativas distribuidas en el yacimiento para realizar las pruebas de conminución, flotación y mineralogía. Véase en la Tabla N°1

SAMPLE ID	DDH	Desde (metros)	Hasta (metros)
LDS-01	PECLD04120	137.60	143.60
LDS-02	PECLD04120	163.10	168.90
LDS-03	PECLD04168	84.35	93.65
LDS-04	PECLD04168	195.70	209.20
LDS-26	PECLD04339	190.4	200
LDS-27	PECLD04339	10.5	20.9
LDS-28	PECLD04339	29.9	39.3

Tabla N° 1: Algunos sondajes representativos que forman parte del compósito LDFC-03.

5.1.1. Índice de Abrasión (Ai)

El índice de abrasión se usa para determinar el desgaste de las brocas en la perforación, tubos y medios de acero en trituradores, molinos de barra y de bolas. (SGS, 2020).

Los resultados de Ai que se obtuvieron de la mayor población de muestras se encuentran en rangos medios a altos, como se muestra en la Figura N°4.

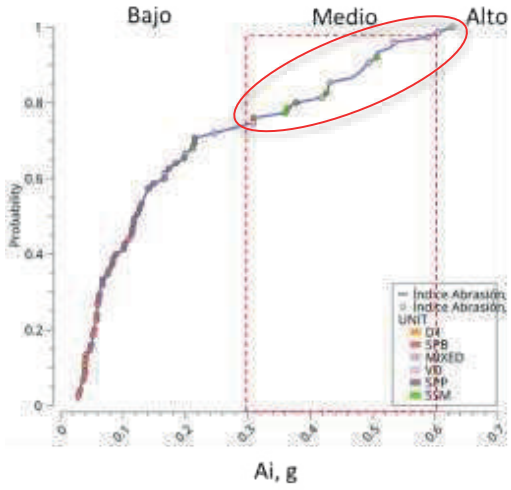


Figura N°4: Índice de abrasión (Ai)

5.1.2. Distribución de índice de Trabajo (BWi)

Es la energía usada en la reducción de tamaño de partículas, como en el caso para determinar el consumo de energía de un molino de bolas para obtener un tamaño de partículas deseado. (Metallurgist, s.f.).

En la Figura N°5 podemos observar que los resultados de BWi de la mayor población de muestras presentan mayor dureza respecto a los otros dominios.

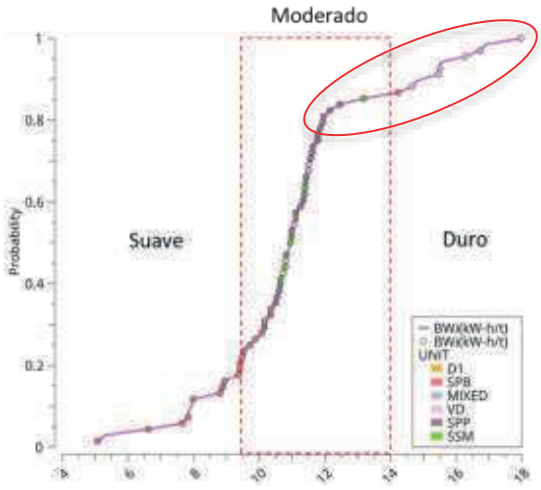


Figura N°5: Distribución de índice de trabajo (BWi)

5.2. Flotación

Es el procedimiento que permite concentrar el mineral de la pulpa de material mineralizado que viene del proceso de molienda. En las celdas de flotación se hacen burbujear aire desde el fondo de manera que las partículas de mineral presentes en la pulpa se adhieren a las burbujas de aire y así suben con ellas y se acumulan en una espuma. La espuma rebasa hacia canaletas que bordean las celdas y que la llevan al proceso de decantación. (Chile, s.f.)

En las pruebas de flotación del compósito LDFC–03 se puede observar que las recuperaciones de los elementos (Zn, Cu, Pb y Ag) están dentro los estándares (Véase en la Tabla N°2 y N°3).

AQ. Cabeza	Ag	Cu	Pb	Zn	Fe	As	Hg	Cu_SS	Cu_CN	(CuSS+CuCN)/ CuT
ID	g/t	%	%	%	%	%	ppm	%	%	%
LDFC-03	134	0.38	2.44	8.90	12.4	0.003	22.6	0.00	0.02	5

Tabla N° 2: Análisis Químico del compósito LDFC-01

PRODUCTOS	PESO		LEY (%, ppm)								RECUPERACIÓN (%)							
	(g)	(%)	(g/t) Ag	Cu	Pb	Zn	Fe	S	Hg	As	Ag	Cu	Pb	Zn	Fe	S	Hg	As
Bulk Concentrate II (C)	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
Bulk Concentrate I (C)	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
Bulk Concentrate Re	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
Zn Concentrate II (C)	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
Zn Concentrate I (C)	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
Zn Concentrate Re	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
Relave final	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]

Tabla N° 3: Resultados preliminares de flotación.

5.3. Mineralogía

Se realizó el estudio mineralógico del compósito LDFC-03 que pertenece al dominio Volcánico Mineralizado (VM).
En la figura N°6 observamos que su composición contiene el 38.8% de silicatos comprobando la alta dureza de este dominio, seguido de los sulfuros con un 39.9% que nos corrobora el contenido de mineral en el volcánico mineralizado (VM).
La presencia de tenantita es muy poco en el compósito realizado.

Composites	Carbonates	Others	Oxides & Hydroxides	Phosphate	Silicates	Sulphides & Suphate
LDFC-03	1.45	0.84	18.9	0.13	38.8	39.9

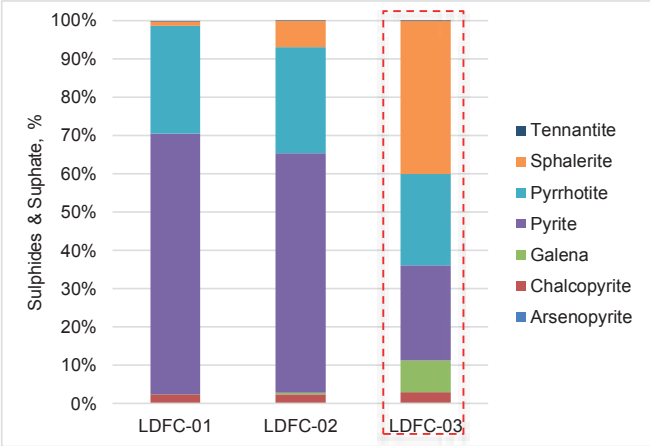


Figura N°6: Mineralogía del compósito LDFC-03

5.4. Estudio Petromineragráfico

Se realizó el estudio petromineragráfico para poder reconocer los minerales de mena y ganga en el dominio Volcánico Mineralizado en base a una descripción macroscópica, microscópica, descripción de minerales primarios y secundarios, probable secuencia paragenética, textura y alteraciones.
En la muestra macroscópica podemos ver que es una roca metamórfica compacta de color gris pardusco. Presenta una textura granoblástica con agregados de blastos de cuarzo y muscovita, presenta relictos de andalucita y moldes de porfidoblastos alterados. Con una invasión de cuarzo posterior asociado con pirita y esfalerita. Véase en la Figura N°7.

Figura N°7: Muestra macroscópica

En la descripción microscópica por luz transmitida la muestra corresponde a una roca corneana con textura granoblástica. Formada por relictos de porfidoblastos de andalucita y moldes de porfidoblastos (totalmente alterados por sericita, muscovita I, muscovita II y cloritas). Han sido invadidos y englobados por agregados de blastos

de cuarzo I con muscovita I y sericita en sus intersticios. Posteriormente, la roca ha sido invadida por agregados de cuarzo II (de tamaños mayores) que presentan a pirita I, esfalerita III, muscovita II y cloritas entre sus intersticios.
En la descripción microscópica por luz reflejada tenemos que la Calcopirita III se aprecian como relictos en esfalerita III. Galena ha reemplazado débilmente algunos cristales de pirita I.

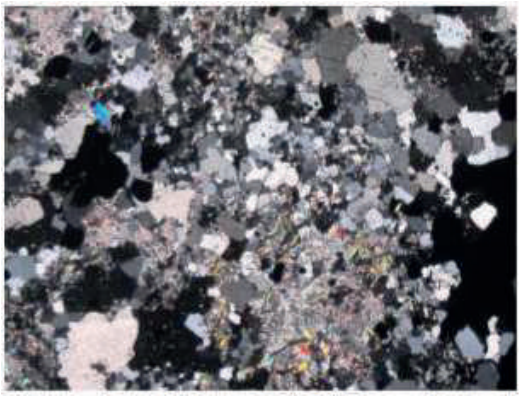


Figura N°8: Muestra microscópica

La muestra presenta una textura granoblástica, con una textura moderada de sericitización y una textuta débil de cloritización.
La probable secuencia paregénetica en esta muestra es: anatasa, pirita I, Calcopirita III, esfalerita III, Galena.

5.5. Modelamiento

El Volcánico mineralizado fue modelado en el software Leapfrog Geo mediante el Refined Geological model. Cronológicamente es último dominio en interpolarse por su disposición y contacto con la roca caja. Véase en la Figura N°9.

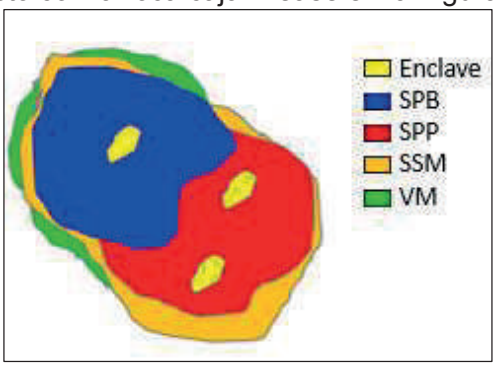


Figura N°9: Cronología usada para el modelamiento geológico en Cerro Lindo, se evidencia que el Volcánico mineralizado es el último dominio en interpolarse.

El VM se diferencia de las otras litologías por no contener sulfuros masivos, la mineralización se encuentra diseminada o en parches en la roca volcánica, adicionalmente se tomaron estas consideraciones para su asignación.
VM = Rocas volcánicas %Fe <15%; Zn >=1% o Cu >=0.25% o Pb >=0.50% o Ag >=30ppm (Véase en la Figura N°10)

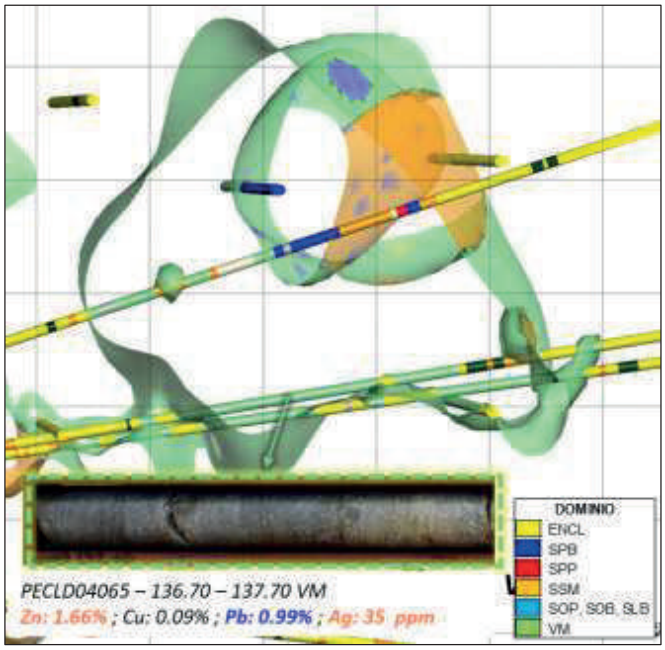


Figura N°10: Sección de sondajes diamantinos con presencia de Volcánico mineralizado.

6. Conclusiones

Se identificó que el mineral de caja adyacente a la mineralización, es decir el volcánico mineralizado (VM) presenta mayor dureza y abrasividad en comparación al sulfuro masivo.
Las recuperaciones y calidad de los concentrados están dentro de los estándares establecidos por planta concentradora.
Se debe realizar ensayos de densidad ya que este dominio contiene mayor contenido de volcánico, posiblemente su densidad se a menor a la de los sulfuros masivos.

Agradecimientos

A la empresa Nexa Resources Peru por facilitarnos usar la información requerida para realizar este presente trabajo y al equipo de Geología de Cerro Lindo por incondicional apoyo.

Referencias

Bizalab. (2020). Estudios Petrográficos y Petromineragráficos - Informe III. Lima.

Camiper. (2019). ¿Qué es la Conminución de Minerales en Metalurgia? Lima: Redacción Tiempo Minero.

Chile, M. d. (s.f.). Flotación. Obtenido de http://www.minmineria.gob.cl/glosario-minero-f/flotacion/

Metallurgist, 9. (s.f.). Indice de Trabajo de Bond y su Procedimiento. Obtenido de https://www.911metallurgist.com/metalurgia/indice-trabajo-bond-procedimiento/

SGS, M. (2020). Servicios metalúrgicos y operaciones de unidades - Pruebas de abrasión.

Controles Estructurales como guía de exploración de los cuerpos de borde (OB13 y OB9) del Yacimiento Cerro Lindo.

Sheyla Pinto Amaro[1], Nils Sarmiento[2], Peter Cerna[3]

[1] Nexa Resources S.A.C, Lima, Perú (sheyla.pinto@nexaresources.com)
[2] Independiente, Lima, Perú (nsvgeology@hotmail.com)
[3] Independiente, Cajamarca, Perú (peter.cerna@hotmail.com)

1. Abstract

Cerro Lindo is a volcanogenic massive sulphide deposit (Kuroko Type) with Zn, Cu, Ag and Pb mineralization hosted in a volcano- sedimentary sequence of Huaranguillo Formation (Albian) limited by the intrusion of the Coastal Batholith. This deposit is composed by 14 ore bodies with a clear alignment in a NW-SE. These ore bodies are configured in 4 principal trends along the volcanic basin.
The mineralization is controlled by 2 faults system. A NW-SE extensional system which generated the basin configuration and presented several reactivations during the mineralization emplacement, and N-S system as feeders of the Zn, Cu, Pb and Ag mineralization. A post mineralization intrusion of porphiritic andesitic dikes with an orientation NNE-SSW that cross-cut all the mineralization. Additional to these systems there are NE structures associated to ore remobilization at the Eastern of the deposit that are considered as small ore bodies with high economical grades as new targets.

2. Introducción

El yacimiento Cerro Lindo está definido como un VMS de tipo Kuroko (Zn, Cu, Pb y Ag) con un potencial de 200 Mt de mineral, ubicado en el distrito de Chavín, Provincia de Chincha, departamento de Ica, a 175 km al SE de Lima.
Este VMS se encuentra emplazado en secuencias volcánicas dacíticas - riodacíticas de la formación Huaranguillo (Grupo Casma), dentro de la cuenca Cañete; los cuerpos mineralizados (OB) presentan una dirección NW-SE asociados a 4 direcciones principales con una longitud de 1.25 Km, 600 m de ancho y 500 m de profundidad aproximadamente.
El yacimiento está controlado por dos sistemas de fallas principales, el sistema NW-SE y N-S con diferentes reactivaciones que han generado el emplazamiento de sulfuros masivos de Zn, Cu, Pb y Ag dentro de una ganga de baritina y de pirita. El sistema NW-SE de carácter regional generó la configuración de la cuenca y presenta múltiples eventos tectónicos cuyas reactivaciones favorecieron el desarrollo de la mineralización primaria en la parte central del yacimiento definiendo la geometría de los cuerpos mineralizados que actualmente se encuentra en explotación. Cabe mencionar la ocurrencia de valores anómalos de oro, el cual presenta buena correlación con Sb-Ag en la parte central del yacimiento. Las fallas del sistema N-S permitieron la migración y la re-movilización de fluidos mineralización hacia roca caja (zonas de borde al NE). Esta zona enriquecida fue posteriormente emplazada por diques tardíos de composición andesítica estériles que cortan los cuerpos mineralizados con una orientación NNE- SSW y como último evento estructural se presentan sistemas post mineralización en sentido E-W.

3. Contexto Geológico

3.1. Geología Local

Localmente, el yacimiento se encuentra dominado por una secuencia volcánico-sedimentaria de composición intermedia – félsica (dacíta-riodacíta) de la formación Huaranguillo del Albiano -106.9 Ma (CODES, 2016) donde se emplazan sulfuros

masivos de Zn, Cu, Pb y Ag. Las zonas periféricas del yacimiento presentan intrusiones de domos riolíticos - 105.7 Ma (CODES, 2016) cortando la secuencia dacítica. El emplazamiento de estos domos presentan un alineamiento NW-SE, los cuales se encuentra cubiertas por niveles volcanoclásticos de composición andesítica hacia el techo.

Esta secuencia volcáno-sedimentaria se encuentra flanqueada por intrusivos de composición granodiorítica. Hacia el Este se tiene la superunidad de Catahuasi - 93.7 Ma (CODES, 2016) con dirección SE-NW de alto ángulo compuesto por granodioritas que genera un metamorfismo de contacto y favorece el emplazamiento de diques dioriticos post mineralización (89.87 Ma). Hacia el Oeste se emplaza la superunidad del Incahuasi (82.35 Ma) con rumbo general NW-SE con componentes N-S de bajo ángulo que generó un fuerte metamorfismo dinámico produciendo un halo de metavolcánico con fuerte foliación y biotización. La distribución y orientación de estos intrusivos dejan la secuencia volcáno-sedimentaria como un roof pendant. Finalmente cortando toda la secuencia mineralizada se emplazan diques porfiríticos andesíticos tardíos - 73.89 Ma (CODES, 2016) con dirección NNE-SSW que se postula como una reactivación estructural tensional, aprovechando zonas de debilidad preexistente.

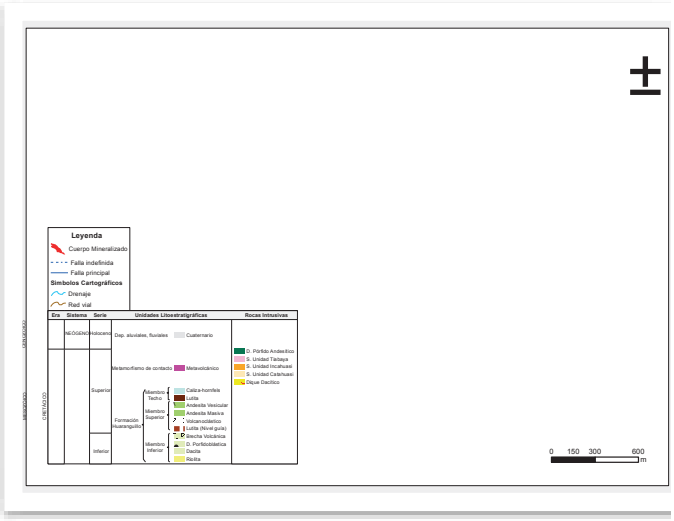


Figura 1.- Mapa de Geología Local Cerro Lindo

4. Mineralización

4.1. Eventos de mineralización

4.1.1. Paragénesis

En base a estudios mineragráficos y petromineragráficos de las muestras tomadas a lo largo de todos el yacimiento (Bizalab, 2019) se ha podido generar una asociación de las secuencias parageneticas de los eventos que han favorecido el zoneamiento de la mineralización económica. Dentro de estas secuencias tenemos una correlación de un primer evento rico en fierro con ocurrencias de pirita – magnetita - pirrotita y localmente rutilo con estructuras NW-SE. Así mismo se tiene la ocurrencia de apy zonal como evidencia de una reactivación del sistema de fallas NS y NW-SE que marca una transición al segundo evento.

Como segundo evento se produce un reemplazamiento de cpy I – sph sobre py-po, mgt desde los bordes al centro, siendo este evento continuo hasta llegar a cpy III y sph III, con disminución gradual de T° precipitando finalmente Gn.

El tercer evento corresponde a los minerales de intermedia a baja temperatura con sulfosales de Pb, Ag y Cu las cuales podrían estar asociadas a un sistema de estructuras tensionales.

Un último evento se presenta con una moderada a fuerte correlación de volátiles Sb y Bi, con valores anómalos en Au (electrum), esta tiene mayor importancia en la zona del OB2B y OB5B.

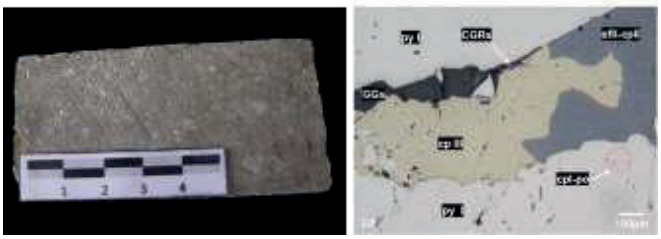


Figura 2.- Muestra OB-9 con la secuencia paragenética principal con la presencia de CGs.

5. Control Estructural

La mineralización en Cerro Lindo obedece a controles litológico-textural y netamente estructural, los cuales definen la geometría del yacimiento, el yacimiento presenta 4 alineamientos de dirección NW-SE asociado a fallas principales:

- **Lineamiento Pahuaypite:** OB1
- **Lineamiento Milpo:** OB2, OB5, OB5B, OB5C, OB5D, OB6.

- **Lineamiento Casuarinas- OB:** OB12, OB3-4, OB2B, OB6B, OB6A, OB7.
- **Lineamiento Patahuasi:** OB10, OB13, OB6C, OB8A, OB8B, OB9.

Posterior a la configuración del yacimiento, un sistema de fallas N-S se asocia con la removilización de fluidos mineralizantes en múltiples activaciones.

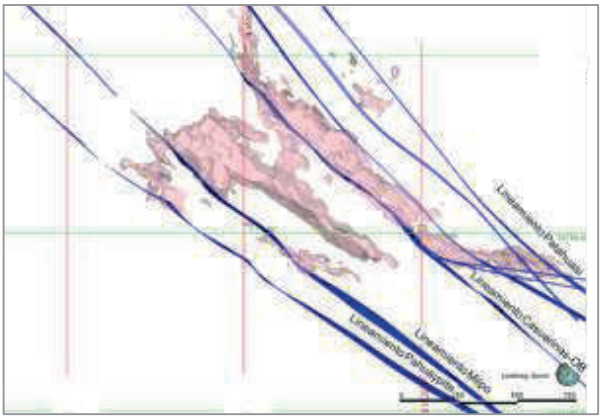


Figura 3.- Vista en planta 3D de los principales Trends estructurales que controlan la extensión de los Cuerpos Mineralizados del Yacimiento.

6. Control Estructural de Cuerpos de Borde

6.1 Control Estructural del OB-9

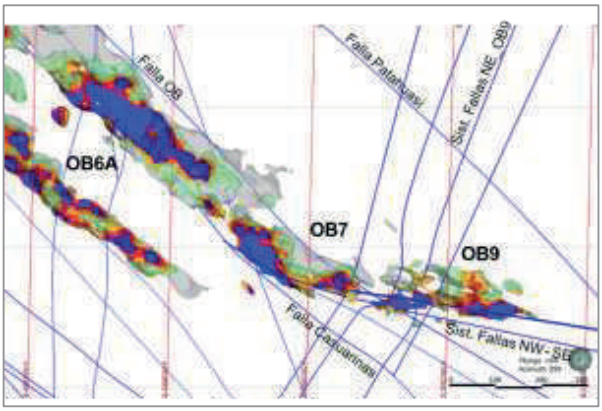


Figura 4.- Plano a nivel del control entre sistema NW-SE y NE en el cuerpo de borde OB-9.

El control estructural y el paleo relieve muestran una estrecha relación con la formación y geometría de los cuerpos mineralizados, en especial en los cuerpos de borde en los cuales se evidencia un cambio textural y mineralógico de manera gradacional y que podrían explicar la extensión restringida de estos.

Hacia la zona sur del yacimiento se observa un cambio en la orientación de la mineralización entre el lineamiento Casuarinas-OB y el lineamiento Patahuasi, específicamente entre los OB9 y OB7 (Figura4). En esta zona el patrón estructural predomínate son los sistemas NW-SE y NE-SW y con menor ocurrencia el sistema N-S de extensión local. Según, análisis de permeabilidad y porosidad de los sondajes exploratorios se evidencia una correlación de la dirección de los sistemas principales con las tendencias de la porosidad y permeabilidad del OB-9. La mineralización se presenta con una ocurrencia en bandas de SPB (sp-py-gn) con orientación N115°, cortado por cuerpos de py-cpy con rumbo NE-SW, esta particularidad se da por la presencia de fallas profundas con dicha orientación. El sistema de fallas NE-SW han sido los conductos favorables para el proceso de removilización, dando origen a un dominio distinto a los sulfuros masivos que son las zonas de volcánicos mineralizado, descritos como volcánicos dacíticos con reemplazamiento de sulfuros diseminados y parches sin una orientación evidente (Cu 0.25 %, Zn 1%, 0.5% Pb, 30 ppm Ag). Este dominio se desarrolla mejor a partir del nivel 1800 tanto lateral como verticalmente, en profundidad son principalmente piritosos y que se han estudiado debido a la explotación de estos niveles.

6.2. Controles Estructural del OB-13.

El OB-13 se encuentra en el borde Este del yacimiento al límite con el intrusivo granodioritico de la superunidad Catahuasi. Existe una zona de mineralización controlada por el sistema NW-SE (falla Patahuasi) y las N-S, generando cuerpos distales de baritina (menor volumen) y cuya raíz evidencian py-po y cpy puntual. También se observa fallas menores de rumbo NE con buzamiento hacia el NW que generan una zona favorable para albergar mineralización por reemplazamiento compuestos principalmente por sulfuros de Zn, Cu y Ag propios del dominio del volcánico mineralizado. De acuerdo a las correlaciones realizadas en este Cuerpo, el Cu y Ag presentan una fuerte correlación, que podría indicar la asociación de minerales de intermedia temperatura sobreimpuestos a la roca caja. De la misma manera que el OB-9 el emplazamiento del intrusivo desde el Nivel 1820 también genera una restricción para su extensión.

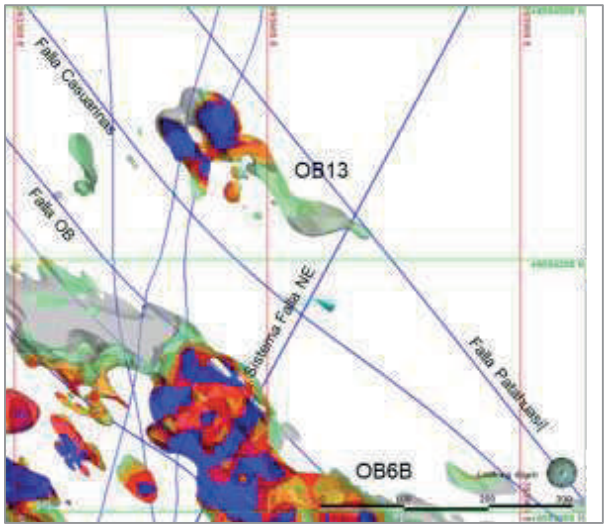


Figura 5.- Plano a nivel del control entre sistema NS y NW-SE limitado por Falla Patahuasi al Norte del OB13

7. Potencial Exploratorio

Teniendo en consideración los tres sistemas de fallas principales asociadas a los eventos mineralizantes y su distribución espacial de los minerales económicos, es posible generar un patrón estructural para los cuerpos distales y definir nuevos targets de exploración.

En la zona del OB-13 la mineralización está asociada a sistemas NW-SE y N-S.

En el sector del OB9, presenta una variación en cuanto al control estructural ya que predomina el NW-SE y NE-SW, y su desarrollo se da a partir del nivel 1800.

Ambos OB-9 y OB-13 tienen potencial lateral restringido al emplazamiento del intrusivo Catahuasi.

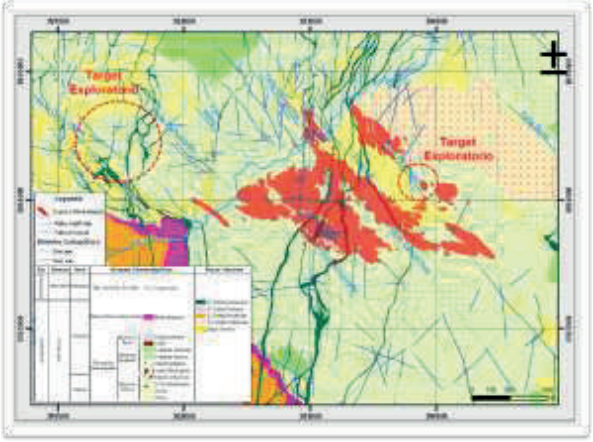


Figura 6.- Plano de ubicación de posibles targets exploratorios en relación a su configuración estructural.

El potencial geológico de estos volcánicos mineralizados y cuerpos distales asociados a estos sistemas de fallas es de 10 a 12 Mt.

8. Conclusiones

El potencial geológico de Cerro Lindo, está ligado a su edad (106.7 Ma) los demás yacimientos de la cuenca Casma están entre 68 y 62 Ma. .

Los controles de mineralización principal son litológicos y estructurales. En tal sentido se ha definido los principales lineamientos que han favorecido la mineralización de la cuenca marcando direcciones principales del reemplazamiento de la roca caja por sulfuros masivos y posteriormente generando una mineralización tardía del volcánico mineralizado.

El zoneamiento y estilo de mineralización, sea de sulfuros masivos o diseminado se generan debido a consecuentes activaciones tectónicas.

En la actualidad se están teniendo más hallazgos sobre el potencial de ampliación considerando los pequeños cuerpos periféricos y los volcánicos mineralizados.

Agradecimientos

Agradecemos a Nexa Resources – Cerro Lindo S.A. el apoyo y autorización del uso de la información para publicar esta contribución, en especial a la Gerencia de Geología y la constructiva revisión del Ing. Jean Paul Bueno.

Referencias

Acosta, J., Santisteban, A. & Huanacuno, D. 2015. Principales franjas metalogenéticas y tendencias

de la dotación plomo y zinc en el Perú. Trabajo presentado en PERUMIN 32 Convención Minera. Arequipa, Perú, 21-25 setiembre 2015, p. 10

Bizalab, Estudio Mineagráfico, petromineragráfico y petrográfico de 72 muestras, para Nexa Resources, Diciembre 2019

Bueno, J.; Herramientas de exploración aplicadas a la generación de nuevos targets en el yacimiento VMS Cerro Lindo. Resúmenes extendidos PROEXPLO 2019, Lima, Perú, p. 332-340.

CODES Technology services, Milpo Report U-Pb August 2016

Doyle, M.G., and Allen, R.L., 2003, Subsea-floor replacement in volcanic- hosted massive sulfide deposits: Ore Geology Reviews, v. 23, p. 183222.

Ly, Percy, 2000. VMS Deposits of Latin America. Cerro Lindo Project, p.407-422

Monecke, T.; Volcanic Host-Rock Succession of the Cerro Lindo VHMS Deposit, Peru. Workshop Nexa Resources, cerro lindo, August 2019.

Romero, D., Carlotto, V., Tassinari., C. & Quispe, J. 2008. Los depósitos de la cuenca Maastrichtiano-Daniano: relación con los yacimientos tipo sulfuros masivos volcanogénicos de Pb-Zn-Cu; Perú central. Resúmenes extendidos XIV Congreso Peruano de Geología.

Sarmiento, N., Cerna, P., Palma, R. “CERRO LINDO - CONTROL ESTRUCTURAL Y ZONEAMIENTO DE MINERALIZACIÓN”. Resúmenes extendidos I CIVGEO, 23-25 julio 2020

Vidal, C. 1987. Kuroko-type deposits in the Middle Cretaceous marginal basin of central Peru: Economic Geology, p. 1409-1430.

Descubrimiento y geología del proyecto Coralillo, un sistema mineralizado de Cu-Au-Fe asociado a rocas volcánico-sedimentarias cretácicas del “Grupo Casma”, Cuenca Huarmey, en la costa norte del Perú

Pedro Jesús Reyes[1]

[1] Raimondi Exploraciones EIRL, Av de la Solidaridad 103, Lima, Perú (pedroreyes.rayex@gmail.com)

1. Abstract

El proyecto Coralillo muestra diversas ocurrencias de mineralización aflorante de Cu-Au-(Ag), asociado a óxidos de Fe (hematita, magnetita), que están relacionadas a sistemas hidrotermales hospedados en rocas volcánico-sedimentarias del Grupo Casma, cuenca Huarmey (Cretácico Medio-Superior). Los resultados geoquímicos de muestras en canales, rocks chips y en labores artesanales, varían entre, 0.1%-5% Cu, 0.1g/t-5g/t Au, 1%-25% Fe,1g/t-15d/t Ag, se ha reconocido ensambles de alteraciones silicea, potásica, sericitica y propilitica. De acuerdo a estos patrones geológicos se póstula que la mineralización correspondería a un sistema IOCG o a una variación de este tipo de depósito, en un contexto geológico similar a los depósitos de Raul y Mina Justa en Perú, y Candelaria en Chile. En el proyecto se han identificado 5 targets con afloramientos mineralizados y halos de alteración, en un área de 2,5Km2-3Km2, abriendo oportunidades de exploración para este tipo de depósitos en la costa norte del Perú.

Palabras clave: yacimientos Cu-Au-Fe, cretácico.

Abstract

The Coralillo project shows severals occurrences of Cu, Au, (Ag) outcropping mineralization, associated with Fe oxides (hm, mt), which are related to hydrothermal systems hosted in volcano-sedimentary rocks of the "Casma Group", Huarmey basin (Kms). The grades in channels, chips rocks, vary between 0.1% to 5% Cu, 0.1g / t Au to 5g / t Au, 1% -25% Fe, with alterations helo assemblages of siliceous, potassium, sericitic and propylitic. According to these geological patterns, it is proposal that the mineralization of Cu,Au,Fe would correspond to an IOCG system or at variation of this system, although these involve a wide range of styles, in a geological context similar to the deposits of Raul, Mina Justa in Peru and Candelaria in Chile. In the project, 5 target with mineralized and alteration halo outcrops have been identified, in an área of 2.5Km2 - 3Km2 in radius, so it is considered that the project is of interest to companies of large or medium mining scale, opening exploration opportunities for this type of deposits on the north coast of Peru.

Fig 1. Vista (S) de la zona central del proyecto Coralillo, mostrando el halo de alteración hidrotermal 1,2 Km2, en la parte superior.

Key words: ore deposits, copper, gold, cretaceous basin

2. Introducción

El proyecto Coralillo, se localiza en la costa norte del Perú, provincia del Santa (Ancash), a 30Km de la línea costera, en cotas de 800 a 1000 msnm, en las zonas bajas de la vertiente occidental de la cordillera de los Andes, presenta numerosos afloramientos mineralizados (+100), mostrando óxidos/sulfatos de Cu y Fe principalmente.

Los depósitos de Óxidos de Hierro, Cobre y Oro (IOCG), están reconocidos y bien estudiados en la margen occidental de los Andes entre el paralelo 14º en Perú y 33° de Chile. En contraste, en el sector norte de la costa peruana, no se reporta su ocurrencia significativa entre los paralelos 10° y 14°; sin embargo, en años recientes, se ha identificado mineralización importante, evidenciada en (aun) pequeñas pero numerosas operaciones mineras y en algunos proyectos tempranos de exploración (Reyes 2019).

En los proyectos mineros y operaciones mineras de esta región se observa mineralización de Cu, Au, Fe, Ag, Mo, U y RREE. La mineralización esta principalmente en rocas volcánico-sedimentarias del grupo Casma, el que muestra una clara división de facies, hacia el oeste de predominio de vulcanismo subaereo con texturas de pillow, y hacia al este de predominio sedimentos volcanoclásticos (Child, 1976).

El proyecto Coralillo se consolido en base a la revisión e inventario de mineralización, en un área de 25Km2 aproximadamente, de diversos laboreos antiguos realizados a pequeña escala, que no progresaron, debido principalmente a la complejidad de la geometría de la mineralización. En esta fase se ha logrado el entendimiento de la mineralización y su relación con los controles litológico, estructural, tectónico, patrones de alteración, determinándose la geometría de corredores mineralizados en base al mapeo escala 1/2000 y cubriéndose el muestreo de todos los lugares aflorantes de la mineralización.

3. Geología del Proyecto Coralillo

En el área del proyecto se observa un conjunto de estratos volcanoclsticos alineados en dirección NW-SE, plegados y deformados por metamorfismo regional de facie esquisto verde predominante. Las rocas volcanoclásticas están afectadas por estructuras NNW-SSE que muestran una fuerte esquistosidad en su traza e intensa foliación (pizarrosa-esquisto) hacia las cajas.

Todo el paquete volcanoclastico (Grupo Casma)se encuentra rodeado de intrusivos de composición granodiorita-tonalita, del Eoceno , mostrando una débil a moderada deformación-alteración argilica, hacia la zona de contacto entre ambas unidades.

3.1. Litología

En el área del proyecto las rocas hospedantes de la mineralización son volcanoclasticas (Grupo Casma), que corresponden a las facies orientales, en transición a las facies sedimentarias de la cordillera occidental peruana (Myers,1974). En las cuales predominan las tobas y aglomerados volcánicos en la base a lodolitas, tobas, pizarras con algunos horizontes calcáreos hacia el techo, en una columna de aproximadamente 2-3 km. Las cuales están rodeadas por masas ígneas calcoalcalinas correspondientes al batolito de la costa, configurando una geometría de grandes segmentos volcanoclsticos englobados en una gran masa ígnea del batolito de la costa a semejanza de un gran roof pendant de 75Km2, las rocas intrusivas corresponden al segmento Santa Rosa de Po-Ti (Pitcher, Cobbing 1977), de composición granodiorítica tonalita.

3.2. Tectónica

El marco tectónico de formación corresponde a una cuenca de intra-arco, desarrollada en la margen occidental peruana bajo un régimen extensional en el Cretácico (Polliand 2005), contexto similar identificado para la costa sur peruana, en las cuencas Cañete y Arequipa (Sillitoe, 2003).

3.3. Mineralización

La mineralización principal de Cu y Au, está expuesta en diversos afloramientos y cateos artesanales, mayormente como oxidos y sulfatos de Cu y Fe, se presentan en diversos estilos, principalmente como diseminaciones en rocas volcánicas tobaceas (formando cuerpos elongados irregulares), seguido de estructuras vetiformes sinuosas, autobrechas y franjas de , alineada en corredores NE-SW, que presentan una intenso fracturamiento y esquistosidad de centenas de metros de longitud por 50m-100m ancho.

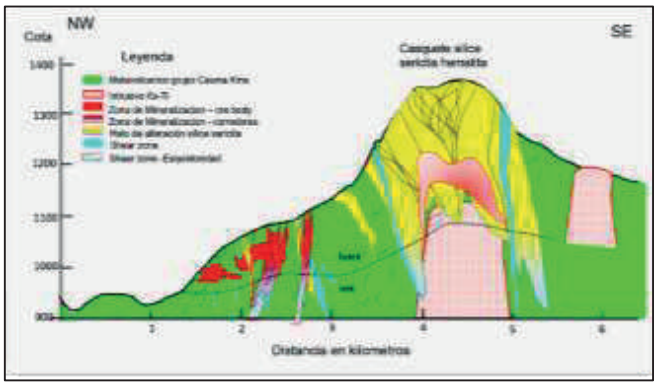


Fig. 2. Sección geológica esquemática AB, mostrando la geometría de las zonas mineralizadas y el contexto geológico asociado.

La mineralogía en las zonas de óxidos comprende de brocantita, malaquita, crisocola, y cuprita. Como sulfuros primarios, se observan principalmente calcopirita y escasa bornita, asociados con pirita y pirrotita hacia los bordes.

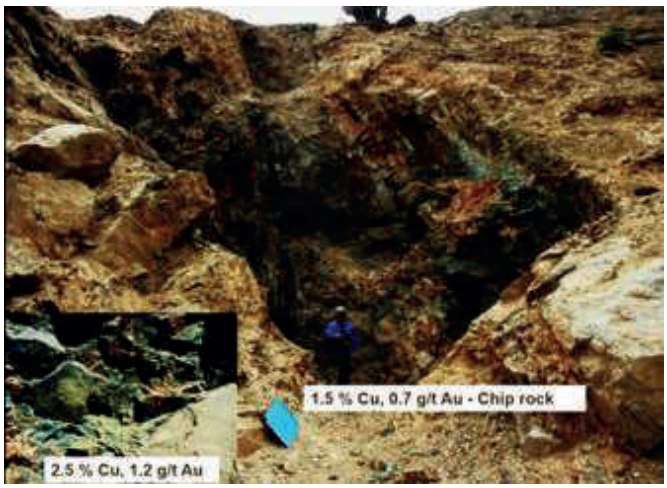


Fig 3. Afloramiento con mineralización típica de Cu,Au , expuesta en la zona de óxidos, en una pequeña labor minera.

Los ensambles de alteración relacionados está compuesto por siliclice pervasiva, sericita, alt K (alb), carbonatos (Ca, Fe), hematita, mushquetovita (en algunos casos), y como borde el halo propilitico de epidota, calcita, clorita.

La mineralización presenta un zonamiento de mayores valores de Cu, Au, en la zona central (Cerro Negro) y con incremento de metales base hacia la periferia Cu, Au, Zn, Ag, Pb (zona Estrella), así como estructuras y cuerpos de mineralización de skarn de Cu,Ag hacia el norte (María Fe), cerca al contacto con rocas ígneas del batolito de la costa.

Los tenores de leyes de cobre y oro, obtenidos en canales de estructuras tabulares y chips rocks en mineralización de corredores estructurales, varían entre 0.1%-5% Cu, 0.1g/t-5g/t Au con clara correlación entre ambos elementos (fig 4).

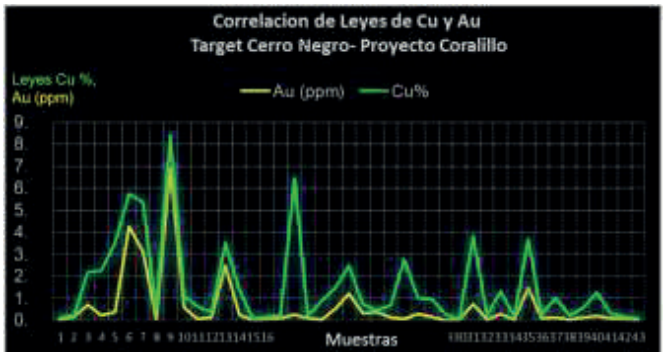


Fig 4. Gráfico de leyes, canales y chip rock, mostrando la correlación entre los valores de Cu y Au.

La plata se encuentra como acompañante principal en los rangos de 1g/tAg-15g/t Ag, seguido de zinc en tenores 0.1%Zn-5% Zn, 0.1%Pb-2.5% Pb.

3.3.1 Edad de la mineralización

En las zonas de contacto entre las unidades volcanoclasticas (Cretáceo Medio-Superior) hospedantes de la mineralización y los intrusivos de Batolito de la Costa (Eoceno), no se observa alteración hidrotermal conspicua, por lo que se considera que la mineralización está relacionada con plutones intrusivos más antiguos, del Ks-Po de composición dioritica, unidades que afloran hacia el SE del proyecto.

4. Potencial de mineralización

La presencia de numerosos y diversos afloramientos mineralizados con predominio de Cu y Au, así como la extensión de los halos de alteración hidrotermal, definen muy bien 5 targets exploratorios, que en conjunto delinean un potencial importante para ser prospectados. El área prospectiva que agrupan los targets, presenta aproximadamente 2.5 Km de radio.

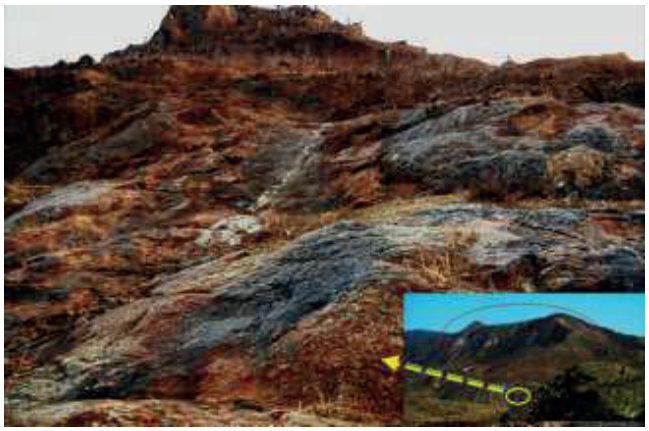


Fig 5. Halo de alteración: silicificacion y oxidos de Fe, como zona de cobertura de las zonas mineralizadas de Cu-Au.

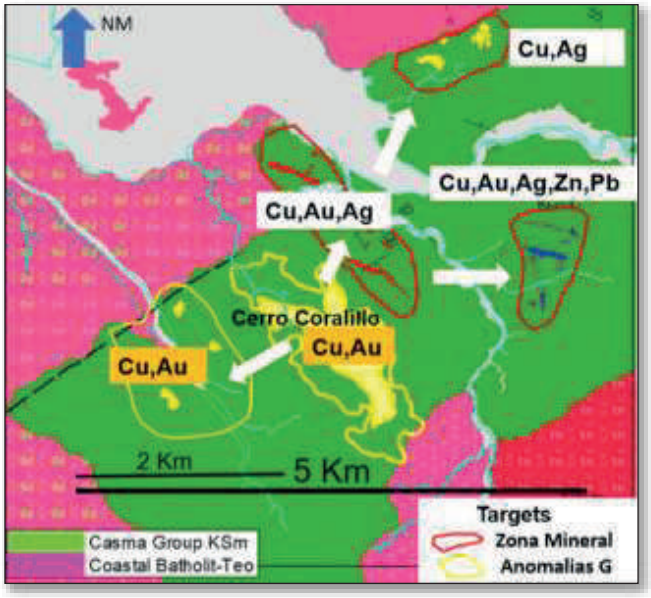


Fig 6. Plano geológico regional mostrando las dimensiones de los targets y el potencial de mineralización del proyecto "Coralillo".

Un aspecto particular en el proyecto coralillo, son los patrones de alteración hidrotermal típicos, como la sílice, sericita, alteración potásica y oxidación moderada, no se muestran muy conspicuos comparativamente con otros tipos de depósitos (pórfidos), probablemente por los volúmenes reducidos de sulfuros contenidos, como pirita o grandes halos de alteración de arcillas que no permiten la formación de volúmenes mayores de gossan de fe, o de grandes halos de alteración argilica, sin embargo es muy frecuente localizar mineralización aflorante de Cu-Au, en fracturas y diseminado en las tobas porfiriticas, que se manifiesta principalmente como óxidos de Cu.

5. Discusión sobre la envoltura cretácica del batolito de la costa Grupo Casma, cuenca Huarmey

Trotterau y Ortiz (1963), denominaron "Formación Casma" a una serie volcánico-detrítica del lado occidental del batolito de la costa, que aflora en las cercanías de la localidad de Casma, luego (Atherton 1983), subdivide el grupo en dos zonas, al norte de Lima, como cuenca Huarmey y al sur, cuenca Cañete.

En el área de trabajo la cuenca Huarmey se extiende desde el Tironiano hasta el Albiano, teniendo la máxima subsidencia en el Albiano, con un grosor aparente de 6,000m, alcanzando, un espesor de 9,000m en las cercanías de Chimbote (Bussell 1975), adelgazándose abruptamente cerca de Trujillo.

Estudios de detalle por una misión Inglesa de la universidad de Liverpool, entre los años 70s y 80s, distinguieron una facie de transición, con intercalaciones de lavas, limonitas, areniscas y algunos estratos de calizas; entre la Cretácico volcanoclástico "Grupo Casma" y Cretácico sedimentario de la cordillera occidental, con la falla "Tapacocha" como la disconformidad estructural entre ambas (Myers 1974, Child 1975).

En la última década, estudios centralizados por el INGEMMET (Romero 2007, Mamani 2010), en base a edades radiométricas identificaron dos periodos de vulcanismo, asociado al grupo Casma, el primero del Albiano-Cenomaniano (~108 -93 Ma) y el volcanismo del Maestrichtiano-Daniano (~70-60 Ma), donde los primeros por sus características geoquímicas, estarían relacionadas a depósitos de Cu-Fe- Au del tipo IOCG (Mamani et al 2009).

Quedando aun mayor investigación para la definición de las unidades estratigráficas cretácicas y su relación con los depósitos IOCG y VMS, se considera que el área del proyecto correspondería a el periodo Albiano-Cenomaniano (~108 -93 Ma) y en transición a las unidades del Cretácico sedimentario occidental (Fig 7).

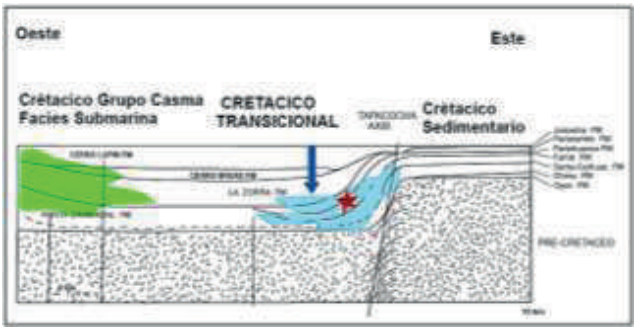


Fig 7. Sección esquemática (vista hacia norte), mostrando la ubicación del proyecto Corallillo entre la variación de facies cretáceas desde la cuenca occidental de los andes al este y el Grupo Casma al Oeste. Modificado de (Myers 1974, Child 1975).

N. Conclusiones

El proyecto Coralillo presenta principalmente mineralización de Cu y Au con contenidos de Ag y metales base, emplazado en rocas volcanoclasticas del Km-s correspondiente al Grupo Casma (cuenca Huarmey) y de acuerdo a las características de los ensambles mineralógicos cpy-po-py-mt(escasa), patrones de alteración, silice, sericita, potásica, albita y propilitica periférica, estaría relacionada a un estilo de depósito que podría interpretarse como sistemas de mineralización de Cu-Au-Fe atípico, pero se póstula que se trataría de sistemas IOCG dado que estos depósitos implican un amplio rango de estilos de mineralización.

A la fecha se han identificado 5 targets propsectivos, 3 de ellos con mineralización aflorante y con labores artesanales y 2 con anomalías geoquímicas superficiales de Cu y Au, los ensayes en canales y rock chip en la zona mineralizada varían entre 0.1%-5% Cu, 0.1g/t-5g/t Au, 1g/t-15g/t Ag, hacia zonas exteriores (target Estrella) hay un incremento de Zn con rangos entre 0.1%-5%, y Pb de 0.1%-2.5%, el potencial de extensión, en conjunto tiene un alcance de 2.5 Km de radio, de área prospectiva.

Los targets del proyecto cubren una extensión de 2Km-2,5Km de radio, de área altamente prospectiva

Agradecimientos

A todos lo colegas que me acompañaron en los trajines del trabajo de campo y a los pobladores de la comunidad de Lacramarca por brindarnos gentilmente el acceso al recorrido de sus terrenos como parte de la actividad exploratoria.

Referencias

Polliand, Marc, et al. 2005 Formation of intra-arc volcanosedimentary basins in the western flank of the central Peruvian Andes during Late Cretaceous oblique subduction: field evidence and constraints from U-Pb ages and Hf isotopes. International Journal of Earth Sciences, vol. 94, no. 2, p. 231-242

Huayong Chen. 2008. The marcona - Mina Justa district, south-central Perú: implications for the genesis and definition of the iron oxide-copper (-gold) ore deposit clan. Queen's University Kingston, Ontario, Canada

Reyes, Pedro. 2019. Sobre el potencial de mineralización de Cu, Au tipo IOCG en la costa norte del Perú paralelo 9º-12º. IIMP, XI Proexplo 2019.

Pitcher, Wallace., Atherton, Michael., Cobbing, Jhon. 1985. Magmatism at a plate edge. The Peruvian Andes. Jhon Wiley and son Inc., New York.

Myers, Jhon. 1975. Vertical crustal movements of the Andes in Peru. Nature, vol 254, no. 5502, p. 672-674.

Meyers,Jhon. 1974. Bulletin.Webb, Sandra, 1976. The volcanic envelope of the coastal batholith in Lima and Ancash, PhD thesis, University of Liverpool.

Cobbing, Jhon., Pitcher, Wallace,Tailor, William. 1977. Segments and super-units in the coastal batholith of Peru. Journal of Geology: The University of Chicago Press, Chicago, Illinois:

Child, Ralph. 1976. The coastal batholith and its envelope in the Casma region of Ancash, Peru. PhD thesis. University of Liverpool.

Pollian, Marc, Fonbote, Lluis. 2002. The Perubar VHMS deposit, Central Peru: formed in an upper Cretaceous intra-arc setting?. Peruvian Congress Sociedad Geológica del Perú.

Sillitoe, Richard. 2003. Iron oxide-copper-gold deposits: an Andean view. Mineralium Deposit: Springer, Berlin.

Bussell, Michael. 1975. The structural evolution of the coastal batholith in the provinces of Ancash and Lima, Central Perú. PhD thesis, University of Liverpool

Webb, Sandra. 1976. The volcanic envelope of the coastal batholit Lima and Ancash, Peru. PhD thesis. University of Liverpool.

Romero, Darwing. 2007. La cuenca Cretácico superior - Paleoceno del Perú Central: un metalotecto para la exploración de SMV, ejemplo mina María Teresa. Tesis de maestría. Red Desir,UNI. Lima, Peru.

Cueva, Eber., Mamani, Mirian., Rodriguez, Rildo. 2010. Magmatismo y geoquímica del volcanismo Albiano-Cenomaniano (Grupo Casma) y Maastrichtiano-Daniano entre Pucusana y Chimbote. Resúmenes extendidos CPG: SGP.

Caracterización tectónica de los depósitos tipo VMS en el arco volcánico submarino Casma

Rosa Jara Torres[1] y Enrique Fernández de Paredes[2]

[1] Lima, Perú (rosajarat@gmail.com)
[2] Lima, Perú (enrique.fernandez.paredes@gmail.com)

Abstract

This research characterizes, on a regional scale, the tectonic context during the formation of volcanogenic massive sulphide deposits (VMS) hosted in the Cretaceous volcanic-sedimentary sequences of the Casma Group on the central coast of Peru, particularly in the Cañete basin where Cerro Lindo, Perubar, Maria Teresa and Palma deposits are located.
The results of the lithogeochemical analysis show that tectonic context during the formation of the VMS deposits correspond to a submarine volcanic arc, in which the volcanic-sedimentary sequences of the Casma group were deposited, characterized by calc-alkaline signature with enrichment of light rare earth elements (LREE) and depletion of Nb and Ti. The rocks where deposited on a crust ~20-30 km thick.

Resumen

La presente investigación caracteriza, a escala regional, el contexto tectónico durante formación de los depósitos de sulfuros masivos volcanogénicos (VMS) hospedados en las secuencias volcánico-sedimentarias del Grupo Casma en la costa central de Perú, particularmente en la cuenca Cañete donde se ubican los depósitos de Cerro Lindo, Perubar, María Teresa y Palma.
Los resultados de los análisis de litogeoquímica, muestran que el contexto tectónico corresponde a un arco volcánico submarino, en el cual se depositaron las secuencias volcánico-sedimentarias del Grupo Casma, caracterizadas por una signatura calco-alcalina, con enriquecimiento de tierras raras ligeras (LREE) y empobrecimiento de Nb y Ti. Las rocas fueron depositadas sobre una corteza de ~20-30 km de espesor.

2. Introducción

Los depósitos de sulfuros masivos volcanogénicos (VMS) en el Perú están asociados a cuencas volcánico-sedimentarias submarinas cretácicas en la costa Perú (Cuenca Casma y Cuenca Lancones). En la cuenca Casma, particularmente en el área de la sub-cuenca Cañete, se ubican varios depósitos y ocurrencias del tipo VMS, conteniendo importantes recursos polimetálicos (Zn, Pb, Cu, Ag y Au). Conocer y entender los controles metalogenéticos constituyen herramientas claves para las exploraciones y descubrimientos futuros, es por ello que la caracterización téctonica es relevante. El contexto tectónico de la Cuenca Casma, a través de varios estudios previos (Atherton & Webb, 1989; Aguirre et al., 1989; Polliand et al., 2005; Romero, 2007; Cueva et al., 2010; Fontboté, 2019)., ha tenido diversas interpretaciones, que varían entre ambiente de tras-arco y arco volcánico. Los resultados de esta investigación logran contextualizar el ambiente de formación, para los depósitos VMS conocidos, dentro de la sub-cuenca Cañete a escala regional.

3. Litogeoquímica de las rocas volcánicas

Se realizaron análisis de roca total y elementos traza a 14 muestras de rocas volcánicas en la sub-cuenca Cañete, éstas incluyen a las unidades volcánicas asociadas a depósitos VMS (Cerro Lindo, Perubar y Palma) y muestras en el sector oeste y sur de la cuenca.

3.1. Clasificaciones

Las rocas volcánicas tienen una composición bimodal de acuerdo al diagrama de elementos traza Zr/Ti versus Nb/Y de Pearce (1996) (Fig. 01), estos elementos son inmóviles durante los procesos hidrotermales o supérgenos. Además, las muestras tienen una signatura sub-alcalina, que se observa en el diagrama AFM (Álcalis: Na_2O + K_2O; FeO; MgO) de Irvine y Baragar (1971).

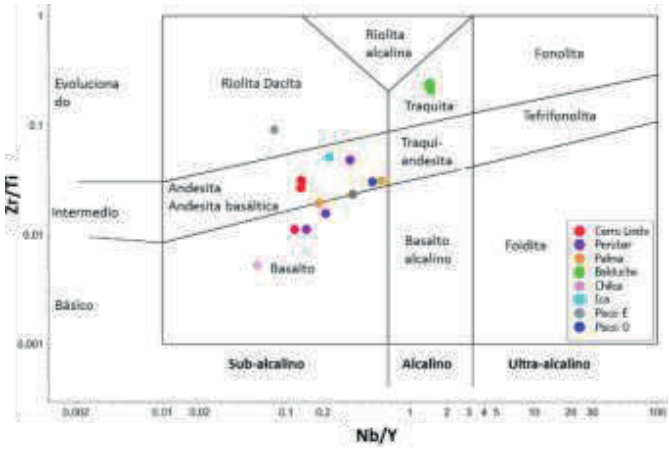


Figura 01. Clasificación de rocas volcánicas de Pearce (1996) en base a elementos traza inmóviles.

3.2. Litogeoquímica de Rocas Máficas

El contexto tectónico bajo el cual se formaron las rocas volcánicas se evaluó utilizando elementos traza inmóviles en diagramas de rocas máficas.

Los diagramas ternarios de Th, Zr, Nb (Wood, 1980) e Y, La, Nb (Cabanis y Lecolle, 1989) muestran que todas las rocas corresponden a un ambiente de arco volcánico, con signatura principalmente de arco calco-alcalino a arco transicional (Fig. 02), esta misma signatura se observa en el diagrama AFM de Irvine y Baragar (1971). La diferenciación del tipo de arco volcánico, según el diagrama Th/Yb versus Nb/Yb de Pearce (2014), muestra una transición desde un arco oceánico a un arco continental y algunas muestras indican un origen continental sub-aéreo (Fig. 03).

Los diagramas tipo spider de tierras raras y multi-elementales de Pearce (2010), normalizados con respecto al manto primitivo de McDonough et al., (1992) (Fig. 04), muestran un enriquecimiento de LREE acompañado de alta razón de Th con respecto a Nb (Fig. 4A); esta signatura es consistente con zonas de arcos calco-alcalinos, lo cual coincide con la clasificación de contexto tectónico hecha en base al diagrama de La, Y, Nb; la razón alta de Th/Nb es causada porque el Th es un elemento móvil durante procesos de subducción a diferencia del Nb que es un elemento inmóvil en la mayoría de ambientes de arco. Adicionalmente, se observa un empobrecimiento de Ti indicando también un ambiente de subducción y fusión parcial (Pearce, 2014).

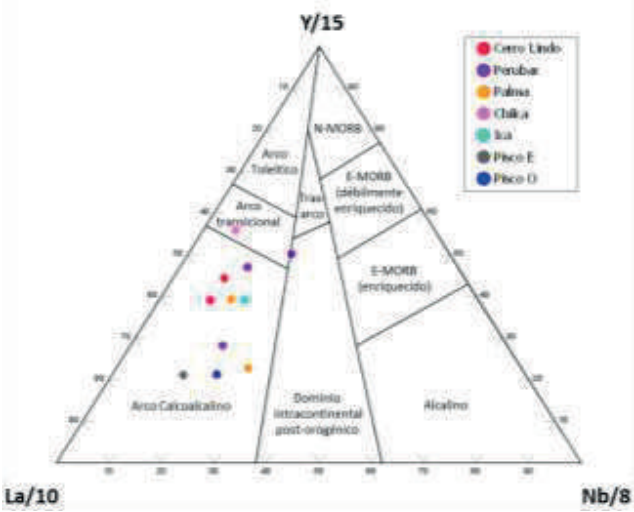


Figura 02. Diagrama La/10, Y/15, Nb/8 de Cabanis y Lecolle (1989).

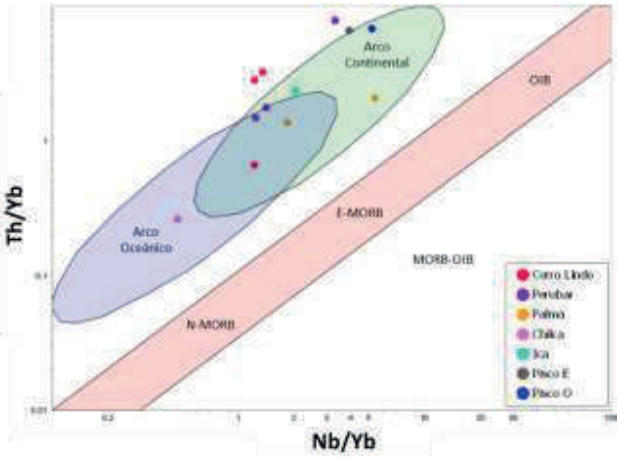


Figura 03. Th/Yb versus Nb/Yb de Pearce (2014).

Una muestra presenta relación plana entre elementos LREE con respecto a HREE (Fig. 4B), lo cual representa también un ambiente de subducción; sin embargo, podría representar una etapa más temprana del desarrollo del arco. El empobrecimiento de Zr y Hf representa una signatura típica de arcos oceánicos, concordando con la clasificación previa del Diagrama Th/Yb versus Nb/Yb de Pearce (2014) (Fig. 03).

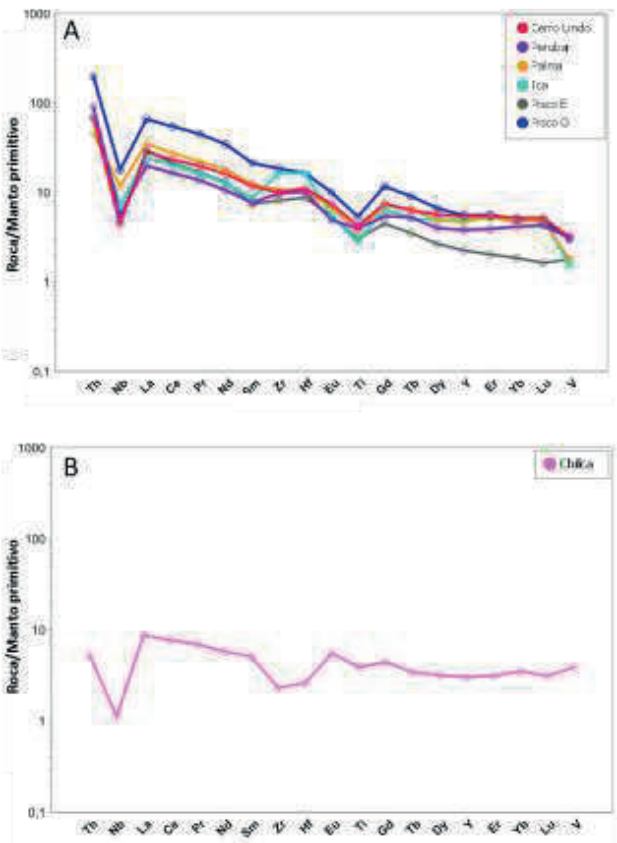


Figura 04. Diagrama tipo spider de los dos tipos de signaturas. A. Enriquecimiento de LREE en rocas asociadas a los depósitos VMS. B Relación plana de LREE y HREE en una muestra al NO de la cuenca.

Para poder discriminar entre rocas de arco y rocas de tras-arco debemos considerar que las rocas máficas de arco tienen como característica una significativa anomalía negativa de Nb con respecto a Th (Pearce, 1996) causando una alta razón de Th/Nb, esta característica se observa en las rocas asociadas a los depósitos VMS en el área de estudio (Fig. 04A).

3.3. Espesor Cortical

De acuerdo a la relación Ce/Y de Mantle & Collins (2008) para rocas de composición máfica, en la sub-cuenca Cañete las rocas volcánicas asociadas al contexto de arco oceánico a transicional se habrían depositado sobre una corteza desde ~20 km hasta ~30 km de espesor (Fig. 05). Las secuencias asociadas al contexto de arco continental, del extremo sur, se habrían depositado en una corteza de hasta ~45km (Fig. 05).

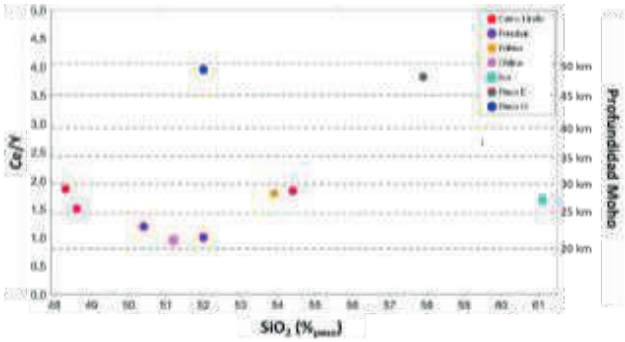


Figura 05. Diagrama Ce/Y versus SiO2 para estimación del espesor cortical de Mantle y Collins (2008).

4. Conclusiones

Las rocas volcánicas del Grupo Casma, en la sub-cuenca Cañete, se habrían formado en un contexto tectónico de arco volcánico oceánico en el extremo NO, evolucionando a un arco transicional oceánico-continental o arco oceánico somero en la parte central (contexto dominante en la cuenca) (Fig. 06), sobre una corteza entre ~20-30 km de espesor. La existencia de rocas de origen continental en el extremo SE de la sub-cuenca Cañete, que se depositaron en una corteza con >45 km de espesor, sugieren que estas rocas no corresponden al Grupo Casma, por lo que, el límite de la cuenca submarina Casma se encontraría al sur del depósito de Cerro Lindo (Fig. 06).

La signatura geoquímica varía de un arco transicional a netamente calco-alcalina (Fig. 02). Las rocas ubicadas al extremo noroeste, de signatura transicional, corresponden a los niveles estratigráficos inferiores y varían hacia el este a niveles estratigráficos superiores, a una signatura calco-alcalina; esta variación está acompañada con un enriquecimiento de elementos de tierras raras ligeras (LREE) (Fig. 04A y 04B).

Los depósitos VMS en la sub-cuenca Cañete se habrían formaron en un arco volcánico transicional, que puede ser interpretado como un arco oceánico somero o poco profundo, asociados a una signatura calco-alcalina y con un espesor cortical que varía entre ~20 - 30 km.

5. Discusión

Han sido ampliamente descritas en la literatura que las secuencias volcánico-sedimentarias del Grupo Casma fueron formadas en un ambiente de tras-arco, durante el Albiano-Cenomaniano (Atherton & Webb, 1989 y Aguirre et al; 1989). Posteriormente Romero (2007) y Cueva et al., (2010), consideran que existen 2 contextos

tectónicos asociados a los depósitos VMS: un arco volcánico extensivo, durante el Albiano-Cenomaniano y un tras-arco, durante el Maastrichtiano – Daniano, . Por otro lado, Polliand et al., 2005 en el depósito de Perubar interpreta cuencas pull-apart desarrolladas en un ambiente de intra-arco, y más recientemente los trabajos de Fontboté (2019), Farfán et al., (2019) y Picardo et al., (2019) propone también un ambiente de arco volcánico calco-alcalino para María Teresa, Palma y Perubar evidenciados en el diagrama Th, Zr y Nb. Los resultados de esta investigación proveen evidencias geoquímicas adicionales en base a diagramas de La, Y, Nb, Th e Yb, y con análisis de tierras raras, de que las rocas volcánicas asociadas a los depósitos VMS se formaron en un contexto de arco volcánico transicional coincidiendo con las interpretaciones de Fontboté (2019), Farfán et al., (2019) y Picardo et al., (2019) hechas en los depósitos de María Teresa, Palma y Perubar. Adicionalmente en este trabajo y se propone una zona prospectiva regional para la formación de depósitos VMS dentro del área de estudio (Fig. 06).

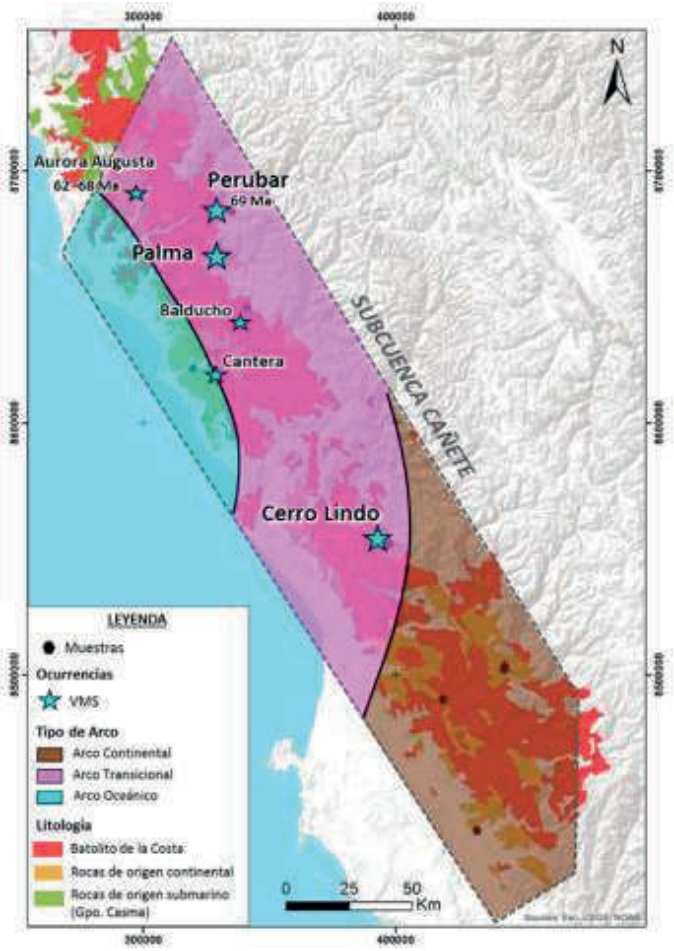


Figura 06. Mapa de los tipos de arco volcánico en la sub-cuenca Cañete.

Agradecimientos

Al profesor Javier Jacay por su asesoramiento en el desarrollo de la investigación y a Jesús Gómez por su colaboración la ejecución de los trabajos de campo.

Referencias

Aguirre, L., Levi, B. & Nystrom, J. 1989. The link between metamorphism, volcanism and geotectonic setting during the evolution of the Andes. In Daly, J. S., Cliff, R. A. and Yardley, B. W. D. eds., Evolution of Metamorphic Belts, Geological Society. Special Publication. No.43, pp. 223-232.

Atherton, M. P. & Webb, S. 1989. Volcanic facies, structure, and geochemistry of the marginal basin rocks of central Peru. J. South Am. Earth Sci. 2, pp. 241–261.

Cabanis, B. & Lecolle, M. 1989. The La/10-Y/15-Nb/8: diagram: a tool for discriminating volcanic series and evidencing continental crust magmatic mixtures and/or contamination. Comptes Rendus - Academie des Sciences, Serie II. 309, pp. 2023-2029.

Cueva, E., Mamani, M. & Rodríguez, R. 2010. Magmatismo y Geoquímica del Vulcanismo Albiano-Cenomaniano (Grupo Casma) y Maastrichtiano-Daniano entre Pucusana y Chimbote; XV Congreso Peruano de Geología. Resúmenes Extendidos. Sociedad Geológica del Perú, Pub. Esp. N° 9 (2010), Cusco pp. 921-925.

Irvine, T. & Baragar, W. 1971. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. Canadian Journal of Earth Sciences, Vol. 8, pp. 523-548.

Jara, R., 2019. Controles metalogenéticos de los depósitos de sulfuros masivos volcanogénicos (VMS) en la Cuenca Casma, Subcuenca Cañete, Perú. Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero Geólogo, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú, 85p.

Farfán, C., Monge, R. & Fontboté, L. 2019. Palma, yacimiento de Zn-Pb tipo VMS en una Cuenca intra-arco del Cretácico Superior en Perú Central: nuevos avances en exploracón para un gran potencial. ProExplo 2019.

Fontboté, L. 2019. Volcanogenic Zn-Pb±Cu massive sulfide deposits in the upper cretaceous pluto-novolcanic arc in central Peru. ProExplo 2019.

Mantle, G. & Collins, W. 2008. Quantifying crustal thickness variations in evolving orogens:

Correlation between arc basalt composition and Moho depth. Geological Society of America Bulletin, v. 36, pp. 87–90.

McDonough, W.F., Sun, S.-S., Ringwood, A.E., Jagoutz, E. & Hofmann, A.W. (1992). Potassium, Rubidium and Cesium in the Earth and Moon and the evolution of the mantle of the Earth. Geochimica et Cosmochimica Acta 56, pp. 1001-1012.

Pearce, J. 1996. A user's guide to basalt discrimination diagrams. In Trace Element Geochemistry of Volcanic Rocks; Applications for Massive Sulphide Exploration. Geological Association of Canada, Volume 12, pp. 79-113.

Pearce, J. 2014. Immobile Element Fingerprinting of Ophiolites. Elements 10, pp. 101-108.

Picardo, E., Fontboté, L., Mena, T., Chirinos, O. & Halter, W. 2019. El yacimiento de Zn-Pb-Cu-Ag tipo VMS María Teresa, Perú: geología y exploración.

Piercey, S.J. 2010. An overview of petrochemistry in the regional exploration for volcanogenic massive sulphide (VMS) deposits. Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis. V 10; pp. 119-136.

Polliand, M., Schaltegger, U., Frank, M. & Fontboté, L. 2005. Formation of Intra-arc volcanosedimentary basins in the western flank of the central Peruvian Andes during Late Cretaceous oblique subduction: field evidence and constraints from U-Pb ages and Hf isotopes. Int. J Herat Sci. (Geol. Rundsch) 94: 231 – 242 p.

Romero, D. 2007. La Cuenca Cretácico Superior-Paleoceno del Perú Central: Un Metalotecto para la exploración de SMV, Ejemplo Mina María Teresa, Tesis de Maestría, Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco, Cusco, p, 100.

Características Metalogenéticas de los Depósitos Tipo Pórfidos y Epitermales de las Franjas XV, XXIII, XXI-A y XXI-C del Sur del Perú

Luis Ysaías Quispe-Rentería[1], Victor Raúl Torres-Bazán[1], Alonso Arturo Marchena Campos[1], Carlos Nicolás Fernández Geraldino[2]

[1] Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico, Av. Canadá #1470, San Borja, Lima (lquispe@ingemmet.gob.pe, vtorres@ingemmet.gob.pe, amarchena@ingemmet.gob.pe)
[2] Universidad Nacional de Ingeniería, Av. Tupac Amaru 210, Cercado de Lima 15333 (carlos.fernandez.g@uni.pe)

Metallogenic Characteristics of the porphyry and epithermal deposits of the XV, XXIII XXI-A, XXI-C metallogenic belts XV, XXIII, XXI-A y XXI-C from the south of Peru

Abstract Important mineral deposits like Arcata, El Zafranal, Las Bambas, Trapiche, Orcopampa and others, are located in southern Perú in the Western Cordillera of the Andes, specifically in the metallogenetic belts X, XV, XX-A and XXIII. The present research has been developed based on field information;, geochemical, isotopic and geochronological data of the main deposits; as well as compiled information from different works of several authors; with all of that, it has been determined the following main metallogenetic epochs: 5-6 My (XXIII belt), 10-18 My (XXI-A belt) and 36-40 My (XV belt); all these ages are associated to tectonoestratigraphic units, Magmatic Arc Plutonism (Eocene-Oligocene) and Miocene Magmatic Arc .
Key Words: Metallogeny, Tectonostratigraphic units, geochronology, metallogenic belts.

Resumen: Importantes yacimientos minerales como Arcata, El Zafranal, Las Bambas, Trapiche, Orcopampa, entre otros; se emplazan en la Cordillera Occidental de los Andes del Sur del Perú, específicamente en las franjas metalogenéticas X, XV, XX-A y XXIII. El presente trabajo se ha desarrollado en base a la información recolectada en campo, así como a los datos geoquímicos, isotópicos y dataciones geocronológicas de los principales yacimientos, recopilados de distintos trabajos de múltiples autores, con lo que se ha determinado las siguientes principales épocas metalogenéticas: entre los 5 y 6 Ma (Franja XXIII), entre los 18 -10 Ma (franja XXI-A) y 40-36 Ma (Franja XV); asociadas a las unidades tectonoestratigráficas, Plutonismo de Arco Magmático Eoceno Oligoceno y al Arco magmático del Mioceno.
Palabras clave: Metalogenia, unidades tectonoestratigráficas, geocronología, franjas metalogenéticas.

1. Introducción

El presente trabajo se llevó a cabo bajo el marco del proyecto denominado "Características Metalogenéticas de los depósitos tipo pórfido y epitermales de la Cordillera Occidental" del INGEMMET; para ello se ha tomado como base las unidades tectonoestratigráficas definidas en base a sus características litoestratigráficas y su ambientes tectónicos; además, se han considerado los aspectos geocronológicos variaciones temporarias entre la rocas huésped y los eventos mineralizantes; así como el análisis geoquímico de los principales arcos magmáticos y como estos influyen en la generación de estos tipos de depósitos minerales; en cuanto a los estudios geocronológicos se han tomado como referencia a las muestras obtenidas por otros autores en los depósitos de Tintaya, Trapiche, Sulfobambas y Cotabambas, en el batolito Andahuaylas Yauri; por su parte en la franja de epitermales de Au-Ag del Mioceno, hospedados en rocas volcánicas cenozoicas XXIA; se describen las dataciones presentes en las minas de Orcopampa y Selene. Por último, para la franja de depósitos polimetálicos con superposición epitermal XXIII, se destaca las edades radiométricas halladas en la mina Arcata.

En este trabajo se presentan nuevos datos litogeoquímicos que suman a los ya existentes para los distintos arcos magmáticos presentes en la Cordillera Occidental sur; para este análisis se emplearon los elementos menores y traza inmóviles, de las rocas ígneas presentes en la zona de estudios asociados a los depósitos pórfidos, epitermales y skarn; por lo que se han elaborado los diagramas como de Espesor cortical estimado (km) vs la Distancia a la fosa oceánica (km), además de las razones LaN/YbN vs EuN/Eu*, Th/Yb vs NbN/TaN, por último el diagrama para Sr/Y vs Y. Las muestras procesadas provienen de minas, proyectos y prospectos presentes en estas franjas que se encuentran alojados en rocas volcánicas que proceden de distintos centros volcánicos emplazados entre el Eoceno al Plioceno; fueron reconocidos por Perelló et al. (2003), Carlotto et al., (2009) Acosta et al. (2009). Estos depósitos se encuentran controlados por los corredores estructurales que tienen una dirección de NO-SE; sistemas de

fallas son Cincha-Lluta, Incapuquio, Abancay-Condoroma-Caylloma y Cusco-Lagunillas-Mañazo (Carlotto et al., 2009). Es así que en esta región se encuentran depósitos epitermales de alta, intermedia y baja sulfuración.

2. Metodología

Para realizar el presente trabajo, se llevó a cabo la recopilación bibliográfica de artículos, revistas, boletines, mapas, tesis e informes técnicos internos y externos; así como información otorgada por compañías privadas. Con todo ello se confeccionaron mapas preliminares para los trabajos de campo lo que permitió generar una base de datos robusta con información geoquímica de roca total, geoquímica de sedimentos, isotópica y datos geocronológicos de los principales yacimientos presentes en la Cordillera Occidental sur. Durante el 2017, especialistas del INGEMMET realizan la visita a minas y proyectos, en donde se tomaron muestras de carácter selectivo de testigos de perforación y esquirlas de roca. Dichas muestras se tomaron con distintos propósitos como, estudios petromineragráficos, inclusiones fluidas, DRX para tipificar arcillas y estudios isotópicos, además, del respectivo cartografiado geológico y estructural. Posteriormente se enviaron las muestras para sus respectivos análisis al laboratorio tanto interno como externo y se le aplico un riguroso protocolo de aseguramiento y control de calidad (QA/QC). Una vez validada la data, se procedió al procesamiento respectivo e interpretación.

3. Contexto Geológico Tectónica presente en la Cordillera Occidental sur

Se ha logrado definir al menos dos unidades tectonoestratigráficas separadas por discontinuidades tectónicas regionales:

- Plutonismo de Arco Magmático del Eoceno al Oligoceno (PeoNo - pAM); representador por rocas del Batolito de Andahuaylas-Yauri, constituido por intrusivos que se exponen en una superficie de dimensiones que van ~300 km x 130 km; estos se emplazan cortando a las rocas sedimentarias del Cretácico. (Carlotto, 1998; 2002 Perelló et al. (2003). Este cuerpo plutónico está controlado por el corredor Cusco-Lagunillas-Mañazo:En el que destacan los depósitos de Las Bambas, Tintaya, Cotabambas, Katanga y depósitos de Cu-Au-Fe con edades de mineralización entre 42 y 30 Ma.
- Los depósitos del Arco Magmático del Mioceno; está unidad se encuentra controlada por los sistemas de fallas de Cincha-Lluta, Incapuquio, Abancay-Condoroma-Caylloma y Cusco-Lagunillas- Mañazo. (Velarde et al., 2004; Velarde, 2006, Carlotto et. al., 2009). Son rocas andesíticas y tobas calcoalcalinas, se relacionan a la subducción, se encuentra definida por Grupos Tacaza, Palca y Sillapaca, y formaciones como Llallahui, Arma, Confital, Andamarca, Chacoma, Chibemi, Añashuayco, Alpabamba, Huaylillas, Puquio, Aniso, Huaycha, Caudalosa,

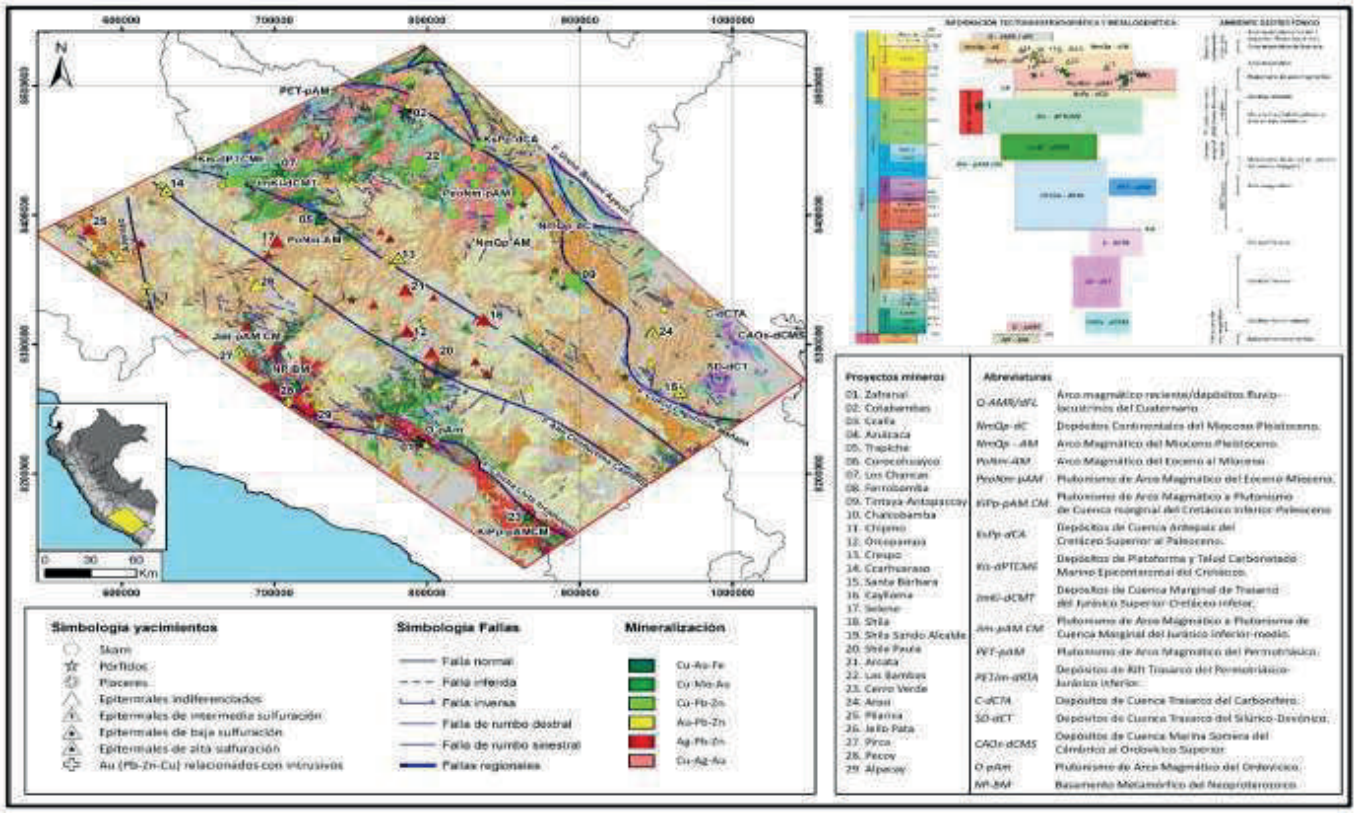


Figura 1. Unidades tectonoestratigráficas y yacimientos en la zona de estudio.

también incluye a cuerpos subvolcánicos asociados a estos centros volcánicos (Benavides, 1999; Klinck et al., 1986; Jenks, 1946; Boudesseul et al., 2000, Carlotto et al., 2009 Acosta et al., 2009, Cereceda et. al., 2010); por su parte Mamani et al. (2013) establece la ocurrencia de los arcos Calamarca-Tacaza (30-24 Ma.), Calipuy-Huaylillas (24-10 Ma.) y Barroso inferior (10-3 Ma.), Barroso superior (3-1 Ma), y Arco Frontal (<1 Ma.). Estos yacimientos se han desarrollado generalmente en las intersecciones de fallas y fracturas con direcciones NO-SE y NE- SO. Figura 1.

4. Interpretaciones geocronológicas

A continuación se presenta la definición de tres franjas metalogénicas. Una síntesis de las edades geocronológicas se da en la Figura 2.

XV. Franja de Pórfidos-Skarns de Cu-Mo (Au, Zn) y depósitos de Cu-Au-Fe relacionados con intrusiones del Eoceno-Oligoceno.

a. Batolito Andahuaylas Yauri

La mineralización en esta franja tomó lugar entre el Eoceno medio y el Oligoceno (~42 a ~30 Ma). En la mina Tintaya, las dataciones radiométricas K/Ar y Re-Os llevados a cabo tanto en la alteración como en la mineralización del tipo pórfido arrojaron una edad 41.9 ± 0.2 Ma. por el método Re- Os de (Mathur et al., 2001). Perelló et al., (2003a) reporta edades que van de 39.5 ± 1.1 Ma para Peña Alta y 30.3 ± 0.8 Ma. para Trapiche, mientras que en Sulfobamba obtiene una edad de 35.2 ± 0.9 Ma y para Cotabambas reporta una 35.7 ± 0.9 Ma.

XXIA. Franja de epitermales de Au-Ag del Mioceno hospedados en rocas volcánicas cenozoicas.

a. Distrito Minero Orcopampa

Este distrito se encuentra conformado por Chipmo, la veta Calera, Orcopampa, Poracota, Shila, Paula (Mayta, 1999; Salazar, 2008). Por su parte Gibson et al., (1995) data la mineralización del sector Calera entre 17.0 y 17.9 Ma sobre adularia, mientras que las alunitas hipógenas de la veta Santiago Norte han dado edades entre 18.4 y 19.5 Ma.

Por otro lado Swanson (1998) data las adularias de las zonas de alteración vinculadas a la mineralización de la mina Chipmo, esta adularia fue datada por el método K-Ar (adKAr), cuyas edades se encuentran entre 17.00 ± 0.5 y 17.90±0.5 Ma, similares a las obtenidas por Mayta (1999). En la veta Prometida con 18.1 Ma (Ramos A., 2014), otros datos geocronológicos son los obtenidos por Salazar (2008) quien por el método Ar-Ar dató las plagioclasas de las dacitas de Chipmo obteniendo edades de 18.90 a 19.45 Ma. En Poracota las alunitas datadas de la veta 1900 y el cuerpo Silvana, por el método 40Ar-39Ar, dan 13.52 ± 0.20 Ma y 14.02 ± 0.06 Ma (Vidal et al.2014).

b. La Mina Selene

Palacios et al., (2005 y 2008), obtiene edades por el método 40Ar / 39Ar que sugiere cuatro eventos magmáticos, para este distrito durante el Mioceno. El primero conformado por tobas de 16.2 ± 0.2 Ma., el segundo conformado por andesitas y tobas de 15.1 ± 0.1 Ma. La tercera etapa se encuentra asociada al emplazamiento de complejos de domos riodacíticos: Explorador (biotita 40Ar / 39Ar 14.6 ± 0.1 Ma) y Parcachata (40Ar / 39Ar biotita 14.5 ± 0.1 Ma). El último evento marca el inicio de la actividad hidrotermal, que se ha datato en las alunitas de las vetas, por el método 40Ar /39Ar de 14.62 ± 0.05; se superpone a los complejos de domos, además se tiene otra edad de 14.2 ± 0.1 Ma para el complejo de domo Explorador más joven que la edad de biotita de la misma muestra de (14.6 ± 0.1 Ma) obtenida por 40Ar / 39Ar en roca total.

XXIII. Franja de depósitos polimetálicos con superposición epitermal

a. Mina Arcata

Candiotti et al., (1990) dató, por el método K-Ar, las adularias y alunitas hipógenas de la Caldera Chonta, relacionadas con la mineralización de baja sulfuración; reportando edades de 5.10 ± 0.3, a 5.60 ± 0.2 Ma, además de dataciones de biotitas por el mismo método obteniendo una edad de 6.10 ± 0.2 Ma. (Figura 2).

5. Nuevos aportes a la Litogeoquímica para el sector sur

A continuación, se describen las principales características litogeoquimicas de acuerdo con las Franjas Metalogenéticas.

Para la franja XXI-A, los magmas Miocenos muestran mayor potencial que los intrusivos Oligocenos, los cuales presentan valores de LaN/YbN y Sr/Y en rangos adakíticos, sin embargo, dada la anomalía negativa de Eu, estos intrusivos no son muy fértiles, al no contener muchos fluidos en su sistema ni ser muy oxidados. El contenido de volátiles igualmente, señalado indirectamente por la ratio U/Th, es más bajo que el promedio.

El comportamiento para los intrusivos oligocénicos en la franja XXI-C es igualmente poco favorable para generar magmas fértiles (Tabla 1). En esta franja destacan valores muy favorables para Pinaya, Los Chancas, Las Águilas, aunque no presentan valores de anomalía de Eu positiva en algunos casos. Se dan parámetros relativamente favorables para Trapiche, pero con bajo Sr/Y, lo que sugiere remoción del Sr por alteración, dado el alto LaN/YbN que no corresponde con este bajo valor de Sr/Y. Para la franja XV, en el caso de Anama-Utupara, no presentan valores de LaN/YbN y Sr/Y altos, a pesar de encontrarse a una mayor distancia a la fosa; además el U/Th es anómalamente bajo, por lo que esta muestra en particular no indica magmatismo fértil, pero puede haber hidrotermalismo ya que la anomalía de Eu es en torno a 1. En el caso de Los Chancas, compuestos por dioritas a granodiorítas y monzonítas porfiríticas a feldespáticas, se tienen valores de anomalía de Eu en torno y mayores a 1, así como para las rocas más félsicas se tiene alto contenido de volátiles. El LaN/YbN y Sr/Y sin embargo, no se encuentran en rangos adakíticos, y mientras más parámetros confluyan mayor será el potencial del magma de generar un sistema hidrotermal en sus últimos estadios de diferenciación. Dichos parámetros son los que indican engrosamiento cortical anómalo, que haya permitido la liberación masiva de fluidos estructurales de anfíbol en la base de la corteza, debido a la generación de granates, minerales anhidros; gran contenido de fluidos magmáticos, por una

anomalía de Eu>1 y gran contenido de volátiles, por U/Th>0.25).

Por su parte en Pinaya, que pertenece a la franja XV con superposición epitermal, los valores con respecto a LaN/YbN y Sr/Y son cercanos a rangos adakíticos. La anomalía de Eu se encuentra en torno a 1, aunque una anomalía negativa, sin embargo, el U/Th es alto, por lo que puede esperarse el desarrollo de un sistema hidrotermal. Algo que se destaca en estas tablas, es que hay un buen grado de correlación entre el incremento de la distancia a la fosa y el incremento del espesor cortical.

6. Conclusiones

El criterio de las unidades tectonoestratigráficas facilita e integra la información geocientífica así como de los procesos geológicos que han sido precursores y generadores de los procesos de la mineralización, constituyendo buenas herramientas para desarrollar mapas metalogenéticos.

Las principales edades de mineralización se encuentren entre el Eoceno y Mioceno (Tintaya, Trapiche, Sulfobamba, Cotabambas). Esta se encuentra dentro de la unidad tectonoestratigráfica denominada Plutonismo de Arco Magmático (PeoNo- pAM) Eoceno al Oligoceno; mientras que los depósitos epitermales como Orcopampa, Selene Arcata, se hallan en la unidad depósitos de Arco Volcánico Mioceno (PoNm-AM).

La mayoría de depósitos epitermales y pórfidos se dan entorno a los valores más altos de parámetros litogeoquímicos que indican magmas fértiles.

Agradecimientos

Queremos agradecer a la Presidencia Ejecutiva, la Coordinación de Geología y Laboratorios, a la Dirección de Recursos Minerales y Energéticos del Instituto Geológico Minero y Metalúrgico por las facilidades y el apoyo para la consecución del presente trabajo de investigación.

Referencias

Acosta, J., Rivera, R., Valencia, M., Chirif, H., Huanacuni, D., Rodríguez, I., Santisteban, A. (2009). Memoria Mapa Metalogenético del Perú.

Baier, J., Audetat, A. y Keppler, H. (2008). Origin of the negative niobium tantalum anomaly in subduction zone magmas. *Earth and Planetary Science Letters. Vol. 267(1-2)*, 290-300.

Bissig, T., Leal-Mejía, H., Stevens, R., & Hart, C. (2017). High Sr/Y Magma Petrogenesis and the Link to Porphyry Mineralization Revealed by Garnet-Bearing I-Tyoe Granodiorite Porphyries of the Middle Cauca Au-Cu Belt, Colombia. Economic Geology. Vol. 112, 551-568.

Mamani M., Díaz-Martínez E., Navarro P., Jaimes F., Velarde T., Lu S., y Cueva E (2009) Dominios Geotectónicos y Metalogénesis del Perú. En Bol. Soc. Geol. Perú 103: 1-89 (2009).

Du Bray, E. (2016). Geochemical characteristics of igneous rocks associated with epithermal mineral deposits- A review. Ore Geology Reviews. Vol. 80.

Gauthier, A., Diaz, N., & Quirita, V. (1999). Yacimiento La Arena - Virgen, Huamachuco, La Libertad - Peru. En: Congreso Internacional de Prospectores y Exploradores, 1, Lima, 1999, Primer volumen de monografias de yacimientos minerales peruanos: historia, exploracion y geologia. Lima.

Gibson, P.C., MacKee, E.H., Noble, D.C. & Swanson, K.E. (1995). Timing and interrelation of magmatic, tectonic, and hydrothermal activity at the Orcopampa District, southern Peru. Econ. Geol., 90, 2317-2325.

James, J. (1998). Geology, alteration y mineralisation of the Cerro Corona porphyry copper-gold deposit, Cajamarca province, Perú. Unpubl. MSc Thesis, University of British Columbia, Vancouver, Canada.

Keppler, H. y Wyllie, P. J. (1990). Role of fluids in transport and fractionation of uranium and thorium in magmatic processes. *Nature. Vol.348*, 531-533.

Li, L., Xiong, X. L. y Liu, X. C. (2017). Nb/Ta Fractionation by Amphibole in Hydrous Basaltic Systems: Implications for Arc Magma Evolution and Continental Crust Formation. *Journal of Petrology. Vol. 58(1)*, 3-28.

Llosa, F., Georgel, M., & Veliz, J. (2000). Geología, alteración y mineralización de los pórfidos de Au-Cu de Minas Conga, norte del Perú (Cajamarca). X Congreso Peruano de Geología. Resúmenes, Sociedad Geológica del Perú, Lima.

Carlotto, V., Quispe, J., Acosta H., Rodríguez R., Romero D., Cerpa L., Mamani M., Díaz-Martínez E., Navarro P., Jaimes F., Velarde T., Lu S. y Cueva E. (2009); Dominios geotectónicos y Metalogénesis del Perú. Bol. Soc. Geol. Perú 103: 1-89.

Mantle, G. y Collins, W. (2008). Quantifying crustal thickness variations in evolving orogens: correlations between arc basalt composition and Moho depth. Geology, Vol 36:162-182.

Martinez, W., Cervantes J., Romero, D. (2006). El Arco Magmático Jurásico-Paleogeno, nuevas contribuciones estratigráficas, petrográficas y geoquímicas. Arequipa Tacna, Sur de Perú. Informe interno INGEMMET, Proyecto GR-1, Dirección de Geología Regional.

Mamani, M.; Navarro, P.; Carlotto, V.; Acosta, H.; Rodríguez, J.; Jaimes, F.; Santos, A.; Rodríguez, R.; Chávez, L.; Cueva, E. & Cereceda, C. (2010). Arcos Magmáticos Meso-Cenozoicos del Perú. XV Congreso Peruano de Geología. Resúmenes extendidos. Sociedad Geológica del Perú. Pub. Esp. N° 9 (2010), Cusco p. 563-570.

Macfarlane, A. W., Prol-Ledesma, R.-M., & Conrad, M. E. (1994). Isotope and fluid inclusion studies of geological and hidrotermal processes, northern Peru. Internacional Geology Review, vol. 36: 645-677.

Mathur, R., Ruiz, J. & Munizaga, F. (2001). Insights into Andean metallogenesis from the perspective of Re- Os analyses of sulfides. III South American Symposium on Isotope Geology, Extended Abstracts, p. 500-503. Edit. Soc. Geol. Chile. CD

Mayta, O. (1999). Yacimiento aurífero Chipmo (The Chipmo gold deposit). I Congreso Internacional de Prospectores y Exploradores. Primer volumen de monografías de yacimientos minerales peruanos: historia, exploración y geología. Inst. Ing. Minas, Lima, 37-48.

Montgomery, A. (2012). Metallogenetic controls on Miocene high-sulphidation epithermal gold mineralization alto Chicama district, La Libertad, Northern Perú: (Tesis), p. 455.

Navarro, P., Monge, R., & Rivera, M. (2010). Geología y Metalogenia del Grupo Calipuy (Volcanismo Cenozoico) Segmento Santiago de Chuco, Norte del Perú. Boletín N° 28 Serie D – INGEMMET.

Noble, D. C. (2002). Age of mineralization at mina Antapite and Jatun Orcco. Cía. de Minas Buenaventura, Lima, informe interno.

Noble, D. C., Vidal, C., Perelló, J., & Rodríguez, O. (2004). Space-time relationships of some porphyry Cu-Au, epithermal Au, and other magmatic-related mineral deposits in northern Peru. In: Sillitoe, R.H., Perelló, J. & Vidal, C., eds. Andean metallogeny: new discoveries, concepts, and updates.

Palacios, C., Dietrich, A., Nelson, E.P. & Layer, P.W. (2008). Estilos y control de mineralización en el distrito minero de Selene, Apurímac, Perú. XIV Congreso Peruano de Geología y XIII Congreso Latinoamericano de Geología, 6 p. Edit. Soc. Geol. Perú. CD.

Perelló, J.; Carlotto, V.; Zárate, A., Ramos, P.; Posso, H.; Neyra, C.; Caballero, A.; Fuster, N. y Muhr, R. (2003). Porphyry-style alteration and mineralization of the Middle Eocene to early Oligocene Andahuaylas-Yauri Belt, Cuzco Region, Peru: Economic Geology and the Bulletin of the Society of Economic Geologists, v. 98: 1575-1605.

Perelló, J., Neyra, C., Posso, H., Zárate, A., Ramos, P. Caballero, A., Martini R., Fuster, N. & Muhr, R. (2004). Cotabambas: Late Eocene Porphyry Copper-Gold Mineralization Southwest of Cuzco, Peru. In: Sillitoe, R.H., Perelló, J. & Vidal, C., eds. Andean metallogeny: new discoveries, concepts, and updates, Society of Economic Geologists Special Publication, 11: 213-230.

Rivera, M., Navarro, P., Monge, R., & Rolin, D. (2006). Evoucion del Volcanismo Cenozoico en el norte del Perú: departamento de La Libertad (7° 45' - 8° 25' S): XIII Congreso Peruano de Geologia. Resumenes Extendidos Sociedad Geológica del Peru, p. 304-307.

Salazar, J.C. (2008). Epithermal gold-telluride mineralization in the Chipmo deposit, Orcopampa district, Arequipa, Peru. M.Sc. thesis, University of Western Australia, 105 p.

Sarmiento J., Castroviejo R., Tassinari C y Vidal C. (2010) Inclusiones Fluidas e isótopos de plomo en Chipmo y Poracota, región minera de Orcopampa - Perú, implicancias para la exploración. En XV Congreso Peruano de Geología. Resúmenes Extendidos. Sociedad Geológica del Perú, Pub. Esp. N° 9 (2010), Cusco p. 644-649.

Somoza, R., & Ghidella, M. (2012). Late Cretaceous to recent plate motions in western South America revisited. Earth and Planetary Science Letters, 331-332, 152–163. doi:10.1016/j.epsl.2012.03.003.

Swanson, K. E. (1998). Geology of the Orcopampa 30 Minute Quadrangle, Southern Perú, with Special Focus on the Evolution of the Chinchón and Huayta calderas. A dissertation submitted for the degree of Doctor of Philosophy in Geology. University of Nevada, Reno.

Vidal C., Miranda M., SalazarJ. C, Coller D, Canchaya S., Meza J y Noble D. (2014) Geología volcánica, geocronología, geofísica, y paragénesis de alteración y mineralización del depósito epitermal de oro de Poracota, y sus relaciones con los depósitos de plata y oro del distrito minero de Orcopampa. En Boletín de la Sociedad Geológica del Perú, v. 109: 116-121 (2014)

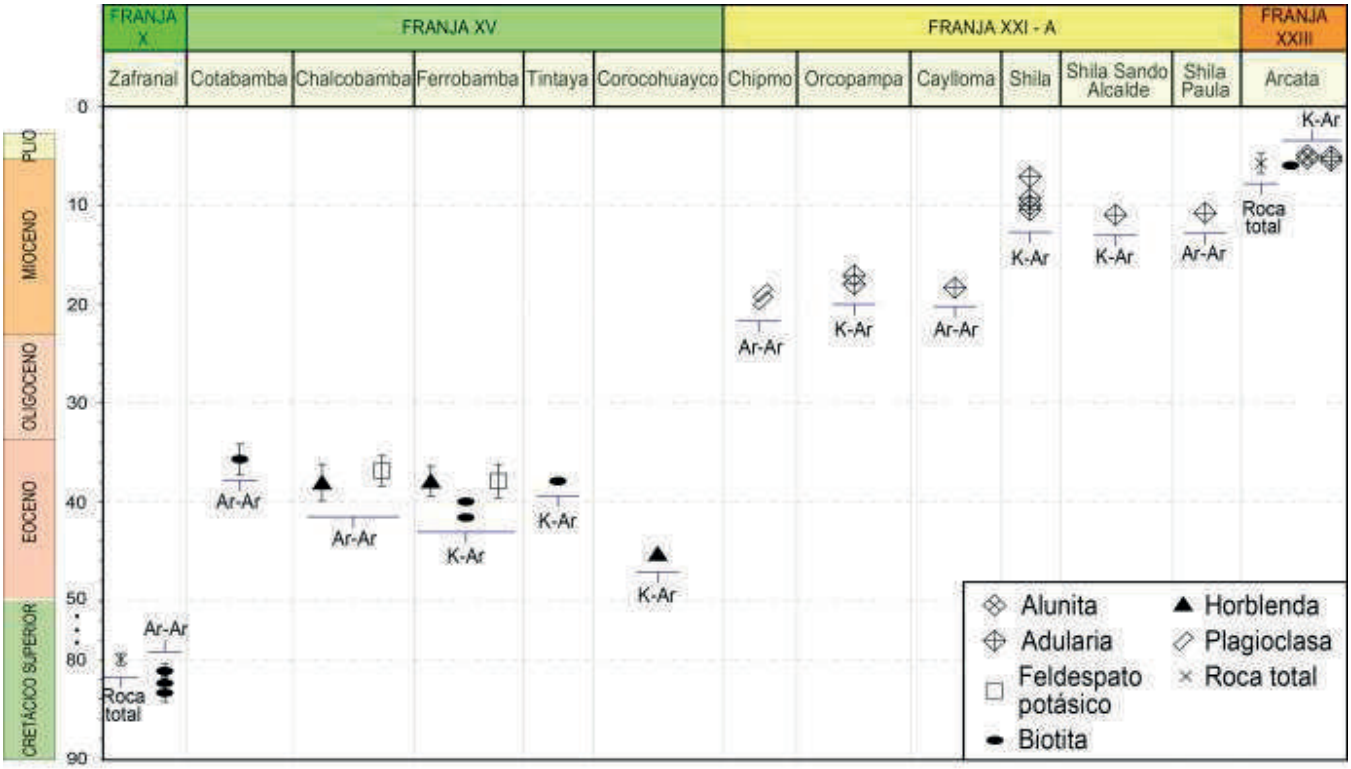


Figura 2. Cuadro resumen de las edades geocronológicas de cristalización, alteración y mineralización de los principales yacimientos de las regiones Cajamarca y La Libertad, según franja metalogenética.

Tabla 01. Características Litogeoquímicas de los principales yacimientos del área de estudio.

					YACIMIENTOS PO
	FRANJA X	FRANJA XV			sup
Yacimiento	Zafranal	Coroccohuayco	Los Chancas	Utupara	Las Ag
SiO_2 (%)	63.25	65.22	68.30	54.89	57.
La_N/Yb_N	4.68	8.15	11.21	9.46	15.
Sr/Y	7.77	61.87	31.76	29.72	20.
Zr/Y	0.00	11.41	2.08	2.69	9.
Y (ppm)	17.27	12.25	8.50	14.58	23.
Espesor cortical	29.20	35.42	46.65	45.80	46.
Th/Yb	1.80	2.90	9.01	7.68	4.
Eu_N/Eu^*	1.00	0.86	0.94	0.89	0.
Nb_N/Ta_N	1.85	-	2.77	1.46	1.
V/Sc	-	10.25	9.23	18.77	10.
U/Th	0.25	-	0.22	0.27	0.
Distancia a la fosa (km)	198.67	360.84	319.28	318.81	378

TÓTEM 2

INNOVACIÓN EN LA EXPLORACIÓN MINERA

Caracterización litogeoquímica con el analizador XRF Portátil Niton XL5 y vectorización de los elementos económicos Pb -Zn en el Proyecto Minero Zoraida, Perú.

Juan Jhojan Carhuapoma Carlos[1] , Max Gregorio Paniagua Tasayco[2]

[1] Av. 9 de enero S/N, Chaupimarca, Pasco, Perú, juancarhuapomageologia@gmail.com
[2] Compañía Minera Volcan, Av. Manuel Olguín 375, Surco, mpaniagua@volcan.com.pe

1. Abstract

The research work was carried out in the Zoraida mining project located in Suitucancha District, Yauli Province, Junín Department. The objective of this research is to characterize 39 samples of rocks (Pucará Group) lithogeochemically obtained with stratified random sampling and vectorizing the Pb-Zn elements. The multielemental analysis was carried out with the portable XRF Niton Xl5 tool to later characterize the samples lithogeochemically as andesite basalt, limestone and dolomites. Vectorization *Pb – Zn* was interpreted with a graphical geostatistics applying the CLR (Center Log Ratio) algorithm. The results obtained show anomalies of +Zn -Pb in the basalt andesites of amygdaloid texture, as well as in the dolomites of the Fm. Aramachay. In the Fm. Condorsinga a linear anomaly of the element Pb (+ Pb, -Zn) related to lineaments observed in the project.
Keywords: Basaltic Andesite, Limestone, Dolomite, Concentration, algorithm.

2. Resumen

El trabajo de investigación se desarrolló en el proyecto minero Zoraida ubicada en Distrito de Suitucancha, Provincia de Yauli, Departamento de Junín. El objetivo de esta investigación es caracterizar litogeoquímicamente 39 muestras de rocas (Grupo Pucará) obtenidas con un muestreo aleatorio estratificado y vectorizar los elementos Pb-Zn. El análisis multielemental se realizó con el equipo XRF portátil Niton Xl5 para luego caracterizar litogeoquímicamente las muestras como andesita basáltica, calizas y dolomías. La vectorización *Pb – Zn* se interpretó con una geoestadística gráfica aplicando el algoritmo CLR (Center Log Ratio). Los resultados obtenidos muestran anomalías de *+Zn -Pb* en las andesitas basálticas de textura amigdaloide, así como también en las dolomías de la Fm. Aramachay. En la Fm. Condorsinga se identificó una anomalía lineal de *Pb (+Pb, -Zn)* relacionados a lineamientos que se observan en el proyecto.
Palabras claves: Andesita basáltica, Caliza, Dolomía, Concentración, algoritmo.

3. Introducción

En una investigación geológica es importante contar con métodos analíticos que puedan brindar resultados confiables en la toma diaria de decisiones, éstos se basan en la aplicación de nuevas tecnologías e interpretación de resultados aumentando la eficiencia operativa y rentabilidad financiera. El uso de la XRF portátil nos ayuda en la obtención de datos representativos y confiables en el sitio y tiempo real, para luego ser interpretado mediante diferentes métodos geoestadísticos que nos brinden resultados efectivos para una prospección y exploración minera exitosa.

4. Metodología.

Se realizó el análisis multielemental de 39 muestras de roca en el laboratorio del proyecto con el Analizador XRF Portátil Niton Xl5, el método de muestreo aplicado es el muestreo aleatorio estratificado tomándose muestras de mano desde 5x5x5 cm hasta 10x10x10 cm., para luego tratarla mediante una geoestadística gráfica. Se utilizaron los programas IOGAS y CodaPack para el tratamiento de la información litogeoquímica. Sus localizaciones en el campo son mostradas en el plano Geológico de este resumen *(Figura 1).*

5. Ubicación y Geología

La zona de estudio se ubica en el extremo sur del Domo de Yauli - Junín, estructura tectónica que alberga yacimientos minerales como San Cristóbal, Toromocho, Andaychagua, Morococha y Ticlio, que conforman una región minera de primer orden del Perú Central. Estratigráficamente en el Proyecto Zoraida la unidad más antigua es el grupo Mitu de edad Pérmico-Triásico, con una marcada discordancia reposa sobre ésta las rocas carbonatadas del Grupo Pucará de edad Triásico – Jurásico inferior, este grupo dividido en dos formaciones el Aramachay y Condorsinga donde la actividad volcánica efusiva sincrónica es representada por el Basalto Montero que separa a éstas dos formaciones. Sobre ésta yace en discordancia paralela el Grupo Goyllarisquizga de edad Cretácico inferior compuesta por areniscas que infrayacen a la Formación Chúlec del Grupo Machay de edad Cretácico superior *(Figura 1).*

6. Resultados

6.1. Caracterización macroscópica

6.1.1. Rocas basálticas

Muestras de roca de color gris verdoso y color violáceo de textura afanítica y amigdaloide (amígdalas de 1-2 cm alongadas hasta 3 cm rellenados de calcita y óxidos) con moderada a fuerte susceptibilidad magnética según el grado del lápiz imantado. Sin embargo, una de las muestras, de color violácea y de textura afanítica no indica susceptibilidad magnética alguna y su grado de dureza (lápiz de dureza) es mayor al resto de las muestras, lo que sugiere que ha sido afectada por silicificación.

6.1.2. Rocas carbonatadas

Fm. Aramachay, Rocas carbonatadas de color gris oscuro y gris verdoso de textura grainstone con débil efervescencia al HCl y micro-oquedades de disolución.

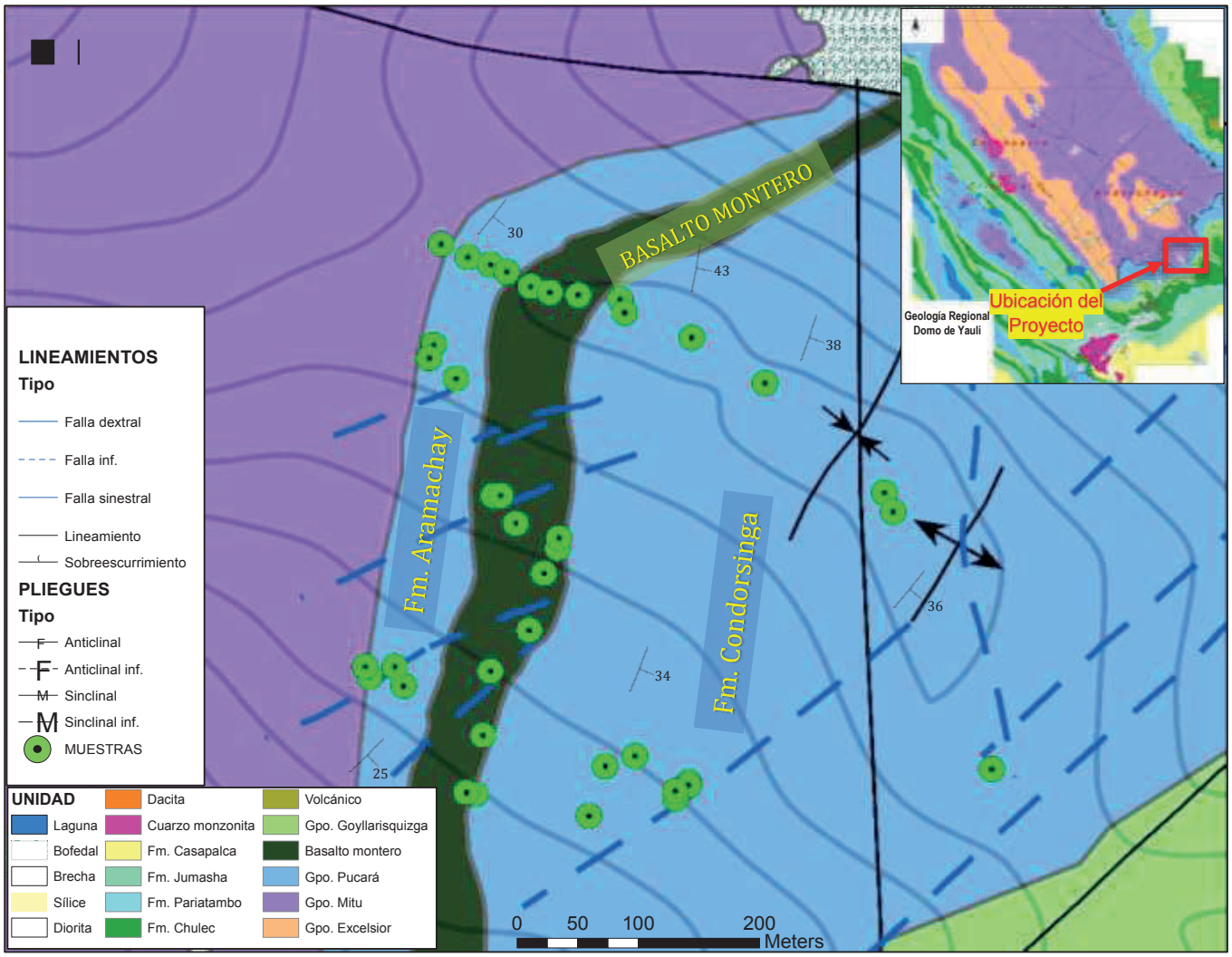


Figura 1. Plano Geológico y ubicación de las muestras

Fm. Condorsinga, Rocas carbonatadas de color gris claro y beige con texturas entre mudstone y grainstone con componentes aloquímicos (oolitos) y con fuerte efervescencia al HCl con excepción de algunas muestras que presentan débil reacción, también se observó en las muestras débil a nulo descarbonatación (deleznable).

6.2. Clasificación litológica empleando litogeoquímica

6.2.1. Caracterización litogeoquímica de las rocas carbonatadas

El análisis litogeoquímico en las rocas carbonatadas muestran mayor concentración de los elementos *Ca* y *Mg* permitiendo definir dos litologías: Dolomías (Fm. Aramachay) y Calizas (Fm. Condorsinga). En algunas muestras de caliza en la Fm. Condorsinga se encontraron importantes concentraciones de *Mg* lo que estaría indicando dolomitización local *(Figura 2).*

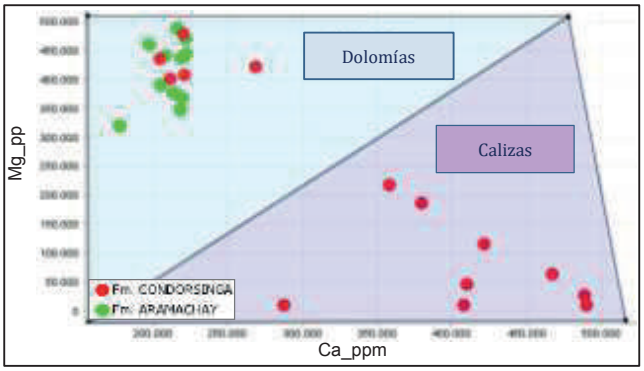


Figura 1. Análisis correlacional Ca vs. Mg

6.2.2. Caracterización litogeoquimica de las rocas basálticas.

Para el análisis de las muestras de rocas basálticas se utilizaron los elementos inmóviles y no los elementos mayores porque se observaron evidencias de alteración como carbonatación (calcita en las amígdalas), oxidación, silicificación y alteración de los minerales ferro-magnesianos, los resultados se ploteó en el diagrama *Zr/Ti* vs *Nb/Y* (Pearce, 1996) verificando la concentración de estos elementos con los límites de detección *(tabla 1)*. El resultado del ratio de *Nb/Y* varían entre 0.021 y 0.060 en muestras con moderada a fuerte susceptibilidad magnética, sin embargo, una muestra que tiene susceptibilidad magnética nulo el ratio indica 0.27 y la concentración de *Si* sobrepasa del 50% a diferencia de los demás donde la concentración varía entre 20% – 40% lo que indicaría que la muestra sufrió silicificación. En cuanto al ratio *Zr/Ti* varían entre 0.012 y 0.056 *(Figura 3).*

Elemento	LOD
Nb	1
Ti	8
Zr	2
Y	2

Tabla 1. Limites de deteccion en ppm (LOD)

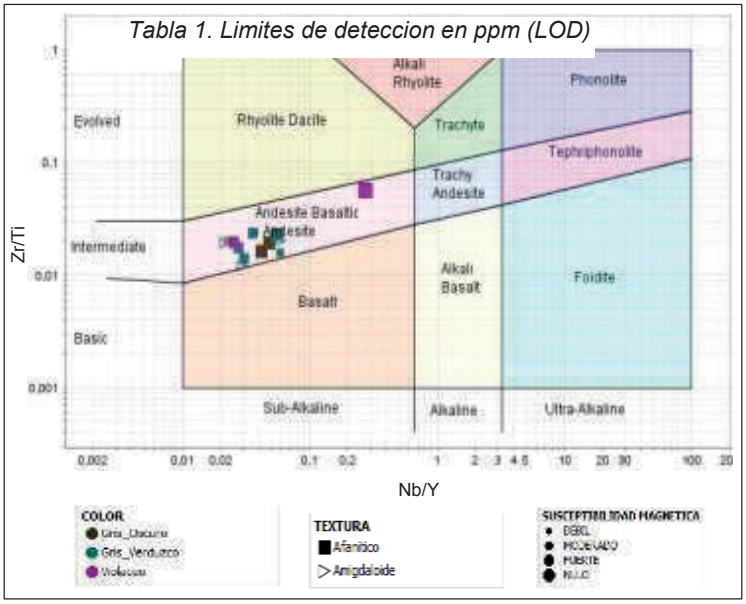


Figura 3. Diagrama Zr / Ti vs. Nb / Y (Pearce, 1996)

6.3. Vectorización de los elementos Pb-Zn

La interpretación geoquímica de los elementos económicos Pb – Zn se realizó mediante el análisis composicional de datos con el algoritmo CLR que consiste en transformar datos cerrados (concentración de elementos) en datos abiertos mediante la fórmula propuesta por Aitchison (1982) para que no haya correlaciones espurias. La vectorización se realizó mediante una geoestadística gráfica.

$$Zi = \log(Xi/H(XD)) \ (i = 1, ..., D)$$

Donde H(XD) es la media geométrica de la composición

El gráfico de componentes principales indica que el *Pb* posee más afinidad a las rocas carbonatadas y el *Zn* posee más afinidad a las andesitas basálticas *(Figura 4).*

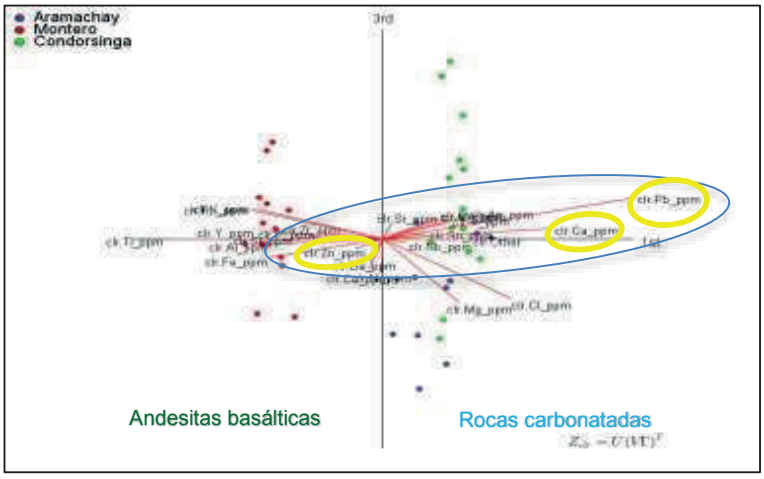


Figura 2. Representación gráfica de los componentes principales de los datos geoquímicos

El resultado del análisis composicional de los datos geoquímicos muestra que las anomalías de *Zn-Pb* estaría correlacionado principalmente al *Ca,* por lo que en las rocas carbonatadas el *Pb-Zn* estaría relacionado a una alteración de descarbonatación (liberando *Ca y Mg*) y en las andesitas basálticas relacionado a una alteración de las plagioclasas (liberando de *Ca*) precipitando calcita y rellenando las amígdalas. También se observa que el *Pb* y el *Zn* tienen una correlación inversa en la Fm. Condorsinga *(Figura 4)*, es decir mayor concentración de *Pb* que de *Zn*, lo que indicaría que las anomalías de *Pb* en la Fm. Condorsinga estaría relacionado a algunos lineamientos o fallas que se presentan en el proyecto *(Figura 5)*. Lo que se comprueba estos resultados en los sondajes diamantinos con la interpretación geológica *(Figura 6).*

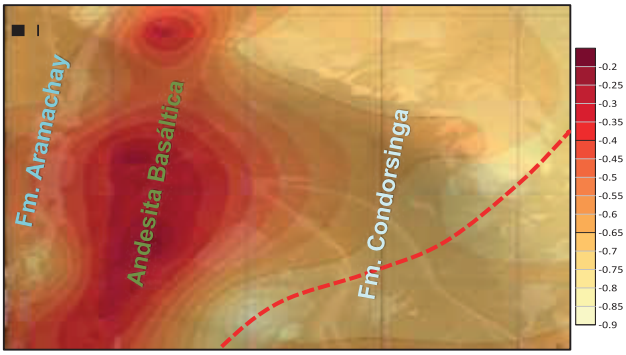


Figura 4. Representación gráfica del análisis composicional de los elementos Ca/Pb+Zn

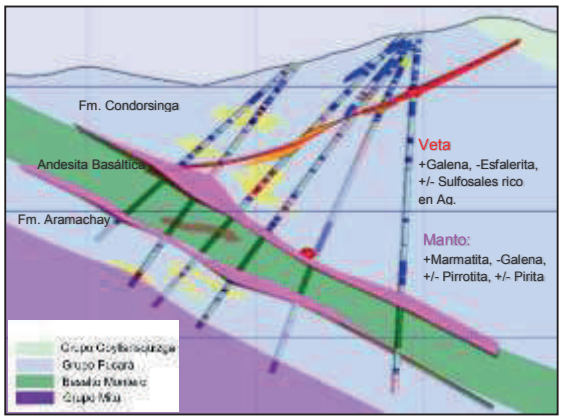


Figura 5. Mineralización de las estructuras en el Proyecto Zoraida (Exploraciones Zoraida – VOLCAN, 2019)

7. Conclusiones

Macroscópicamente se caracterizó dos tipos de litologías predominantes, litologías basálticas y litologías carbonatadas. Con el análisis litogeoquímico de los datos obtenidos con el analizador XRF Portátil Niton XL5 se concluye que, las rocas basálticas se caracterizan como andesitas basálticas y las rocas carbonatadas se caracterizaron como Calizas (Fm. Condorsinga) y Dolomías (Fm. Aramachay).

El análisis de los elementos *Pb y Zn* aplicando del algoritmo CLR sugiere que las anomalías de estos elementos están relacionadas a alteraciones hidrotermales, como alteración de las plagioclasas en las andesitas basálticas precipitando calcita y en rocas carbonatadas relacionado a una alteración de descarbonatación (liberando de *Ca y Mg*).

La representación gráfica del análisis composicional indica anomalías altas en la andesita basáltica *(+Zn, -Pb),* formando clavos importantes de mineralización en las texturas amigdaloides, por lo que éste tipo de litología sería un horizonte favorable para seguir explorando, además que, éstas texturas son propicios para hospedar mineralización de elementos económicos.

En las rocas de la Fm. Condorsinga la correlación de *Pb* es inversa al *Zn (+Pb, -Zn)*, por lo que la mayor concentración de *Pb* estaría relacionado a estructuras vetiformes en estas calizas evidenciándose estos resultados en los sondajes diamantinos.

Agradecimientos

A la Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión por los conocimientos obtenidos.

A todos del Proyecto Zoraida en especial al Ing. Marco Meza Atencio por su confianza y apoyo en la obtención de información y datos del proyecto.

A mi Padre Aureliano y a mi Madre Epifania que, por su ejemplo de perseverancia y humildad mostrándome el camino, cuyo resultado es lo que soy ahora.

Referencias

Aitchison, J. (1982). The Statistical Analysis of Compositional Data. Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological). 44 (2): 139–177.

Bauer M. (2018). Exploring New Frontiers of in Situ Geochemical Analysis, using the Thermo Scientific Niton XL5 XRF Analyzer, application note. Thermo Fisher Scientific, Tewksbury, MA USA.6:1-6.

Pearce, J. A. (1996). A user´s guide to basalt discrimination diagrams. In:Wyman, D. A. (eds) Trace Element Geochemistry of Volcanic Rocks: Applications for Massive Sulphide Exploration. Geological Association of Canada, Short Course Notes 12, 79-113.

Pearce, J. A. and Norry, M. J. (1979). Petrogenetic Implications of Ti, Zr, Y, and Nb Variations in Volcanic Rocks Contributions to Mineralogy and Petrology 69, 33–47.

Rosas, B. S., Tankard, A., Fontboté, L. (2006). Tectonic Evolution and Paleogeography of the Mesozoic Pucará Basin, Central Peru. Journal of South American Earth Sciences 24:1–24

MODELO LITOGEOQUÍMICO DE ALTERACION EN 3D Y SU IMPLICANCIA EN LOS CONTROLES DE LA MINERALIZACION DEL YACIMIENTO VMS CERRO LINDO

Maylin Mendoza Mondragón[1], Cristina Palacios Allca[2]

[1] Nexa Resources, Lima, Perú(maylin.mendoza@nexaresources.com)
[2] Explomin del Perú, Lima, Perú (criztina.palacios@gmail.com)

1. Abstract

The interpretation of lithogeochemical diagrams established alteration assemblies (J. Bueno & M. Mendoza, 2019). From this, these assemblies were plotted in the diamond drill holes and a 3D alteration model was generated for Ore Body 1 and 2 (OB1-OB2), in order to give the lithogeochemical data a 3D approach and determine alteration trends and establish a correlation with other mineralization controls (structural, geophysical, geochemical). This information is intended to support the creation of an explicit alteration model that has now been completed with other exploration tools that serve to generate new targets at the Cerro Lindo Mining Unit.

2. Introducción

El área de estudio se ubica en la parte occidental del Perú, en la provincia de Chincha, departamento de Ica, a 175 km al SE de Lima. Cerro Lindo es un depósito de sulfuro masivo vulcanogénico VMS de Zn-Cu (Ag-Pb), 52 Mt de Reservas (P+P) con 1.44 %Zn, 0.61%Cu, 0.20%Pb, 0.68 oz/t Ag (2020), y está compuesto de varios cuerpos subverticales.

El yacimiento está emplazado en la cuenca back-arc cretácica en rocas félsicas que gradan de composición andesítica, dacítica a riodacítica; siendo las rocas proximales las que presentan mayor relación con la mineralización (riodacitas).

Cerro Lindo posee una geometría peculiar de cono invertido con gradientes geotérmicos que van desde 200° a 350°C los cuales guardan relación con el Zonamiento de la mineralización; la zona de alta temperatura (Po-Py) y zona de baja temperatura (Sp-Gn-Py-Ba) (Figura 1).

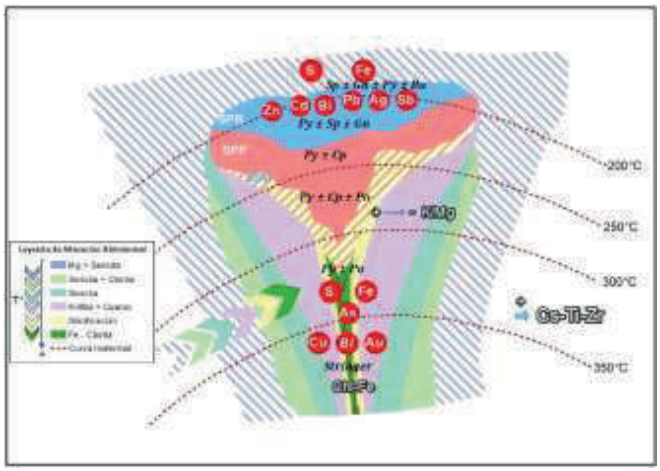


Figura 1: Modelo esquemático de alteración hidrotermal en Cerro Lindo (Informe de Exploraciones Cerro Lindo, 2018).

El índice CCPI vs AI (Ishikawa et al., 1976) presenta un vector hacia la mineralización, en el centro del sistema se observa sericita potásica más clorita con contenido elevado de Fe (clorita-pirita); y en las partes más distales clorita magnésica, calcita y epidota (Bueno & Mendoza, 2019).

El emplazamiento de los sulfuros masivos del depósito refleja un fuerte control estructural en su formación y preservación, ya que los cuerpos mineralizados se alinean en bloques estructurales delimitados por fallas que actuaron como conductos de mineralización con rumbo (NW-SE). (Hinostroza, 2009).

Por medio de diagramas litogeoquímicos se establecieron los ensambles de alteración (Bueno & Mendoza, 2019). Se ploteó estos ensambles en

los sondajes diamantinos y se generó un modelo de alteración en 3D para el ore bodies 1 y 2 (OB1 y OB2), con la finalidad, de determinar las tendencias de alteración y establecer una correlación con otras guías de la mineralización (estructural, geofísica, geoquímica) en el contexto espacial. Con este set esta información se buscó sustentar la creación de un modelo de alteración que completado con otras herramientas de exploración sirvan para generar nuevos targets en la Unidad Minera Cerro Lindo.

2. Metodología

Se tomó como referencia las interpretaciones de los diagramas litogeoquímicos de Alteración Box Plot (Large et al., 2001) e índice de alteración de Hashimoto (AI, Ishikawa et al., 1976) complementado con el gráfico Molar Al/Zr vs (Na+K)/Zr (Stanley & Madeisky, 1994) para este análisis se incluyó 448 muestras de sondajes diamantinos en zonas de roca caja , las muestras se analizaron por el tipo de análisis ICP-MS por el método LF200 (fusión en metaborato de litio).

En base a los resultados obtenidos se establecieron ensambles de alteración los cuales se plotearon en los sondajes diamantinos y se realizaron secciones transversales para poder generar un modelo de alteración, en base a las interpretaciones.

Al ser el OB1 y el OB2, los cuerpos con mayor información litogeoquímica, lo cual permite establecer un mejor análisis y por ende un modelo 3D mejor sustentado, y considerando que el OB1 y OB2 presentan un comportamiento de la mineralización diferenciado entre sí, por ser de diferentes eventos (justificado con secuencias paragenéticas) y tener controles estructurales asociados a diferentes sistemas de fallas (Figura 2)

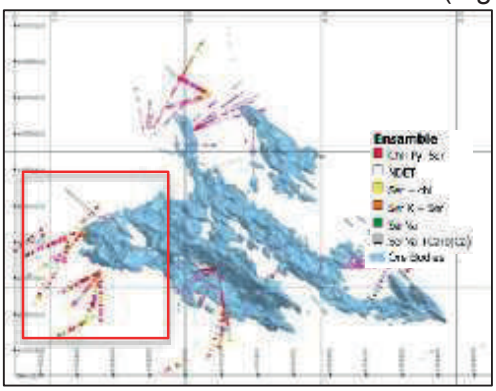


Figura 2: Distribución espacial en planta de los sondajes diamantinos con ensambles de alteración.

El modelo de alteración en el OB1 y OB2, esta alimentado de 27 sondajes diamantinos que fueron muestreados de manera puntual solo en la roca caja volcánica y de forma sistemática en funcion de las profundidades del sondaje diamantino. A partir de esto se elaboró el modelo de alteración, tomando como referencia los cuerpos mineralizados, lo que nos permitió determinar el vector guía de alteración para la búsqueda de nuevos cuerpos mineralizados; al establecer correlaciones con los controles estructurales, geofísicos y geoquímicos de la mineralización estudiados en Cerro Lindo, para complementar esta interpretación se ploteó la geoquímica de Zn-Cu, para poder tener delimitados los zonas con mayor ley para estos elementos.

Diagrama 1: Proceso de la metodología aplicada.

4. Modelo 3D de alteración

Se consideró realizar el modelo del OB1 y el OB2 debido a las diferentes características que poseen; el OB1 pertenece a un primer evento de la mineralización (evento primario), es de baja ley de Cu y Zn, con litología principalmente de SSM (mineralización en bandas sobre roca volcánica, y controlado por fallas de poca profundidad NW-SW, las cuales transportaron mineralización de tipo Cpy1, además se ubica hacia la zona de Borde del yacimiento; mientras que el OB2 es un cuerpo de sulfuros masivos de alta ley de Cu y Zn, relacionado a eventos posteriores de la mineralización , con dominio de SPB (sulfuro primario de Baritina) y SPP (sulfuro primario de pirita), está controlado por fallas profundas NW-SE y que pertenece al corredor estructural principal que nos permitirá definir mejor los vectores de alteración (Canales, 2015).

En base a los ensambles de alteración determinados por la interpretación del diagrama CCPI/AI, se llevó esta información a los sondajes diamantinos y se generaron e interpretaron secciones que establecieron los siguientes dominios relacionados al mismo evento de mineralización: (Figura 3)

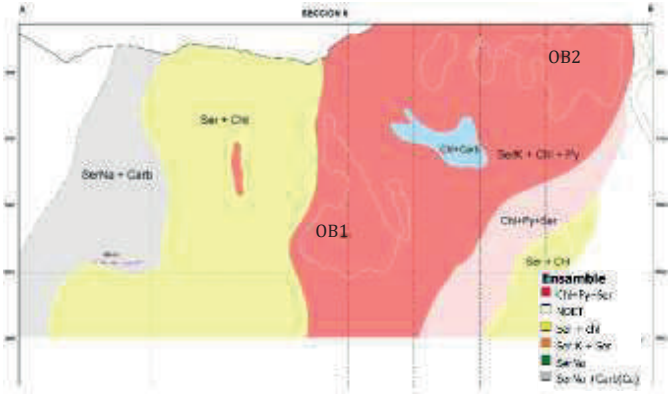


Figura 3: Sección transversal N° 6, dominios de alteración según ensamble del gráfico CCPI vs AI.

El ensamble más cercano a la zona mineralizada está determinado por SerK+ChlFe [0.8-1] (zona caliente). Hacia la zona más distal se observan finos halos de Ser-Na [0.4-0.6] y de manera muy aislada a los bordes ChlMg [1-1.6] (zona fría) (Figura 4)

SerK+ChlFe(Py) [0.8-1] (zona caliente), es el halo de alteración más cercano a la zona mineralizada que abarca en su mayor potencia 500 m de ancho por 600m de profundidad, es el halo más extenso y pervasivo que abarca tanto la roca techo como la roca caja. Esta zona está marcada por la pérdida del Na_2O y CaO pero enriquecimiento en K. La piritización se produce como diseminaciones, parches y venillas enriqueciendo en Fe a la clorita de alteración de esta zona.

La zona SerK+ChlFe (Py) está relacionada principalmente a la zona de debilidad (fallamiento). Esta alteración se hace más potente hacia los cuerpos de sulfuros masivos de alta ley (OB2) (segundo evento de mineralización (Figura 4).

SerK+Chl [0.8-0.4] zona de intermedia temperatura, son delgados halos que se presenta de forma puntual y se emplaza en las zonas donde se observa contactos entre riodacitas y riolitas. En esta zona empieza a marcar la presencia de mineralización, pirita diseminada y en parches con presencia puntual de Calcopirita (SSM). Se evidencia la perdida de Fe en la clorita, y K en la sericita. Se extiende con mayor proporción hacia cuerpos de baja ley (primeros eventos de mineralización) (Figura 4)

Ser - Na [0.4-0.6]- zona fría, son halos de poca dimensión, esta alteración es no pervasiva, relacionadas a rocas menos diferenciadas andesita-dacita. Disminución del K y aumento del Na en las micas. (Figura 4)

ChlMg [1-1.6] (zona fría), esta alteración es puntual, relacionada en zonas de intrusivo y diques andesíticos, que corresponde a las eventos más tempranos de alteración, enriquecimiento de Mg principalmente en la clorita y Calcita en venillas. (Figura 4)

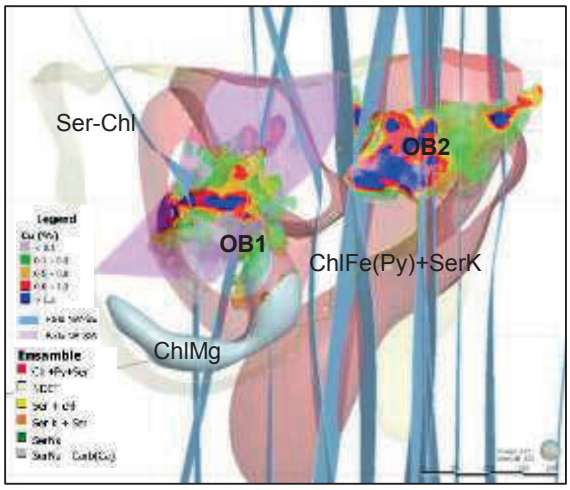


Figura 4: Modelo de alteración 3D en el Yacimiento Cerro Lindo con la geoquímica de Cu ***(OB1-OB2)***

5. Correlación de la litogeoquímica con otros controles de la mineralización

5.1 Litogeoquímica-Geoquímica Vs Geología Estructural

El yacimiento de Cerro Lindo está hospedado en una secuencia volcánica félsica con afloramientos expuestos en una franja de dirección NW-SE. Este nivel volcánico presenta grandes halos de alteración con diferentes mineralogías e intensidad de alteración, los cuales han sido afectados por las variaciones térmicas y por los grandes sistemas de fallas NW-SE y fallas posteriores N-S.

El OB1 cuyo control ha sido marcado por fallas poco profundas NW-SW de mayor ángulo y con mayor espaciamiento entre sí, son de borde con poco arrastre de mineralización económica, relacionadas a la alteración Ser –Chl y las fallas NE-SW las cuales han sido los conductos de las zonas puntuales de alta ley en el OB1, estas zonas presentan un fuerte halo de alteración SerK+ChlFe (Py) (Figura 5)

En el OB2 se observa un gran sistema de fallas profundas NW-SE, las cuales traen mineralización económica y se acercan hacia la zona de SerK+ChlFe (Py) (Figura 5).

Al existir el control estructural profundo con sistemas de fallas (NW-SE) cuyos esfuerzos han sido continuos y el dip de menor ángulo, son las más favorables para formar zonas económicas y presentaran la relación con la alteración guía hacia el centro del cuerpo.

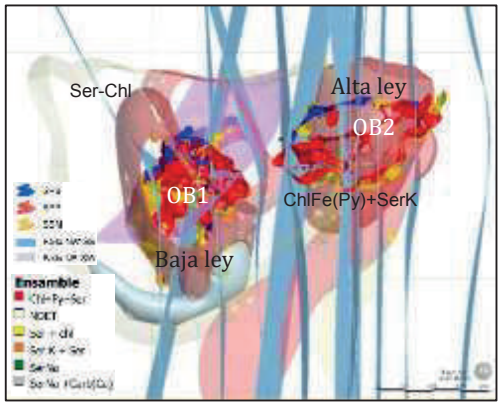


Figura 5: Modelo de alteración Vs Estructural Vs Litología

5.2 Litogeoquímica-Geoquímica Vs Geofísica

Según los trabajos de geofísica PI realizados en el año 2017 se detecta anomalías de baja resistividad (40ohm-m) y alta capacidad de cargabilidad (40mrad). Esto podría indicar una continuación de mineralización de la unidad minera. (Ver Fig. 6)

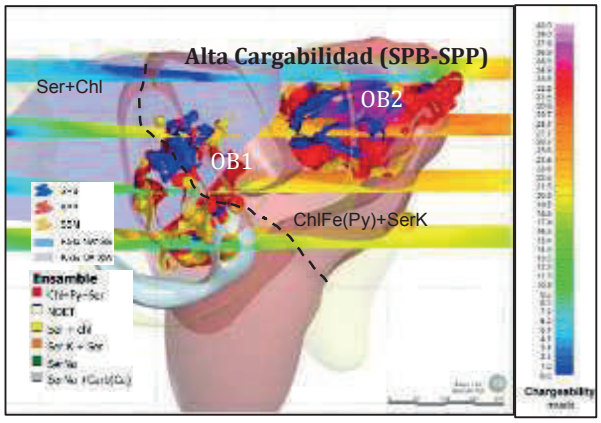


Figura 6: Geofísica (Cargabilidad) Vs Alteración Vs Litología.

El OB1 presenta baja cargabilidad debido al tipo de litología (SSM), con contenido del 20 al 50 % de sulfuros. Esta zona guarda relación con la zona de baja ley (parte inferior del cuerpo) donde se extiende el halo Ser+Chl y de manera puntual aparece la ChlMg (Figura 6).

El OB2 presenta alta cargabilidad debido al emplazamiento masivo de sulfuro >50% (SPP-SPB) y guarda relación con la zona de alteración que es la guía al centro de los cuerpos mineralizados (Figura 6).

6. Resultados

El modelo de alteración para el OB1 y OB2 sugiere que la alteración SerK+ChlFe (Py) forma el halo proximal que bordea la mineralización. Este halo varía su potencia en función de la profundidad y temperatura. A mayor temperatura la alteración se torna más extensa y se relaciona a (zona de Cpy-Po) mientras; en la zona superior del sistema VMS la potencia disminuye (zona de Sp-Gn-Ba), y aumenta la potencia de la alteración Ser+Chl.

En la sección A-A´ tomada a un sondaje diamantino vemos que la zona de alta ley comprende justamente a la alteración ChlFe (Py) + SerK y a menos de 20 metros de esta zona mineralizada donde las leyes empiezan a decrecer está el predomino de Ser + Chl, tener en cuenta que muy cerca de la zona de alta ley se forma un delgado halo de Ser K justo hacia el Este donde se evidencia los demás emplazamientos de los cuerpos mineralizados del yacimiento (Figura 7)

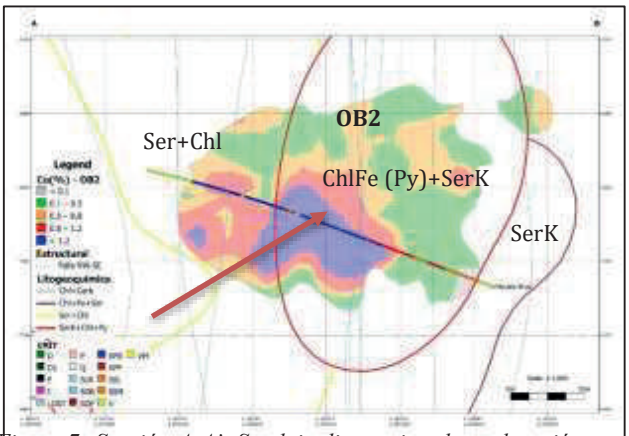


Figura 7: Sección A-A', Sondaje diamantino de exploración, con Caracterización de alteración y geoquímica del Cu en el OB1

7. Conclusiones y Recomendaciones

Al llevar la data litogeoquímica generalmente usada en diagramas de interpretación a un modelo tridimensional ha permitido tener una mejor correlación con el control litológico, geofísico,

geoquímico y estructural, y se logró establecer un vector definido de la siguiente manera (riolita-riodacita + fallas NW-SE (mineralizadas)+ SerK+ChlFe (Py) + cargabilidad alta). Este vector que combina todos los controles de la mineralización llevaría a acercarnos de manera más certera zonas con potencial económico en un yacimiento tipo VMS.

Del modelo de alteración se concluye que hacia los cuerpos masivos con altas leyes en Zn –Cu como el OB2 prevalece el dominio el ensamble (Serk+ChlFe (Py)) y hacia los cuerpos piritosos con escasa calcopirita el halo con mayor predominio es Ser (K)+Chl.

El halo de alteración SerK+ChlFe(Py) tiene mayor potencia y dominio en fallas profundas que han traído mineralización económica de Zn –Cu (NW-SE y NE-SW), fallas relacionadas a los cuerpos de alta ley; mientras que las fallas poco profundas NW-SE, que traen mineralización de baja ley se relacionan a la alteración Ser-Chl.

La geofísica nos indica que la alta cargabilidad está relacionada a los cuerpos masivos. Por ende el OB1 es un cuerpo conformado principalmente por litología de SSM (volcánico con pirita diseminada), por lo cual presenta poca cargabilidad; en cambio el OB2 es un cuerpo masivo de sulfuros (Py-Cpy-Sp), lo que le da mayor cargabilidad. Determinamos que la alteración SerK+ChlFe (Py) está limitada a las zonas de alta cargabilidad (zonas potencialmente económicas).

La metodología utilizada en este trabajo puede extenderse para la obtención de modelos de exploración similares para los otros sectores del distrito (Chavín del Sur, Pathuasi Millay, etc).

En base a esta tendencia de alteración, usamos estos criterios en conjunto con el control estructural y litológico, y el resultado obtenido en la exploración del OB12 (Exploraciones Cerro Lindo, 2019), nos llevó a concluir que en otras partes del sistema mineralizado de Cerro Lindo se observa similares vectores de alteración hacia cuerpos de sulfuros masivos. (Figuras 8 & 9),

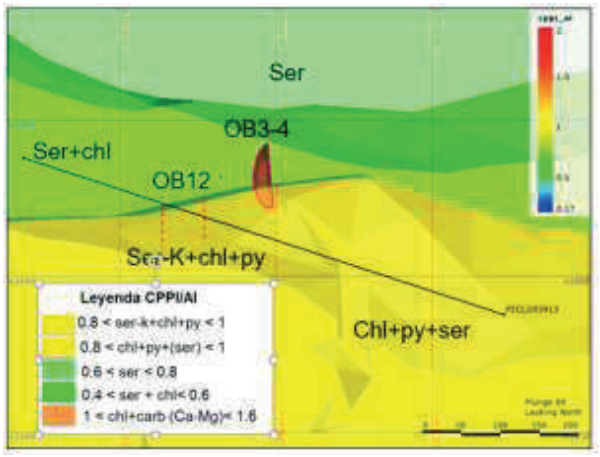


Figura 8: Sección A-A', Sondaje diamantino de exploración, con Caracterización de alteración en el OB12 y OB3-4.

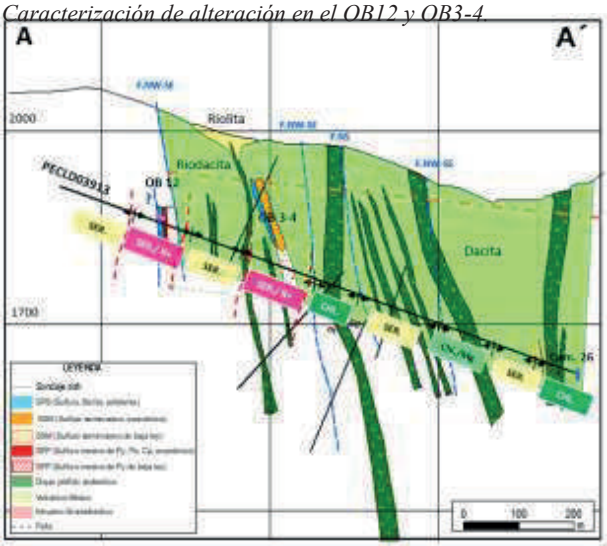


Figura 9: Sección A-A', Sondaje diamantino de exploración con halos de alteración OB12 y OB3-4.

Se recomienda incrementar la data en otros cuerpos referenciales con las tendencias ya determinadas para corroborar los vectores y establecer firmas de alteración

Agradecimientos

A la compañía minera Nexa Resources por facilitar la información requerida para la elaboración del presente trabajo y a los geólogos de la Unidad Minera Cerro Lindo, por el apoyo constante y el trabajo en equipo.

Referencias

Bueno, J. & Mendoza, M (2019), Caracterización litogeoquímica en el Yacimiento VMS-Cerro Lindo y su relacion con la mineralización para

determiner vectores guías en la exploración. Lima, Perú. Proexplo2019.

Canales, J, (2015). Informe de Cartografiado geológico-estructural y muestreo geoquímico - litogeoquímico Cerro lindo.

Hinostroza de la Cruz, J.H., (2009). Proyecto Cerro Lindo. Geología y Zonamiento Cu-Zn. Tesis para Optar el Título Profesional de Ingeniero Geólogo. Universidad Nacional de Ingeniería. Facultad de Ingeniería Geológica, Minera y Metalúrgica. Lima, Perú.

Ishikawa, Y., Sawaguchi, T., Ywaya, S., and Horiuchi, M., (1976), Delineation of prospecting targets for Kuroko deposits based on modes of volcanism of underlying dacite.

Large, R.R, Gemmel, J.B., Paulick, H., and Huston, D.L., 2001, Hidrotermal alteration and volatile element haloes for the Rosebery K lens volcanic-hosted massive sulfide deposit, western Tasmania; Economic Geology, v. 96, p. 1055-1072.

Stanley, C.R. and Madeisky, H.E., 1994, Litogeochemical exploration for hydrothermal ore deposits using Pearce Element Ratio analysis, in Alteration and Alteration Processes Associated with Ore-Forming Systems, (ed.) D.R. Lentz; Geological Association of Canada, Short Cource Notes, V. 11,P. 193-211.

Análisis de Componentes Principales de elementos traza en sedimentos de corriente de la cuenca Cháparra (Arequipa) como herramienta de prospección aurífera

Genaro Manuel Ypanaque Reto[1]

[1] Domingo Sarmiento N° 377, Rímac, Lima-Perú, gypanaquere@gmail.com

1. Abstract

The Bi-Au-W geochemical association in stream sediments is spatially related to gold deposits in the Cháparra Basin (Coastal Cordillera, southern Peru). This and other associations were recognized using the statistical method of principal component analysis, being an effective tool to delimit areas of interest in geochemical prospecting by means of stream sediment sampling.

2. Introducción

La información cuantitativa obtenida de los análisis geoquímicos en muestras de sedimentos de corriente usualmente contiene una gran cantidad de variables. La técnica estadística multivariable de Análisis de Componentes Principales (ACP) utiliza las correlaciones existentes entre las variables para crear otras nuevas, que permiten reducir la información original e identificar asociaciones geoquímicas que se asocien a procesos geológicos.

El presente trabajo involucra el uso de ACP de elementos traza en sedimentos de corriente de la cuenca Cháparra (Arequipa) y tiene como objetivo determinar correlaciones multivariables que sean de utilidad en prospección aurífera en el área de estudio y en entornos similares. La base de datos de geoquímica como el software estadístico utilizado para el procesamiento de información son de libre disponibilidad y pueden descargarse de https://geocatmin.ingemmet.gob.pe/geocatmin/ y https://rstudio.com/, respectivamente.

3. Área de estudio

Este trabajo comprende la cuenca del río Cháparra, ubicada en la zona NO del departamento de Arequipa (Perú), ver Figura 1. La cuenca alberga cuantiosas unidades mineras, en su mayoría por tipo vetas auríferas (Chambi, 2014 y Deza, 2016). Según el Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET, 2017), los parámetros principales considerados en el diseño de muestreo son: una muestra compuesta por cada 4 km^2, recolectadas en quebradas de primer y segundo orden, preferentemente en la parte central del cauce y en donde no se evidencie contaminación de una u otra margen. El tamiz de malla utilizado en campo fue el ASTM N° 30 y se consideró 3 kg para muestras secas y 5 kg para muestras húmedas. Todas las muestras fueron sometidas a digestión agua regia. Los métodos analíticos de FA y AAS se utilizaron para el oro, mientras que para el resto de los elementos se utilizó el ICP-MS. En total se procesaron 511 muestras correspondientes a la Prospección Geoquímica Regional de los cuadrángulos de Cháparra y Ático.

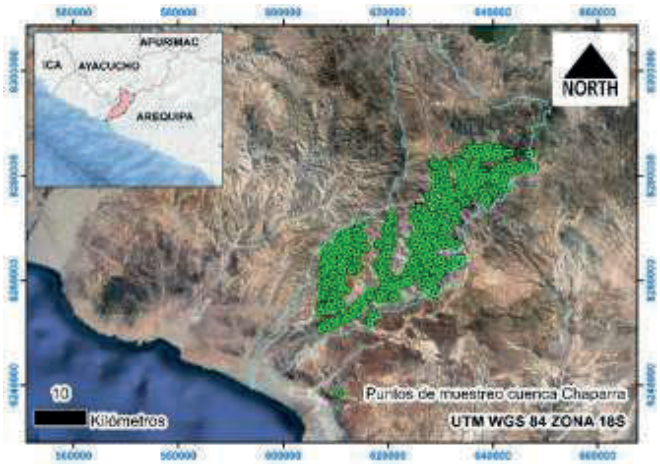


Figura 1. Ubicación del área de estudio

3.1. Geología Regional

En la mayor parte de la cuenca Cháparra se emplazan rocas intrusivas cretácicas del Batolito de

la Costa. Hacia la parte NE y SO afloran formaciones sedimentarias y volcánico-sedimentarias del Jurásico-Cretácico. La Formación Huaylillas al oeste y la Formación Moquegua al este representan el vulcanismo del Neógeno en el área de estudio y están sobreyaciendo al resto de formaciones y cuerpos intrusivos. Respecto a la ocurrencia de mineralización aurífera, los cuerpos intrusivos del Batolito de la Costa comúnmente hospedan vetas de cuarzo-oro con espesores de 0.1 a 2.5 m (Chambi, 2014). Su emplazamiento está controlado por el contacto entre los diferentes pulsos intrusivos que forman el Batolito de la Costa en conjunto con los sistemas estructurales presentes (Palacios et al., 2011).

3.2. Selección de variables y pre-procesamiento de datos

Se utilizaron por cada muestra (511 en total), 29 variables o concentraciones elementales: Ti, Ba, Cr, Cu, Mn, Pb, Sr, V, Y, Zn, Zr, Li, Be, Nb, Mo, Sb, La, W, Bi, Th, U, Co, Ni, Cd, As, Hg, Au, Sn y Ag. Los valores por debajo del límite de detección fueron reemplazados por la mitad del límite de detección inferior instrumental y todas las concentraciones (en ppb o ppm) fueron recalculadas a escala logarítmica natural, a fin de optimizar el grado de correlación estadística entre las variables. Los valores atípicos extremos superiores e inferiores no muestran influencia significante en el presente estudio, por lo que fueron considerados en el análisis.

4. Análisis estadístico

4.1. Análisis Bivariante

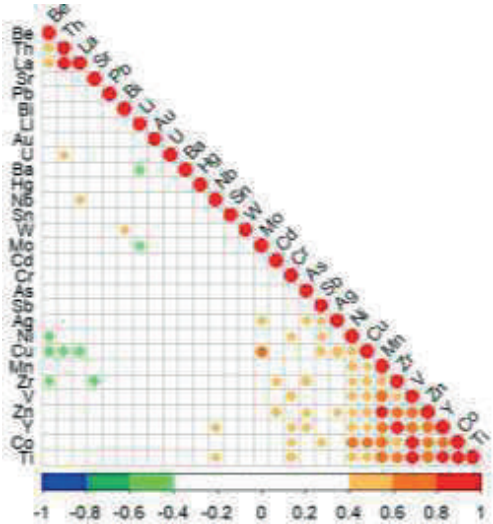


Figura 2. Matriz de correlación de Pearson

De acuerdo con la Figura 2, existen correlaciones muy altas (≥0.8) entre las variables en estudio. Entre las más resaltantes se tiene V-Co (0.91), Ti-V (0.90), Ti-Co (0.87), La-Th (0.87), entre otras.

4.2. Análisis Multivariante

4.2.1. Test de Esfericidad de Barlett

Este test se utiliza para evaluar si las variables en estudio tienen intercorrelación entre sí y se justifica un análisis factorial. Un valor de $p < 0.05$ resulta significativo para dicho análisis (Everitt & Wykes, 2001). Para el actual estudio se tiene un valor de $p < 2.2e\text{-}16$.

4.2.2. Medida de adecuación muestral de KMO

Este estadístico se utiliza para evaluar si las correlaciones entre pares de variables pueden ser explicadas por otras. Un valor superior a 0.70 sugiere una interrelación satisfactoria entre las variables (Hair et al., 1999). Para el presente análisis se tiene un valor de 0.81.

4.2.3. Análisis de Componentes Principales (ACP)

Mediante esta técnica se puede reducir el número de variables considerando las correlaciones existentes entre las variables originales. Estos componentes explican la mayor parte de varianza total, por lo que la pérdida de información es mínima.

En una primera instancia, se calcula tantas componentes como variables se tenga (29). Posteriormente, en base a criterios gráficos (Figura 3) y numéricos (Tabla 1), se selecciona el número de componentes óptimo para nuestro análisis.

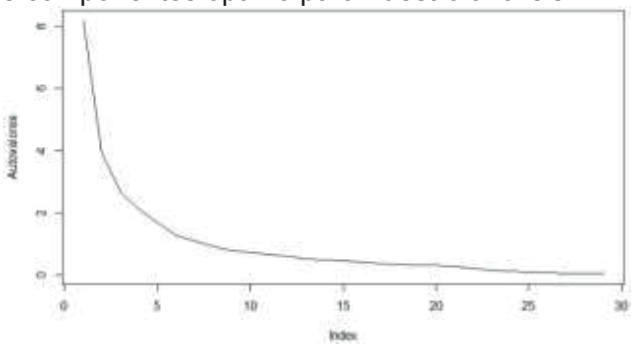


Figura 3. Gráfico de sedimentación

El criterio gráfico (Cattell, 1966), consiste en analizar el gráfico de sedimentación, en donde el número de componentes óptimo está representado por el punto de inflexión a partir del cual la gráfica es lineal y de poca pendiente.

Tabla 1. Autovalores o varianzas de los componentes principales

En la Tabla 1 las celdas resaltadas representan los componentes, y los valores contiguos inferiores

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
8.12	3.99	2.82	2.14	1.68	1.22	1.10	0.92	0.79	0.76
11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
0.66	0.60	0.51	0.48	0.46	0.39	0.36	0.35	0.31	0.29
21	22	23	24	25	26	27	28	29	
0.26	0.22	0.15	0.12	0.09	0.08	0.06	0.05	0.02	

a ellos son sus respectivos autovalores. El criterio numérico de raíz latente (Kaiser, 1958) asume como óptimos los componentes cuyos autovalores sean mayores a 1. En el presente estudio es óptimo trabajar con 7 componentes principales, que en su conjunto explican el 72.6% de la varianza total. Posteriormente, a fin de visualizar los datos de mejor manera, se aplicó la rotación varimax a los componentes principales seleccionados. La Figura 4 resalta el componente RC3, el cual se relaciona principalmente con la asociación Bi-Au-W.

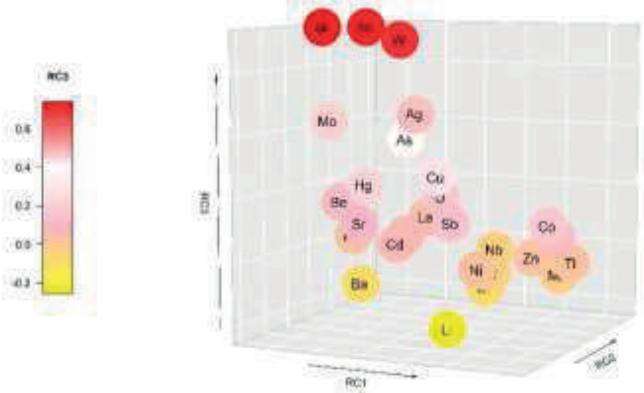


Figura 4. Tres primeras componentes analizadas en espacio tridimensional

5. Resultados

5.1. Asociaciones Geoquímicas

Considerándose significativos los pesos factoriales mayores o iguales a 0.6, se tienen las siguientes asociaciones geoquímicas:

RC1: Ti-Co-V-Mn-Y-Zn-Ni-(Cu-Zr-Cr-Sb)
RC2: Th-La-Nb-(U-Be)
RC3: Bi-Au-W
RC4: Ba-(Mo)
RC5: Zr-Cd-As-Sn
RC6: Pb-(Ag)
RC7: Hg-(Sr)

Entre paréntesis se consignan las variables cuyos pesos factoriales son mayores o iguales a 0.5 y menores que 0.6.

5.2. Mapas de Componentes Principales

Los componentes principales generan puntuaciones para cada punto de muestreo, por lo que es factible realizar mapas de distribución. Debido a que la cuenca Cháparra alberga en su mayoría depósitos auríferos, se analizará el componente rotado RC3. Este componente explica el 8.7% de la varianza total y se comporta como una nueva variable, que se relaciona con los elementos en estudio según se detalla en la Figura 5.

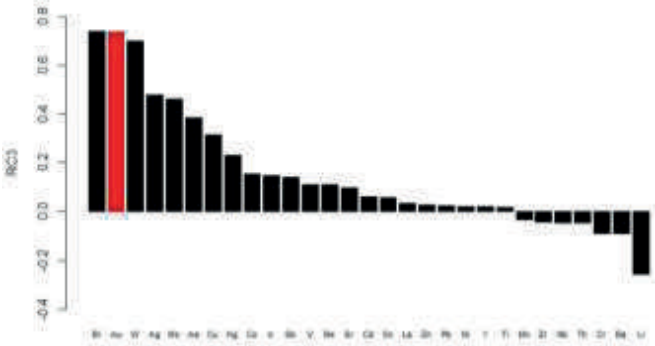


Figura 5. Puntuaciones del componente RC3

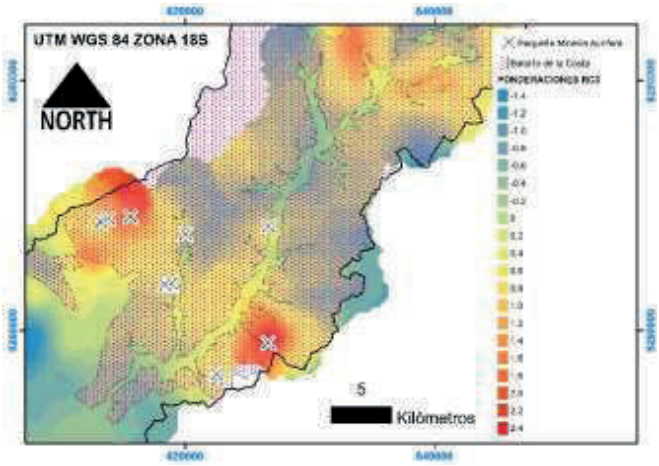


Figura 6. Dispersión (Kriging Ordinario) del componente RC3 en la cuenca Cháparra

A fin de establecer una comparación con las concentraciones elementales de las variables, se muestra el mapa de dispersión del Ln Bi ppb en la cuenca Cháparra.

6. Discusión

Como se observa en las Figuras 6 y 7, las ponderaciones RC3 de mayor intensidad se ubican en la parte SO de la cuenca. Se coinciden con altas concentraciones de Ln Bi ppb y labores de pequeña minería, que explotan vetas auríferas con leyes mínimas de 5 gr/TM (Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico, 2018). Esta mineralización sería la fuente de los altos valores de Ln Bi ppb, cuya distribución espacial es explicada en gran medida por la nueva variable RC3.

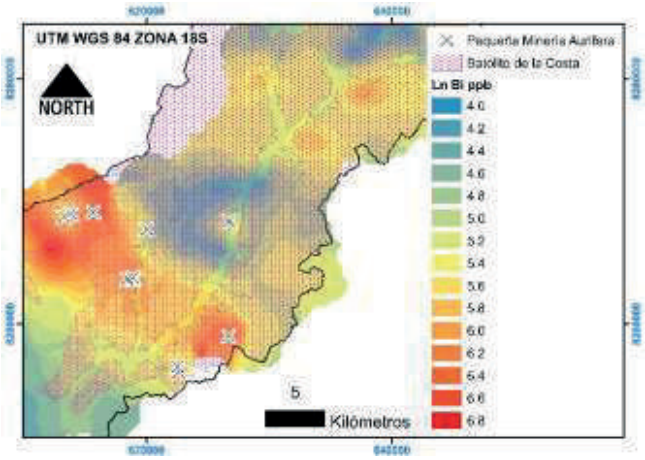


Figura 7. Dispersión (Kriging Ordinario) del Ln Bi ppb en la cuenca Cháparra

7. Conclusiones

El ACP permite identificar asociaciones geoquímicas (p.ej. Bi-Au-W) mediante nuevas variables (p.ej. Componente RC3). Los sistemas magmáticos-hidrotermales de oro en la cuenca Cháparra explican la ocurrencia de la asociación geoquímica Bi-Au-W.

Se deduce además que el bismuto y el tungsteno se comportan como elementos *pathfinder* geoquímicos de oro, siendo de utilidad en prospección de vetas auríferas en entornos similares. Se concluye que el ACP, como parte de la estadística multivariable, es una herramienta efectiva para identificar asociaciones geoquímicas y delimitar áreas de interés en prospección geoquímica, por medio de muestreo en sedimentos de corriente.

Agradecimientos

A la E.P. de Ingeniería Geológica de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos.

Al Ing. Luis Vargas Rodríguez, por sus valiosos aportes para el desarrollo de este trabajo.

Referencias

Cattell, R. 1966. The Scree Test for the Number of Factors. Multivariate Behavioral Research, 245-276.

Chambi, A. 2014. Proyecto de Explotación de la Veta la Picada por el Método Corte y Relleno Ascendente Empresa Minera Aurífera Estrella - Caravelí - Arequipa. Universidad Nacional San Agustín de Arequipa, tesis de grado, 101 p.

Deza, C. 2016. Factibilidad Técnico-Económico del Proyecto de Ampliación en la Mina Abigail Estefanía en el Departamento de Arequipa. Universidad Nacional de Trujillo, tesis de grado, 85 p.

Everitt, B., & Wykes, T. 2001. Diccionario de Estadística para Psicólogos. España: Ariel.

Hair, J., Anderson, R.E., Tatham, R.L. & Black, W. 1999. Análisis Multivariante. Madrid: Prentice Hall.

Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico. 2017. Atlas Geoquímico del Perú. Obtenido de https://www.ingemmet.gob.pe/-/atlas-geoquimico-del-peru-segunda-version-2017

Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico. 2018. GEOCATMIN. Obtenido de https://geocatmin.ingemmet.gob.pe/geocatmin/

Kaiser, H. 1958. The varimax criterion for analytic rotation in factor analysis. Psykometrica, 23, 187-200.

Palacios, S., Alfonso, P., & Mata-Perelló, J. 2011. Caracterización del Yacimiento de Oro de Misky, Sur del Perú. Revista de la Sociedad Española de Mineralogía,159-160.

Estudios de Orientación Geoquímica y el uso de herramientas para destacar anomalías

Geochemical Orientation Studies and the use of tools to highlight anomalies

Miguel Martínez[1]

[1] ALS Global, Hermanos Carrera Pinto 159, Colina, Santiago, Chile (miguel.martinez@alsglobal.com)

1. Abstract

¿Por qué recolectamos muestras de la forma en que lo hacemos? Esta presentación busca atraer la atención de geólogos de exploración a pensar acerca del porque recolectamos y analizamos las muestras de la forma en que lo hacemos y como pequeños cambios en los procedimientos pueden llevar a destacar señales geoquímicas cruciales para el progreso de un programa de exploración.

Why do we collect exploration samples the way that we do? This work will try to get exploration geochemists and geologists to think about how and what they sample, and how changes driven through preparing the sample for analysis can bias the interpretation of data. The resultant data might highlight (or miss) some important processes that can have a crucial role in how explorers choose to progress an exploration program.

1. Introducción

Los estudios de orientación geoquímica pueden tener varios objetivos, pero sin duda, el entender cómo y dónde se distribuyen los elementos de interés es uno de los más importantes, ya que además se define el tipo de muestra y metodología analítica óptimas para el trabajo.

Sumado a eso, se revisan otras variables que también se consideran dentro de los estudios de orientación y como afectan en la respuesta geoquímica y reproducibilidad de los resultados.
Usando casos de estudios, se mostrará como el uso de metodologías óptimas puede afectar positivamente el futuro de un proyecto, mostrando así la importancia de realizar este tipo de estudios para llevar a cabo una campaña de exploración exitosa.

2. La Señal sobre el Ruido

Encontrar un modo de amplificar la señal geoquímica de un proyecto ha sido siempre una práctica habitual entre exploradores, siempre con el objetivo de mejorar las chances de encontrar mineralización económica.

En el caso de muestras de roca, no es difícil ser selectivo y enfocarse en ciertos minerales en busca de aquellas señales, como es el caso del uso de minerales de mena y de alteración, en trabajos de química mineral.

Sin embargo, en muestras de suelo, en el cual se incluye un segundo proceso de dispersión de elementos, no es fácil enfocarse en aquellos minerales, pero si existen diferentes métodos para ser selectivo y enfocar la atención en aquellas fases que nos ayudan a destacar la señal sobre el ruido.

2.1. Selección Física

Es una de las técnicas más comunes y usadas, desde remover material orgánico, o clastos de tamaño mayor, hasta selección granulométrica de acuerdo con la distribución de concentración de cierto elemento en determinados rangos de tamaño de grano.

Un caso muy usado es la separación de la porción rica en filosilicatos, los cuales naturalmente son una trampa de iones metálicos.

Otro ejemplo es la separación magnética, con lo cual se busca concentrar y separar maghemita en muestras de suelo o sedimentos.

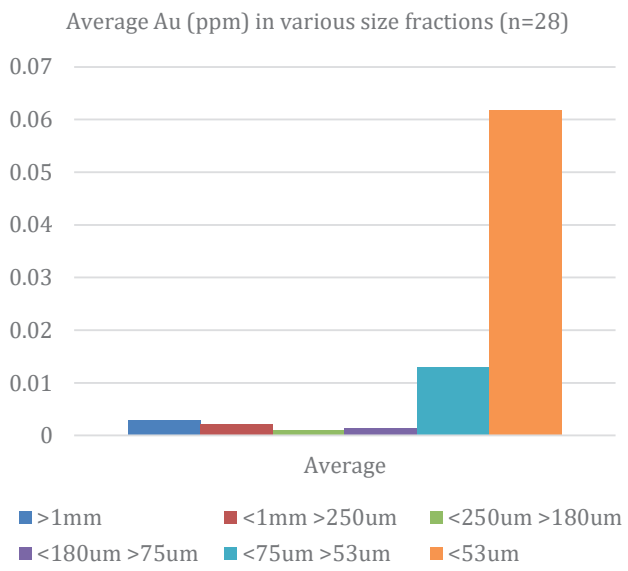


Figura 1: Ejemplo de cómo el tamaño de grano entrega diferentes valores de Au en un set de muestras.

2.1. Selección Química

Si un elemento de interés o "pathfinder" se encuentra asociado a cierto tipo de minerales, existe la posibilidad de solo disolver aquellos minerales, disminuyendo el ruido y mejorando la relación señal/ruido.

Existen diferentes tipos de compuestos que atacan diferentes tipos de minerales, tales como sales solubles en agua, carbonatos, óxidos de manganeso, óxidos de hierro, entre otros. Una pregunta importante en este tipo de ensayos es ¿Cómo se comparan dos muestras?, la presencia de los minerales a disolver no es constante en todas las muestras, por lo que es crucial procesar los resultados de acuerdo a la mineralogía a estudiar antes de interpretar.

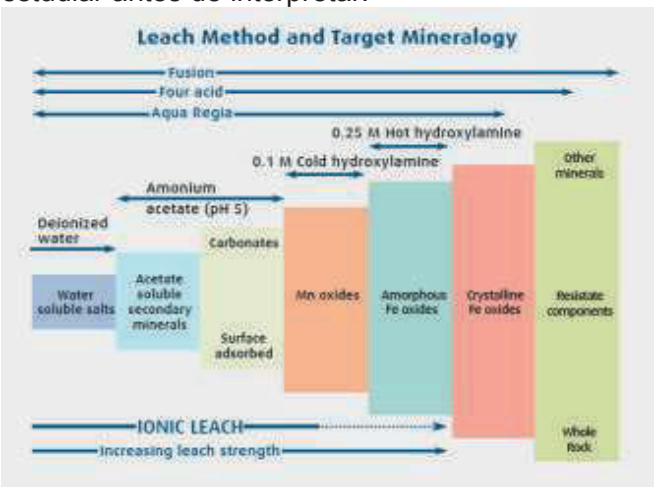


Figura 2: Metodologías de lixiviación selectiva.

3. Estudios de Orientación

Los estudios de orientación geoquímica buscan dar respuesta a una serie de preguntas cuyo objetivo final es determinar los procedimientos de muestreo, preparación mecánica y análisis químico adecuados para maximizar la señal de los elementos de interés sobre el ruido de fondo.

- Dispersión: ¿Qué tan lejos de un depósito mineral se puede encontrar evidencia?
- Distribución y comportamiento, con lo que se obtiene la reproducibilidad de los ensayos.

3.1. Yacimiento conocido

En este caso, lo que se busca es encontrar las metodologías óptimas para la exploración de un tipo de yacimiento ya conocido, determinando:

- La ocurrencia de la mineralización.
- Qué tipo de muestras son útiles para la exploración.
- Que elementos son "pathfinders" de ese tipo de mineralización.
- Tamaño de grano óptimo para mejorar la respuesta y remover problemas de reproducibilidad.
- Procesos de dispersión química y mecánica.
- Espesor de cobertura máximo para ser detectado.

Benn et al, 2017, expone como diferentes metodologías de muestreo, preparación mecánica y análisis químico lleva a determinar diferentes valores de la relación concentración/fondo.

En el primer caso de esa publicación se estudiaron tres procedimientos sobre un depósito:

- Muestra A: muestras de suelo, 500gr de material superficial, tamizado a 2mm, manteniendo la porción gruesa. Pulverizado y digestión 4 ácidos con ensayo multielemento ICP Masa.
- Muestra B: Muestra de suelo, 100gr de material bajo 2mm. Analizado directamente con instrumento XRF portátil.
- Muestra C: Muestras de suelo, 10cm a 20cm de profundidad, tamizado bajo 2mm, 1,5Kg de material. Análisis directo por técnica Ionic Leach™, de ALS.

Finalmente, las muestras A y C fueron las que entregaron una mejor relación anomalía/"background", y se determinó que una

aproximación multielemento entrega una mejor correlación que solo usar el elemento de interés.

3.2. No hay mineralización conocida

En el caso de exploración en zonas donde no hay mineralización conocida, se debe considerar:

- Selección apropiada de tipo de muestra a recolectar; amplia y consistentemente distribuida, y práctica de recolectar.
- Determinar cómo obtener una mejor respuesta en esas muestras; foco en determinados minerales, profundidad, tamaño de grano, etc.
- Siempre optimizar respuesta de la señal con reproducibilidad del ensayo.

Si bien en este caso no hay un yacimiento que sirva como guía, si se puede determinar al menos la metodología que entrega los mejores resultados desde el punto de vista de su reproducibilidad. En el ejemplo de la figura 3, se puede ver como los duplicados de diferentes fracciones de muestras tienen diferente comportamiento, y que no siempre una menor fracción entrega mejores resultados.

Arne y MacFarlane, muestran similares conclusiones en su trabajo realizado el año 2014, en el cual concluyen que el tamaño arcilla entrega mejores resultados desde el punto de vista de reproducibilidad que muestras de mayor tamaño, como es el caso de BLEG.

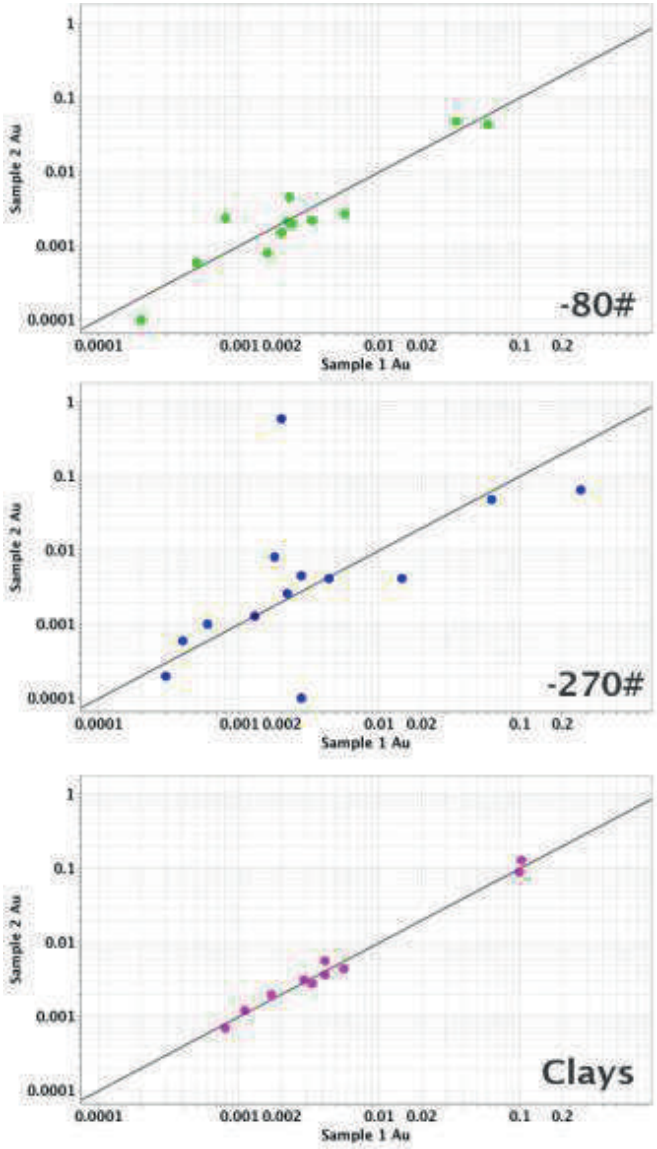


Figura 3: Ejemplo de recolección de muestras en clima muy húmedo, gráficos de duplicados en diferentes granulometrías.

3. Desafíos y Conclusiones

Si bien los estudios de orientación cuestan tiempo y dinero, en el largo plazo son beneficiosos, mejoran la toma de decisiones y dan confianza y fundamento a la forma de realizar las campañas de muestreo.

Esta actividad es esencial en proyectos tipo “greenfield”, y una buena oportunidad de mejora en proyectos “brownfield”, donde ya el conocimiento adquirido en el pasado ha llevado a mejorar los procedimientos de forma progresiva.

Es importante considerar este tipo de estudios en proyectos futuro, para así validar o discutir los procedimientos habituales dentro de una compañía. Se debe romper con los paradigmas y tener el tiempo de entender la ocurrencia mineral y su distribución antes de comenzar con agresivas campañas de muestreo. Aún hay oportunidades en zonas que ya fueron exploradas con metodologías no adecuadas.

Referencias

Arne, D., MacFarlane, B., 2014. Reproducibility of Gold Analyses in Stream Sediment Samples from the White Gold District and Dawson Range, Yukon Territory, Canada. Explore, Number 164, September 2014.

Benn, C., Daroch, G., Kral M., Lhotka P., 2017. Quantitative Interpretation of Orientation Surveys. Explore, Number 177, December 2017.

Clusterización litológica a partir de data multielemental en La Tapada, depósito cordillerano polimetálico del Perú Central

Mario Díaz[1], Susankler Espinoza[1] y Oshin Figueroa[1]

[1] Compañía Minera Chungar S.A.C., Proyecto Carhuacayán - Yauli, Junín, Perú (mdiaz@volcan.com.pe)

1. Abstract

Lithological clustering from multi-elemental data in La Tapada, a polymetallic Cordilleran deposit in Central Peru. La Tapada is part of the late Miocene Carhuacayán polymetallic Cordilleran deposit, emplaced in Cretaceous carbonate and siliciclastic rocks. The large geological variability (diverse stratigraphy, contact metamorphism and multi-stage metasomatic alteration) complicates the visual identification of lithologies. A dataset of 10,657 drill core samples analyzed for multi-elemental geochemistry is used by unsupervised learning algorithm to improve the classification and recognition of the Cretaceous stratigraphic domains.

2. Introducción y marco geológico

La Tapada es parte y uno de los targets principales del depósito cordillerano polimetálico de Carhuacayán que está ubicado a 4 km al NO del distrito de Santa Bárbara de Carhuacayán, provincia de Yauli, departamento de Junín, a 180 km al NE de Lima, a una altitud de 4162 a 4585 m.s.n.m. De la mina Carhuacayán se explotó aproximadamente 2 Mt de mineral de Zn, Pb y Ag; entre los años 1962 y 1982. A partir del año 2016 Volcan Compañía Minera S.A.A. ha ejecutado campañas de cartografiado y muestreo geoquímico superficial y subterráneo, además perforación diamantina (41,303 m en 97 sondajes). A la fecha, se ha estimado recursos (indicados e inferidos) de 10.1 Mt @ 3.4% Zn, 1.4% Pb, 42.2g/t Ag y 0.3g/t Au.

En Carhuacayán afloran carbonatos de la Formación Jumasha (Cretáceo Superior) (Fig. 1A). En el target La Tapada, mediante la perforación diamantina se ha identificado una 'unidad de transición' a sedimentos silicoclásticos (Fig. 1B) por debajo de la Formación Jumasha, en parte afectados por metamorfismo de contacto (hornfels) (Fig. 1C) y cuarcitas (Fig. 1D) que no han sido atribuidos a una unidad litoestratigráfica formal.

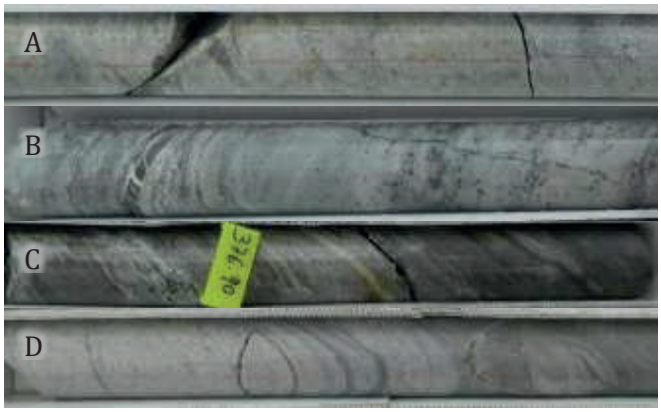


Figura 1. *Rocas carbonatadas y silicoclásticas cretácicas en La Tapada. A) Calizas recristalizadas de la Formación Jumasha. B) 'Unidad de transición' a sedimentos silicoclásticos compuesta de principalmente por intercalaciones de margas y calizas skarnificadas con menor hornfels y cuarcitas. C) Hornfels laminados. D) Cuarcitas con esporádicas laminaciones.*

Una de las estructuras principales del área es el anticlinal Carhuacayán, de dirección NO-SE, que es aprovechado por un pórfido dacita (PD), al cual se le atribuye una edad de 8.2 ± 0.18 Ma (Ar–Ar en biotita) Bissig et al. (2008), para emplazarse a manera de lacolito y cubrir las rocas sedimentarias cretácicas. Además, se ha distinguido una brecha intrusiva con fragmentos de PD y en los bordes como brecha polimíctica incluyendo fragmentos de las rocas sedimentarias, en la cual existen brechas subverticales hidrotermales con matriz de turmalina. Brechas freáticas subverticales cortan la brecha intrusiva. La mineralización polimetálica (Zn-Pb-Ag) de La Tapada ocurren en cuerpos y vetas que cortan todas la secuencia sedimentaria y fases intrusivas anteriores (Fig. 2).

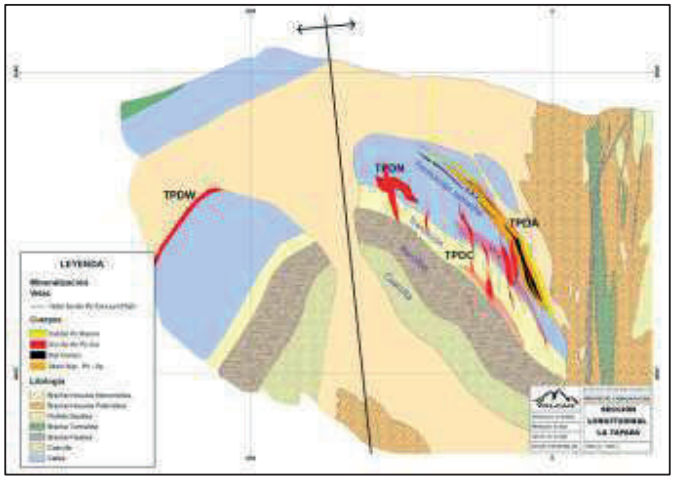


Figura 2. *Sección geológica mirando al norte en La Tapada.*

Esta contribución se enfoca en clasificar y delimitar correctamente los dominios estratigráficos identificados en la perforación diamantina utilizando un algoritmo de aprendizaje no supervisado a partir de data multielemental de las muestras de testigos para su modelamiento geológico 3D.

3. Metodología

3.1. Análisis de laboratorio

En el proyecto Carhuacayán se analizaron un total de 20,006 muestras recolectadas de 41,303 m de perforación diamantina en 97 sondajes, de las cuales 10,567 pertenecen a la secuencia sedimentaria donde se emplaza la mineralización de La Tapada.

La digestión fue multiácida (casi total o cuatro ácidos: HCl, HNO_3, HF y $HClO_4$) y ensayados por espectroscopia de emisión óptica de plasma de acoplamiento inductivo (ICP-OES) para 38 elementos; realizado por los laboratorios ALS Perú S.A. (ALS) y CERTIMIN S.A. (Certimin) ubicados en Lima, cuyos procedimientos son similares en digestión y método de ensayo, pero algunos límites de detección inferior son distintos.

Elemento	ALS	Certimin	Valor de reemplazo
Al (%)	<0.10	<0.10	0.05
Ca (%)	<0.01	<0.01	0.005
Co (ppm)	<1	<1	0.5
Cr (ppm)	<1	<10	0.5
Mg (%)	<0.01	<0.01	0.005
Ni (ppm)	<1	<1	0.5
P (ppm)	<10	<100	5
Ti (%)	<0.01	<0.01	0.005
V (ppm)	<1	<2	0.5

Tabla 1. *Límites de detección inferior.*

Para los datos por debajo del límite de detección se reemplazó por la mitad del ensayo de mayor precisión, generalmente del procedimiento de ALS, ver Tabla 1. Sin embargo, estos datos representan alrededor del 1% de los datos.

3.2. Clusterización litológica

La información multielemental de las secuencias sedimentarias fue procesada y clasificada usando los diagramas de rocas químicas-silicoclásticas de Ordoñez-Calderón et al. (2017), diagramas usados en la exploración de depósitos hospedados en rocas carbonatadas, ver Fig. 3.

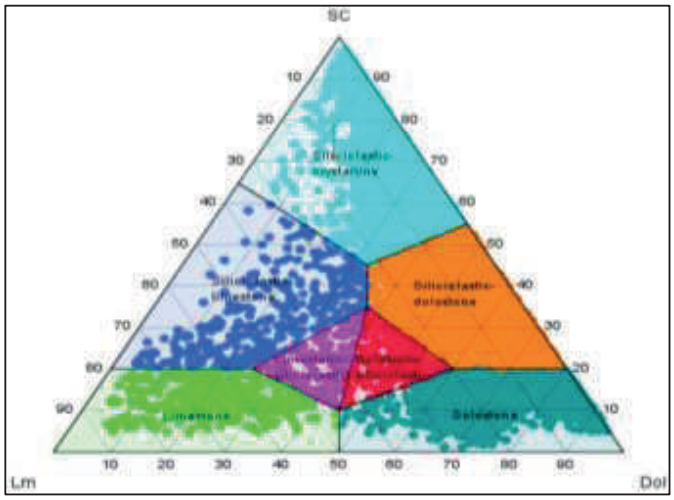


Figura 3. *Diagrama para la clasificación de rocas químicas-silicoclásticas según Ordoñez-Calderón et al. (2017), usando datos de La Tapada.*

Sin embargo, dichos diagramas fueron elaborados para un depósito en especial de tipo skarn (Rosemont, Estados Unidos) que, si bien ayuda a diferenciar las rocas carbonatados de otras rocas, no permite una mayor diferenciación de estas. Por esta razón se vio por conveniente utilizar aprendizaje automatizado.

Las rocas cajas del depósito La Tapada presentan alto grado de alteración, por tal motivo solo se usaron elementos incompatibles como el Cr, Ni, P, Co, V, Ti y Al; además Ca y Mg por sus altas abundancias relativas a pesar de ser elementos bastante móviles en alteraciones hidrotermales y sobre todo en alteración tipo skarn donde los protolitos son rocas sedimentarias. Sin embargo, en el depósito se ha observado abundante alteración tipo skarn de Mg, el skarn de Ca (solo se ha observada epidota) es menos abundante y en él no se encuentra la mineralización; sumado a esto en el área no se aprecian horizontes dolomíticos y es posible que el Mg del skarn provenga de una alteración hidrotermal previa. Lo descrito permite inferir que abundancias altas de Ca corresponden a

la calcita de las rocas químicas presentas, cuyo empobrecimiento y a su vez enriquecimiento de Mg corresponden a las serpentinas, talco y tremolita de la alteración tipo skarn.

Se ha utilizado mapas autoorganizados (SOM), un algoritmo de aprendizaje no supervisado de clusterización usando lenguaje de programación Python. El SOM se corrió usando 10x10 nodos, con 200 iteraciones, para un total de 10,660 muestras sin transformar de solo las unidades sedimentarias, ver Figura 4, y se clasificaron en 4 clústeres por K-means usando distancias cuadráticas, ver Figura 5.

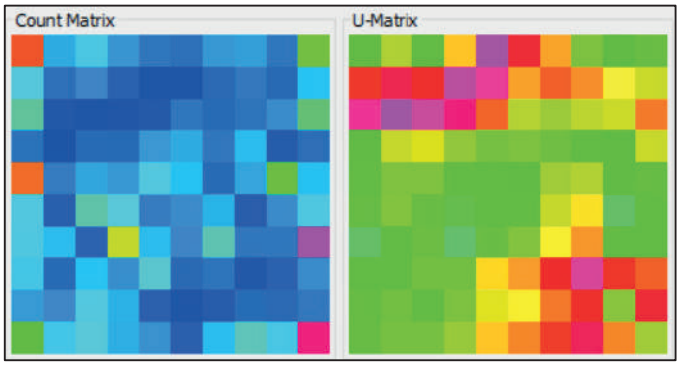


Figura 4. *Matrices de conteo (izquierda) y de distancia unificada (derecha).*

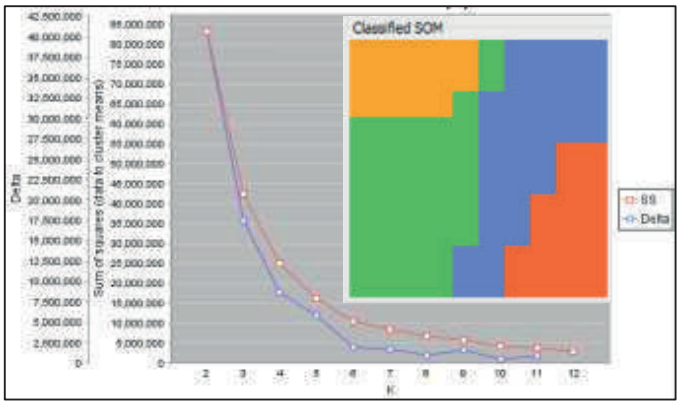


Figura 5. *Clasificación SOM por K-means.*

Los clústeres fueron correlacionados e interpretados con los logueos geológicos en:

1. Diabasa (naranja claro): corresponde a diabasas de grano fino y alteradas a biotitas y cloritas. Esta unidad fue logueada como skarn sin diferenciar el protolito, fue corroborado con estudio microscópico, y se interpreta como magmatismo sin-sedimentario a las rocas carbonatadas cretácicas.
2. Calizas débilmente alteradas (naranja oscuro): corresponde a calizas recristalizadas con débil skarnificación.
3. Silicoclástico (verde): corresponden a cuarcitas/arenas y pelitas intercaladas, con niveles carbonatados menores.
4. Skarn magnesiano (azul): corresponde a rocas carbonatadas alteradas a minerales de skarn, principalmente serpentinas, normalmente mineralizadas.

Los valores promedio de cada clúster se muestran en la Tabla 2 y la Figura 6 muestra los resultados.

Clusters	Count	Ca_pct	Mg_pct	Cr_ppm	Ni_ppm	P_ppm	Co_ppm	V_ppm	Ti_pct	Al_pct
Diabase	1356	5.9	5.8	232.5	146.0	1692.0	36.3	170.9	1.1	7.1
Limestones weak alteration	2407	23.3	6.9	33.9	13.9	1824.0	5.1	41.1	0.1	2.0
Silicoclastics	4054	2.9	2.4	164.6	18.7	954.9	8.5	60.6	0.3	5.4
Mg skarn	2840	9.2	9.1	78.0	24.0	1908.0	10.9	53.1	0.2	4.2
Total	**10660**	**9.6**	**5.6**	**120.6**	**35.2**	**1499.0**	**11.9**	**68.2**	**0.3**	**4.5**

Tabla 2. *Promedio de valores para cada clúster.*

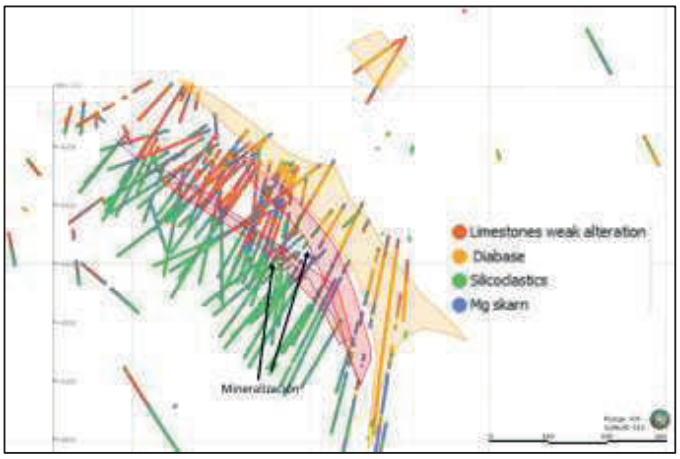


Figura 6. *Resultado de la clusterización litológica.*

4. Dominios estratigráficos

En La Tapada solo aflora la Formación Jumasha, la mayoría de las secuencias sedimentarias han sido reconocidas en sondajes diamantinos.

Se aprecia un claro desarrollo de la cuenca cretácica en el área de 300 m, desde una facie continental representada por silicoclásticos (Grupo Goyllarisquizga), gradando a una unidad de transición representada por intercalaciones de rocas carbonatadas y silicoclásticas, hasta una facie marina carbonatada (Formación Jumasha), dejando evidencia de una transgresión marina progresiva sobre un ambiente continental que ubica la zona de estudio en un borde de cuenca, ver Fig. 7.

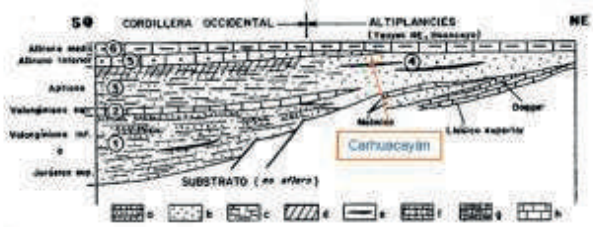


Figura 7 : sección esquemática de la distribución de algunas unidades del cretácico en el centro del Perú. 1) Fm Chimú y Oyón; 2) Fm Santa; 3) Carhuaz; 4) Fm Goyllarisquizga; 5) Fm Pariahuanca; 6) Fm Chúlec. a) cuarcitas; b) areniscas; c) areniscas y lutitas; d) capas rojas; e) lentes de carbón; f) calizas arenosas; 8) calizas margosas; h) calizas puras. (Megard F., 1978)

4.1. Dominio continental

Grupo Goyllarisquizga indiferenciado, representado por areniscas y cuarcitas de grano medio a grueso con arcillas en los ripples que muestran aparente laminación e indicarían largos periodos de turbulencia con muy cortos periodos de calma durante la depositación de esta facie sedimentaria.

4.2. Dominio transicional

Formación Pariahuanca, son interceptos que representan una invasión progresiva de facies marinas sobre facies continentales, reveladas por intensa laminación e intercalaciones de margas y calizas skarnificadas con hornfels y areniscas/cuarcitas, es una secuencia grano estrato decreciente. La alteración de los niveles calcáreos se caracteriza por serpentinas y cloritas con poca intensidad y la mineralización por reemplazamiento en esta unidad es restringida.

4.3. Dominio marino

Formación Chulec, secuencia conformada principalmente por calizas masivas con lentes milimétricos de arenas calcáreas o margas que dan apariencia laminada. Es el horizonte con mayor desarrollo de mineralización por reemplazamiento y es común encontrarla marmolizada o con intensa alteración a serpentina, cloritas, epidota, actinolita, talco, brucita entre otros.

Formación Pariatambo, sobre la Formación Chulec se han interceptado niveles calcáreos, negros y bituminosos, así como hornfels laminares de biotitas de manera restringida que se podrían atribuir a esta formación.

Formación Jumasha, se les atribuye a las calizas grises masivas inalteradas, con escasos lentes de arenas y margas calcáreas posicionados sobre un sill de diabasa.

Para el modelamiento se consideró los tres dominios estratigráficos y la diabasa, ver Figura 8.

5. Discusión y conclusiones

En lugares donde la gran variabilidad geológica complica la identificación visual de litologías se puede aplicar algoritmos de aprendizaje automatizado no supervisados de clusterización para ayudar a la clasificación de dichas litologías y realizar modelos 3D de dominios estratigráficos más robustos.

Para el algoritmo se ha entrenado 10,567 muestras utilizando elementos incompatibles: Cr, Ni, P, Co, V, Ti y Al; además Ca y Mg a pesar de ser elementos bastante móviles; definiendo claramente 4 clústeres.

Se definen tres dominios estratigráficos; los dominios continental y transicional son agrupados en un solo clúster (*silicoclástico*) ya que mineralógicamente son iguales diferenciándose macroscópicamente en el tamaño de las láminas/estratos, dentro de este dominio escasos intervalos han sido clusterizados como skarn magnesiano debido a su débil alteración; el dominio marino logueado principalmente como calizas y skarn fue clusterizado en tres: *calizas inalteradas* (de la misma manera que el logueo) y el skarn pudo ser diferenciado según protolito calcáreo (*skarn magnesiano*) y protolito ígneo (*diabasa*). Además, se definió el contacto entre el dominio marino y transicional como el nivel más favorable para la mineralización por reemplazamiento.

La transgresión marina progresiva sobre un ambiente continental en solo 300 m de la secuencia cretácica, nos indica que el depósito se encuentra emplazado en sedimentos de borde de cuenca.

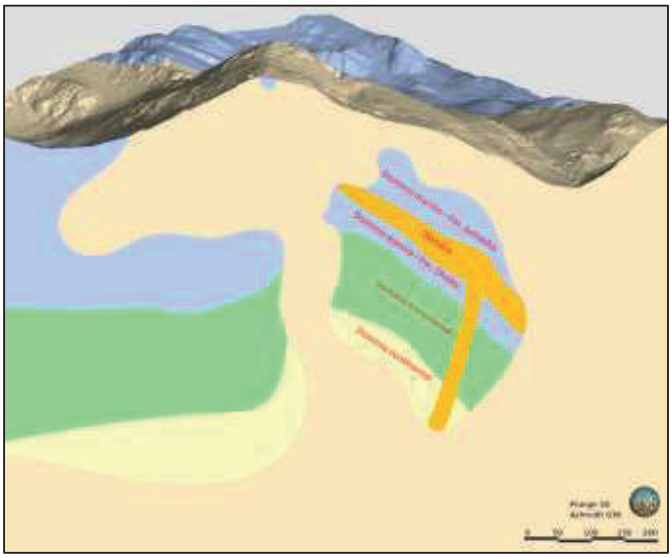


Figura 8. *Modelo de Dominios estratigráficos de La Tapada.*

Agradecimientos

Agradecimientos a Volcan Compañía Minera S.A.A., en especial a los ingenieros C. Farfán, A. Enriquez, C. Velásquez y R. Monge, a los geólogos de Anglo Peruana Terra S.A.: F. Marcelo, J. Terán, A. Pretell, P. Cuba, C. Blanco y S. Meza.

Referencias

Bissig, T., Ulrich, T., Tosdal, R., Friedman, R. y Ebert, S., 2008. The time-space distribution of Eocene to Miocene magmatism in the central Peruvian polymetallic province and its

metallogenetic implications. Journal of South American Earth Sciences, v. 26, p. 16-35.
Megard, F., 1978. Étude géologique des Andes du Pérou central. ORSTOM, 310 p.
Ordóñez-Calderón, J., Gelcich, S. y Oliveira, J., 2017. Applied data analytics on multielement geochemistry for pre-mining characterization of geological and geometallurgical attributes: examples of the Rosemont Cu-Mo-Ag skarn deposit, Tucson, Arizona.

ANALISIS DE MINERALES EN LOS SENSORES LANDSAT 8, ASTER 1B, SENTINEL 2A, DE LA ZONA 22K; 22J; 21K;21J.

Jhosy Yelsin, ALEJANDRO CHAVEZ

[1]Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión, Av. Los Próceres 703, Pasco, Perú (alejandro28194@gmail.com)

1. Resumen

El análisis de imágenes satelitales obtenidas con estos sensores nos permite trazar e identificar zonas de alteraciones hidrotermales y con estas a un ambiente favorable para el descubrimiento de yacimientos minerales.

Estas imagenes son utiles, ya que el rango en el espectro electromagnetico, en lo cual los sensores multiespectrales tienen la capacidad de registrar datos , es donde la reflexion de ciertos minerales de alteracion hidrotermal es mas caracteristico. Teniendo en cuenta el marco teórico de todos los sensores, con el procesamiento adecuado en el software ENVI 5.3 , descripción geologica de la zona y de los puntos de control, que viene ser minas cercanas a nuestra zona de trabajo. Se encontró anomalías de óxidos utilizando el Sensor Lansat LC-8, con el sensor Aster identificando minerales de arcillas, óxidos, carbonatos, granates y sílice; con el Sentinel 2A anomalias de oxidos que en comparacion del sensor aster y Lansat LC-8 , esta nos precisa mejor las zonas de óxidos, debido a sus 8 bandas en el campo del VNIR.

Palabras clave: Imágenes satelitales, anomalías, alteración hidrotermal.

1. Abstract

The analysis of satellite images obtained with these sensors allows us to trace and identify areas of hydrothermal alterations and with these to a favorable environment for the discovery of mineral deposits.

These images are useful, since the range in the electromagnetic spectrum, in which multispectral sensors have the ability to record data, is where the reflection of certain hydrothermal alteration minerals is most characteristic. Taking into account the theoretical framework of all the sensors, with the appropriate processing, geological description of the area and the control points, which are mines near our work area. Oxide anomalies were found using the Lansat LC-8 Sensor, with the Aster sensor identifying clay minerals, oxides, carbonates, garnets and silica; With the Sentinel 2A, oxide anomalies that in comparison to the aster sensor and Lansat LC-8, this one better specifies the oxide zones, due to its 8 bands in the VNIR field.

Key words: Satellite images, anomalies, hydrothermal alteration.

2. Introducción

En la actualidad, el uso de imágenes satelitales es amplio, técnica que se vienen aplicando con resultados satisfactorios en diferentes investigaciones, en relación con la exploración minera.

Se hace la descripción de la geología de toda la escena y de las minas dentro de la escena que nos ayudara como puntos de control para el análisis de anomalías. La evaluación de la escena del LANDSAT 8, enfocada en la detección de óxidos, usando métodos de discriminación de anomalías por band-ratios y análisis de componentes principales, se identificó anomalías en los puntos de control (Colquijirca, Quicay y Cerro de Pasco).

La evaluación de la escena ASTER 1B –, enfocada en la detección de óxidos (hematita, goethita, jarosita), arcillas (alunita, muscovita, calcita, caolín, clorita, pirofilita, dickita), carbonatos (dolomita – carbonatos), silicatos (epidota, cuarzo), usando métodos de discriminación de anomalías por band ratios, análisis de componentes principales y con el método de mapeo(MTMF), controlando en las minas que están dentro de la escena.

El sensor SENTINEL 2A enfocada a la detección de óxidos para luego discriminar y analizar las anomalías en los puntos de control y el análisis de lineamientos.

3. Marco Geológico

3.1. Geología Regional

Las rocas más antiguas que se presentan pertenecen al Paleozoico, Formación Excélsior, constituido por filitas, cuarcitas y lutitas carbonosas.

En cuanto a la edad de ésta formación ,Laughlín (1924) le signo una edad silúrica; sin embargo, a la fecha los trabajos de Megard, Marocco, Lavenes y otros estudiosos han determinado que el silúrico está casi ausente en el territorio, el Ordovícico si es abundante, pues se extiende a lo largo de la Cordillera oriental.
Sobre ésta formación Paleozoica, se extiende en la zona la Formación de calizas Pucará, que cubre el arco del Anticlinal Cerro de Pasco y que en la actualidad se ubica el Tajo Abierto "Raúl Rojas" compuesta por una Intercalación de calizas de color gris oscuro y delgados lentes de lutitas negras, originalmente se les asigna una Edad Triásico - Jurásico (Jenks-1951); pero ahora se les considera como perteneciente a la Formación Aramachay, por la similitud de la litología y la edad Hetangiano - Sinemuríano (Megard 1979), la Formación tiende marcadamente a una sedimentación marina epicontinental al Oeste de Cerro de Pasco con una mayor potencia y facie marina hacia el Este en cuyo final del Bajociano Superior a Batoniano, se produce una erosión y emersión, como lo evidencian las discordancias encontradas en Atacocha (Johnson 1955), y otros afloramientos que evidencian una estructura Nevadiana, finalmente en los alrededores del yacimiento de Cerro de Pasco, se presentan delgados bancos de material fluvioglaciar y aluviones más recientes.

3.2. Estratigrafía

3.2.1. Paleozoico Inferior (Pérmico - Cámbrico)

Corresponden al Grupo Excélsior, se identifican, como las rocas más antiguas.

3.2.2. Paleozoico Superior (Pérmico)

Está representado por el Grupo Mitú; se encuentran hacia el Norte y Sur de Cerro de Pasco se hallan en lentes delgados de arenisca y cuarcitas.

3.2.3. Triásico – Jurásico

Representados por el complejo calcáreo de Uliachín- Paría de la Formación Pucara.

3.2.4. Cretácico

Afloramientos de la Formacion Goyllarisquisga y la Formacíon calcárea Machay, que yacen en las localidades de Cerro de Pasco y Colquijirca, son las rocas más representativas de este grupo.

3.2.5. Terciario

Caracterizada por la erosión glaciar, acumulacion de morrenas y de depósitos fluvioglaciares.

3.2.6. Cuaternario

Las rocas de esta época corresponden a la Formación Pocobamba que presenta tres unidades litológicas: el Miembro Inferior, el Conglomerado Shuco y el Miembro Calera

4. Puntos de Control

4.1. Cerro De Pasco

El depósito que tiene una importante produccion global de Zn-Pb-Ag se encuentra ubicado al este de un complejo diatrema-domo, de edad miocénica, y de composición félsica.
La mineralización de Zn-Pb-Ag proviene de esfalerita rubia, de galena, acompañados de pirita, los centros de cobre gradan lateralmente a zonas piríticas con galena, esfalerita, matildita y luego a hematita, magnetita, carbonatos de Mn-Fe-Zn.

4.2. Colquijirca

Productora de Ag, Pb, Zn y Cu, en las cuales existen 2 tipos de mineralización .
El primer tipo ocurre dentro del Centro Volcánico Marcapunta y consiste de una diseminación de Au-(Ag) acompañado de una alteración argílica avanzada y sílice porosa.El segundo tipo, de mayor importancia económica, es el más frecuente, se encuentra extendido regionalmente y es del tipo de vetas cordilleranas con relleno y reemplazamiento de metales básicos.

4.3. Mina Quicay

Quicay es un depósito de Au-Ag, con un dato estimable de 1,000,000 de onzas de Au, siendo un epitermal de alta sulfuración. El depósito ocurre en lavas, tobas y piroclastos de composición andesítica a dacítica; igualmente afloran pórfidos dioríticos y cuarzomonzoníticos.

4.4. Mina de Oyon

El yacimiento carbonifero de Oyon se encuentran de preferencia agrupados en unos paquetes denominados productivos, cuyo espesor representan solo una pequeña fracción de la potencia total de la secuencia Jurásico–Cretácica.

4.5. Uchucchaccua

Es un depósito con produccion de Ag, Zn y Pb,siendo de tipo hidrotermal epigenético con relleno de fracturas (vetas), las cuales también fueron canales de circulación y emplazamiento metasomático de soluciones mineralizantes que finalmente formaron cuerpos de mineral.

4.6. Minas Ragra

Minas Ragra considerada principal productor mundial de Vanadio en la región de Pasco. El mineral patrónita fue descubierto por primera vez ; con la producción de vanadio como producto secundario de la extracción de uranio a partir de carnotita, la mina tuvo que cerrar en 1955.

4.7. Iscaycruz

Es un yacimiento polimetálico con produccion de Zn, Pb y menor escala de Cu, ubicado a una altura de 4,700 m.s.n.m., en el distrito de Pachangara, provincia de Oyón, departamento de Lima.

5. Métodos y comprobación espectral de minerales.

5.1. Métodos de identificación

5.1.1. ACP (Análisis de Componentes Principales): busca la proyección de una mejor representación de los datos en términos de mínimos cuadrados.

5.1.2. BR (Band Ratios): Sirve para mejorar diferencias espectrales entre bandas y reducir efectos de topografía.

5.1.3. MTMF (Mascara de filtro combinada): Agrega una imagen de inviabilidad la cual se usa para reducir números falsos de positivos.

5.2. Análisis y comprobación de Firma Espectral

La figura. 1 representa el análisis espectral por óxidos, en este caso el pixel de color blanco viene hacer semejante con la firma espectral de la jarosita.

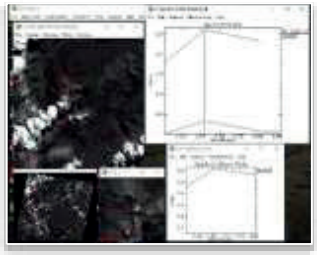


Fig.1

6. Trabajo con los sensores

6.1. Landsat 8

6.1.1. Calibración

Se tiene dos métodos de calibración radiométrica y atmosférico; en el radiométrico se busca minimizar errores que influyen en la radiación en el atmosférico aplica la corrección de neblina o nubes.

6.1.2. Datos

Datos utilizados en la imagen:
TIPO DE SENSOR: Multi Spectral – Lansadt-8 OLI
GROUND ELEVATION (Km): 3.5
ATMOSPHERIC MODEL: Mid Latude Summer
FECHA: 06-02-2015
HORA: 15:09:52

6.2. Aster 1B

6.2.1. Calibración

Se tiene dos métodos de calibración radiométrica y atmosférico; la radiométrica busca recuperar la radiancia intrínseca del objeto de estudio y la atmosférica por condiciones de iluminación.

6.2.2. Datos

La imagen se adquirió el 7 de noviembre del 2002 a las 14:57:24 con un ángulo de elevación solar de 65,127959.

6.3. Sentinel 2A

5.3.1. Calibración

Debido a las condiciones atmosféricas y de iluminación, por lo que se hace necesaria la corrección radiométrica de las imágenes.

5.3.2. Datos

La imagen se adquirió el 15 de junio del 2001 a las 15:033:009

7. Conclusiones

- Los análisis de las anomalías se realizaron combinando las diferentes mascaras que se generaron de los sensores mediante los (métodos ACP, BR, MTMF), con la comparacion de las firmas de la libreria y las firmas espectrales de los pixeles obtenidos ,se obtuvo resultados de los diferentes minerales.
- A diferencia del Aster y Lansat LC-8, el sensor Sentinel 2A te permite obtener mejores resultados para los oxidos, debido a sus 8 bandas en el VNIR, mientras que el sensor Aster con minerales de arcilla y algunos carbonatos.
- Estos analisis son muy importantes porque contribuye a la primera etapa de la prospeccion, se pudo constatar en su mayoria las anomalias, con las minas y prospectos existentes en nuetra zona.

Agradecimientos

El agradecimiento a Dios, a la escuela de Geología – Undac y docente el Ing. Favio MENA OSORIO.

Referencias

Delendatti, G., 2003, Caracterización de zonas de alteración hidrotermal en los márgenes de rio Castaño, mediante Procesamiento digital de Imágenes TM. Revista de la Asociación Geológica Argentina – p. 1

Ruiz Armenta, J., Ledesma, R., 2008, Técnicas de procesamiento de imágenes en la exploración de yacimientos minerales de origen hidrotermal, Instituto de geofísica y posgrado en geofísica UACPYP, UNAM, p. 3

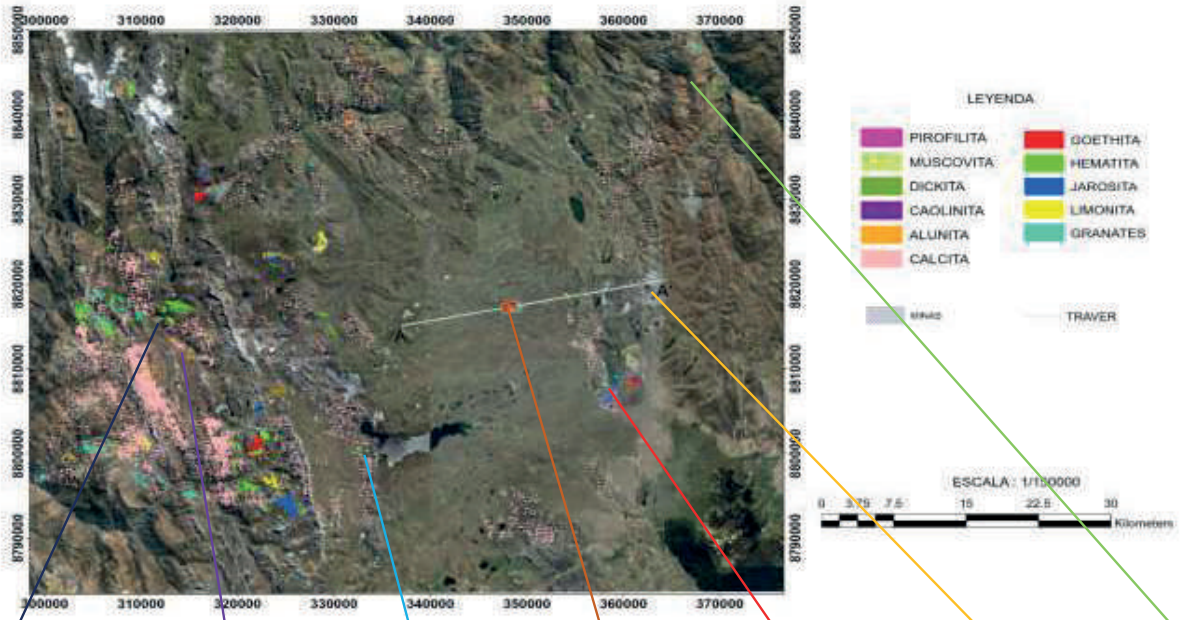
Rodríguez, R.; Cueva, E. & Carlotto, Geología del cuadrángulo de Cerro de Pasco (22-k). INGEMMET. Boletín, Serie A: Carta Geológica Nacional V. (2011).-, p.1-2

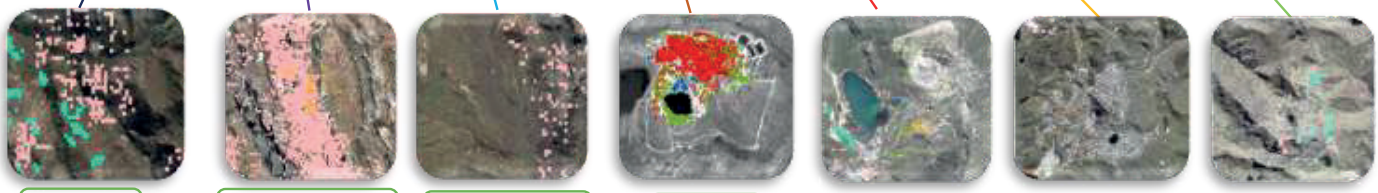
cVargas C., , carmen villon reinoso, josé pasapera gonzales
Comparación de técnicas para el mapeo de cobertura glaciar con imágenes landsat y aster en la cordillera blanca, ancash, perú

Ilustraciones

3

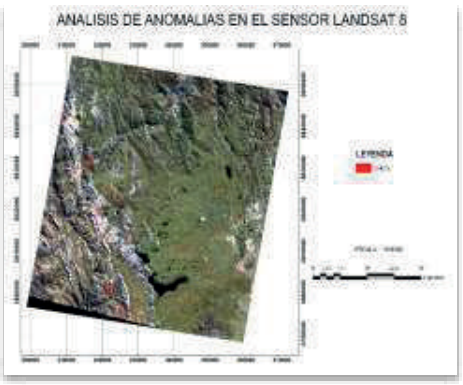
ANALISIS DE MINERALES EN IMAGENES SATELITALES

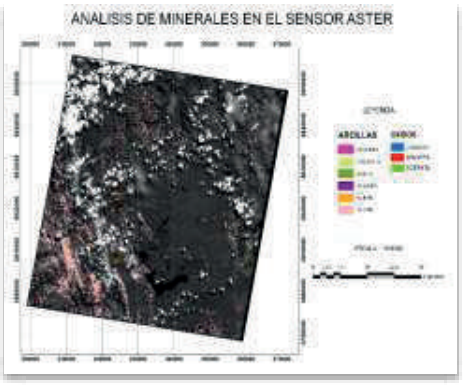


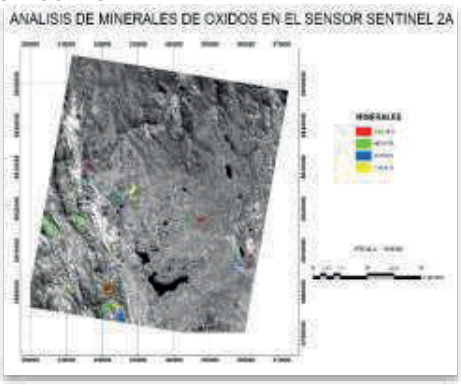


Oyon | Iscaycruz | Minas Ragra | Quicay | Colquijirca | Cerro De Pasco | Vinchos

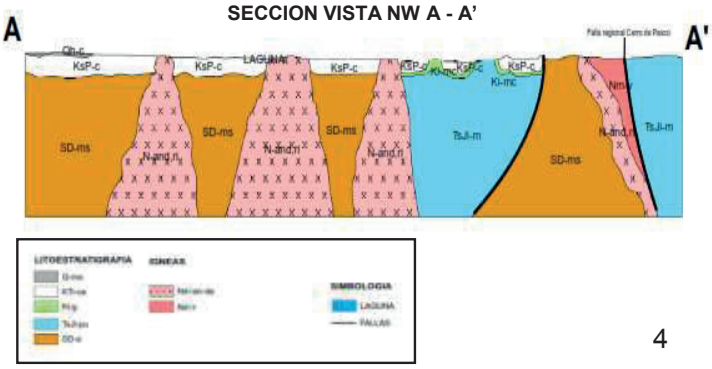
RESULTADOS Y DIFERENCIACION DE MINERALES EN LOS SENSORES







SECCION VISTA NW A - A'



VISTA 3D DE LA ZONA DE TRABAJO

4

TÓTEM 3

DEL DESCUBRIMIENTO A LA MINA

APLICACIÓN DEL RATIO DE KNUCKEY Y LA ANISOTROPÍA DINÁMICA EN LA ESTIMACIÓN DE RECURSOS MINERALES DE CERRO LINDO

Jhonatan Lopez[1], Gianncarlo Zamora[2]

[1] Nexa Resources, Lima, Peru (jhonatan.lopez@nexaresources.com)
[2] Nexa Resources, Arequipa, Peru (gianncarlo.zamora@nexaresources.com)

1. Abstract

The Knuckey ratio or Cu / (Cu + Zn) Ratio was used to generate trend solids using the New Indicator RFB interpolant tool from leapfrog, from these solids trend planes were generated, these trends were used to generate structural trend also used in the Geological modeling in leapfrog, these plans have also been used as a basis for the search directions of local dynamic anisotropy to estimate mineral resources of Cerro Lindo.

2. Introducción

Los ratios entre elementos mayores pueden ser usados efectivamente para describir cuantitativamente un deposito mineral y sugerir la dirección de movimiento de las soluciones mineralizantes et al (Philip C. Goodell et al., 1974).
El presente trabajo es el resultado de la estimación de los recursos minerales de Cerro Lindo utilizando el ratio de Knuckey para la generación de puntos de anisotropía.
Se interpolo los valores del ratio de Knuckey Cu/(Cu+Zn) para generar solidos que nos ayuden a identificar las posibles direcciones mineralizantes en el yacimiento de Cerro Lindo, en base al ratio de knuckey e interpretación se construyeron planos de tendencia que fueron utilizados en el proceso de modelamiento geológico.
Para la obtención de los puntos de la anisotropía dinámica, se utilizaron los planos de tendencia generados a partir de ratio de Knuckey, la anisotropía dinámica adecua la dirección del elipsoide de búsqueda según las direcciones que se le asignen, logrando una mejor continuidad en los dominios.

Cerro Lindo se ubica en la parte occidental del Perú, en la provincia de Chincha, departamento de Ica, a 175 Km al SE de Lima. Cerro Lindo es un depósito de sulfuro masivo vulcanogénico (VMS) de clase mundial con una producción promedio de 21,500Tn/día.

3. Metodología Aplicada

Se realizó la estimación de recursos minerales aplicando y respetando las mejores prácticas establecidas por los estándares internaciones.
Para el proceso de Modelamiento se utilizó el software Leapfrog Geo y la estimación de realizo en el software Studio RM, según el siguiente diagrama de trabajo (Diagrama1).

Diagrama 1: Proceso de la metodología aplicada.

En todo el proceso se contó con la el soporte y validación del consultor externo.

4. Ratio de Knuckey y la Anisotropía Dinámica local

4.1. El modelo idealizado de un yacimiento de sulfuro masivo vulcanogénico (VMS) (Gibsob et al., 2005) incluye una zonificación geoquímica utilizando el ratio de Knuckey (Knuckey et al.,1982).

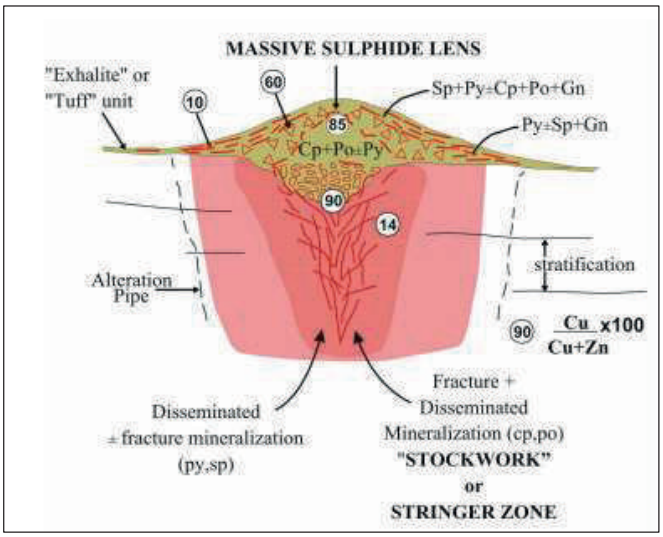


Figura 1: Depósito VMS idealizado que muestra una lente de sulfuro masivo que recubre una zona discordante sobre de roca alterada, Zonificación de metal los números en circules más altos son más ricos en Cu y los números más bajos más ricos en Zn (Py = pirita, Cp = calcopirita, Po = pirrotita, Sp = esfalerita y Gn = galena; modificado de Gibson, 2005).

Este ratio refiere que si su valor es más alto tiene mayor contenido metálico de cobre lo cual indicaría según el modelo idealizado del VMS (Ginson et al., 2005). Nos encontraríamos en la base del modelo y con un posible conducto de mineralización, consecuentemente si es valor del ratio es bajo nos encontraríamos en la parte más distal del modelo marcando un claro vector del flujo mineralizante.
En este trabajo se utilizó el ratio de Knuckey, Cu/(Cu+Zn) con el cual se vectorizo la dirección de mineralización en el yacimiento de Cerro Lidno.

4.2. La Anisotropía es una característica de ciertos materiales que tiene con diferentes comportamientos de acuerdo con su dirección analizada (Moniz et al., 2020).
La anisotropía nos permitirá llegar a una estacionalidad de segundo orden en nuestros modelo (Estacionalidad variográfica).
Existen 2 tipos de anisotropía la geométrica en la que el rango cambia de acuerdo a la dirección pero el Sill o meseta mantiene el mismo valor, En la anisotropía zonal cambia la el rango y el Sill en función a la dirección que es más usada para estimar estratos.

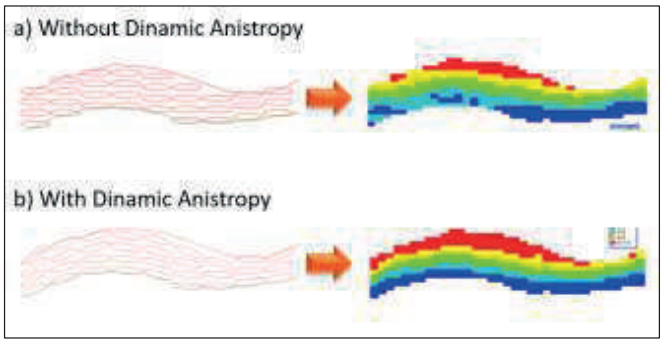


Figura2: Ejemplificación del uso de la anisotropía y la continuidad en la interpolación a) a la izquierda los elipsoides no tienen anisotropía, los mantienen una misma dirección, a la derecha su interpolación que evidencia zonas cortadas. b) a la izquierda los elipsoides poseen anisotropía, a la derecha a interpolación demuestra una mejor continuidad.

La anisotropía dinámica brinda una mayor continuidad en la interpolación ya que los elipsoides de búsqueda cambian su dirección en función a los quiebres mineralógicos o direcciones que se le indique, en contraste si no se utilizaría la anisotropía dinámica el elipsoide de búsqueda mantendría una misma dirección.

5. Uso del ratio de Knuckey en la Estimación de recursos minerales

5.1. Construcción de los planos de tendencia

Se calculó el Ratio de Knuckey Cu / (Cu + Zn) en la base de datos importando esta columna numérica al software LeapFrog Geo donde también se realizó la interpolación numérica para generar solidos con la herramienta New Indicator RFB interpolant, en base a estos solidos se interpretó los planos de tendencia en todos los Orebodies de Cerro Lindo.

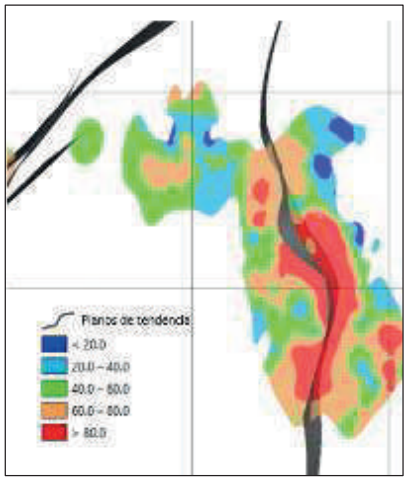


Figura3: Planos de tendencia interpretados de los sólidos generados en base al ratio de Knuckey.

5.2. Modelamiento Geológico

El modelamiento de los dominios geológicos en Cerro Lindo se realizó en el software LeapFrego GEO utilizando la función Refined Geological Model, para darle una mejor continuidad a los dominios geológicos se activó la opción de Structural Trend utilizando como base los planos de tendencia previamente generados.

Figura 4 : Planos de tendencia interpretados utilizados para generar puntos de Structural Trend utilizados en los Refined Geological Model

5.3. Estimación de Recursos

El uso de la anisotropía en la estimación de recursos es una método para poder llegar a tener una estacionaridad de segundo grado (variograma) ya que gracias a este método el variograma tomara la dirección de cada punto asignado a comparación de los otros formas de obtener este tipo de estacionaridad como la rotación de solidos o la construcción de más variogramas para diferentes direcciones.

En este proyecto como ayuda para generar los puntos de la anisotropía se utilizó el ratio de Knuckey para vectorizar el flujo mineralizante y ser capaces de construir planos de tendencias del cual se extrajo dichos puntos.

Los planos fueron exportados del software Leafrog e importados a Studio RM.

Los planos de tendencia fueron utilizados para obtener los puntos con los atributos de la anisotropía dinámica utilizando la herramienta ANIZOANG

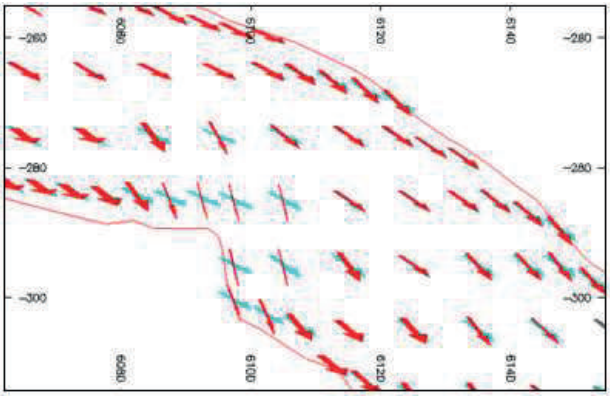


Figura 5: Ejemplificación de la Función AnisoAng de Datamine que transforma la superficie de un wireframe en puntos con atributos de dirección y buzamiento.

Estos puntos obtenidos a partir de los planos de tendencia son usados como imputs para usar el Comando "ESTIMA" de Datamine obteniendo los bloques con los valores estimados.

Como validación global de la estimación se realizaron interpolación en los diferentes dominios por Vecino más Cercano (NN), Kriging Ordinario (OK) e Inverso a la Distancia (IDW3). Obteniendo como resultado que el OK está dentro de los rangos de sesgo global permitida (+-5%), en todas las pasadas.

Se realizó la validación sectorizada donde se realizó la interpolación por Vecino más Cercano (NN), Kriging Ordinario (OK) e Inverso a la Distancia (IDW3). Obteniendo como resultado que el OK tiene una buena correlación con NN.

También se realizó la validación visual para asegurarse de que los valores estimados sean coherentes con los compositos utilizados.

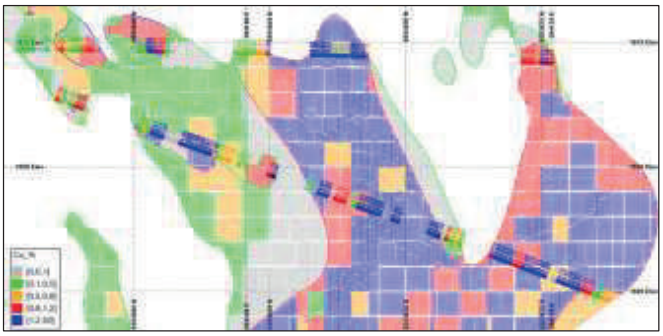


Figura 6: Validación visual de una sección del modelo de bloques que evidencia coherencia entre los valores interpolados y el valor de los compositos.

6. Resultados

El impacto del ratio de Knuckey se observó desde el modelamiento implícito de los dominios

geológicos ya que en la validación visual se evidencia que los dominios son más coherentes con las secciones interpretadas sin la necesidad de utilizar otras herramientas para este ajuste.

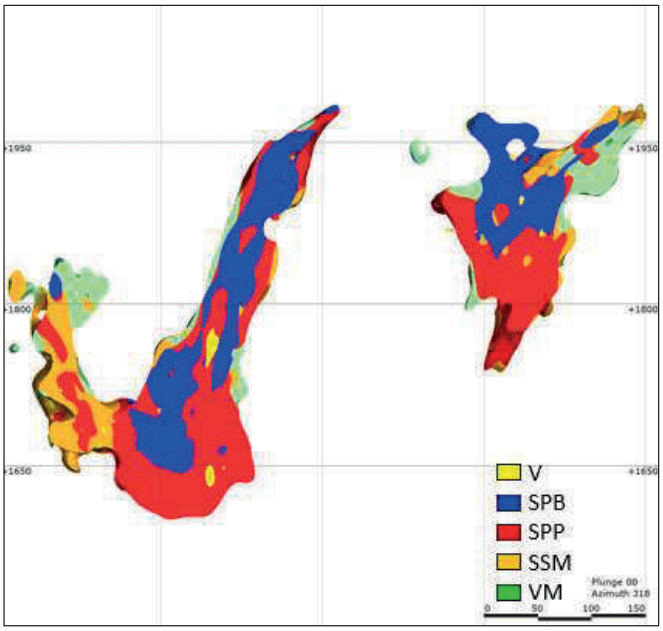


Figura 7: Sección transversal del modelo geológico de Cerro Lindo interpolado utilizado planos de tendencia construidos mediante el ratio de Knuckey, los dominios geológicos evidencian una mejor continuidad espacial.

Para la estimación de recursos geológicos de Cerro Lindo se utilizaron los planos de tendencia construidos con el ratio de Knuckey como anisotropía dinámica. En la validación visual se evidencia una mejor continuidad de interpolación de leyes y en la reconciliación mineral el modelo de recursos 2020 tiene mayor similitud con respecto del año pasado haciendo de este modelo más confiable gracias al ratio de Knuckey.

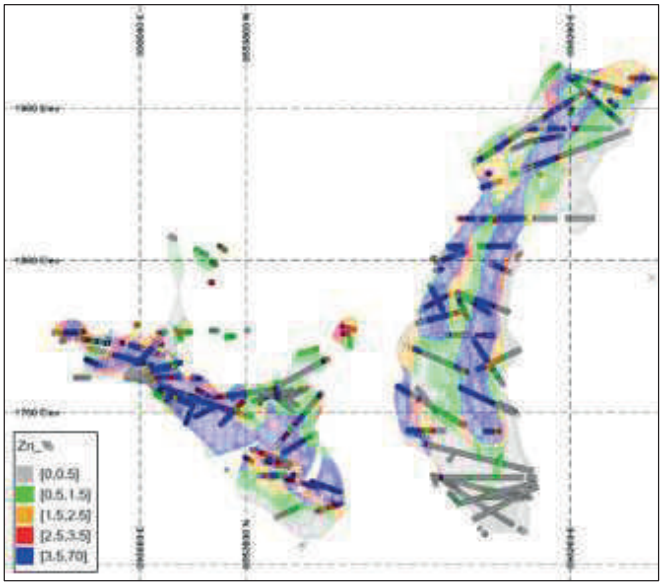


Figura 8: Sección del modelo de bloques que evidencia una mejor continuidad en la interpolación numérica del valor de los metales en Cerro Lindo.

7. Conclusiones

La reconciliación minera evidencia que el modelo de recursos 2020 donde se utilizó el ratio de Knuckey es más semejante a los datos reportados por planta (balance metalúrgico) con respecto al modelo de recursos 2019 haciendo de este modelo más confiable para el planeamiento.
En las reconciliaciones de corto plazo que se realiza mensualmente se evidencia que hay una variación menor al 3% con respecto a lo real reportado por planta estando dentro de los rangos más que aceptables para este tipo de yacimiento.

Figura 9: Grade Comparasion Elemento Zn% histórico entre los tajos minados en los diferentes años, el balance oficial metalúrgico (línea negra), los tajos reportados con el Modelo de Bloques 2019(línea gris claro) y Modelo de Bloques 2020(línea naranja)

Existe una buena cantidad de datos de análisis químico de los elementos Cu y Zn que permitirán realizar el ratio Cu / Cu+Zn y están adecuadamente distribuidos en todo el yacimiento.

El uso del ratio de knuckey es útil para el tipo de yacimiento VMS, ya que mostró de una manera eficiente la dirección de desplazamiento del flujo mineralizante lográndose construir los planos de tendencia.

Es también importante complementar y contrastar la interpretación de estos planos de tendencia con los modelos estructurales y modelos de alteración.

Se pueden utilizar los planos de tendencia como imputs para el modelamiento geológico mediante la herramienta Structural Trend en LeapFrog demostrando una mayor continuidad en la interpolación de los dominios y una similitud mayor a los planos interpretados.

Los planos de tendencia construidos a partir del ratio de knuckey pueden ser utilizados como imputs para la generación de los puntos de anisotropía dinámica que a su vez los puntos serán usados como imputs en la estimación de recursos ya que cuentan con los atributos necesarios.

La anisotropía dinámica es la opción más viable para alcanzar una estacionalidad variográfica y evidencia una mayor continuidad en la interpolación de valores en las direcciones establecidas.

Se deben realizar las validaciones correspondientes en todo el proceso de la estimación, desde el EDA hasta el reporte de los recursos minerales tomando especial foco en las zonas que van a ser minadas.

Agradecimientos

A la empresa Nexa Resources Peru por permitirnos usar la información para realizar esta publicación, a todo el equipo de Geologia de Cerro Lindo y todo el equipo de Recursos Minerales por sus incondicionales enseñanzas y apoyo.

Referencias

Bueno, J. & Mendoza, M (2019), Caracterización litogeoquímica en el Yacimiento VMS-Cerro Lindo y su relacion con la mineralización para determiner vectores Guías en la exploración. Lima, Perú. Proexplo2019.

Canales, J, (2015). Cartografiado geológico y muestreo geoquímico y litogeoquímico cerro lindo.

Hinostroza de la Cruz, J.H., (2009). Proyecto Cerro Lindo. Geología y Zonamiento Cu-Zn. Tesis para Optar el Titulo Profesional de Ingeniero Geólogo. Universidad Nacional de Ingeniería. Facultad de Ingeniería Geológica, Minera y Metalúrgica. Lima, Perú.

Hochschild Plaut. (1999) Instituto de Ingenieros de Minas del Perú. Pro Explo 99.

Geological Association of Canada, (2008), Lithogeochemistry of volcanic rocks associated with volcanogenic massive sulfide (VMS) deposits and applications to exploration

Gibson, H.L.; Lafrance, B.; DeWolfe, M.; Devine, C.; Gilmore, K.; Pehrsson, S,(2009) Volcanic Reconstruction and Post Depositional Modification of a Cauldron Subsidence Structure within the Flin Flon VMS District.

Goodell, P.C. Petersen, U (1974) A study of metal ratios

Ishikawa, Y., Sawaguchi, T., Ywaya, S., and Horiuchi, M., (1976), Delineation of prospecting targets for Kuroko deposits based on modes of volcanism of underlying dacite.

Knuckey, M.J.; Comba, C.D.A.; Riverin, G. (1982) Structure, metal zoning and alteration at the Millenbach deposit, Noranda, Quebec. In Precambrian Sulfide Deposits.

Lentz, D.R., and Goodfellow, W.D., (1996), Intense silicification of footwall sedimentary rocks in the stockwork alteration zone beneath the Brunswick No. 12 massive sulfide deposit, Bathurst, New Brunswick; Canadian Journal of Earth, v. 33, p. 284-302.

McConnell, B., (1991), Geochemistry and mineralogy of volcanic host rocks as indicators of massive sulphide genesis at Avoca, Southeast Ireland; Irish Journal of Earth Sciences v. 11, p. 43-52.

Moniz, R. (2020) Contribuições Para O Uso De Anisotropias Locais Na Geoestatística.

Piercey, (2009), geochemistry of volcanic rocks associated with volcanogenic massive sulphide deposits and applications to exploration, v. 39, p.1-26..

GEOMETALURGIA DE MINERALES DE COBRE OXIDOS Y SECUNDARIOS E IMPACTO EN LOS RECURSOS Y LA PRODUCCIÓN DE LA UNIDAD MINERA CERRO LINDO

Jean Paul Bueno Carreón[1], Nickol Ivan Estrada Ramos[2]

[1] Nexa Resources S.A.A., dirección, Lima, Perú (jbueno@nexaresources.com)
[2] Nexa Resources S.A.A., dirección, Lima, Perú (nickol.estrada@nexaresources.com)

1. Abstract

Soluble copper originated due to seepage and / or precipitation that occurred in the upper zone of the Mineralized Bodies near Quebraba Topará, generating a secondary zone of copper after passing through the leached zone.
Which is to be identified, zoned and characterized in the mineralized bodies of the deposit by means of diamond drilling, to carry out geometallurgical studies that help us find the viability for their exploitation.
Because this mineral is not being considered in the reserves because it causes problems in the recovery of zinc when it is treated together with the standard mineral of the operation.
Reaching the conclusion that metallurgical tests must be carried out to treat this mineral for campaigns and not to harm the zinc recovery.

El cobre soluble se originó debido a las filtraciones y / o precipitaciones que ocurrieron en la zona superior de los Cuerpos Mineralizados cercanos a la Quebraba Topará, generando una zona secundaria de cobre luego de pasar por la zona lixiviada.
La cual se quiere identificar, zonificar y caracterizar en los cuerpos mineralizados del yacimiento mediante los sondajes diamantinos, para realizar estudios geometalúrgicos que nos ayuden a buscar la viabilidad para su explotación. Debido a que este mineral no está siendo considerado en las reservas por causar problemas en la recuperación de zinc cuando se trata junto con el mineral estándar de la operación.
Llegando a la conclusión que se deben realizar pruebas metalúrgicas para tratar este mineral por campañas y no perjudicar a la recuperación de zinc.

2. Introducción

El área de estudio se ubica en la parte occidental del Perú, en la provincia de Chincha, departamento de Ica, a 175 km SE de Lima. El depósito de Cerro Lindo se caracteriza por una mineralización polimetálica Zn-Pb-Cu-Ag-Ba tipo sulfuro masivo vulcanogénico (VMS) de clase mundial con una producción promedio de mineral de 21,500Tn/día.
El presente trabajo se realizó con el fin de mostrar la posibilidad de aprovechar los recursos que no estaban siendo considerados en las reservas por causar problemas metalúrgicos en la recuperación al momento de tratar el cobre soluble con el mineral estándar causando bajas recuperaciones de Zn.
Por ello que se realizaron estudios geometalúrgicos detallados para dar una solución y procesar el cobre soluble en la Unidad Minera Cerro Lindo.
El método que se realizó para poder determinar el contenido de cobre soluble es el análisis químico por cobre secuencial.
El método de análisis por cobre secuencial es una técnica particularmente útil para definir semi-cuantitativamente los tipos y zonas geológicas, mineralógicas comúnmente asociados con depósitos con contenido de cobre. El método químico se basa en el comportamiento de disolución parcial que muestran los minerales de cobre cuando tienen presencia de minerales como calcocita, crisocola, malaquita y calcopitira en contacto sucesivo con soluciones que contienen ácido sulfúrico y cianuro de sodio. Con ello se pueden determinar las cantidades de minerales de

óxido lixiviables y minerales de cobre secundarios. Se presentan resultados analíticos de análisis secuencial e interpretación para depósitos con contenido de cobre. (Parkison, 1995)

3. Objetivo

Identificar, zonificar y caracterizar el cobre soluble en los cuerpos mineralizados en el depósito de Cerro Lindo tipo sulfuro masivo vulcanogénico (VMS), como se muestra en la figura N°1.
Buscar mejoras en el proceso de recuperación de Cobre Soluble y así considerarlo en las reservas en Cerro Lindo.

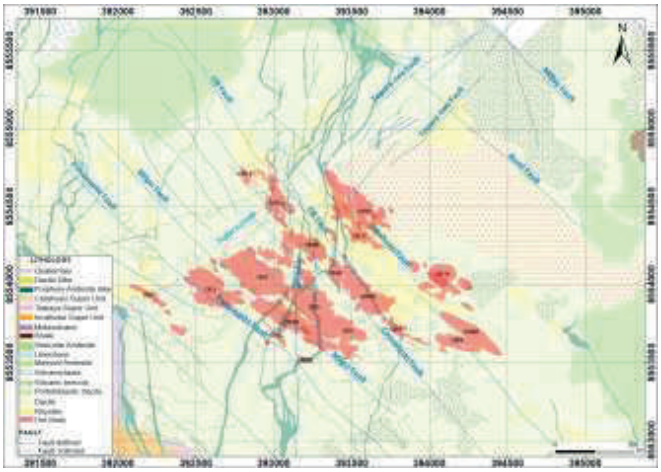


Figura N° 1: Ubicación de los cuerpos del Yacimiento Tipo VMS de la Unidad Minera Cerro Lindo

Para lo cual se va determinar los cuerpos mineralizados con mayor presencia de cobre soluble e identificar la relación con los dominios geológicos existentes en el yacimiento y así poder realizar una estimación con el uso del software Datamine para delimitar zonas en el yacimiento.
Por último realizar el estudio geometalúrgico del cobre soluble para sugerir el método adecuado para mejorar el proceso de recuperación de cobre soluble sin afectar la recuperación de Zn.

4. Metodología Aplicada

Se realizó un muestreo selectivo de sondajes y muestra de comunes situados en la zona alta del OB2 (cuerpo mineralizado con leyes altas de cobre) del Nivel 1850 hasta el Nivel 1970 como muestra la Figura N°2, donde se reportaron tajos con contenido de cobre soluble que en el proceso metalúrgico afectaba a la recuperación de Zn.

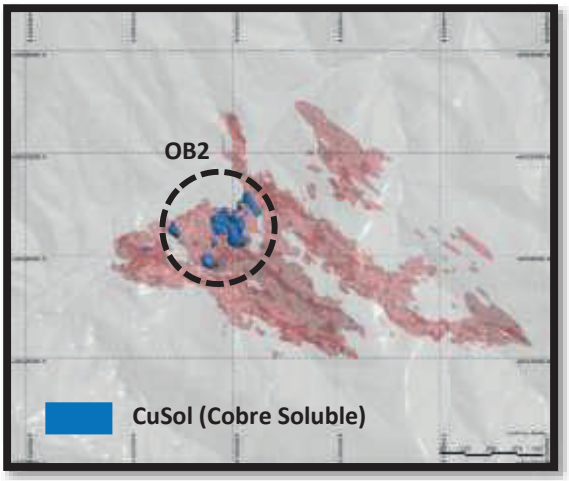


Figura N° 2: Cobre soluble identificado en la zona alta del OB2(cuerpo mineralizado con leyes altas de cobre).

Macroscópicamente se notó con características totalmente diferentes a la muestras de mineral que trata la mina, es decir con presencia de mineral oxidado, carbonatos de cobre y cobres secundarios.

Estas muestras que se encuentran en la Tabla N°1 se analizaron en el Laboratorio de Certimin S.A. por el método químico de análisis de cobre secuencial (utilizando ácido sulfúrico, cianuro de sodio y agua regia), para determinar la cantidad de minerales de óxidos lixiviables, minerales de cobres primarios y cobres secundarios. Dando como resultado el cobre total en las muestras y poder realizar el análisis e interpretación respectiva, clasificándolos por el grado de alteración.
Un grupo de estas muestras formaron un compósito para poder realizar estudios geometalúrgicos como mineralogía, microscopía, conminución (dureza del mineral), flotación, análisis mineralógico en los concentrados y en el relave.
En total se tomaron 300 muestras entre sondajes y muestra de comunes que fueron analizadas y ploteadas en el OB2.

SAMPLE DESCRIPTION	Weight kg	CuSolH+ %	CuCN- %	CuRes %
268526	7.49	0.397	0.42	0.761
268527	7.82	0.306	0.394	0.429
268528	4.59	0.428	0.542	0.5
268529	5.13	0.622	0.668	0.088
268530	5.1	0.076	0.234	0.032
268531	6.39	0.205	0.431	0.056
268532	5.09	0.18	0.308	0.021
268533	5.92	0.176	0.643	0.439
268534	2.64	0.35	1.253	1.121
268535	4.01	0.839	1.176	1.273
268536	5.56	0.114	2.147	0.263
268537	5.32	0.236	1.35	0.344
268538	4.79	0.341	0.474	0.37
268539	4.59	0.14	0.213	0.021
268540	3.11	0.037	0.168	0.057
268541	2.29	0.034	0.161	0.055
268542	4.41	0.185	0.266	0.219
268543	4.77	0.258	0.343	0.109
268544	6.38	0.222	0.306	0.074
268545	5.37	0.203	0.206	0.017
268546	1.96	0.183	0.209	0.015
268547	0.37	0.434	0.707	0.06
268548	2.49	0.254	0.492	0.116
268549	2.79	0.246	0.625	0.018
268550	4.69	0.823	0.937	0.022
268551	5.19	0.626	0.721	0.164
268552	4.9	0.411	0.472	0.098
268553	4.21	0.179	0.262	0.079
268554	2.56	0.282	0.438	0.203
268555	3.87	0.253	0.347	0.167
268556	5.56	0.435	0.521	0.361
268557	2.69	0.374	0.56	0.636
268558	3.67	0.252	0.259	0.018
268559	3.74	0.234	0.263	0.035
268560	1.12	0.006	0.021	0.024
268561	0.87	0.002	0.034	0.027
268562	2.36	0.005	0.034	0.041
268563	3.56	0.002	0.008	0.005
268564	4.43	0.002	0.03	0.019
268565	3.47	0.002	0.017	0.023
268566	2.17	0.002	0.03	0.033

Tabla N° 1: Datos de Laboratorio de algunas muestras representativas por el método de análisis de cobre secuencial.

5. Geometalurgia del Cobre Soluble

5.1. Análisis de cobre secuencial

En el procesamiento de minerales como en este caso el cobre soluble con buena ley de Cu, es importante comprender su naturaleza a partir desde un punto de vista geometalúrgico.

El análisis de cobre secuencial es el punto de partida para poder zonificar el cobre soluble en el yacimiento; para esta oportunidad nos hemos enfocado en el OB2 (cuerpo mineralizado con leyes altas de cobre) ya que reportó tajos con contenido de cobre soluble. Luego se replicará lo mismo para los diferentes cuerpos mineralizados (Ore bodies - OBs) en el yacimiento de la Unidad Minera Cerro lindo, con la finalidad de delimitar y cuantificar el cobre soluble.

El análisis de cobre secuencial se basa en el comportamiento de disolución parcial que muestran los minerales de cobre en soluciones que contienen ácido sulfúrico y cianuro de sodio, véase en la Tabla N°2. Los resultados de los análisis nos determinan las cantidades de minerales de óxidos, lixiviables en ácido, minerales de sulfuro secundario y minerales de cobre primario que hay en las muestras. (R.B. Bhappu, 1995).

Pasos del análisis secuencial	Clasificación Mineralógica	Clasificación Metalúrgica	Clasificación Geológica	
Cobre Soluble en ácido sulfúrico	Oxido de cobre	Lixiviable en Acido Sulfúrico	Zona de Oxido: CuSAc/CuT>50%	Zona Mixta CuSCN o CuR/CuT son todos <50%
Cobre Soluble en Cianuro de Sodio	Componentes de Sulfuros Secundarios	Lixiviable en Medio Férrico	Zona Secundaria: CuSCN/CuT>50%	
Cobre Residual Total	Sulfuro Primario	Lixiviable en Medio Bacterial	Zona Primaria CuR/CuT>50%	

Fuente: THE SEQUENTIAL COPPER ANALYSIS METHOD-GEOLOGICAL, MINERALOGICAL, AND METALLURGICALIMPLICATIONS (G.A. Parkinson, Cambior USA, Inc. Englewood,CO, R.B. Bhappu, Mountain States R & D International Inc.,Vail, AZ , FOR PRESENTATION AT THE sme Annual Meeting Denver, Colorado- March 6-9, 1995)

Tabla N° 2: Análisis de cobre secuencial.

Se sacaron muestras de las ventanas (V01 y V02) del T-1025A_OB2_1850, como se muestra en la Figura N°3, por presentar cobre soluble y se mandaron al laboratorio para realizar el análisis de cobre secuencial obteniendo la distribución del cobre en las muestras, resultando el mayor porcentaje de cobre soluble y cobre cianurado.
Se sacó muestra de mineral ROM (mineral estándar) y se realizó el respectivo análisis de cobre secuencial para realizar un comparativo. La Figura N°4 nos muestra que su contenido de cobre soluble es muy bajo.

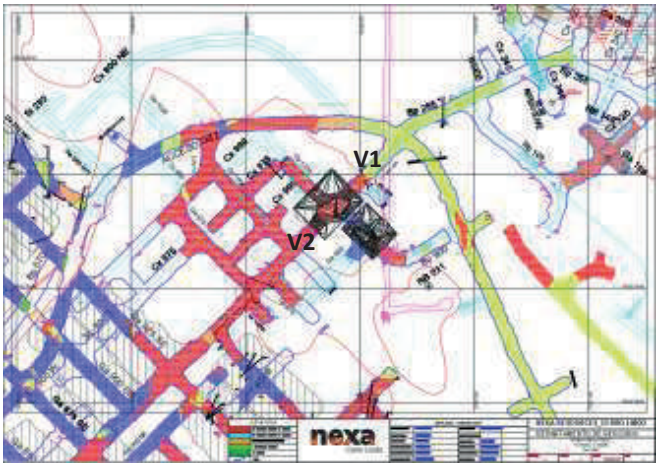


Figura N°3: Ubicación de T-1025A_OB2B_1850 y sus ventanas de extracción.

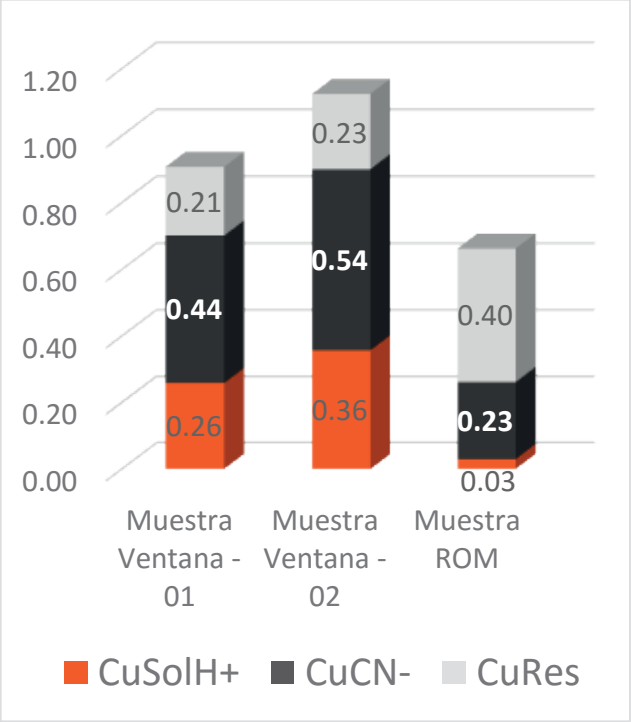


Figura N°4: Distribución de Cobre Soluble.

Se obtuvo resultados de la distribución de Cobre en las muestras sacadas de las ventanas del T-1025A y poder cuantificar el contenido de cobre secundario en las muestras. (Figura N°5)

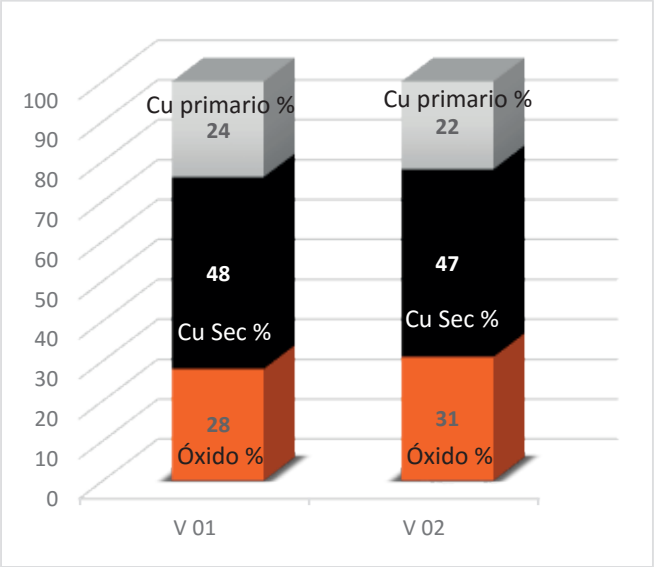


Figura N°5: Distribución de Cobre en las muestras.

5.2. Microscopía de opacos

El análisis de %Cu por microscopía tiene varios significados, en este caso se observa presencia de covelita en sus diferentes texturas tanto en la cabeza general, relave y concentrado de cobre.

La presencia de covelita (cv) indicará que la presencia de cobres secundarios que provienen de zonas alteradas a partir de los cobres primario (cp), eminente presencia de calcantita y considerable presencia de esfalerita tipo 4.(Véase en la Figura N°6).

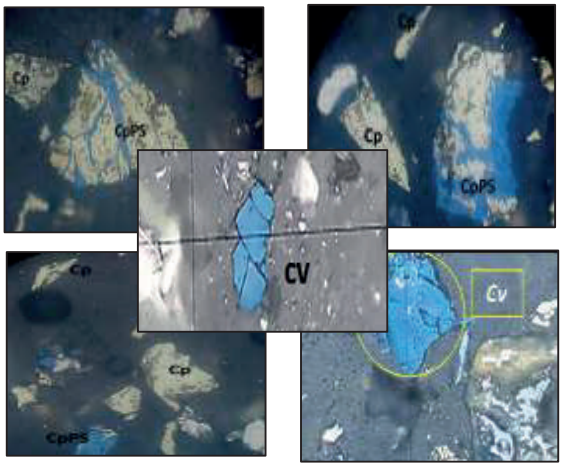


Figura N°6: Calcopirita en transición a covelita (Cv) mineral con tono azulado

La esfalerita tipo 4 es una textura muy poco común en la minería peruana; se trata de una invasión de covelita en la esfalerita. Este mineral genera presencia de Zinc en el concentrado de Cobre. Véase en la Figura N°7.

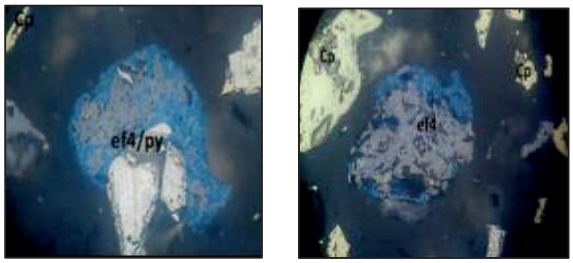


Figura N°7: Esfalerita tipo 4 (textura).

5.3. Conminución

Indica la reducción de tamaño de las partículas de mineral, mediante trituración, chancado, molienda y otros. (Camiper, 2019).

Se realizó el compósito LDFC-01 con las muestras representativas de la zona de cobre soluble ubicada en el OB2 para realizar las pruebas de conminución, flotación y mineralogía. (Tabla N°3)

SAMPLE ID	DDH	Desde (metros)	Hasta (metros)
LDS-05	PECLD04259	4.8	12.3
LDS-20	PECLD04291	20.4	31.1
LDS-07	PECLD04259	26.7	32.7
LDS-09	PECLD04259	65.9	72.2
LDS-10	PECLD04260	64.6	75
LDS-11	PECLD04260	5.6	13.1
LDS-12	PECLD04260	13.1	20.6
LDS-13	PECLD04260	53.9	58.6

Tabla N° 3: Algunos sondajes representativos que forman parte del compósito LDFC-01.

5.3.1. Índice de Abrasión (Ai)

El índice de abrasión se usa para determinar el desgaste de las brocas en la perforación, tubos y medios de acero en trituradores, molinos de barra y de bolas. (SGS, 2020).

Los resultados de Ai que se obtuvieron de la mayor población de muestras se encuentran en rangos bajos y medios. (Figura N°8)

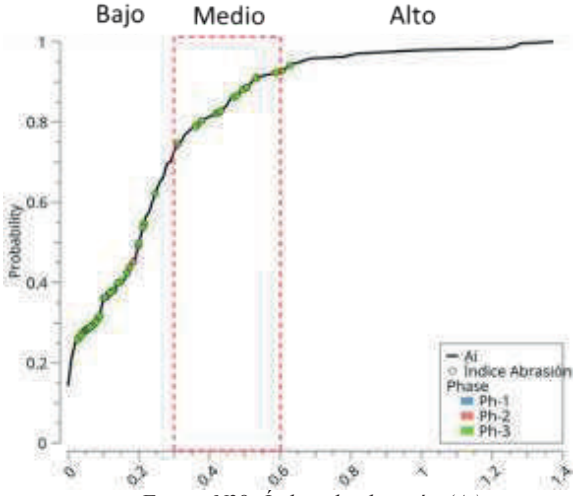


Figura N°8: Índice de abrasión (Ai)

5.3.2. Distribución de índice de Trabajo (BWi)

Es la energía usada en la reducción de tamaño de partículas, como en el caso para determinar el consumo de energía de un molino de bolas para obtener un tamaño de partículas deseado. (Metallurgist, s.f.).

Los resultados de BWi de la mayor población de muestras se encuentran en el rango moderado, como muestra la Figura N°9.

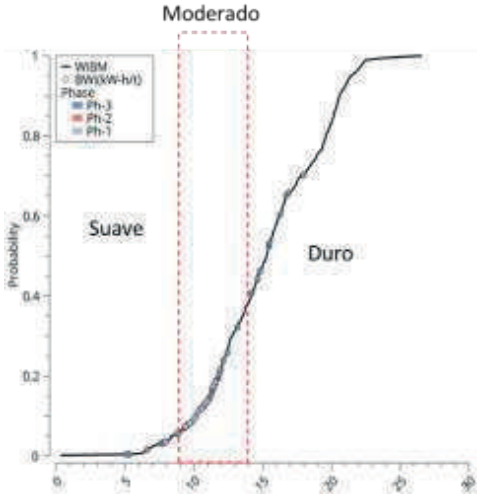


Figura N°9: Distribución de índice de trabajo (BWi)

5.4. Flotación

Es el procedimiento que permite concentrar el mineral de la pulpa de material mineralizado que viene del proceso de molienda. En las celdas de flotación se hacen burbujear aire desde el fondo de manera que las partículas de mineral presentes en la pulpa se adhieren a las burbujas de aire y así

suben con ellas y se acumulan en una espuma. La espuma rebasa hacia canaletas que bordean las celdas y que la llevan al proceso de decantación. (Chile, s.f.)

En las pruebas de flotación del compósito LDFC–01 se tiene la presencia de cobre soluble. Donde la cinética de flotación de Cu es lenta por la posible alteración superficial.
Presencia de tenantita en el concentrado bulk y presencia importante de calcopirita en el concentrado de zinc. Se reporta pirrotita en el relave.
Calcopirita libre y asociada a esfalerita en el concentrado de zinc.
Las leyes de cabeza de este compósito reflejan baja ley de zinc pero alto en ley de cobre para este yacimiento tipo VMS.(Tabla N°4)

AQ. Cabeza	Ag	Cu	Pb	Zn	Fe	As	Hg	Cu_SS	Cu_CN	(CuSS+CuCN)/CuT
ID	g/t	%	%	%	%	%	ppm	%	%	%
LDFC-01	16.0	1.00	0.029	0.66	37.9	0.02	2.96	0.026	0.10	20

Tabla N° 4: Análisis Químico del compósito LDFC-01

Las calidades de los concentrados de Zn y Cu son afectados por la presencia de cobre soluble en el concentrado bulk.
Donde la calidad de Zinc baja a un 46.6%.(Tabla N°5)

Producto	Grado Concentrado							
	Ag, g/t	Cu, %	Pb, %	Zn, %	Fe, %	S, %	Hg, ppm	As, %
Conc. Bk	470.3 ± 83.6	32.8 ± 0.1	1 ± 0	1 ± 0	28 ± 0.8	34.4 ± 0.6	13.6 ± 1.2	0.7 ± 0.2
Conc. Zn	134.7 ± 28.8	6.4 ± 1.6	0.1 ± 0	46.4 ± 3.3	10.6 ± 1.7	34.8 ± 0.5	181.7 ± 4.6	0 ± 0.004

Tabla N° 5: Calidad del compósito LDFC-01.

La recuperación de zinc es afectada por la esfalerita tipo 4 (textura) donde la covelita reemplaza a la esfalerita y el zinc se activa en la flotación bulk al no poder separarse en el proceso de conminución.
La recuperación zinc baja de un 90% a un 68.4%. (Tabla N°6)

Producto	Recuperacion %							
	Ag	Cu	Pb	Zn	Fe	S	Hg	As
Conc. Bk	36.8 ± 7.4	58.3 ± 20.4	42 ± 16	1 ± 1	0.7 ± 0.3	0.8 ± 0.3	6 ± 3.1	41.6 ± 7.7
Conc. Zn	8.6 ± 3.8	9.4 ± 6.6	2.9 ± 1.2	68.4 ± 2.9	0.2 ± 0.1	0.7 ± 0.3	64 ± 24.1	1.1 ± 0.5

Tabla N° 6: Recuperación del compósito LDFC-01.

5.5. Mineralogía

Se realizó el estudio mineralógico del compósito LDFC-01 que pertenece al OB2 y al dominio SPP (Sulfuro Primario de Pirita).
En la figura N°10 observamos que su composición contiene el 89% de sulfuros donde predomina la pirita seguido de la pirrotita, calcopirita y esfalerita.

La presencia de tenantita es muy poco en el compósito realizado; cabe resaltar que nuestro concentrado de Cu es de muy buena calidad.

Composites	Carbonates	Others	Oxides & Hydroxides	Phosphate	Silicates	Sulphides & Suphate
LDFC-01	0.11	0.22	4.09	0.02	6.57	89.0

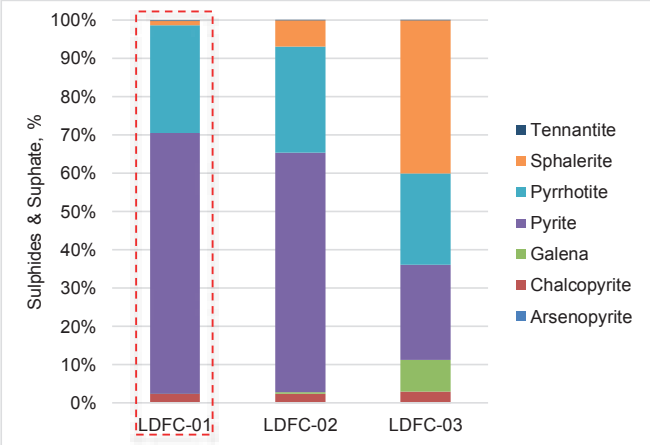


Figura N°10: Mineralogía del compósito LDFC-01

Se realizó un QEMScan al compósito LDFC-01 para corroborar las asociaciones mineraógicas observadas en la microscopía de opacos. Donde se observó que la calcopirita en el concentrado de zinc es fina y en su mayoría está asociado a esfalerita, como se muestra en la Figura N°11.

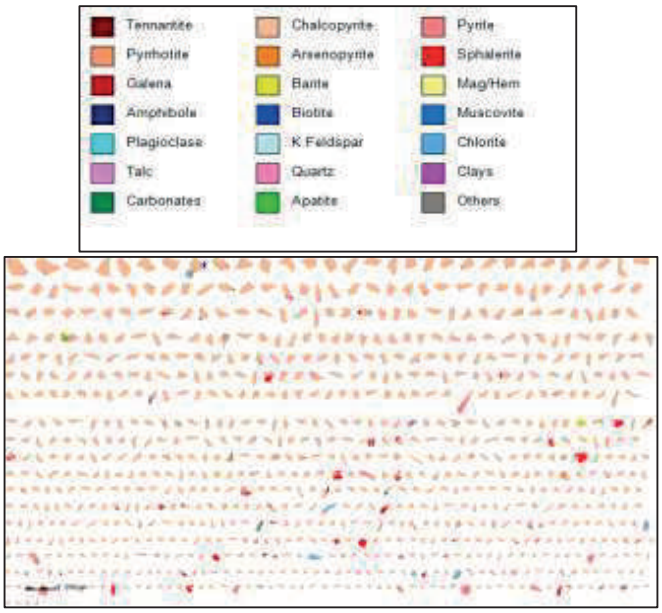


Figura N°11: QEMScan del compósito LDFC-01

6. Conclusiones

Se identificó que el compósito presenta una dureza y abrasividad moderada por contenido de sulfuro

masivo, manteniendo las condiciones estándar de la conminución de la planta concentradora.
La recuperación de Cu disminuye al incrementarse el % de cobre soluble y que muestras con alto contenido de cobre soluble presentan riesgos a la recuperación de Zn.
La calidad de los concentrados de Zn y Cu también se ven afectados por no poder separar mecánicamente la covelita de la esfalerita.
Se debe realizar pruebas para poder tratar el mineral en campañas y poder aprovechar los recursos de cobre soluble que se tiene el yacimiento.

Agradecimientos

A la empresa Nexa Resources Peru por facilitarnos usar la información requerida para realizar este presente trabajo y al equipo de Geología de Cerro Lindo por incondicional apoyo.

Referencias

Balboa, L. (2012). Modelamiento y CO-Simulación de leyes de Cobre Total y Solube. Chile.
Camiper. (2019). ¿Qué es la Conminución de Minerales en Metalurgia? Lima: Redacción Tiempo Minero.
Chile, M. d. (s.f.). Flotación. Obtenido de http://www.minmineria.gob.cl/glosario-minero-f/flotacion/
Diaz, R. y. (2003). Cracterización Geometalúrgica de la Zona de Mixtos Sulfuro Primario-Secunadrio Del Yacimiento Zaldívar. Chile.
Innovación, T. e. (2018). Diseño de Pruebas de Cobre Soluble . Lima: Nexa Resources.
Javier Basurco, C. Q. (2020). Evaluación de Colectores y Modificadres en Nexa Cerro Lindo. Lima.
Jean Paul Bueno, N. E. (2020). Informe sobre el aporte de cobre soluble en la Unidad Minera Cerro Lindo. Lima: Nexa Resources Peru.
Metallurgist, 9. (s.f.). Indice de Trabajo de Bond y su Procedimiento. Obtenido de https://www.911metallurgist.com/metalurgia/indice-trabajo-bond-procedimiento/
Parkison, G. (1995). The Sequential Copper Analysis Method-Geological, Mineralogical, And Metallurgical Implications. Colorado.
R.B. Bhappu, G. P. (1995). The Sequential Copper Analysis Method-Geological, Mineralogical, And Metallurgical Implications. Colorado: SME Anua Meeting.
SGS, M. (2020). Servicios metalúrgicos y operaciones de unidades - Pruebas de abrasión.

Grade Uncertainty Assessment for Sub-Vertical Vein Exploration Projects

David F. Machuca-Mory[1] and Oy Leuangthong[2]

[1]SRK Consulting Ltd. Suite 1500, 155 University Ave. Toronto, Ontario, Canada (dmachuca@srk.com)
[2]SRK Consulting Ltd. Suite 1500, 155 University Ave. Toronto, Ontario, Canada (oleuangthong@srk.com)

Summary

Initial Mineral Resources evaluation of deposits are commonly obtained using traditional estimation methods that yield deterministic tonnage and grade figures. However, it is in the early stages of exploration drilling when data is scarce and, consequently, the uncertainties about the volume, shape, and grades of the deposit are greatest and their evaluation most critical. This paper presents a probabilistic methodology to account for grade uncertainty in the evaluation of Mineral Resources of narrow sub-vertical veins. First, the available data is projected in a vertical plane to reduce the uncertainty related to core location. Second, the uncertainty in grades is characterized using the sequential Gaussian simulation algorithm. Finally, the resulting multiple simulated grade models are reported at different cut-offs. In this way, by considering the uncertainty in the grades, the Mineral Resource model provides a more comprehensive basis for further exploration and engineering decisions.

Keywords: Sequential Gaussian Simulation, Mineral Resources, Coordinate Transformations

Resumen

La evaluación de Recursos Minerales en las etapas tempranas de perforación es comúnmente efectuada por medio de métodos de estimación tradicionales que resultan en declaraciones determinísticas de tonelajes y leyes. Sin embargo, es en estas etapas tempranas cuando, debido a la escasez de datos, las incertidumbres relacionadas con el tonelaje, forma y la ley del depósito son más grandes y críticas para el desarrollo del proyecto. Este trabajo presenta una metodología probabilística para la evaluación de la incertidumbre de los Recursos Minerales de vetas angostas subverticales. Primero, los datos son proyectados en un plano vertical a fin de reducir la incertidumbre relacionada con la ubicación de los testigos. Luego, la incertidumbre de las leyes es caracterizada usando el algoritmo de Simulación Secuencial Gaussiana. Finalmente, las múltiples realizaciones de leyes son reportadas a diversas leyes de corte. De esta manera, al incorporar el rango de incertidumbre, el modelo de Recursos Minerales provee una base más amplia para decisiones sobre la exploración y desarrollo del proyecto.

Palabras Clave: Simulación Secuencial Gaussiana, Recursos Minerales, Transformación de Coordenadas

1. Introduction

Initial Mineral Resource estimates for narrow vein deposits are usually reported after a few tens of boreholes have intersected the vein structure. These estimates are obtained using traditional methods such as polygons and inverse distance interpolation on the basis that limited data do not permit the use of geostatistical methods such as kriging. However, it is in these early stages, when data is scarce, that uncertainties related to geometry, tonnage, and grades are the highest and most critical for further development of the project. Traditional estimation methods, including kriging, are deterministic methods that cannot deal appropriately with these uncertainties. Moreover, they may yield smooth and often biased models of the spatial distribution of grades (Journel and Kyriakidis, 2004).

Sequential Gaussian simulation (Journel and Huijbregts, 1978) yields multiple equiprobable realizations of grades and other mineral attributes at the same support as the informing data. These realizations not only honour the data values at their locations, but also the data histogram, and the spatial continuity imposed by the variogram model (Leuangthong et al, 2004).

This work develops a methodology for the application of Sequential Gaussian Simulation for assessing the grade uncertainty in narrow vein deposits. First, data is preprocessed by compositing the original samples at regular intervals; subsequently, the coordinates of the composites are transformed by projecting the plane of the vein to a vertical plane without loss of volume. Multiple realizations of grades are generated in the transformed coordinates using sequential Gaussian simulation. The multiple thickness and grade realizations are ranked and combined to characterize the range of joint grade-tonnage uncertainty, which is reported using statistical intervals and boxplots at different cut-off grades and compared with the results of conventional estimation methods. The simulated Mineral Resources models can be queried for the probability of exceeding certain metal content targets to support further exploration and engineering decisions.

2. Data Preprocessing and Analysis

The data used to illustrate the proposed methodology comes from one mineralised structure of a deposit conformed by various low-sulfidation epithermal veins. The coordinates and gold grades have been modified by undisclosed factors to protect the confidentiality of the original dataset.

2.1. Sample Compositing and Capping

For very narrow veins, this is when vein thickness does not exceed the minimum mining width or when there is a single sample per vein intercept, the sample accumulation approach should be adopted. This approach calls for the calculation of accumulations by multiplying the sample grade times the sample length. Estimation or simulation is performed using the accumulation values and the estimated or simulated, grades are obtained by dividing the accumulations by the estimated, or simulated, thickness (Deutsch, 1989).

For the present case study, however, the vein thickness ranges from 1 to 36 metres. Thus, the sample compositing approach is adopted since one or more samples can be taken from the vein intercepts, and because the minimum mining width allows for some selectivity in such wide vein structure. A compositing length of 1 metre was selected because it is the most common sampling length in the dataset and 90% of the samples are 1-metre long or less.

Capping of high grades is a common pre-processing step in the estimation of grades. For simulation, however, capping is not required as the aim is to characterize the full range of variability of the grades as informed by the available data. The smearing of high grades is not an issue in simulation, since simulated models reproduce the spatial variability and the proportions of grades at various cut-offs.

2.2. Coordinate Transformation

The Cartesian system of coordinates is seldom the most adequate for characterizing Geological phenomena. Despite this, it is the only coordinate system used by most of the Mineral Resource modelling algorithms and software. Mineralisation in a vein follows non-linear and deformed vein geometry. Several solutions are available to deal with non-linear patterns of mineralization, such as unfolding algorithms and location-dependent variograms and distributions (Machuca-Mory and Deutsch, 2013)

Here we use a simpler approach: the straightening of the coordinates along one vertical plane (Rossi and Deutsch, 2013). This approach works well for sub-vertical (>70º dip) veins that are not heavily deformed. It can also deal with displacements induced by normal faults that are sub-perpendicular to the plane of the vein. The vein straightening transformation around the Y-axis is defined as follows:

$$y' = y_o - \bar{y} + c, \qquad (1)$$

With y' as the new straightened y coordinate, y_o as the original y coordinate, $\bar{y}$ as the y coordinate of

the vein centreline, and c as an optional constant to translate the axis of the transformed coordinates to a convenient location. This transformation may require a prior rotation around the Z-axis if the vein strike is not parallel to the north-south or east-west directions.

Besides being simple, the benefits of using this coordinate straightening transformation include: (1) volumes are not distorted, (2) the uncertainty about core location in one of the axes is eliminated, (3) improved experimental variogram calculation, (4) a smaller block model is required for simulation, and (5) back-transformation is trivial.

2.3. Declustering

Sample declustering is commonly used to reduce the biases introduced by preferential sampling. Statistics that are more representative of the mineralisation are generated by incorporating the declustering weights. Cell declustering (Rossi and Deutsch, 2013) is the most popular method. However, declustering by polygons, nearest neighbours interpolation, or even kriging are more adequate methods for samples in vein deposits, since the volumes used to assign declustering weights can be truncated by the 3D boundaries of the vein. The polygonal method within the straightened vein volume was used for declustering the data in this case study.

2.4. Variography

Spatial continuity analysis was performed on normal score transformed grades in the straightened coordinate system. The fitted variogram model is comprised of three structures: (1) a 0.1 nugget effect, (2) an exponential short-range (50 metres) structure that is isotropic in the plane in the vein, and (3) an anisotropic long-range (300 and 190 metres) spherical structure with major axes ranges confined in the plane of the vein. Ranges perpendicular to the plane of the vein are 6 and 24 metres for the exponential and spherical structures, respectively.
Early exploration projects may suffer from insufficient data to produce well informed experimental variograms. In those cases, a variogram model of a similar and well-sampled deposit may be borrowed. In this case, however, the 702 composite samples within the vein structure allow for variograms that can be considered reliable enough for this study.

2.5. The Simulation Block Model

The volume support of simulated values must be similar to the sample support, thus a 1 metre by 1 metre by 1-metre cell size was chosen for the simulation model. Each cell was assigned with a code 1 if it is located within the volume of the vein in original coordinates, otherwise, the assigned cell code is 0.
The transformation of the original regular cell model into a straightened regular cell model is slightly different to expression (1). The cell model is straightened without overlap or loss of volume using the following formula:

$$y' = y_o - int(\bar{y}) + c, \qquad (2)$$

where $int(\bar{y})$ is the nearest integer to the y coordinate of the vein centreline.
The straightened simulation block model contains 36.5 million cells, compared to 1,449 million 1-metre by 1-metre by 1-metre cells for a block model in original coordinates.

3. Grade Uncertainty Assessment

3.1. Simulation of Grades

Fifty realizations of gold grades were generated in the straightened block model using the program SGSIM of the GSlib geostatistical library (Deutsch and Journel, 1997). The search ranges and orientations used in the grade simulation correspond to full variogram model ranges and orientations. The declustered distribution of gold grades was used for normal scores transformation and back transformation. Simple kriging was used to condition the local distributions of grades, using up to 24 neighbouring data values and 12 previously simulated values.

3.2. Validation and Post-Processing of the Realizations

The 50 simulated models were trimmed by the vein code, keeping only the values within the veins. Still, in the straightened coordinates, the simulation results were validated by checking the reproduction of the declustered histogram and normal scores variogram model.
The coordinates were subsequently back-transformed using the expression

$$y_o = y' + int(\bar{y}) - c, \qquad (3)$$

and upscaled to the SMU size of 24 metres by 6 metres by 12 metres. The percentages of vein and waste rock material were calculated for the upscaled blocks.
For each upscaled realization, the tonnage, average grade and gold content above cut-off were calculated. Using boxplots, Figure 1 illustrates the spread of uncertainty in the gold content of the 50 realizations at different cut-offs. For comparison, the estimated gold content obtained from models created using inverse distance to a power of three

(ID3), and ordinary kriging (OK) are also plotted. For low cut-offs up to 1.50 Au g/t, estimated ID3 and OK models provide results that are very close to the average of the distribution of uncertainty in gold ounces. Relative to the average of the simulations, ID3 tends to over-estimate the gold content at cut-offs greater than 1.50 Au g/t. The overestimation obtained from kriging is less pronounced at these higher cut-offs, and even under-estimate the gold content at high cut-offs above 4.00 Au g/t.

4. Discussion and Conclusions

Geostatistical Simulation methods are regarded as sophisticated approaches that can be used only when data is abundant enough. Here we have shown how geostatistical simulation can be used even in the early stages of exploration for characterizing the grade uncertainty of the deposit. Simulation is not affected by the over-smoothing of estimated grades and can reproduce the correct tonnage above cut-offs, it can be used to validate estimated models and to provide globally accurate assessments of the Mineral Resources. Finally, although there are no fixed prescriptions for acceptable uncertainty thresholds in the Mineral Resources at different stages of a project, the spread of uncertainty resulting from the ensemble of simulated models can be used to obtain quantitative measures of uncertainty related to different production volumes or time periods, accompanied by probabilistic confidence estimates (CIM, 2019).

References

Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum (CIM) Mineral Resource and Mineral Reserve Committee, 2019. “CIM Estimation of Mineral Resources and Mineral Reserves Best Practices Guidelines”, p. 29.

Deutsch, C.V., 1989. "Mineral inventory estimation in vein type gold deposits: Case study on the Eastmain deposit," CIM Bulletin, Vol. 82, No 930, p. 62-67

Deutsch, C.V. and Journel, A.G.,1997. GSLIB: Geostatistical software library and users guide, Oxford University Press, New York, second edition, 1997, 369 p.

Journel, A.G. and Huijbregts, C.J., 1978. Mining geostatistics. Academic press, 384 p.

Journel, A.G. and Kyriakidis, P.C., 2004. Evaluation of Mineral Reserves: a simulation approach. Oxford University Press, 231 p.

Leuangthong, O., McLennan, J.A. and Deutsch, C.V., 2004. Minimum acceptance criteria for geostatistical realizations. Natural Resources Research, 13(3), p.131-141.

Machuca-Mory, D.F. and Deutsch, C.V., 2013. Non-stationary geostatistical modeling based on distance weighted statistics and distributions. Mathematical Geosciences, *45*(1), p.31-48.

Rossi, M.E. and Deutsch, C.V., 2013. Mineral Resource estimation. Springer, 332 p.

Illustrations

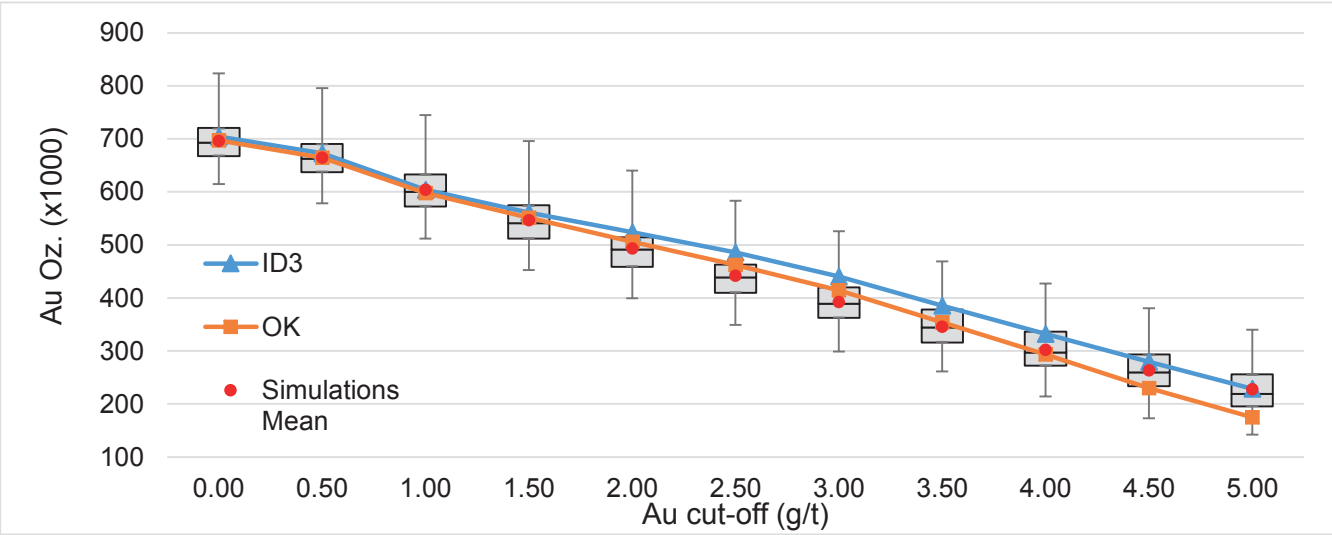


Figure 1: Gold Ounces above cut-off grade for inverse distance to a power of 3 (ID3) and ordinary kriging (OK) estimates compared to the uncertainty distribution based on 50 simulated realizations of gold.

¿QA/QC REALIDAD O FANTASÍA?: DIEZ AÑOS DESPUÉS

Samuel Canchaya Moya[1,2,3]

[1] Catedrático Universidad Nacional de Ingeniería
[2] Catedrático Pontificia Universidad Católica del Perú
[3] Gerente General SAMPLING OK SAC

1. Abstract

QA&QC Reality or Fantasy? Ten years after.

The importance of sampling is well understood because it provides data which, combined with good geological information, allow us to raise arguments to reject or drill a prospect, to invest or not, to classify a tonnage as waste or economic mineral, or to decide whether a domain is or is not contaminated by harmful elements.
In general, a sampling chain can be divided into primary sampling, secondary sampling, and chemical analysis.
The largest known biases and errors are introduced at the stage of primary sampling; which are several orders of magnitude higher than those committed during the secondary sampling and chemical analysis. However, QA/QC procedures, today widely used, are focused mainly on secondary sampling and chemical analysis. The best demonstration of this is the fact that only "twin" or duplicate samples are applied to primary sampling, which means about two percent of the total control samples.
Fortunately, in Perú several companies are applying good sampling practices, which place us among the top in the world ranking.

1. Resumen

Un buen muestreo proporciona datos que, combinados con una buena información geológica, nos permiten plantear argumentos para rechazar o perforar un prospecto, realizar una inversión o clasificar un tonelaje como desmonte o mineral económico, o para decidir si un dominio está o no contaminado por elementos nocivos.
En general, la cadena de muestreo se divide en: muestreo primario, muestreo secundario (conminución) y análisis químico.
Los mayores sesgos y errores conocidos se introducen en la etapa de muestreo primario; que son varios órdenes de magnitud superiores a los cometidos durante el muestreo secundario y el análisis químico. Sin embargo, los procedimientos de QA&QC, ampliamente utilizados en la actualidad, se centran principalmente en el muestreo secundario y el análisis químico. La mejor demostración de esto es el hecho de que sólo se aplican muestras "gemelas" o duplicadas al muestreo primario, lo que aproximadamente significa el dos por ciento del total de muestras de control; el resto se aplican al muestreo secundario y análisis.
Estas malas prácticas fueron destacadas por el autor, desde 2010 hasta su última participación en el evento Muestreo 2018.
Este documento no solo da a conocer esa realidad, sino que también documenta los avances más importantes en las mejores prácticas de muestreo y QA&QC, que han ubicado al Perú en la cima del ranking mundial en prácticas de muestreo.

***Palabras clave**: Muestreo, Aseguramiento de la calidad y Muestras de control.*

2. Planteamiento del problema

La cadena del muestreo se divide en tres etapas:

- El Muestreo Primario, cuyo entregable es la muestra sellada y codificada, el cual también comprende el transporte y almacenamiento de las muestras.
- El Muestreo Secundario (secado, chancado y pulverizado) y
- El Análisis, que se inicia cuando se tiene la muestra disuelta en un tubo de ensayo.

Todos aspiramos a la calidad y por ese motivo, existe una serie de procedimientos y protocolos, conocidos como QA&QC. "Quality Assurance" (QA) que es el conjunto de acciones sistemáticas preventivas, para asegurar la calidad y confianza en el muestreo; mientras que "Quality Control" (QC) es

el conjunto de actividades o técnicas para monitorear, identificar errores y realizar acciones correctivas durante el muestreo.

Por otro lado, la práctica actual del QA/QC es muy inadecuada, debido principalmente a que se circunscribe a la inserción de muestras de control (Blancos, Duplicados y Estándares), principalmente en el muestreo secundario y análisis; descuidando lo más importante: el Aseguramiento de la Calidad (QA) del Muestreo Primario.

Este es un problema de alcance internacional, ya que está ocurriendo en la mayor parte de los proyectos de exploración y operaciones mineras del mundo.

3. Antecedentes

Hace diez años, el autor por primera vez llamó la atención sobre esta práctica inadecuada, en un artículo presentado en el XV Congreso Peruano de Geología (Canchaya, 2010).

Posteriormente, hace nueve años, lo hizo a nivel internacional, con un artículo presentado en el 5th "World Conference on Sampling and Blending" (5thWCSB), realizado el 2011 en Santiago de Chile (Canchaya, 2011) y posteriormente en el congreso mundial: Muestreo 2018, presidido por el Dr. Francis Pitard y realizado en nuestro País en ese año (Canchaya, 2018).

En todos los casos, se trató de llamar la atención de los mejores especialistas de muestreo del mundo, de que no se está aplicando el QA&QC de manera adecuada.

Observando la figura 1 es más que evidente que, la principal fuente de los errores de toda la cadena de muestreo, es el Muestreo Primario y que, por lo tanto, debiéramos priorizarlo y darle nuestra mayor atención, presupuesto, logística, etc.;

Lamentablemente, la práctica actual del QA&QC se ha reducido sólo a insertar muestras de control: duplicados, blancos y estándares; que como se observa en el cuadro de la figura 2, están prácticamente circunscritos al muestreo secundario y análisis.

Sesgo %	Fase	Actividad	% Error relativo
1000	Muestreo primario	Muestreo	100 a 1,000
		Transporte y almacenamiento	1 a 100
50	Muestreo secundario	Preparación mecánica, reducción	10 a 100
		Preparación química	5 a 20
0.1 a 1	Análisis	Análisis	0.1 a 5
Según: Gy (1999:10)		Compilado a partir de: Gy (1999:10); Gy & Francois-Bongarson (1999) y Paski (2006)	

***Figura 1**: Errores asociados a las fases del muestreo. Según los especialistas que se cita, la principal fuente de sesgo y errores en la cadena de muestreo está, en órdenes de magnitud: ¡en el Muestreo Primario!*

Tal como se observa en el cuadro de la figura 2, sólo los duplicados de campo (2%) (recuadros grises) estarían relacionados con el Muestreo Primario; mientras que el resto de muestras de control están referidas al Muestreo Secundario y al Análisis.

Tipo de muestras	% recomendado
Duplicados de campo	2
Duplicados gruesos	2
Duplicados de pulpa	2
Estándar bajo	2
Estándar medio	2
Estándar alto	2
Blancos gruesos	2
Blancos finos	2
Duplicados externos	4
TOTAL	20

***Figura 2**: Proporción recomendable de muestras de control; en base a Simon (2007).*

Debemos preguntarnos porqué nos hemos acostumbrado a esta práctica. La razón principal es que todavía el Muestreo Primario sigue siendo la Cenicienta de la Minería; a continuación, las principales razones: El muestreo no figura en el Planeamiento, los muestreros son los peor tratados y pagados, las Escuelas de Geología no consideran cursos de Muestreo, las muestras de control están dirigidas prioritariamente al muestreo secundario y análisis, con la complicidad de casi todos los "Qualified y Competent Persons" (QP/CP) del mundo, etc.

4. Mejoras en el Perú de las prácticas de muestreo y QA&QC

A continuación, vamos a presentar de manera resumida, los más importantes logros en las prácticas de muestreo en nuestro País.

4.1. **En el ámbito académico**.- En la Escuela de Geología de la Pontificia Universidad Católica del Perú: (PUCP), ocasionalmente se dicta un Curso opcional de Muestreo; así como dos capítulos sobre Muestreo y QA/QC dentro del sílabus del curso de Geoestadística de pre-grado y del Diplomado de Geometalurgia.

En la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI), se ha implementado un curso de muestreo (GE120) en la currícula del pre-grado de la Escuela de Geología, en el marco de su acreditación internacional ABET. Se inició hace cinco semestres, convirtiendo a la UNI en una de las primeras en el mundo, y por ahora la única, que tiene en su currícula de pre-grado, un **curso de Muestreo obligatorio**. Lamentablemente, las autoridades actuales de la Escuela de Geología, han dado un paso atrás, al recategorizar al curso como opcional; sin embargo, conseguiremos se le devuelva la categoría que merece, e incluso, implementar un curso adicional.

La empresa SAMPLING OK SAC (SOK) tiene un programa de difusión de la Teoría del Muestreo (TOS) y QA&QC, a través de conferencias y cursos gratuitos, dictados en todas las universidades nacionales y privadas que tienen Escuelas de Geología y/o de Minas. En algunas, los cursos ya se han repetido hasta tres veces (UNSAAC) o dos (UNP, UNSA, UNAP, etc.).

4.2. **Avances en el ámbito de exploraciones y operaciones mineras**.- Ya son varias las empresas peruanas que, aunque de manera parcial, se han alineado con las buenas prácticas del Muestreo y QA /QC; sobre todo en los casos de material particulado; donde aplicando la teoría del muestreo (TOS) en general, y la fórmula de P. Gy en particular (que relaciona la masa o peso de la muestra, con el diámetro máximo de los chips y la varianza de error fundamental); permite construir nomogramas de muestreo; así como minimizarlos; sobre todo los del muestreo de “blast holes”, donde ya ha sido demostrado que la peor forma de muestrearlo es con tubos o canales; por el contrario los muestreadores sectoriales son mejores, sobre todo el 3D que ha diseñado SOK.

***Figura 3**: Una de las promociones privilegiadas de estudiantes de la UNI, en una práctica de campo en los Cerros Arrastre del curso obligatorio de Muestreo y QA&QC.*

Las primeras empresas en mejorar sus prácticas de muestreo fueron La Arena y Shahuindo, gracias a la gestión de los ingenieros E. Garay y W. García. También tenemos que nombrar al Área de Exploraciones de Buenaventura, que durante la gestión de su Vice-Presidente de Geología, el Dr. C. Vidal, se llegó a implementar las mejores prácticas de Muestreo y QA&QC, permitiendo que el suscrito las materialice en casi todas las cuadrillas de exploraciones. En esta implementación debemos mencionar el apoyo sustantivo de los ingenieros A. Quiroz y H. Tanabe.

Actualmente ya existen algunos proyectos de exploración y operaciones mineras en el Perú que están priorizando el QA del muestreo primario, mediante el uso de cortadoras diamantinas portátiles para el muestreo de canales, o el uso de fragmentadores para disminuir el tamaño máximo de los chips, o espátulas especiales para el muestreo de testigos diamantinos particulados, etc.

Mención aparte merece la Unidad Operativa Tantahuatay, operada por Buenaventura, donde se tiene una de las mejores salas de logueo-muestreo y almacén de testigos, rechazos y pulpas, del Perú y del mundo; obra del Ing. W. Amaya, quién además consiguió muestrear la Veta Alejandra, en

el frente de las labores subterráneas, como tiene que ser; y no en la corona, como es la práctica habitual.

5. Conclusiones

Queda claro entonces que, lo más importante es el ASEGURAMIENTO DE LA CALIDAD (QA) y sobre todo del MUESTREO PRIMARIO, porque este es que genera los tenores más altos de sesgo y error relativo; además es la principal y directa responsabilidad de los geólogos y/o de los metalurgistas (si se trata de las plantas metalúrgicas). Los laboratorios están haciendo bien su trabajo (muestreo secundario y Análisis).

Actualmente el Perú es potencia mundial en Muestreo y QA & QC, por obra y gracia de todos aquellos profesionales y empresas que aceptaron el reto de ser diferentes y de nadar contra la corriente oficial a nivel mundial, preocupada sólo de la inserción de muestras de control (blancos, duplicados y estándares). Felizmente son cada vez más las empresas que asignan presupuesto, apoyo logístico y de capacitación a sus mejores cuadros en las prácticas integrales del verdadero Muestreo y QA&QC.

***Figura 4**: Uno de los privilegiados grupos de geólogos participantes del Taller de Campo de Muestreo y QA&QC, ofrecido semestralmente por la empresa Sampling OK SAC (SOK).*

Tal como se desprende del presente trabajo; se trata de resolver preguntas cruciales como: ¿Cuál es el peso adecuado de una muestra?, ¿Cada cuántos metros debo tomar una muestra? (DOM), ¿Cada cuántos metros debo perforar un taladro?, ¿Cuál es el tamaño máximo de los “chips” de roca que debo meter a la bolsa de muestreo?, etc.; así como también definir mallas anisótropas de muestreo, obtenidas después del correspondiente análisis variográfico; etc.

Todas estas preguntas y otras relacionadas al Muestreo Primario y al QA, no tienen relación directa con las muestras de control; con una solitaria excepción de las muestras duplicadas de campo; por lo que, no nos van a informar si debemos tomar más kilos de muestra, o si debemos minimizar la segregación antes de muestrear o si tenemos que disminuir la distancia de muestreo.

Por su puesto podemos seguir insertando muestras Blanco, Duplicados y Estándares y seguir con el espejismo o la fantasía de creer que estamos haciendo QA/QC, o podemos atrevernos al gran cambio y priorizar el Aseguramiento de la Calidad (QA) del Muestreo Primario.

Referencias

Canchaya S. (2010) *“QA/QC” ¿Realidad o Fantasía?.- XV Congreso Peruano de Geología*, Cuzco 27 Set. al 01 de Octubre; 4p.

Canchaya S. (2011) *QA/QC in mining: reality or fantasy?*.- 5ta Conferencia Mundial de Muestreo y Mezclas (5WCSB), Santiago de Chile, 25 al 28 de Octubre del 2011; 7p.

Canchaya S. (2018) *QA & QC en minería; realidad o fantasía? Siete años después*. Congreso Mundial Muestreo 2018. Lima.

Gy P. (1992) *Sampling of Heterogeneous and Dynamic Material Systems. Theories of Heterogeneity, Sampling and Homogenizing*.- Elsevier, New York.

Gy P. (1999) *Sampling for Analytical Purposes*.- John Wiley & Sons, New York; 153p.

Paski E. (2006) *Taller internacional de muestreo geológico*.- IIMP & Actlabs; Lima Abr. 2006; 120 p.

Simon A. (2007) *Control Sample Insertion Rate: Is there an Industry Standard?*.- 23rd International Applied Geochemistry Symposium, IAGS; Oviedo, Spain, June 2007; 9 p.

Economía circular, rutas tecnológicas para la pirita proveniente de relaves CL
Circular economy, technological routes for pyrites from tailings of the CL mining

Daniel Soares[1], Edelink Tinoco[2], Anthony Erazo[3] y Rodrigo Gomes[4]

[1]Nexa Resources, Circunvalación del Club Golf los Incas 170, Lima, Perú (daniel.soares.ds1@nexaresources.com)
[2]Nexa Resources, Circunvalación del Club Golf los Incas 170, Lima, Perú (edelink.tinoco@nexaresources.com)
[3]Nexa Resources, Circunvalación del Club Golf los Incas 170, Lima, Perú (ext.anthony.erazo@contratistas.com.pe)
[4]Nexa Resources, Rua Guaicuí 20, Belo Horizonte, Brasil (rodrigo.gomes@nexaresources.com)

1. Resumen

El area de Economía Circular de Nexa Resources, tiene como como objetivo reducir la cantidad de relaves generados en sus operaciones, transformándolos en nuevos productos.
En este sentido viene estudiando la pirita, que representa alrededor de 70% del contenido de los relaves de la unidad de Cerro Lindo - CL, en aplicaciones tales como la producción de ácido sulfúrico-PAS y azufre sólido-PAE
En este artículo, será presentado los resultados de investigación de dos temas complementares.
En el primer estudio PAS, se realizaron una serie de experiencias de tostación a diferentes condiciones de temperatura y flujos de aire y N_2. Se Consiguió resultados satisfactorios dando la posibilidad de producir un ácido con excelente calidad, inclusive apto para su aplicación en la agricultura.
En el segundo estudio PAE, se realizaron una seria de experiencias de conversión de SO_2 a azufre sólido a diferentes temperaturas, considerando la selección y diseño adecuado de catalizadores y sus respectivos soportes. Los valores de conversión alcanzados están por encima del 85%, mostrando de esa forma resultados muy promisorios.

Abstract

Nexa Resources' Circular Economy team aims to reduce the amount of tailings generated in its operations, transforming them into new products.
In this sense, it has been studying pyrite, which represents around 70% of the Cerro Lindo unit´s tailings, in applications such as the productions of sulfuric acid-PAS and solid sulfur-PAE.
In this paper, the research results of two complementary studies will be presented.
In the first study - PAS, a series of roasting experiences were carried out at different temperature conditions, and air and N2 flow. Satisfactory results were achieved giving the possibility of producing an acid with excellent quality, even suitable for application in agriculture.
In the second one - PAE, a series of conversion experiences from SO2 to solid sulfur were carried out at different temperatures, considering the selection and proper design of catalysts and their respective supports. The conversion values achieved are above 85%, showing in that way promising results.

Key words: Pyrite, roasting, sulfuric acid, SO_2 conversion, catalyzing.

2. Introducción

La industria minera trata grandes cantidades de materiales, sin embargo valores inferiores a 10% son aprovechados. Los materiales en mayor proporción, denominados relaves, requieren grandes inversiones y de extensos espacios para su disposición.
En la actualidad la industria minera requiere aprovechar al máximo sus relaves en forma de insumos junto a otras materias primas convencionales contribuyendo con el medio ambiente y la economía. [1]
Alineado con ese concepto, Nexa Resources viene trabajando en ese desafío. Un ejemplo de esto, es el caso de la unidad minera Morro Agudo en Brasil, que consigue usar sus relaves en la agricultura. De igual manera, las operaciones en Perú buscan alternativas que valoricen los residuos.
Los presentes trabajos buscan dar valor al SO_2 obtenido de la tostación de la pirita. El primero de estos, es el estudio para producir ácido sulfúrico [2,3] y la segunda alternativa, fue un estudio para obtener azufre sólido, mediante una conversión de un proceso catalítico [4 - 9] de gases ricos en SO_2, con características similares al gas obtenido en el primer estudio.
Ambos estudios fueron parte del proyecto de cooperación con la empresa OUTOTEC y la Universidad Nacional de Ingeniería.

3 *Producción de ácido sulfúrico*

3.1 Parte experimental

El material a tostar, para obtener los gases para evaluar la producción del ácido sulfúrico, fue la pirita de alta pureza que fue previamente concentrada por flotación a partir relaves. Su composición química se puede observar en las tabla 1.

Tabla 1 composición química de la pirita

Elementos,	%
Pb	0.01
Zn	0.11
Cu	0.053
Fe	45.2
SiO2	0.45
CaO	0.2
MgO	0.05
Ni	0.002
Co	0.005
S	53.8
P	0.002
Cr	0.005

Se utilizó un reactor de lecho fluido semi- batch, que posee calentamiento eléctrico que permite usar temperaturas que alcanza hasta 1050°C. También cuenta con un dispositivo de mezcla de gases O_2/N_2/aire para la fluidización; como indicado en la figura 1.

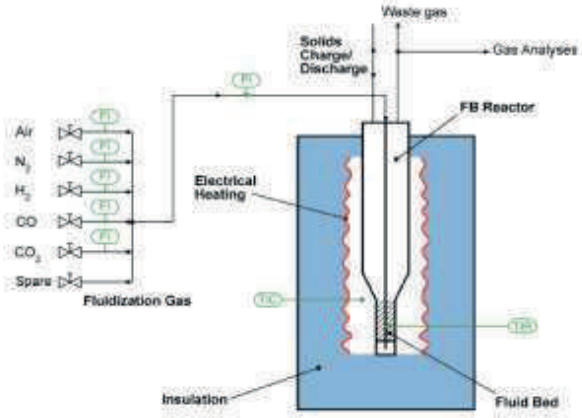


Figura 1. Esquema experimental

Se alimentó entre 180-200g de material de prueba continuamente al reactor a través de un sistema de alimentación que incluye una tolva de alimentación y un tornillo dosificador.

Las condiciones de temperatura y composición de los gases a los cuales fueron realizadas las experiencias de tostación se muestran en la tabla 2

Tabla 2 condiciones del teste

Teste		1	2	3	4
Temperatura	°C	750	800	820	850
N_2	Nl/h	80	160	160	160
Aire	Nl/h	650	650	650	650
Duración	min	60	60	60	60

La composición de los gases de salida fue también monitoreada para cada experiencia con el analizador de gases que el reactor cuenta.

3.2 Resultados de las pruebas de tostación

Las muestras de pirita fueron sometidas a análisis de termo gravimetría para definir la temperatura de tostación. Durante la quema se observó que presentan una reacción altamente exotérmica como se puede observar en la figura 2

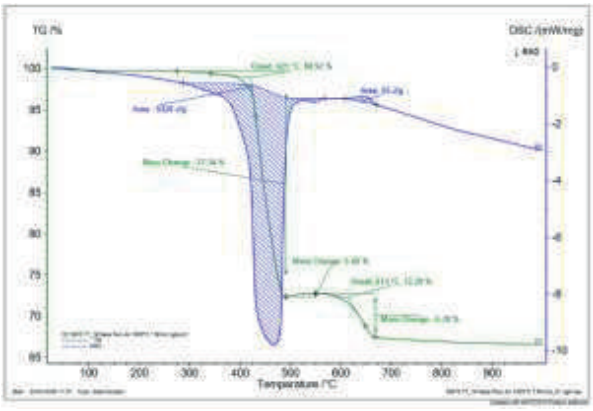


Figura 2 análisis termo-gravimétrico de la pirita

Una serie de ensayos de tostación fueron realizados a diferentes composiciones de gas y temperaturas seleccionados a partir de los análisis de termo-gravimetría. En la figura 3 podemos ver la evolución de nuestras experiencias de tostación de pirita. Consiguiendo los mejores resultados con las condiciones del teste 4.

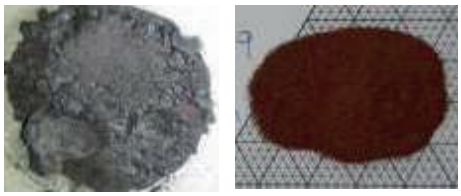


Figura 3 aspectos de piritas después de la tostación

Los gases producto de la tostación que presentaron en mayor proporción fueron el N_2, SO_2,.. etc. Como indicado en la tabla 3. Composición muy similar a lo que se usa en la producción de ácido sulfúrico a

nivel industrial. Sim embargo precisó de un análisis más exhaustivo de los gases para comprobar la ausencia de elementos deletéreos, principalmente como el Hg, Cl, en la producción de ácido sulfúrico

Tabla 3 Composición de gases de tostación

Test		1	2	3
O_2	vol%	3-3.4	2.7-3.5	2.3-4
SO_2	vol%	9-10.1	9.5-10.2	9.4-10.6
N_2	Vol %	79	79.2	79.1
H_2O_2	Vol %	4.5	4.3	4.0
Flujo	m3/h	3.18	3.24	3.33
Velocida del gas	m/s	0.45	0.46	0.47

A partir del estudio de los gases obtenidos, con concentraciones bien bajas de elementos nocivos se determinó la composición del ácido sulfúrico de excelente calidad que se puede obtener a partir de la tostación de la pirita proveniente de los relaves. Como indicado en la tabla 4

Tabla 4 Composición química de acido

Impureza	Concentración, ppm
As	0.002
Cd	0.027
Cl	0.027
Cr	0.003
Cu	0.023
Hg	0.00002
Ni	0.001
Pb	0.005
Sb	0.001
Se	0.001
Zn	0.059

4. Conversión de SO2 a azufre elemental.

Para reducir el SO_2 con hidrogeno, el presente estudio se basó en la reacción de Claus.

$$SO_2 + 2H_2 \rightarrow \frac{1}{n}S_n + 2H_2O \qquad \text{(i)}$$

El análisis de esta reacción muestra que es exotérmica, por lo que no es conveniente elevar demasiado la temperatura, ya que la propia reacción aporta calor al sistema.

4.1. Proceso

4.1.1 Desarrollo de catalizadores.

Los catalizadores soportados en oxido de aluminio, se prepararon con dos sales metálicas disueltas en agua destilada; formándose los catalizadores $M_1M_2O_x/\gamma\text{-}Al_2O_3$ mediante el método de impregnación por humedad incipiente. Las familias de catalizadores preparadas fueron V-Co, Co-Mo, Ni-Mo, controlando este proceso con los parámetros densidad de metales (σ) y la composición molar de metales (α).

La tabla 4 muestra a detalle los catalizadores preparados para las pruebas.

4.1.2 Test catalítico

Los trabajos de reducción catalítica para producir azufre elemental del SO_2, cuentan con un reactor de lecho fijo tubular de cuarzo, de diámetro interno 13 mm y 40 cm de longitud. La masa de catalizador fue de 200 mg. El flujo de alimentación de los gases de 25 mL/min, la composición de estos fue 5% de SO_2, 10% de H_2 y 85% de He, de manera que las relaciones entre SO_2/H_2 = 1/2. El rango de temperaturas en el reactor varió desde 300 °C hasta 500 °C.

Tabla 4. Catalizadores sintetizados para la reducción de SO2.

N°	Familia	Soporte	σ	α	Nombre
1	$Ni-Mo$	$\gamma-Al_2O_3$	0.00525	0.90	$NiMo0.9-alto$
2	$Ni-Mo$	$\gamma-Al_2O_3$	0.00525	0.50	$NiMo0.5-alto$
3	$Ni-Mo$	$\gamma-Al_2O_3$	0.00175	0.90	$NiMo0.9-bajo$
4	$Ni-Mo$	$\gamma-Al_2O_3$	0.00175	0.50	$NiMo0.5-bajo$
5	$Ni-Mo$	$\gamma-Al_2O_3$	0.00350	0.67	$NiMo0.67-central$

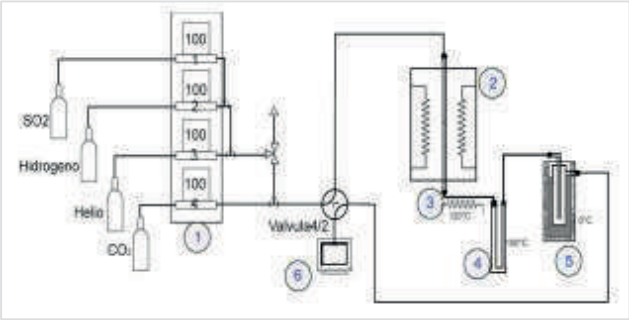


Figura 4. Sistema de reacción catalítica.

El sistema preparado para las pruebas de reacción catalítica se muestra en la figura 4, para el ingreso de los gases se cuenta con reguladores másicos (1), el horno catalítico (2) cuenta con programador de temperatura en el rango de 25 a 1100 °C, resistencia (3) para mantener la temperatura a 120°C desde la salida del horno hasta la trampa de azufre elemental (4), la trampa de agua a 0 °C y el cromatógrafo de gases (6).

4.1.3 Característica de catalizadores

Se realizaron pruebas de análisis textural de los catalizadores $\mathrm{NiMo}/\gamma-\mathrm{Al_2O_3}$, evaluando los efectos de la composición (α) y densidad (σ) sobre la superficie especifica de catalizador. El catalizador $\mathrm{NiMo0.5}/\gamma-\mathrm{Al_2O_3}$ de baja densidad, mostró un aumento de área superficial pasando de 140 antes de la reacción a 150 m^2/g después de la reacción. Por su parte, los catalizadores de alta densidad redujeron su área superficial.

También se analizaron los efectos sobre la temperatura programada de reacción (TPR) de los catalizadores. Nuevamente, se observaron las características favorables de los catalizadores $\mathrm{NiMo0.5}/\gamma-\mathrm{Al_2O_3}$ de baja densidad. La figura 5 muestra que al usar el catalizador, se inicia la reacción a 300 °C, mientras que el mismo catalizador pero con composición molar de 0.9 de Ni, requiere una temperatura de 400 °C para iniciar el proceso catalítico.

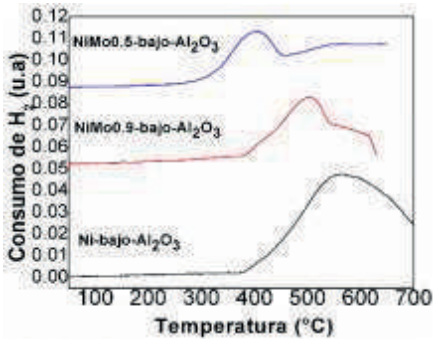


Figura 5: Efecto de la composición sobre la temperatura programada de reacción.

4.2. Resultados

Para el análisis de dos parámetros de control del proceso catalítico de reducción del SO_2 con H_2 (conversión y selectividad), se utilizaron cuatro tipos de catalizadores basados en Ni-Mo soportados en alúmina.

4.2.1. Efectos de la composición de catalizadores

Cuando se utiliza el catalizador $\mathrm{NiMo0.5}/\gamma-\mathrm{Al_2O_3}$ de baja densidad, la conversión de SO_2 a S llega hasta 90%, al aumentar la temperatura desde 300 a 400°C. Desde esta temperatura hasta 500 °C, la conversión se mantiene en un rango de 90 y 93%

Por otro lado, la selectividad sufre una disminución cuando se aumenta la temperatura de 300 a 500 °C. El catalizador $\mathrm{NiMo0.5}/\gamma-\mathrm{Al_2O_3}$ con baja densidad, se reduce desde 95 % a 300 °C, hasta 50 % a 500 °C. Otros catalizadores tuvieron reducciones de selectividad hasta puntos más bajos, como muestra la figura 6.

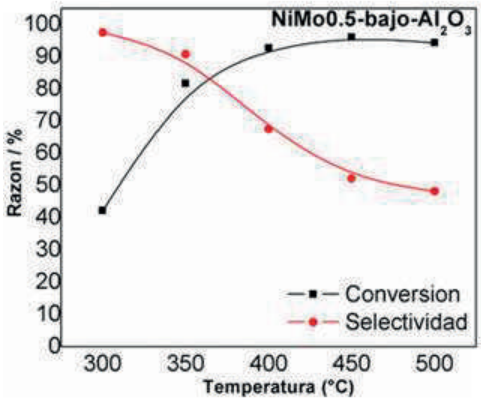


Figura 6: Selectividad y conversión en función de la composición de los catalizadores Ni-Mo

4.2.2. Efectos de la densidad de catalizadores

Los efectos del catalizador $\mathrm{NiMo0.5}/\gamma-\mathrm{Al_2O_3}$ de baja densidad, fueron superados por el catalizador de alta densidad $\mathrm{NiMo0.5}/\gamma-\mathrm{Al_2O_3}$. Según se observa en la figura 7, cuando la reacción inicia a 300 °C, los catalizadores con alta densidad inician el proceso de reducción con una conversión de 55 %, comparados con el 40% reportado en los de baja densidad. Los efectos sobre la selectividad también tienen diferencias. Los catalizadores de alta densidad $\mathrm{NiMo0.5}/\gamma-\mathrm{Al_2O_3}$, disminuyen su selectividad de 97 a 65 %, al aumentar la temperatura de reacción hasta 500 °C, 15 % por encima de lo reportado en los catalizadores de baja densidad para el mismo de rango de temperaturas.

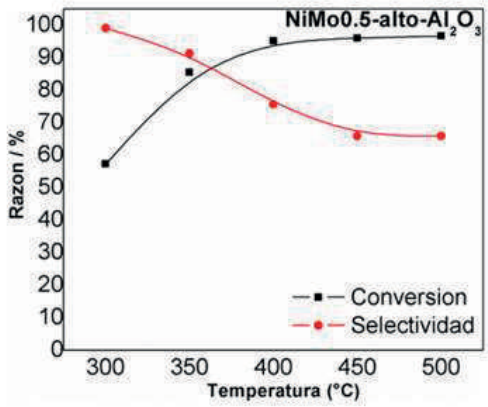


Figura 7: Selectividad y conversión en función de la densidad de los catalizadores Ni-Mo

5. Conclusiones

La Pirita obtenida a partir de nuestros relaves presentó excelentes características física y química para la tostación en lecho fluido. Consiguiendo los mejores resultados a 850°.

La composición de los gases obtenidos en la tostación de la pirita es apropiada para su uso en la producción de ácido sulfúrico. Presentó concentraciones de SO2 de 9.5 -11.5%, similar a lo que se obtiene típicamente a nivel industrial

La pureza de nuestra pirita 97%, nos da la opción de producir un ácido de excelentes calidad, contenido de impurezas debajo de los límites usuales, que permitiría ser utilizado en los procesos metalúrgicos así como en la producción de fertilizantes.

Los catalizadores $\mathrm{NiMo0.5}/\gamma-\mathrm{Al_2O_3}$ mostraron mejores resultados para la reducción del SO2 con H2, alcanzando conversiones por encima de 90% y reportando selectividad inicial de 95%.

El catalizador $\mathrm{NiMo0.5}/\gamma-\mathrm{Al_2O_3}$ de alta densidad presento los mejores resultados de conversión de SO_2, parámetro que varió de 55% a 95% durante el proceso de reacción catalítica.

El catalizador $\mathrm{NiMo0.5}/\gamma-\mathrm{Al_2O_3}$ de alta densidad mejora la selectividad del proceso catalítico, fijando el parámetro en el rango de 65% a 95%, valor mínimo que esta 25% por encima del reportado por el catalizador de baja densidad.

Las mejores condiciones para la reacción de reducción con el catalizador $\mathrm{NiMo0.5}/\gamma-\mathrm{Al_2O_3}-alto$, alcanzaron conversiones entre 85% y 93%, así como selectividades entre 90% y 75%, cuando se aumenta la temperatura en el rango de 350 °C y 400 °C.

6. Referencias Bibliograficas

1. Libro: Mohammad M. Ali, Satish K. Agarwal, Ashwani Pahuja, Birendra K. Singh, and Sunil Duggal, Utilisation of by-product jarosite in the manufacture of ordinary Portland cement. Advances in cement research.
2. Estudio: Sergio Rosas, César Luna, Oscar Sánchez y Esiquio Ortiz, Producción de Ácido Sulfúrico por Medio del Tratamiento de Gases Residuales Generados en la Tostación de Pirita, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Facultad de Ingeniería Química, Av. San Claudio s/n, Col. San Manuel, 72570 Puebla-México.
3. Valery, R. & Forster, K. Grupo de P&D “Sustainable use of Earth's natural resources”. Outotec-Germany
4. Artículo: V. V. Borisov, S. Ya. Ivanov & A. Yu. Fuks, Factory Tests of a Technology for Recycling Metallurgical Sludge that Contains Iron and Zinc.
5. Picasso, E., Leoncio, R., Hurtado, M., Laboratorio de Investigación Fisicoquímica. UNI-Ciencias
6. Libro: Cat SC Paik, H Kim, JS Chung - Catalysis today, 1997 – Elsevier. The catalytic reduction of SO2 to elemental sulfur with H2 or CO.
7. Sohn, H. Y. (2003). Thermodynamics of a new cyclic reaction system involving BaS and BaSO4 for converting sulfur dioxide to elemental sulfur. Industrial & engineering chemistry research, 42(23), 5946-5948.
8. Kim, B. S., & Sohn, H. Y. (2002). A novel cyclic process using CaSO4/CaS pellets for converting sulfur dioxide to elemental sulfur without generating secondary pollutants: Part II. Hydrogen reduction of calcium-sulfate pellets to calcium sulfide. Metallurgical and Materials Transactions B, 33(5), 717-721.
9. Estudio: CL Chen, HS Weng - Applied Catalysis B: Environmental, 2005 – Elsevier. Nanosized CeO2-supported metal oxide catalysts for catalytic reduction of SO2 with CO as a reducing agent

ANÁLISIS DE RIESGOS EN EL NEGOCIO MINERO APLICANDO LA RECONCILIACION EN LA UNIDAD DE CERRO LINDO

Jhonatan Lopez[1], Gianncarlo Zamora[2]

[1] Nexa Resources, Lima, Peru (jhonatan.lopez@nexaresources.com)
[2] Nexa Resources, Arequipa, Peru (gianncarlo.zamora@nexaresources.com)

1. Abstract

In all mining operations, a reconciliation system is necessary, which allows the performance of the processes involved in obtaining the final product to be measured, from the reserve-resource models, through mine design, mining planning, mining production, until culminating in the metallurgical process. It is through the relationship between the mineral received (ground ore) with the mineral sent to milling (short-term model), that reconciliation factors will result for tonnage, grade and metal.

2. Introducción

La unidad minera Cerro Lindo es un depósito de sulfuro masivo vulcanogénico (VMS) de clase mundial, es una operación subterránea, la extracción del mineral se realiza mediante el método de explotación sub level stopping (Tajeo por subniveles) con la aplicación de Taladros largos, con una producción actual promedio de 21,500Tn/día y aproximadamente 645,000Tn al año, el mineral extraído de mina es procesado en la planta de Beneficio de Cerro Lindo, mediante el proceso de flotación se recupera los concentrados de Zinc, concentrados de Cobre y concentrados de Plomo con contenido de Plata siendo estos nuestros principales productos.
Actualmente existes softwares o aplicaciones capaces de realizar la reconciliación minera y los resultados típicos son la obtención de factores que pueden ser usados para la transformación de los recursos a las reservas, En Cerro Lindo se creó una aplicación en el software Excel para implementar la Reconciliación Mineral que conecta los reportes emitidos por las diferentes áreas de la unidad como son geología, planeamiento, mina, planta y comercial, nos ha permitido detectar y corregir algunos desvíos, la reconciliación de Cerro Lindo está elaborada para poder evaluar desde un solo tajo finalizado hasta la reconciliación de los años pasados.
Así mismo la reconciliación minera de Cerro Lindo nos permite medir la recuperación, overbrake y underbrake de todos los tajos explotados así como el tonelaje de los dominios geológicos que se explotaron y la categorización de confiabilidad mineral del material explotado.

3. Metodología Aplicada

Se elaboró una aplicación Excel donde se compilan y conectan los diferentes reportes de las diferentes áreas en base de la arquitectura de la reconciliación publicada por Morley C., (2003).

Diagrama 1: Arquitectura del sistema de reconciliación de Cerro Lindo.

La base de datos en este modelo está obteniendo información de múltiples paquetes comerciales y bases de datos, facilitando el proceso de reconciliación y permitiéndonos realizar informes desde una sola fuente (Morley C. et al., 2003).

4. Marco Teórico

En el contexto de la industria minera, la reconciliación mineral equivale a una comparación de una estimación (un modelo de recursos minerales, un modelo de reserva de mineral o un modelo de corto plazo), con los reportes de la producción oficial, generalmente de la planta de procesamiento o tratamiento (Glacken y Morley, et al., 2003; Schofield, et al., 2001)

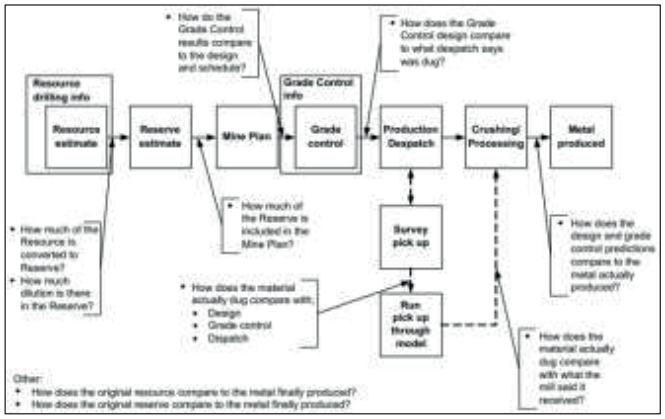


Diagrama 2: Esquema del proceso de reconciliación y los puntos claves de análisis por Morley C. (2003).

4.1. Modelo de Recursos y Reservas En Cerro lindo se actualiza anualmente el modelo de Largo plazo, este modelo es entregado al área de Ingeniería para que pueda realizar la planificación de minado de todo el año así como pueda realizar el reporte de reservas.

Adicionalmente el área de geología prepara un modelo de recursos de corto plazo donde se toma principal foco en los tajos próximos a ser minados, se le realizan sondajes infill de ore control para corroborar la ley y tener una mejor adherencia a lo planeado.

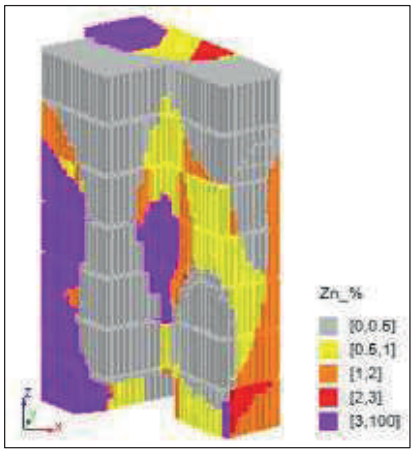


Figura 1: Diseño de un tajo reportado con el modelo de corto plazo fuente: Área de Geología de Cerro Lindo

4.2. Planificación de minado El área de planeamiento de corto plazo se encarga de realizar el diseño de los tajos próximos a ser explotados, así mismo cuando un tajo termina su etapa de producción se encargan de realizan un levantamiento topográfico del tajo vacío, con estos solidos se realizan todas las comparaciones y reportes para la reconciliación minera, en casos excepcionales no se logra realizar el levantamiento topográfico de los tajos vacíos generalmente por temas de seguridad, en estos casos el área de topografía se encarga de realizar un sólido 3D aproximado según lo visto en campo.

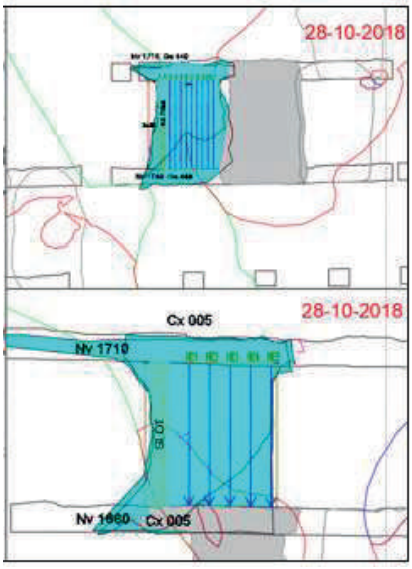
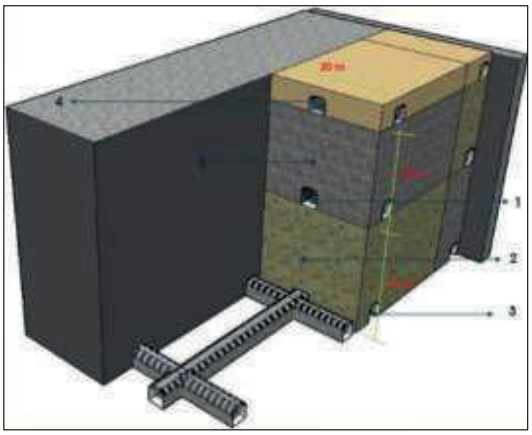


Figura 2: Ejemplo del levantamiento topográfico de un tajo vacío en la Unidad de Cerro Lindo Fuente: Área de Servicios Técnicos Cerro Lindo.

4.3. Método de minado En la unidad de Cerro Lindo los orebodies son cuerpos regulares de gran dimensión y el macizo rocoso es competente, por estas características el método de minado escogido es el Sub level Stopping (Tajeo por subniveles) utilizando taladros largos los subniveles están distanciados 30m y un ancho de minado promedio de 20m y un largo de 30m, por mes se explotan un promedio de 20 tajos.



. Figura 3: Esquema de las dimensiones de un tajo en la unidad de Cerro Lindo Rojas. (2015)

El acarreo y transporte de mineral se realiza mediante Scoop tramp y volquetes hacia la parrilla de ingreso al chancado primario dentro de mina, y luego a través de fajas el mineral es transportado hacia la planta de beneficio.

4.3. Muestreo de control: En la unidad de Cerro Lindo cada tajo que va a entrar en producción se le realiza perforación infill para corroborar la litología y las layes del tajo, adicionalmente se realiza un muestreo de control tipo chip de las cargas rotas de los tajos con una frecuencia de hasta 2 veces por tuno con el fin de poder realizar una estadística sobre el valor promedio del tajo, estas muestras son enviadas al laboratorio químico para así obtener sus leyes.

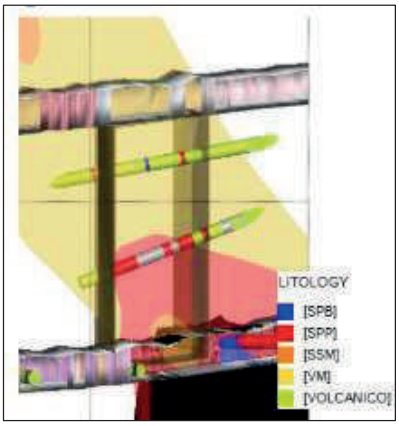


Figura 4: Diseño de un tajo próximo a explotar con perforación tipo infill para corroborar litología y leyes

4.4. Proceso metalúrgico El mineral se transporta de interior mina de chancado primario a través de fajas hacia chancado secundario y terciario(superficie) y luego ingresa al molino de bolas, el mineral sale del molino de bolas ya con la granulometría requerida e ingresa al sistema de flotación para la recuperación del concentrado de Zinc, concentrado de Cobre y concentrado de Plomo con agregados de Plata, el relave es prensado y filtrado obteniendo un relave seco que posteriormente será dispuesto como relleno para los tajos y el agua recuperada será recirculada.

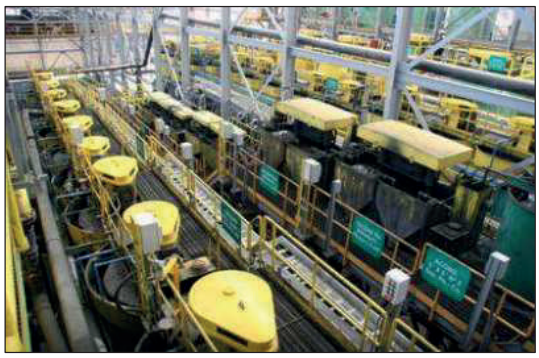


Figura 5: Tanques de flotación de la planta de beneficio de Cerro Lindo

5. Aplicación de La Reconciliación Minera

La información utilizada para generar la reconciliación minera en Cerro Lindo es recopilada de las diferentes áreas de Cerro Lindo.

Para realizar comparaciones requeridas en la reconciliación se utilizan los siguientes imputs:

1. Solido 3D de diseño del tajo
2. Solido 3D del levantamiento topográfico del tajo vacío.

Que son proporcionados por parte de planeamiento, en casos excepcionales algunos tajos no tienen levantamiento topográfico usualmente por temas de seguridad.

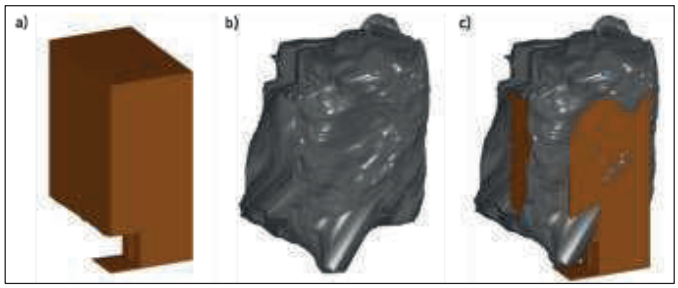


Figura 6: a) Solido 3D del diseño del tajo b) Solido 3D del levantamiento topográfico del tajo vacío. c) contraste entre el sólido 3D diseñado y el sólido 3D levantado

Con estos solidos se realizan el reporte de tonelaje, ley de Zn, ley de Pb, Ley de Cu y ley de Ag, para realizar los reportes se utilizan los modelos de recursos minerales de largo y corto plazo.

Como parte de la reconciliación minera en cerro Lindo, con estos solidos 3D medimos el porcentaje de recuperación del tajo minado así como el overbrake y underbrake para poder encontrar y mitigar algún desvió en la voladura.

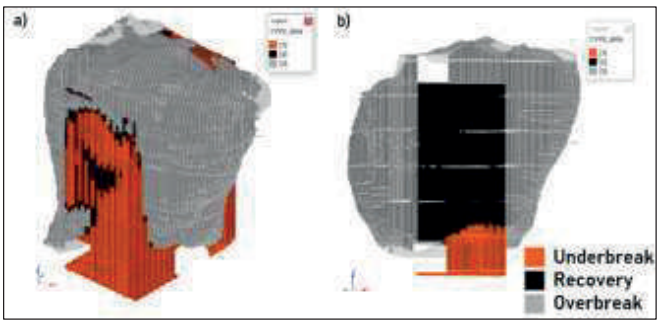


Figura 7: a) Vista isométrica del levantamiento topográfico de un tajo clasificado por recuperación, overbrake y underbrake. b) Sección del levantamiento topográfico de un tajo finalizado clasificado por recuperación, overbrake y underbrake.

En la figura 7 el término recuperación se refiere al material que fue explotado y se encontraba dentro del diseño del tajo, el Underbrake se refiere al material que se encuentra dentro del diseño del tajo pero no logro ser extraído usualmente esto ocurre por desvió en los taladros largos que no llegan a las partes extremas del tajo y la voladura no es eficiente en esas zonas y el Overbrake se refiere a material que no estaba dentro de diseño del tajo pero se explotó usualmente esto ocurre por sobre rotura del material que se encuentra aledaño al tajo, adicionalmente a medición en tonelaje podemos reportar las leyes.

Con estos solidos también medimos el porcentaje de dilución que presentan los tajos minados, es decir medimos el porcentaje de mineral y tonelaje de roca caja que se está produciendo.

También medimos el porcentaje de aporte de los diferentes dominios geológicos presentes en la unidad de Cerro Lindo.

Para medir, comparar y poder encontrar algún desvió en la extracción en mina recopilamos la información proporcionada por el área de mina del transporte de mineral de los tajos hacia la parrilla del chancado primario, los volquetes tienen una capacidad de carga de 50tn esporádicamente para corroborar este peso, aleatoriamente sale un volquete a superficie para ser pesado, además se tiene una balanza en la faja que calcula la cantidad de material que es extraído de mina.

Para poder conocer la ley que se está extrayendo de los tajos el área de geología realiza un muestreo constante de la carga rota del tajo con una frecuencia de 2 muestras representativas por turno y así generar una estadística de leyes de extracción de tajos y un valor promedio del tajo.

NIVI	OB	LAB	FECHA	ZN.LA	PB.LA	CU.LA	AG.LA	FE.LA
1600	OB1	001F	5/07/2020	0.32	0.01	2.41	1.08	35.68
			6/07/2020	0.20	0.02	2.07	1.04	40.00
			7/07/2020	0.23	0.01	2.04	1.12	39.72
			8/07/2020	0.23	0.01	1.49	0.77	40.00
			9/07/2020	0.19	0.01	1.85	0.90	39.74
			10/07/2020	0.40	0.01	1.83	1.04	40.00
			11/07/2020	0.67	0.02	2.23	1.18	37.85
			12/07/2020	0.55	0.01	1.91	1.03	40.00
			13/07/2020	0.50	0.01	2.42	1.34	40.00
		Total 001F		0.37	0.01	2.01	1.05	39.35

Figura 8: Control de leyes por tajo que se realiza guardia tras guardia y el valor promedio del tajo.

Tomamos como número oficial y con el cual realizamos todas nuestras comparaciones de tonelaje, ley de Zn, ley de Pb, ley de Cu y ley de Ag el balance metalúrgico proporcionado por la plata de beneficio y el área de gestión. El cual es enviado formalmente por correo finalizando cada mes.

Todos estos reportes alimentan una aplicación en Excel donde juntamos la información de planeamiento, mina, geología y planta que nos permite realizar las comparaciones adecuadas para presentar nuestra Reconciliación Minera.

Figura 9: Aplicación Excel donde se encuentra la reconciliación minera de Cerro Lindo J. Lopez (2020)

6. Resultados

El resultado de la reconciliación minera es medir la confiabilidad del modelo de reservas y la adherencia de la producción real con la planificación, así mismo nos permitió identificar algunas áreas con elevados desvíos que afectan el proceso, centralizar la data y dar visibilidad a los diferentes KPIs de desempeño.

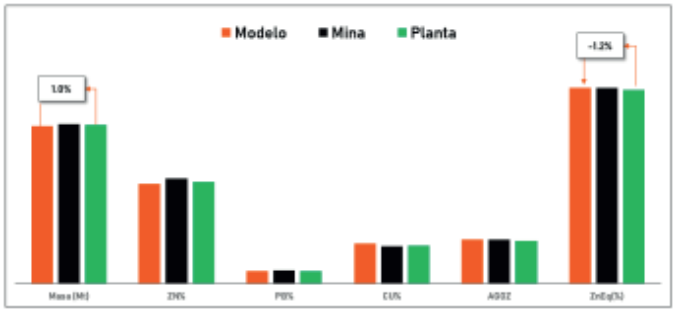


Figura 10: Cuadro de barras comparativo entre el modelo, mina y planta.

En la figura 10 se aprecia la comparación del tonelaje (Masa) la ley de Zn, ley de Pb, ley de Cu, ley de Ag y el ZnEq, el color de barra anaranjada representa el modelo de reservas que se utilizó para generar el plan, la barra negra representa la mina que se refiere a la producción de mina, reportado por mina y geología y la línea verde representa la planta como número oficial y con el cual realizamos nuestras comparaciones.

Se ha logrado medir con eficiencia el porcentaje, tonelaje y leyes de la recuperación, overbrake, underbrake y dilución, los reportes son flexibles y pueden realizarse por año, por mes y por tajo.

Figura 11: Porcentaje de la recuperación, overbrake y underbrake por tajo en Cerro Lindo.

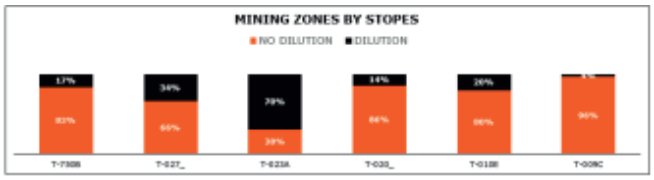


Figura 12: Porcentaje de la dilución por tajo

Adicionalmente se ha logrado medir con eficiencia el porcentaje, tonelaje y leyes de los diferentes dominios geológicos y la clasificación por confiabilidad a la producción de Cerro Lindo.

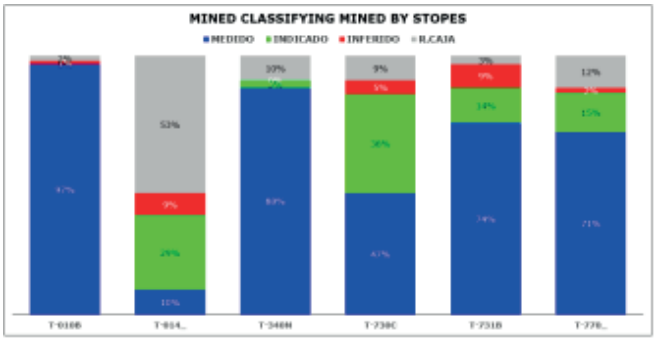


Figura 13: Porcentaje de extracción por clasificación de confiabilidad mineral por tajo

7. Conclusiones

La reconciliación Minera en Cerro Lindo evidencia una buena adherencia entre el modelo, mina y planta con una variación del 1% en tonelaje y producto final 1.2% encontrándose dentro de los parámetros permitidos.

La reconciliación minera es una herramienta importante para identificar desvíos que pueden afectar el proceso y corregirlos.

Se debe centralizar y usar solo la información reportada directamente de las áreas responsables para evitar doble información y resultados erróneos.

Existen algunas aplicaciones comerciales para poder realizar la reconciliación sin embargo, la metodología aplicada en Cerro Lindo muestra ser eficiente, de bajo costo y replicable en todas las operaciones mineras.

Agradecimientos

A la empresa Nexa Resources Peru por permitirnos usar la información para realizar esta publicación, y a todas las áreas de la unidad Minera Cerro Lindo su incondicional apoyo y en especial al área de Geología.

Referencias

Amoako R., (2015) Ore Grade Reconciliation Techniques.

Blucher, I. D. (2002). “Reconciliation – Towards an Ideal Process”, in Proceedings of Value Tracking

Carpio J. M., (2018) . Evaluación del desempeño de la aplicación del Sistema fara y su impacto en el costo operativo En la UM. Cerro lindo.

Chapman E., (2012) Corporate Reconciliation Procedural Manual versión 2

Chapman E., (2013) Volume Variance and Its Importance in Reconciliation, I Miner Reconciliation & Resource Estimation Summit.

Gutiérrez J., (2011) Modelos de Corto Plazo en Vetas

Herrera J., (2020) Acciones para reducir diferencias de reconciliación entre el mineral recibido y el enviado a molienda

Fouet T y Riske R., (2009) Standardising the Reconciliation Factors Required in Governance Reporting.

Morley C., (2003) A Proactive Approach to Using Mining Data.

McCormack R y Berryman T., (2006) Reconciliation at KCGM Fimiston Operation

Parhizkar A., (2010) A New Model to Improve Ore Grade Reconciliation

Pitard, F. F. (2001). “A Strategy to Minimise Ore Grade Reconciliation Problems between the Mine and the Mill”, in Mineral Resource and Ore Reserve Estimation

Potencial de Exploración de relaveras históricas y sus implicancias para un futuro sostenible caso: Antigua Mina Carhuacayán, Junín-Perú

Oshin Figueroa[1], Mario Díaz[1] y Susankler Espinoza[1]

[1] Volcan Compañía Minera S.A.A., Manuel Olguín 373 Piso 8, Lima, Perú (ofigueroa@volcan.com.pe)

1. Abstract

Exploration potential of historic tailings and its implications for a sustainable future, case: The Old Carhuacayán Mine, Junín Peru. During the last century, Peru was a very important mining center worldwide, Pasco and Junín Region being the main sources of polymetallic minerals; which gave rise to the existence of tailings and mineral waste currently exposed to the environment and that can be re-processed. This is the case of the historic tailings of the old Carhuacayán mine that operated for 50 years, extracting polymetallic mineral (zinc, lead and silver).
Volcan mining company started a program of exploration of environmental liabilities as part of its environmental practices and culture change for a sustainable future.

2. Introducción

Los yacimientos actuales son explotados con menores leyes, además el aspecto ambiental que involucra generar una nueva operación, así como las relaciones con las comunidades, conduce a que las empresas empiecen a buscar nuevas formas de negocio y al mismo tiempo resarcir zonas afectadas por la minería antigua, esto como parte de una nueva cultura de un futuro sostenible. Tal es el caso de las Relaveras 828 (R828) y 829 (R829) actualmente reconocidas como Pasivos Ambientales Mineros (PAM) administrado por Activos Mineros S.A.C (AMSAC), donde Volcan Compañía Minera S.A.A. (Volcan) en el 2017, inicia una campaña de exploración con muestreo geoquímico de calicatas; y en 2019, continuó con una campaña de 2237 metros de perforación por Ensayo de Penetración Estándar (SPT), concluyendo con análisis geoquímico, mineralógico (DRX) y geometalúrgico. Lo cual ha llevado al cálculo de recursos con un total de 0.05MTM @2.5% ZnEq (R828) y 3.1 MT @1.9% ZnEq (R829) y su evaluación económica.

El Sindicato Minero de Rio Pallanga entre los años 1962 y 1983 explotaron la Antigua Mina de Carhuacayán aproximadamente 2 Mt de mineral (Ag, Zn y Pb), producto de ello son estas relaveras que se ubican a 3.2 km al NW del pueblo de Carhuacayán y a 28 km de la planta concentradora de Alpamarca, esta cercanía y los estudios llevados a cabo hacen posible su reaprovechamiento.
Esta contribución se enfoca en los estudios de exploración y metodología utilizada para reconocer y calcular el potencial y además plantear estrategias para las buenas prácticas para un futuro sostenible.

3. Antecedentes

La Antigua mina de Carhuacayán presenta registros de estudios geológicos y mineros desde la década 50. Fue el “Sindicato Minero de Rio Pallanga”, que inició oficialmente sus operaciones en el año 1962, a mediana escala y operó hasta el año 1983 (Bisa, 1983).

Inicialmente el mineral era tratado en la planta de la mina Río Pallanga y en 1965, tratan en su propia planta de concentración por flotación y casi al finalizar tratan 500 T.M.S./día (J. Mendoza,1970).

De acuerdo con la Ley Nº 28271 Ley que regula los pasivos ambientales de la actividad minera (http://www.minem.gob.pe) y que actualmente han otorgado 31 derechos de reaprovechamiento de pasivos ambientales mineros en todo el país (*Fuente MINEM*). También son varias las empresas Mineras que han implementado el reciclaje de sus relaveras. Un caso muy importante es el Proyecto B2 San Rafael – Minsur, reporta relaves con 7,6 MTM @ 1.05% Sn y su explotación con una vida útil de nueve años aproximadamente. Minsur (2018), al presente reporta una producción acumulada de 725 toneladas de estaño contenido (Minsur, 2020) dando trabajo a más de 500 personas.

En el caso de las Relaveras 828 y 829 se tiene estudios ambientales previos realizados por

AMSAC y un expediente técnico para el cierre de estas relaveras, presupuestado con un costo de S/. 75 millones (AMSAC, 2018); así como reportes del MINEM (http://www.minem.gob.pe).

También se desarrolló una tesis para determinar si el relave es estable en aspectos geotécnicos y geoquímicos y cómo afecta a la población de Santa Bárbara de Carhuacayán (Macedo, 2019).

4. Metodología

En las relaveras 828 y 829 se perforó un total de 2237 metros en época seca de la sierra peruana, mediante SPT, en una malla de distribución romboédrica de 29 x 29 m (Fig. 01). Fueron sondajes verticales entre 1.00 y 19.00 metros de profundidad que interceptaron arenas, arcillas y óxidos (Fig. 02), en muchos casos de consistencia blanda por el contenido de agua, el control de este aspecto fue esencial para evitar la pérdida o perforación de pozos gemelos.

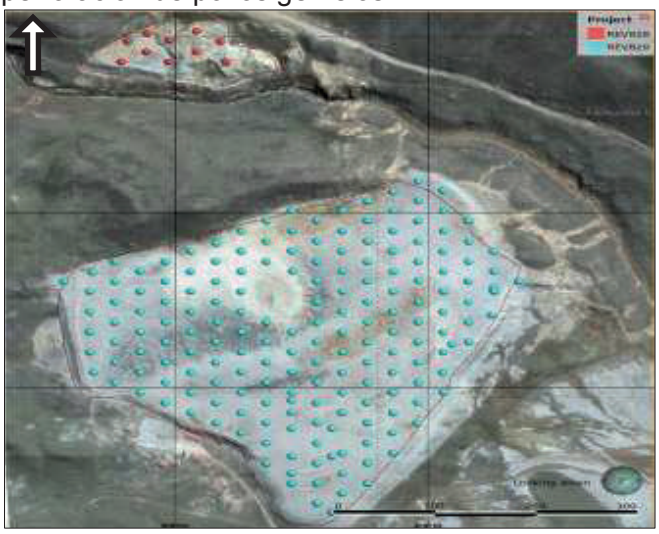


Fig. 01. Ubicación de las relaveras 828 y 829 y los sondajes programados.

Los primeros 3 metros de cada pozo y las zonas húmedas con contenido de agua mayor a 50% fueron revestidas metro a metro, hasta llegar al piso de la relavera, de consistencia más compacta con fragmentos de travertino. En el logueo geológico se diferenciaron óxidos, arenas y arcillas con contenidos de sulfuros que fueron analizados in-situ con XRF, evidenciando la existencia de Zn y Pb.

"Óxidos" *Rev82917 00-1 m*

Au (ppm)	Ag (Oz)	Cu (%)	Fe (%)	Pb (%)	Zn (%)	Pb-OX (%)	Zn-Ox (%)	Cu-Ox (%)
0.44	1.09	0.03	16.60	0.95	2.31	0.51	1.00	<0.01

"Arenas" *Rev82940 10-11 m*

Au (ppm)	Ag (Oz)	Cu (%)	Fe (%)	Pb (%)	Zn (%)	Pb-OX (%)	Zn-Ox (%)	Cu-Ox (%)
1.00	0.55	0.05	8.72	0.38	2.12	0.13	0.10	<0.01

"Arcillas" *Rev82911 10-11 m*

Au (ppm)	Ag (Oz)	Cu (%)	Fe (%)	Pb (%)	Zn (%)	Pb-OX (%)	Zn-Ox (%)	Cu-Ox (%)
0.16	0.39	0.04	6.64	0.23	0.48	0.18	0.07	<0.01

Fig. 02. Fotografías de sondajes SPT, ilustra las tres principales zonas diferenciadas, en general las leyes son más bajas en la zona de arcillas. Las cajas de taladro miden 1 m de largo.

Las muestras fueron recuperadas en tubos de PVC con diámetro de 6.94 cm, el tubo era cortado exactamente a la mitad, una mitad era enviada a laboratorio para ensayo geoquímico, incluida densidad por picnometría, y la otra mitad era pesada en seco con una balanza de precisión de 10 gramos, y posteriormente usada por el registro geológico. Se muestreó e intervalos regulares de 1 metro.

4.1. Geología y mineralogía

El principal mineral extraído fue del cuerpo La Tapada, que es parte del depósito polimetálico tipo Cordillerano Carhuacayán (Bernaola et al, 2019), que consiste en vetas y niveles de reemplazamiento de zinc, plomo y plata emplazados en calizas cretácicas.

De la mineralogía macroscópica en las R828 y R829 se distingue principalmente granos de carbonatos, cuarzo, cloritas y pirita (mineral ganga) con granos finos de magnetita, esfalerita, galena, calcopirita, y minerales oxidados de color pardo denominado ''limonitas''.

Para diferenciar los minerales oxidados presentes, se analizaron muestras por DRX (M. Diaz, 2019; AMSAC, 2018). De estos resultados se tiene:

-***Minerales primarios:*** esfalerita (<18% en peso de Fe), galena, tenantita (cobre gris de As y contenido de Ag), pirita, Arsenopirita, pirrotita y muthmannita (teleruro de Ag y Au).

-Minerales secundarios (oxidados): fowlerita (silicato de Ca, Mn y Zn), cerusita (carbonato de Pb), anglesita (sulfato de Pb), covelita(Sulfuro de Cu), jarosita (sulfato de K y Fe), goetita (Hidróxido de Fe)y rutilo (óxido de Ti).

Además, Minerales Ganga como cuarzo (30%), dolomita (12%), calcita (6%), clinocloro (4%) y otros (48%). Se distingue rastros de sulfatos como yeso y anhidrita. Por la mineralogía, la zona logueada como óxidos corresponderá a la Zona de Mixtos.

Geológicamente al ser la roca caja ''calizas'', donde se emplazó la mineralización y su beneficio produjo estas relaveras, se comprueba con los logueos, Mineralogía DRX y estudios previos, que estas relaveras presentan una neutralización natural por el contenido de carbonatos y su potencial de generar drenaje ácido es muy bajo. Sin embargo, AMSAC (2018) mencionan a los R828 y R829 como potenciales generadores de acidez a largo plazo, una vez que se consuman los carbonatos presentes. Así mismo hay que mencionar que AMSAC con perforación diamantina interceptó 3

metros de Travertino en la base de la R829 (AMSAC.2018).

5. Modelamiento y Estimación

Con la caracterización mineralógica y resultados geoquímicos, se modelaron las dos relaveras, donde se ha dividido en tres principales dominios: Sulfuros de Alta ley (SFsHg), Sulfuros de baja ley (SFsLg), y Mixtos (MX). Se seleccionaron 5 compósitos para ensayos geometalúrgicos cada uno con 105 kg de peso seleccionados para abarcar todos los escenarios de mezcla (Fig. 04).

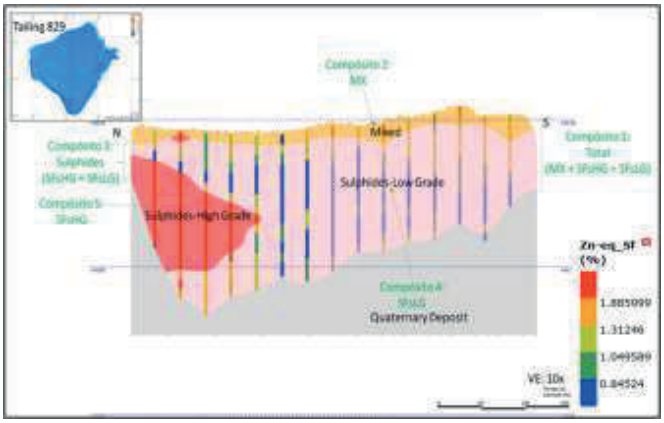


Fig. 03. Modelo de la Relavera 829 con el total de leyes y ubicación de los compósitos preparados para estudios geometalúrgicos.

Para el cálculo del tonelaje, es necesario considerar la densidad aparente (BD), calculada por el volumen que ocupa la muestra, y no la densidad por picnometría (PD) que no considera esta porosidad. La Fig. 04 muestra la porosidad promedio de la relavera según profundidad. En promedio la diferencia entre la BD y PD es de 35%, siendo muy sensible en los cálculos de estimación de tonelaje.

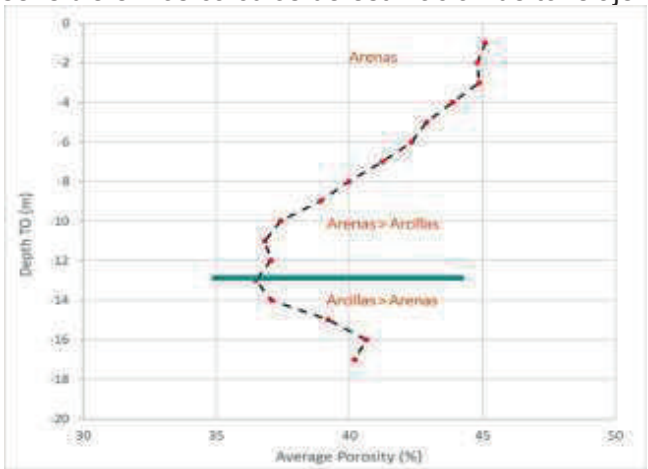


Fig. 04. Porosidad promedio vs profundidad de las R828 y R829.

Las variables estimadas son Ag, As, Au, Cu, Densidad, Fe, Mn, Pb_Ox, Pb, Zn_Ox y Zn. Todas las leyes estimadas por inverso a la distancia al cuadrado. Bi y Sb no fueron estimados porque todos los datos están bajo el límite de detección.

De la estimación de las dos relaveras Tabla 01 y Fig. 05 (validado por A. Chiquini GZTS, 2019).

Relavera	MTM	Leyes				
		Zn %	Pb %	Ag oz/TM	Au g/t	ZnEq %
828	0.1	1.4	0.6	0.8	0.4	2.5
829	3.1	1.3	0.4	0.5	0.2	1.9

Tabla 01. Recursos estimados en las R828 y R829.

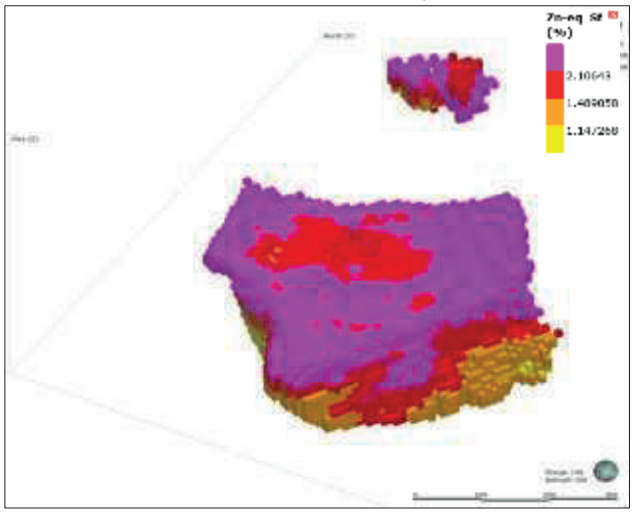


Fig. 05. Vista 3D, mirando al NO. Modelo de bloques mostrando la distribución de valores de ZnEq (%). Exageración vertical: 10x.

6. Caracterización geometalúrgica

Se llevó a cabo la evaluación metalúrgica en el Laboratorio Alpamarca (P. Huaman, 2019) de 5 compósitos (preparados en CERTIMIN) denominados: (1) Total, (2) Mixed, (3) Sulphides, (4) Sulphides_LG y (5) Sulfhides_HG (Fig. 04); de estas muestras se determinó la Ley de cabeza, moliendabilidad, características mineralógicas y comportamiento al método de flotación de sulfuros realizando pruebas de caracterización física, flotación y microscopia óptica Fig. 06.

Fig. 06. fotomicrografía del Compósito 01 (total) corresponde a las espumas de 1er minuto de la flotación total. Se observa amarre de esfalerita- CGrs- ganga (círculo rojo), galena-pirita (círculo verde) y amarre entre esfalerita-ganga (Circulo amarillo). También se observa partículas libres de Esfalerita y ganga (Huaman, P. 2019).

De estas pruebas se concluye que los sulfuros responden positivamente, sin embargo, para su optima flotación requerirá mayor liberación (>54%) - malla (200#) y mayor tiempo de flotación para su

recuperación excepto el compósito (4) que no necesita molienda.
En los compósitos no se detectó presencia de arsenopirita, Pirrotita ni sulfuros de cobre secundarios (covelita, digenita) estos últimos que significan activación natural de esfalerita en una flotación bulk. Sin embargo, se considera remanentes de reactivo CuSO4 en la muestra debido a que es un producto de un tratamiento pasado cuya etapa final fue el desbaste de zinc con dosificaciones de CuSO4.

En el compósito 5 se interpreta un balance Metalúrgico teórico proyectado que expresan las posibilidades de tratamiento del mineral "Relave Carhuacayán", a un nivel industrial *(Huamán, P. 2019)*.

7. Aspectos Ambientales

De los estudios previos, ensayos geoquímicos de agua (AMSAC, 2018) y los estudios realizados por Volcan. Los parámetros físico-químicos, inorgánicos y microbiológicos analizados en la estación de monitoreo ubicado cerca a la R829, registró valores por debajo del estándar establecido en el D.S. 004-2017-MINAM Categoría 3: Riego de Vegetales y Bebida de Animales, a excepción de los siguientes parámetros: Metales (Manganeso y Zinc) (Inspectorate, 2018).
Sin embargo, el relave minero es afectado por los fuertes vientos quienes transportan el material del relave hacia la población de Carhuacayán (Macedo, 2019).
En el monitoreo del pH cercano a las Relaveras (Tabla 02) donde son casi neutros.

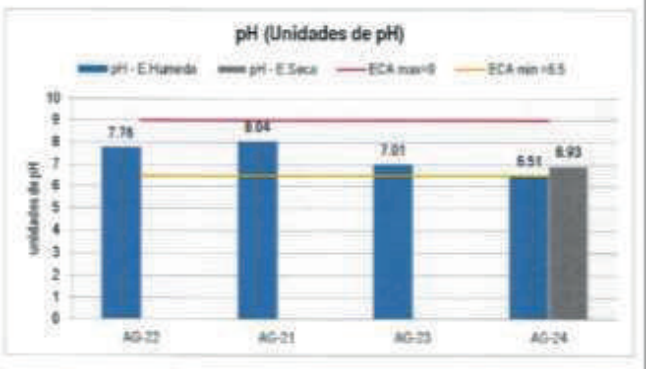


***Tabla 02**. Valor del pH en el monitoreo de agua superficial R828 y R829 (AMSAC. 2018)*

La existencia de aguas termales (Baños termales de Collpa) muy cerca de estas relaveras, así como aguas superficiales por época de lluvia, y la cercanía de otros PAM, genera que las aguas en esta parte presenten soluciones de minerales, como As con valores 3. 77 mg/L (AMSAC, 2018). Por lo tanto, es necesario buscar una solución para remediar estos pasivos así no generen drenaje ácido.

8. Discusión y conclusiones

La malla de perforación 29x29 m fue óptima para cubrir toda el área de estudio, el tipo de perforación fue de bajo costo a comparación de otro tipo de perforación, pero tuvo complicaciones por el tipo de material.
El potencial de generar drenaje ácido en estas relaveras es muy bajo, por el alto contenido de Carbonatos.
Por los estudios mineralógicos solo se reconoce trazas de Jarosita y Goethita, por lo cual no existe una zona exclusiva de óxidos.
En promedio la diferencia entre la BD y PD es de 35%, siendo muy sensible en los cálculos de estimación de tonelaje.
De la metalurgia la zona económica corresponde a la zona de Sulfuros de Alta Ley que puede ser tratado a nivel industrial.
La evaluación económica, muestra que los R828 y R829 son viables para su reaprovechamiento con una mínima ganancia y considerando que el costo de cierre planteado por Volcan es 75% menor al costo de cierre presupuestado por AMSAC, por lo tanto, es de interés para el Estado, la comunidad y Volcan que se lleve a cabo un convenio de reaprovechamiento de PAM como parte de una buena práctica para un futuro sostenible.

Agradecimientos.

A Volcan Compañía Minera S.A.A., por permitir la publicación, muy en especial a los ingenieros C. Farfán, A. Enriquez, C. Velásquez y R. Monge, a los geólogos de Anglo Peruana Terra S.A.: F. Marcelo, J. Terán, A. Pretell, P. Cuba, C. Blanco y S. Meza.

Referencias

Acuña, J. 2018. Informe de Monitoreo de calidad de agua. INSPECTORATE SERVICES PERÚ S.A.C.
AMSAC. 2018. Elaboración de los estudios de pre - inversión, plan de cierre y expediente técnico para la remediación de pasivos ambientales mineros generados por la ex u. m. Carhuacayan, distrito de santa Barbara de Carhuacayan, Junin borrador - plan de cierre.
Bernaola, R., Espinoza, S., Díaz, M., Figueroa, O., Farfán, C. y Fontboté, L., 2019. Estadíos de mineralización en La Tapada, yacimiento cordillerano polimetálico Carhuacayán, Perú Central: su aplicación para modelar recursos y definir nuevos targets de exploración. Resúmenes proEXPLO 2019.
Buenaventura Ingenieros S.A, 1983. Estudio geológico y programa de exploraciones de los yacimientos San Jose de Rio Pallanga, Alpamarca

y Carhuacayán, Informes internos Sindicato Minero Rio Pallanga.
Diaz, M., 2019. Análisis mineralógico por difracción de rayos X de 5 muestras de material suelto.Proyecto Relavera Carhuacayán.
Estado Peruano. 2004. Ley N° 28271, Ley que regula los pasivos ambientales de la actividad minera.
Huamán P. 2019. Caracterización geometalúrgica y pruebas de flotación "Relave Carhuacayan". Informes internos.
Mendoza, J.,1970. Estudios del método de explotación Carhuacayán cuerpo La Tapada-Mina Carhuacayán. Tesis de Grado.
Macedo, A. 2019. Estudio y evaluación de la estabilidad física del depósito de relave-829 de la ex unidad minera carhuacayán Tesis de Grado.
Minsur, 2018. Memoria anual 2018- Resultados consolidados.
Minsur, 2020. Informe de Segundo trimestre 2020.

EDUCACIÓN:
Indispensable para evitar conflictos sociales, promover y garantizar la sostenibilidad de la inversion minera en el Perú

Renzo Valdez Villalobos

CONGEMIN NICARAGUA S.A.
Jirón Acapulco No. 150, Casa « A », Urb. Sol de la Molina, Distrito de La Molina
renzo.valdez@congemin.com

1. Resumen

El presente trabajo tiene como objetivo analizar el sentido que tiene la educación (o la falta de ésta) en el conflicto social en minería y si mejorándose ésta, podría construir un tejido social que permita evitar conflictos sociales y a su vez, promover y garantizar la sostenibilidad de las inversiones mineras en el Perú.

El Perú tiene 1´369,295 peruanos adultos que no saben leer, ni mucho menos escribir. Esto significa que, a pocos meses del bicentenario de nuestro país, aproximadamente el 6% de nuestra población adulta no puede leer un periódico, un libro, ni mucho menos escribir una carta o un mensaje de texto. La situación empeora cuando advertimos que quienes sí estarían educándose, obtienen una educación de mala calidad, según reporte de competitividad elaborado por el Foro Economico Mundial que reporta que el Perú ocupa la posición 127 de 138 economías a nivel mundial, en calidad de educación.

Según estudios de INEI y SUNADU en las regiones Apurímac, Huancavelica y Ayacucho, se encuentran las tasas más altas de analfabetismo en nuestro país. El porcentaje de analfabetismo en estas zonas, se encuentra en el orden de 15%, casi tres veces el promedio nacional.

Adicionalmente, encontramos en las regiones de Cajamarca, Puno, Cusco y Ancash, tasas de analfabetismo igualmente altas, sobre un promedio de 11% en su población.

Las regiones nombradas, según detalle y cuadros expuestos en el desarrollo del presente trabajo, se encuentran liderando la lista de mayor tasa de analfabetismo en nuestro país y si algo tienen en común, a parte de una falta o inadecuada educación en beneficio de su población, **es que todos ellos son conocidos por cultivar grandes proyectos mineros en cartera**, entre ellos, Optimización Inmaculada en Ayacucho, Haquira, Trapiche, Antilla y Los Chancas en Apurímac, Pukaqaqa en Huancavelica, San Luis, Magistral, Racaycocha Sur en Ancash, Corani, Ollachea, Macusani, Relaves B2 en Puno, entre otros.

Por otro lado, según Reporte de Conflictos Sociales No. 193 correspondiente al mes de Marzo de 2020 emitido por la Defensoria del Pueblo, el 66.3% de conflictos socioambientales activos por actividad corresponden a la actividad minera y de acuerdo al informe Willaqniki, Edición No. 3-2019 emitido por el Vice Ministerio de Gobernanza, justamente, las regiones Ancash, Ayacucho, Apurimac, Cusco y Puno, son las regiones que ostentan mayor cantidad de conflictos sociales activos relacionados a reclamos socioambientales; regiones que según hemos expuesto, confirman un alto porcentaje de analfabetismo

Ahora, dicho esto, ¿podríamos confirmar que la falta de una educación adecuada de la población contribuye a la generación de conflictos sociales?

La Vice Gobernanza en el informe referido, confirma que la mayoría de las causas de los conflictos sociales en minería se generan, en más de un 31% de los casos, por percepciones o sensaciones de la población *(percepción de afectación 17% + percepción de incumplimiento de compromisos 14%)* lo que no involucra una comprobación objetiva o un analisis promenorizado de los hechos; herramientas básicas que nos otorga una adecuada educación, el criterio que permite la edificación de una mejor sociedad enmarcada en la importancia de convivir en paz y encontrar soluciones a los problemas a través del dialogo y el entendimiento.

Considero que la falta de educación o de una educación adecuada a la población influye de

manera predominante sobre la ocasión de los conflictos sociales y es urgente e indispensable priorizar la mejora educativa en las regiones donde se cultivan la mayor cantidad de grandes proyectos mineros en cartera con inversiones de cientos e inclusive miles de millones de dólares americanos *(vease Apurimac)*, que facilmente podrían contribuir directamente con la erradicación del analfabetismo y a su vez, elevar, sustancialmente, la calidad de la educación de la zona de influencia.

De esa manera, con la finalidad que dichas inversiones mineras a su vez, obtengan su licencia social es indispensable y oportuno propiciar la participación de la actividad minera en la educación de las comunidades de la zona de influencia (en reemplazo de la ineficiencia – *comprobada* – del Estado de brindar una educación adecuada a toda la población) a través del otorgamiento de un incentivo tributario y financiero a favor de la inversión minera que busque la supresión del analfabetismo en nuestro país y eleve la calidad educativa de la población mediante la inversión privada directa en educación, lo que en definitiva garantizará la sostenibilidad del proyecto en el tiempo, lográndose una efectiva transición de la exploración de un proyecto a la ejecución y operación de la mina.

Esta medida según mi experiencia, no solo eliminaría el analfabetismo y mejoraría la calidad de la educación en la zona de influencia sino que, adicionalmente, evitaría conflictos sociales debido a que la educación contribuye en la construcción (o reconstrucción) del desgastado tejido social, confirmandose las palabras del mismo Nelson Mandela: **« La educación es el arma mas poderosa que puedes usar para cambiar el mundo »**

Sobre la base de lo expuesto, resulta indispensable establecer incentivos tributarios y financieros a favor de la inversión minera que faciliten a las comunidades alejadas donde solo llega la minería, obtener su derecho fundamental a la educación.

1. **Incentivos tributarios:** reducción parcial del pago del IGV a fin de conservar flujo a favor de la inversión minera para que se destine a la educación adecuada de la población de la zona de influencia.

2. **Incentivos financieros:** Disminución de un 50% en la garantía del cierre de minas, lo que a su vez involucrará un ahorro en costos financieros (cartas fianzas o pólizas de caución) que serán correcta y eficientemente trasladados para la formación educativa de la población de la zona de influencia.

Una población educada evita conflictos sociales a través del dialogo, el entendimiento, el consenso y permite entender la necesidad y la importancia de la actividad minera segura, que cuida el medio ambiente y aporta al país. La educación permite la edificación de una mejor sociedad, siendo uno de sus grandes retos la importancia de convivir en paz y encontrar soluciones a los problemas a través del dialogo social, la sana convivencia y la libre participación.

No es menos cierto que la mayoría de los actuales conflictos sociales son generados por ideología, desconocimiento, ignorancia e incertidumbre propiciada por actores con intereses políticos y antimineros; falta de información y/o de conocimiento que puede ser remediada con educación de calidad y adecuada a la población de la zona de influencia para garantizar la sostenibilidad de la relación social entre la población y la inversión minera, y poder hacer una efectiva transición de exploración al desarrollo, preparación y explotación de un proyecto minero.

2. Introducción

La minería es la columna vertebral de la economía en nuestro país. No solo por sus grandes aportes a la economía peruana sino, adicionalmente, por su inagotable creación de fuente de trabajo, ventas y servicios en beneficio de la económica familiar, local, regional y central. En efecto, la minería de la mano de la ingeniería y la innovación en tecnología minera, como fuente económica principal de nuestra economía, estamos obsesionados por el futuro y guiados por el pragmatismo, contraria a la obsesión del estado por el pasado y la repetitiva historia guiada la perpetua ideología, que afecta directamente el deber de educación de la población y las potenciales inversiones mineras que representan, de manera probada, prosperidad a nuestro país.

Esto último es lo que involucra que en pleno siglo 21 tengamos niveles de analfabetismo y una calidad de educación absolutamente inaceptable en términos de realidad económica, social y tecnológica de nuestro país; lo que nos obliga como

actores principales, a tomar cartas sobre el asunto y proponer el presente trabajo técnico, que no hará más que viabilizar de manera pragmática, la transición de un proyecto minero de exploración a explotación de minas y a su vez, complementará (ayudándolo) el precario cumplimiento del Estado, en su deber fundamental de educar a los peruanos y hará sostenible en el tiempo el proyecto minero.

3. Objeto del presente trabajo técnico

3.1. ¿Cómo eliminamos el analfabetismo mejoramos la calidad educativa estatal y propiciamos la inversión en minería?

- ✓ **Voluntad política:** Involucra intereses particulares que se unen en un pacto conducente al bien común. Propiciar la eliminación del analfabestimo y mejora de la calidad de la educación a través de incentivos tributarios y financieros a favor de la inversión minera, como la propuesta.

- ✓ **Seguridad jurídica:** Reglas claras y la seguridad jurídica al inversionista.

- ✓ **Predictibilidad:** Cualidad de lo que es predecible. Saber cuánto y cómo.

3.2. La falta de educación adecuada en lugares donde solo llega la minería representa una oportunidad capitalizable para el desarrollo del proyecto:

¿Cómo reemplazamos y suplimos necesidades del Estado en pro de una inversión minera? Como sabemos quienes nos dedicamos a esto, la minería llega a los lugares más recónditos y alejados del país y conoce de primera mano, las necesidades de la población de esa zona. No es menos cierto que esta población recóndita y alejada ostenta una desesperanza aprendida, lo que representa un estado de indefensión psicológico, producto de los incansables – *prometidos pero no atendidos* – requerimientos de servicios básicos y fundamentales que el Estado debe brindar a esta población; promesas incumplidadas por parte del gobierno local, regional y central. Pero no todo es malo, porque esta deficiencia - *como toda crisis* - representa una oportunidad palpable para empezar a hacer las cosas bien a través de la inversión privada. En ese sentido, el Estado debe propiciar ante el efectivo reconocimiento de sus limitaciones, incentivos tributarios y financieros permita que la inversión minera la reemplace en el otorgamiento de este servicio básico y fundamental, como lo es la educación. A cambio de este esfuerzo el Estado y población debe **propiciar el otorgamiento de la licencia social para el inicio de la mina**, lo que en definitiva, generará desde el inicio de cualquier inversión minera, una relación de esperanza entre todos los actores que suprimirá el analfabetismo y mejorará la calidad de la educación en la zona de influencia, lo que disminuirá en definitiva los conflictos sociales, entre ambos actores.

3.3. La transición de exploración al desarrollo y explotación de la mina:

La transición de la exploración de un proyecto al desarrollo y explotación de una mina es un momento crítico y delicado, en términos sociales relacionados con expectativas y percepciones equivocadas, donde se debe priorizar la viabilidad y sostenibilidad del proyecto, en el tiempo. Es evidente que si existen pretensiones extremas de cualquier de los actores involucrados o una falta de comunicación adecuada, esto comprenderá la inviabilidad del proyecto.

En ese sentido, es importante poner en el mismo nivel de prioridad la prospección, exploración, pre factibilidad y factibilidad del proyecto, con la aceptación o **licencia social**, y esto debe lograrse a través del dialogo donde medie reciprocidad entre los actores; reciprocidad entre el Estado, el titular minero y las comunidades de las zonas de influencia. Para lograr ello, resulta indispensable la promulgación de incentivos permitan a la inversión minera ofrecer educación adecuada a la población; el punto de inicio que permita lograr esta transición y que la misma sea sostenible en el tiempo; bases que permitan eliminar la incertidumbre, satisfacer necesidades básicas y fundamentales pero, principalmente, eliminar pedidos y expectativas extremas, inviables en todo sentido.

Para esto es necesario que se parta de un principio de colaboración que se sostenga en el tiempo. Es allí donde, capitalizando la nula o deficiente educación que brinda el Estado a esta población alejada donde solo llega la minería, es que nace esta idea de incentivar la participación de la inversión minera en la educación para sentar bases sólidas para la transición de la exploración al desarrollo y explotación de una mina; bases sólidas que servirán para cimentar un relación permanente y sostenible en el tiempo entre los actores, por la

necesidad mutua que esto involucrará en el decurso del tiempo.

3.4. La licencia social

La licencia social va mucho más allá de obtener estudios de impacto ambiental para la ejecución de un proyecto minero. Va mucho más allá de la negociación y efectiva obtención de una servidumbre de paso, cesión en uso, arrendamiento de terrenos o cualquier modalidad contractual que garantice a la inversión minera el uso de la superficie. Va más allá de cualquier incentivo económico y diálogo con la comunidad, en razón a que la licencia social busca la aprobación o al menos, la amplia aceptación de un proyecto de inversión minero, lo que justifica el presente trabajo y propuesta técnica al identificar una necesidad de primer orden como lo es la educación, a fin de propiciar el otorgamiento de la licencia social y su sostenibilidad en el tiempo.

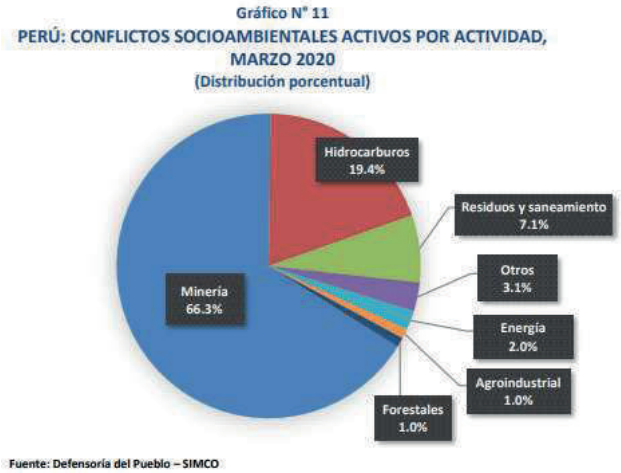
4. Propuesta de valor del trabajo técnico

4.1. La Educación, factor determinante para evitar conflictos sociales, promover y garantizar la sostenibilidad de la inversión minera en el Perú:

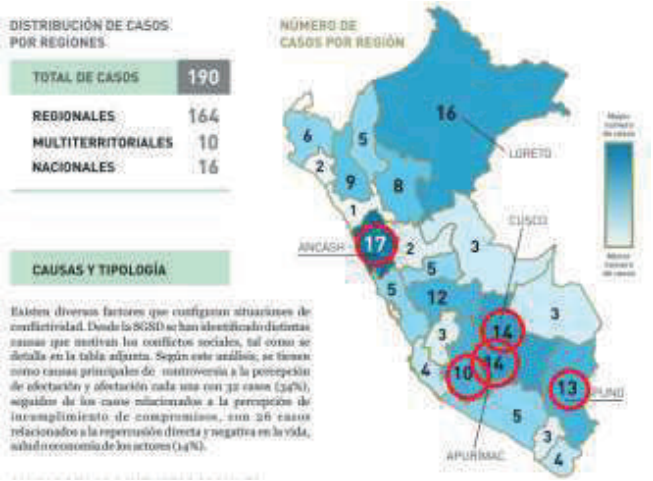
Según estudios de INEI y SUNADU en las regiones Apurímac, Huancavelica y Ayacucho, se encuentran las tasas más altas de analfabetismo en nuestro país. Adicionalmente, encontramos en las regiones de Cajamarca, Puno, Cusco y Ancash, tasas de analfabetismo igualmente altas, sobre un promedio de 11% en sus poblaciones.

Las regiones nombradas, según cuadro líneas arriba, se encuentran liderando la lista de mayor tasa de analfabetismo en nuestro país y si algo tienen en común, a parte de una falta o inadecuada educación en beneficio de su población, es que todos ellos son conocidos por cultivar grandes proyectos mineros en cartera, entre ellos, Optimización Inmaculada en Ayacucho, Haquira, Trapiche, Antilla y Los Chancas en Apurímac, Pukaqaqa en Huancavelica, San Luis, Magistral, Racaycocha Sur en Ancash, Corani, Ollachea, Macusani, Relaves B2 en Puno, entre otros.

Por otro lado, según Reporte de Conflictos Sociales No. 193 correspondiente al mes de Marzo de 2020 emitido por la Defensoria del Pueblo, el 66.3% de conflictos socioambientales activos por actividad corresponden a la actividad minera.



Asimismo, de acuerdo al informe Willaqniki, Edición No. 3-2019 emitido por el Vice Ministerio de Gobernanza, las regiones Ancash, Ayacucho, Apurimac, Cusco y Puno, serían las regiones que ostentan mayor cantidad de conflictos sociales activos relacionados a reclamos socioambientales; regiones que según hemos expuesto, ostentan un alto porcentaje de analfabetismo.



Vease circulos rojos para identificar cantidad conflictos por región

Ahora, dicho esto, ¿podríamos confirmar que la falta de una educación adecuada de la población contribuye a la generación de conflictos sociales?

La Vice Gobernanza en el informe referido, confirma que la mayoría de las causas de los conflictos sociales en minería se generan, en más de un 31% de los casos, por percepciones o sensaciones de la población *(percepción de afectación 17% + percepción de incumplimiento de compromisos 14%)* lo que no involucra una comprobación objetiva o un analisis promenorizado de los hechos; herramientas básicas que nos otorga una adecuada educación, el criterio que permite la edificación de una mejor sociedad enmarcada en la importancia de convivir en paz y encontrar soluciones a los problemas a través del dialogo y el entendimiento.

Considero que la falta de educación o de una educación adecuada a la población influye de manera predominante sobre la ocasión de los conflictos sociales y es urgente e indispensable priorizar la mejora educativa en las regiones donde se cultivan actualmente, la mayor cantidad de grandes proyectos mineros en cartera con inversiones de cientos e inclusive miles de millones de dólares americanos, que facilmente podrían contribuir directamente con la erradicación del analfabetismo y a su vez, elevar, sustancialmente, la calidad de la educación de esta población.

De esa manera, con la finalidad de que dichas inversiones mineras a su vez, obtengan su licencia social es indispensable y oportuno propiciar la participación de la actividad minera en la educación de las comunidades de la zona de influencia (en reemplazo de la ineficiencia – *comprobada* – del Estado de brindar una educación adecuada a toda la población) a través del otorgamiento de un incentivo tributario y financiero a favor de la inversión minera que busque la supresión del analfabetismo en nuestro país y eleve la calidad educativa de la población de la zona de influencia mediante la inversión privada directa en educación lo que en definitiva garantizará la sostenibilidad del proyecto en el tiempo, lográndose una efectiva transición de la exploración de un proyecto a la ejecución y operación de la mina.

Esta medida según mi experiencia, no solo eliminará el analfabetismo y mejorará sustancialmente la calidad de la educación en la zona de influencia sino que, adicional y fundamentalmente, evitará conflictos sociales debido a que la educación contribuye en la construcción (o reconstrucción) del desgastado tejido social, confirmandose las palabras del mismo Nelson Mandela: « La educación es el arma mas poderosa que puedes usar para cambiar el mundo »

Sobre la base de lo expuesto, resulta indispensable establecer incentivos tributarios y financieros a favor de la inversión minera que faciliten a las comunidades alejadas donde solo llega la minería, obtener su derecho fundamental a la educación.

- **Incentivos tributarios:** reducción parcial del pago del IGV a fin de conservar flujo a favor de la inversión minera para que se destine a la educación adecuada de la población de la zona de influencia.

- **Incentivos financieros:** Disminución de un 50% en la garantía del cierre de minas, lo que a su vez involucrará un ahorro en costos financieros (cartas fianzas o pólizas de caución) que serán correcta y eficientemente trasladados para la formación educativa de la población de la zona de influencia.

Una población educada evita conflictos sociales a través del dialogo, el entendimiento, el consenso y permite entender la necesidad y la importancia de la actividad minera segura, que cuida el medio ambiente y aporta al bienestar del país. La educación permite la edificación de una mejor sociedad, siendo uno de sus grandes retos la

importancia de convivir en paz y encontrar soluciones a los problemas a través del dialogo social, la sana convivencia y la libre participación.

No es menos cierto que la mayoría de los actuales conflictos sociales son generados por ideología, desconocimiento, ignorancia, percepciones equivocadas e incertidumbre propiciada por actores con intereses políticos y antimineros; falta de información y/o de conocimiento que puede ser remediada con educación de calidad y apropiada a la población de la zona de influencia para garantizar la sostenibilidad de la relación social entre la población y la inversión minera y poder hacer una efectiva transición de exploración al desarrollo, preparación y explotación de un proyecto minero.

5. Conclusiones

La puerta que abre el camino a vivir en sana convivencia es sin lugar a duda la educación, por ello, es primordial que desde el escenario politico se analice la data y formulen propuestas como la presente, que se encuentren a la vanguardia de las necesidades del actual contexto de la realidad educativa y de la minería peruana. En conclusión la presente propuesta obtendrá los siguientes resultados:

- Se disminuirá considerablemente el analfabetismo en el País.
- Se le otorgará a la población, educación de primer nivel, en lugares alejados.
- Se garantizará la transición eficiente de los proyectos en exploración, al desarrollo y explotación de la mina.
- Se propiciará una relación sostenible en el tiempo entre las comunidades de la zona de influencia y la inversión minera, de la mano de la educación de su futuro.
- Se disminuirán los conflictos sociales, priorizándose el diálogo y el consenso.
- Se promoverá la inversión minera a través de principios fundamentales de seguridad jurídica y predictibilidad y reciprocidad, que deben gobernar en un Estado de Derecho.
- Se mejorará cualitativamente el nivel de educación del Perú, lo que contribuirá con el correcto desarrollo de nuestro país.

Referencias

1. https://www.publimetro.pe/actualidad/2018/09/08/peru-tasa-analfabetismo-reducido-ultimos-cinco-anos-nndc-79383-noticia/
2. https://es.unesco.org/
3. http://prometheo.pe/donde-esta-regulada-la-licencia-social/
4. https://dle.rae.es/predictibilidad
5. http://m.inei.gob.pe/estadisticas/indice-tematico/analfabetismo-y-alfabetismo-8036/
6. http://www.pcm.gob.pe/willaqniki_sgsd/
7. http://www.minem.gob.pe/_publicacion.php?idSector=1&idPublicacion=593
8. https://www.defensoria.gob.pe/wp-content/uploads/2020/04/Reporte-Mensual-de-Conflictos-Sociales-N%C2%B0-193-marzo-2020.pdf

CURSOS CORTOS

proEXPLO2021
Año del Bicentenario

PRE
CONGRESO

GEOMETALURGIA PARA EXPLORADORES

CONTENIDO

CONTENIDO

Tradicionalmente el entregable del Geólogo explorador era simplemente los recursos geológicos; sin embargo, actualmente se les exige además indicar por lo menos la viabilidad geometalúrgica del proyecto. En el presente curso se revisó los principales métodos para la caracterización geometalúrgica; así como los procedimientos para identificar y minimizar a los minerales y elementos indeseables o penalizables.

Se mostró también la Caracterización Geometalúrgica Global y la implementación del Modelo Geometalúrgico de Bloques; que, siendo un modelo predictivo, aportará la información crítica necesaria para diseñar las instalaciones de conminución y beneficio metalúrgico más apropiadas; así como los procedimientos y aditivos más adecuados.

AUTOR

EXPOSITOR:

SAMUEL CANCHAYA

Ingeniero Geólogo de la Universidad Nacional de Ingeniería. Magister en Yacimientos en la Universidad de Heidelberg – Alemania. Profesor visitante en las Universidades de Bochum y Heidelberg – Alemania. Especialista en: Muestreo & QA/QC, Análisis Mineralógico Instrumental: Microscopía óptica y electrónica, NIR, FTNIR, DRX y QEMSCAN; Mineralogía y Yacimientos, Exploraciones, Modelamiento 3D, Caracterización geoquímica multielemental. Geoestadística (aplicada a exploraciones, Plantas metalúrgicas, Estimación, Categorización y Evaluación de Recursos) y Geometalurgia (Caracterización, Logueo y Modelado Geometalúrgico por Bloques).

Trabajó en prestigiosas empresas: Minero Perú, INGEOMIN, INGEMMET, Consultor Internacional PNUD (Prospección por Cu IV Región-Chile), Cyprus-Cerro Verde AQP, North Cía. Minera, Consorcio Minero Horizonte, Director Reg. de Energía y Minas de Ucayali, MINSUR S. A. (a través de AESA), Phelp Dodge y Free Port McMoran – Sociedad Minera Cerro Verde y Compañía de Minas Buenaventura. Consultor en Geoestadística, Muestreo y QA/QC, Microscopía y Geometalurgia. Actualmente Gerente General de Sampling OK SAC y catedrático de pregrado y postgrado de la Ponti¬cia Universidad Católica del Perú y Universidad Nacional de Ingeniería. Creador, principal impulsor y desarrollador del "Concepto de Roca Total", de la Caracterización Geometalúrgica Global, del Logueo Geometalúrgico y del Modelo Geometalúrgico de Bloques probabilístico

PRE CONGRESO

VALORIZACIÓN DE PROYECTOS MINEROS

CONTENIDO

CONTENIDO

Parte importante del desarrollo de un proyecto minero implica la identificación de aquellos proyectos que tengan la posibilidad de continuar hacia etapas de estudio más avanzadas (Conceptual, PFS, FS). Esto reviste particular importancia, considerando a la minería, y en especial la exploración minera, como una actividad de riesgo que requiere un adecuado direccionamiento de los fondos disponibles.

Del mismo modo, como parte de las operaciones de compra-venta y transferencia de proyectos mineros es importante fijar valores de referencia acordes con el tipo de depósito, sus resultados y el nivel de estudio alcanzado en dichos proyectos.

Ambos aspectos son relevantes dentro de las actividades de exploración minera y requieren una valuación adecuada de estos activos mineros en base a la información disponible, lo cual, es particularmente complejo en las etapas tempranas de desarrollo de un proyecto o activo minero, en donde la información limitada hace difícil la toma de decisiones.

Este curso desarrolló las metodologías usadas y aceptadas en la industria minera para la valuación de activos y/o proyectos mineros en etapas tempranas de desarrollo y exploración, así como, los aspectos cualitativos y cuantitativos a tomar en cuenta en este proceso. El curso desarrolló tanto el sustento técnico, como ejemplos prácticos que permitan el adecuado entendimiento del proceso de valuación.

AUTOR

EXPOSITOR:

JAMES GILBERTSON

James Gilbertson es un geólogo con más de 20 años de experiencia en la generación de targets, diseño, gestión y supervisión de exploraciones y estimación de recursos minerales de varias commodities a nivel mundial. James se incorporó a SRK en 2005 como geólogo de recursos en las o¬ficinas del Reino Unido y posteriormente en SRK Exploration Services (SRK ES) en 2008. Entre 2014 y 2016, James trabajó en Sudamérica y estableció y dirigió el Departamento de Minería de SRK Consulting (Perú) en Lima. Durante este periodo, pasó a ser geólogo colegiado y persona competente (CP) de la Sociedad Geológica de Londres. Antes de unirse a SRK gestionó las propiedades de exploración de AXMIN Inc en África Occidental y Central.

Durante su trayectoria profesional ha adquirido experiencia en diversas disciplinas de exploración/minería, incluyendo prácticas de exploración minera, plani¬ficación y gestión, SIG, perforación y muestreo de control de recursos y leyes, protocolos de control y aseguramiento de la calidad, optimización de la infraestructura minera, registro geotécnico y temas de estabilidad de taludes y suelos. Sus responsabilidades en SRK ES incluyen el diseño y revisión de programas de exploración, programas de desarrollo de recursos minerales y programas de valorización y optimización de proyectos. También se especializa en asesoría y enlace a nivel gubernamental/ministerial y recientemente ha gestionado el desarrollo de estrategias para la industria minera, apoyo técnico, capacitación y servicios de asesoría para el Gobierno de Afganistán y el Sultanato de Omán.

AUTOR

EXPOSITOR:

MIKE ARMITAGE

El Dr. Mike Armitage fue Director General y Presidente de SRK (Reino Unido) y también fue Presidente del Grupo SRK. Actualmente es consultor de empresas y tiene más de treinta y cinco años de experiencia en el sector. Antes de unirse a SRK, trabajó en minas auríferas en Sudáfrica y Zimbabue y también realizó un doctorado evaluando métodos alternativos de estimación de reservas en la mina de oro Renco, en Zimbabue. En SRK es responsable de la gestión de estudios de factibilidad e informes de personas competentes en la bolsa de valores en nombre de empresas mineras y de exploración y también de auditorías y estudios de diligencia debida para instituciones de inversión o en apoyo de fusiones y adquisiciones. Ha redactado diversos artículos sobre la metodología de estimación de recursos y reservas y ha sido durante varios años coordinador conjunto de un curso de maestría en recursos minerales en la Universidad de Cardiff y, posteriormente, examinador externo del curso de maestría en finanzas de metales y energía en la Universidad Imperial College de Londres.

También fue miembro del consejo y vicepresidente de la Sociedad Geológica entre 2012 y 2015 y actualmente es presidente de la División de Ciencias de la Tierra Aplicadas del Instituto de Materiales, Minerales y Minería (IOM3) y presidente honorario de la Critical Minerals Association. Sus proyectos incluyen minas y prospectos de oro, diamantes, metales base, uranio, minerales industriales, carbón/pizarra bituminosa y mineral de hierro en Europa, América del Norte y del Sur, la antigua Unión Soviética, África y Oriente Medio. Ha sido gerente de proyecto de varias auditorías de estudios de factibilidad realizadas por encargo de bancos e instituciones financieras para proyectos en Rusia, África meridional y occidental y América del Norte y del Sur, así como de informes de personas competentes elaborados para apoyar la cotización en las bolsas de valores del Reino Unido, Irlanda, Sudáfrica, Australia y Canadá.

AUTOR

EXPOSITOR:

NICK FOX

Nick Fox (MSc, ACA) es consultor principal (Geología / Economía de minerales) con más de 18 años de experiencia internacional de posgrado en geología de recursos, economía de minerales, modelado financiero y diligencia debida.

La experiencia técnica de Nick incluye la creación y revisión de estimaciones de recursos minerales y modelos financieros para varios productos básicos a nivel mundial, en particular África y Rusia y países de la CIS, e incluyen oro, mineral de hierro, níquel, arenas minerales pesadas, metales básicos, potasa, tántalo-niobio y arcilla china.

Nick gestiona comisiones multidisciplinarias, incluidos los informes de Personas Competentes de la bolsa de valores en nombre de las empresas mineras y de exploración y también auditorías y estudios de diligencia debida en nombre de instituciones de inversión o en apoyo de fusiones y adquisiciones.

PRE CONGRESO

TECHOS Y PISOS DE DEPÓSITOS EPITERMALES Y TRANSICIÓN A LOS DEPÓSITOS DEL TIPO PÓRFIDO: APLICACIÓN A LA EXPLORACIÓN

CONTENIDO

CONTENIDO

Este curso examinó las características de los depósitos de mineral epitermal relacionados con la intrusión y la transición a la parte superior de los depósitos de pórfido, con observaciones relevantes para la exploración y evaluación de minerales.

La presentación incluyó:

1) Sistemas hidrotermales activos, ya que esta es la mejor y más interesante forma de entender los procesos genéticos que son directamente relevantes para los tipos de depósito que cubriremos.

2) Formación de lithocaps y depósitos de mineral de alta sulfuración, incluidos varios entornos de 'alteración argílica avanzada' con diferentes implicaciones de exploración.

3) Los lithocaps tienen una transición a la parte superior de los depósitos de pórfido de Cu-Au, el objetivo económicamente más significativo presente en el núcleo del sistema magmático-hidrotermal, debajo del ambiente epitermal.

4) Las vetas epitermales, tanto las relacionadas con la intrusión como las formadas durante la extensión, tienen una gran variación en tectónica, metales, tamaños y formas, y características, incluida la mineralogía de alteración. Los geólogos deben pensar lateralmente, figurativa y literalmente, durante la exploración de depósitos epitermales.

AUTOR

EXPOSITOR:

JEFF HEDENQUIST

Jeffrey Hedenquist obtuvo un doctorado en geología en la Universidad de Auckland, Nueva Zelanda. Posteriormente, el Dr. Hedenquist realizó investigaciones con la División de Química del DSIR en Nueva Zelanda y el Servicio Geológico del Japón durante 10 años, cada uno sobre el desarrollo de la energía geotérmica y las descargas volcánicas, respectivamente, así como sobre la formación de depósitos epitermales de oro y pórfidos de cobre.

Desde 1999 ha sido asesor independiente de la industria minera, de varios organismos gubernamentales y del Banco Mundial, realizando evaluaciones de proyectos hidrotérmicos de oro y cobre en más de 40 países, así como capacitación relacionada con la exploración minera. También es profesor adjunto de la Universidad de Ottawa y en 2010 fue presidente de la Sociedad de Geólogos Económicos

AUTOR

EXPOSITOR:

Dr. ANTONIO ARRIBAS

El Dr. Arribas tiene más de 35 años de experiencia profesional en el campo de la investigación, la educación superior y en puestos técnicos y de gestión en la industria. Es un geólogo con experiencia en geología y exploración económica, mineralogía y geoquímica. Antes de formar parte de la UTEP, fue profesor en la Facultad de Ciencias de Recursos Internacionales de la Universidad de Akita en Japón. En 1986, el Dr. Arribas obtuvo una beca Fulbright para asistir a la Universidad de Michigan y realizar investigaciones sobre depósitos de oro en el sudeste de España. Recibió su doctorado en Michigan en 1992.

El Dr. Arribas ha ocupado diversos cargos en la industria, entre ellos el de Gerente de Exploración para América del Sur en Placer Dome Inc., Jefe de Geología en Newmont Corp. y Vicepresidente de Geociencias en BHP Exploration. Actualmente es miembro de la Junta Directiva de Auryn Resources Inc., una empresa de exploración junior con sede en Vancouver. El Dr. Arribas es miembro de diversas asociaciones profesionales, entre ellas la Asociación Nacional de Profesores de Geociencias, la Sociedad de Geología de Recursos, la Société Géologique aux Gites Minéraux y la Sociedad de Geólogos Económicos (SEG). Fue Presidente de la SEG en 2013.

PRE CONGRESO

FUNDAMENTOS DE LAS LEYES DE VALORES DE DIVULGACIÓN MINERA - NI43-101 Y S-K 1300

CONTENIDO

CONTENIDO

Tener la confianza de los inversores en la industria minera es esencial para obtener financiación destinada a apoyar la exploración y el desarrollo de nuevos proyectos. La materialidad, transparencia y competencia son principios fundamentales en la presentación de informes públicos sobre los resultados en materia de exploración, recursos minerales y reservas minerales, y estos conceptos constituyen la base de la mayoría de códigos internacionales de presentación de informes.

En este taller se analizó brevemente los principales conceptos de divulgación del Instrumento Nacional Canadiense 43-101 - Normas de divulgación de proyectos mineros, incluida la definición de Persona Calificada, la divulgación de recursos y reservas minerales, cómo preparar un Informe Técnico y los factores desencadenantes para la presentación de un Informe Técnico. También se examinó los aspectos más importantes de la nueva ley de valores mineros S-K1300 de la Comisión de Bolsa y Valores de los Estados Unidos (SEC) y se comparó con los requisitos del NI 43-101.

AUTORA

EXPOSITORA:

DEBORAH McCOMBE

Deborah McCombe, P. Geo., es Geóloga Principal con más de 35 años de experiencia en la gestión de proyectos de exploración, estudios de factibilidad, estimación de recursos y reservas, estudios de diligencia debida y estudios de valoración en diversos entornos geológicos de América del Norte y del Sur, Europa, Asia y África. Antes de incorporarse a SLR, McCombe fue Presidenta de Roscoe Postle Associates y fue Consultora Jefe de Minería para la Comisión de Valores de Ontario (OSC). En la OSC, se encargó de desarrollar y aplicar el Instrumento Nacional 43-101: Normas de Divulgación de Proyectos Mineros (NI 43-101). Realizó revisiones técnicas en compañías mineras y de exploración, y preparó informes de propiedad para facilitar el financiamiento. Deborah McCombe es Copresidenta del Comité de Recursos Minerales y Reservas Minerales del Instituto Canadiense de Minería, Metalurgia y Petróleo (CIM), Ex Presidenta del Comité de Normas Internacionales para la Presentación de Informes sobre Reservas Minerales (CRIRSCO), Ex Presidenta de la Asociación de Geocientícos Profesionales de Ontario, y miembro del Comité de Supervisión y Asesoramiento Técnico Minero de Administradores de Valores de Canadá (MTAMC).

En 2012, Deborah McCombe recibió el Premio por Servicios Distinguidos de la Asociación de Prospectores y Promotores de Canadá (PDAC) y fue distinguida con el Premio Robert Elver de Economía Minera del CIM por sus contribuciones al establecimiento del NI 43-101 y sus esfuerzos como jefa de CRIRSCO en la coordinación de normas internacionales para la presentación de informes sobre recursos/reservas. Deborah McCombe también ha recibido el Premio de Geocientíficos Profesionales de Canadá de 2013 en reconocimiento a su destacada contribución al desarrollo y la práctica de las geociencias profesionales. En 2020 se le otorgó la Medalla por Servicio Distinguido del CIM por sus notables y meritorios esfuerzos en favor del CIM y la industria minera. McCombe es autora de numerosos artículos y ha realizado presentaciones destinadas a ayudar a compañías mineras y sus asesores jurídicos, así como a profesionales de la industria minera, a comprender mejor las normas canadienses de divulgación de proyectos mineros.

AUTORA

EXPOSITORA:

ROSMERY CÁRDENAS

Rosmery Cárdenas Barzola, P. Eng., es Geóloga Principal con más de 18 años de experiencia en la industria minera, incluyendo operaciones de exploración, desarrollo y producción tanto en instalaciones subterráneas como a tajo abierto en una amplia variedad de ambientes geológicos en Perú, República Dominicana, Chile, Argentina, España, México, Honduras, Senegal y Canadá. Antes de trabajar como consultora, Cárdenas fue geóloga de recursos en una importante compañía minera multinacional.

Rosmery Cárdenas ha participado en diversos proyectos, incluyendo diligencia debida y revisión de ingenieros independientes. También, ha evaluado proyectos mineros para facilitar la financiación por parte de bancos, fusiones y adquisiciones. Además, elaboró programas de perforación, estudios geoestadísticos, estimaciones y auditorías de recursos minerales y documentación para su divulgación pública. Ha trabajado en proyectos de oro, plata, metal base, cobre, hierro, níquel y carbonato de calcio. Cárdenas cuenta con una amplia experiencia en software minero, sistemas de modelado en 3D e informes públicos. Tiene amplios conocimientos prácticos en materia de loggeo, mapeo geológico y geotécnico, análisis de datos, control de calidad y garantía de calidad, estimación de recursos y auditorías. Cárdenas ha impartido cursos de capacitación sobre estimación de recursos minerales a compañías mineras y ha sido ponente en un curso corto de la Asociación de Prospectores y Promotores de Canadá (PDAC). Cárdenas es miembro activo del Comité de Minería de la Cámara de Comercio Peruano-Canadiense con sede en Toronto.

PRE CONGRESO

ESTRATEGIAS PARA EL ANÁLISIS GEOQUÍMICO PUNTUAL (IN SITU) DE MINERALES

CONTENIDO

CONTENIDO

Durante este curso corto de un día de duración se revisó los principales métodos de análisis puntual (in situ) de uso para la determinación de la composición química de fases minerales.

Nociones básicas sobre cada método, principales aplicaciones y sus ventajas e inconvenientes fueron presentados en el marco de marchas analíticas apropiadas para la integración de los datos en patrones texturales.

Al final del curso, el asistente debe ser capaz de seleccionar de forma crítica los métodos y marchas analíticas óptimas para resolver diferentes problemas geológicos.

AUTOR

EXPOSITOR:

Dr. LISARD TORRÓ

Graduado en Geología (2009, Universitat de Barcelona) y en Ingeniería de Minas (2011, Universitat Politècnica de Catalunya), Lisard Torró obtuvo su doctorado en Ciencias de la Tierra por la Universitat de Barcelona en 2017. Su investigación ha girado mayormente entorno de la descripción de progresiones litogeoquímicas en rocas ígneas emplazadas durante los primeros estadios evolutivos de arco-islas y la contextualización de yacimientos magmático-hidrotermales en este contexto tectónico.

Más recientemente, el Dr. Torró y su equipo han centrado su investigación en la caracterización de la expresión mineralógica, patrones de distribución y mecanismos de enriquecimiento de los conocidos como elementos de alta tecnología en yacimientos magmático-hidrotermales, hidrotermales y residuales en República Dominicana, Perú y Bolivia. El Dr. Torró es "fellow member" de la Society of Economic Geologists (SEG, 2011; SEGF2019), miembro activo de la Society for Geology Applied to Mineral Deposits (SGA, 2009) y parte de los grupos de investigación internacionales "Caribbean Lithosphere" (CALOR) y Geología de Yacimientos Minerales (GYM).

POST CONGRESO

ALTERACIÓN Y MINERALIZACIÓN EN LOS YACIMIENTOS DE PÓRFIDOS

CONTENIDO

CONTENIDO

En este taller de un día se revisaron las características claves de la alteración y la mineralización en una diversa gama de yacimientos de pórfidos de Cu, Au y Mo en los alrededores de la cuenca del Pacífico, y de qué manera se pueden utilizar estas características en la exploración.

El curso comenzó con medio día de conferencias en las que se revisaron las características y orígenes de los yacimientos de pórfidos. La sesión de la tarde fue una sesión práctica interactiva con el ponente del curso, en la que los participantes describieron e interpretaron muestras de rocas de diversos entornos de pórfidos.

En las prácticas se utilizaron imágenes en 3D de alta resolución de muestras provenientes de yacimientos de pórfidos, junto con escaneos de roca de muy alta resolución. A los participantes se les asignó muestras de rocas individuales y se les proporcionó imágenes y datos antes de que empiece el taller para que puedan preparar sus descripciones con anticipación. Dado el carácter intensivo de la sesión práctica e interactiva, el curso corto tuvo un límite de 30 participantes. El curso corto y la sesión práctica interactiva se presentaron en inglés.

AUTOR

EXPOSITOR:

Dr. DAVID COOKE

David Cooke es el Director de CODES, el Centro de Yacimientos Minerales y Ciencias de la Tierra de la Universidad de Tasmania.

David y su equipo de investigación han estudiado los sistemas de pórfido durante más de tres décadas, investigando los aspectos genéticos, caracterizando los yacimientos y desarrollando nuevas e innovadoras herramientas de exploración geoquímica y geológica para ayudar al descubrimiento de pórfidos.

David es Editor Asociado de Geología Económica y recibió la Medalla Haddon Forrester King de la Academia de Ciencias de Australia (2018) y la Medalla de Plata de la Sociedad de Geólogos Económicos (2013) y el premio Thayer Lindsley a Profesor Distinguido (2005).

POST CONGRESO

APLICACIONES GEOQUÍMICAS Y MINERALÓGICAS PARA LA SELECCIÓN DE MÉTODOS GEOFÍSICOS EN LA EXPLORACIÓN DE YACIMIENTOS VMS

CONTENIDO

CONTENIDO

Este curso de capacitación tuvo como objetivo presentar una metodología que ayude a mejorar la utilización de datos geológicos y geoquímicos históricos a fin de limitar y crear modelos geofísicos predictivos para la exploración de depósitos VMS en diversos entornos.

Se previó que este curso fuese interactivo e incluyera la presentación de diversos casos prácticos que plantean problemas comunes en la exploración de depósitos VMS ricos en oro y polimetálicos en los dominios andinos y los antiguos dominios volcánicos de Europa septentrional. Se dió especial importancia al reconocimiento de firmas minerales dentro de las regiones con perturbaciones formativas y artificiales en el dominio brownfield.

Como el curso requirió una comprensión básica de conceptos geofísicos en exploración minera, la capacitación estuvo dirigida a geólogos de exploración y a recién graduados o estudiantes de último año de geología con interés en el campo de la geología económica o la geofísica aplicada. No se requirió experiencia previa en sistemas VMS, pero fue deseable.

AUTOR

EXPOSITOR:

MARCELLO IMAÑA

Marcello es geólogo económico con amplio interés en el desarrollo de métodos de exploración para mejorar las acciones de prospección de menas polimetálicas y auríferas en arcos volcánicos y cuencas sedimentarias del Norte de Europa y Latin America. Su experiencia en la industria minera radica en la participación activa, supervisión y mentoring en equipos multidisciplinarios y exitosos de exploración en compañías tales como Lundin Mining, Agnico Eagle, First Quantum e Inmet Mining, cuyas actividades lo han llevado a trabajar en sistemas mineralizados con variados e inusuales esquemas de preservación, deformación y metamorfismo en diversos arcos volcánicos y cuencas sedimentarias del mundo. Su pasión por promover la investigación aplicada a la exploración mineral lo han llevado a ser mentor, asesor y colaborador con gran número de investigadores, compañías y estudiantes de pre y post grado, además de poseer un gran interés por promover la participación multinacional y diversidad de género y perspectivas.

La trayectoria académica de Marcello cubre los programas de ingeniería geológica en la UNMSM (Perú), más el input tecnológico adquirido a través de varios proyectos con compañías mineras en Europa y Latin America a través de estudios de postgrado (eg. División de Geología y Mineralogía Turku-Finlandia y en la división de geología económica y Geofísica Aplicada de la universidad de Luleå en Suecia). En el ámbito de la industria se desempeña actualmente como director técnico de GRM-Services Finland, compañía dedicada al asesoramiento y ejecución de métodos indirectos de exploración adaptados a las condiciones particulares de exploración en minas profundas y proyectos superficiales; y es asesor en las actividades de exploración aurífera de Agnico Eagle con foco en los dominios Proterozoicos del Norte de Europa.

POST CONGRESO

APLICACIÓN DE LA GEOQUÍMICA A LA EXPLORACIÓN MINERA: SISTEMAS PÓRFIDOS Y EPITERMALES

CONTENIDO

CONTENIDO

Este curso estuvo dirigido a profesionales y estudiantes con intereses en interpretación de la geoquímica (mineralogía) de sistemas hidrotermales, y la aplicación práctica de geoquímica a la exploración minera.

I) Introducción al tema
   a) Reacciones geoquímicas – reflexiones de asociaciones mineralógicas y equilibrio (ó no) del sistema hidrotermal.
   b) Uso (y abuso) de diagramas de actividad

II) Ejemplos de aplicaciones de la geoquímica en alteración-mineralización
   a) Pórfidos de Cu-Mo +/- Au
      i) El ambiente profundo – alteración "tardimagmática" y constructiva (K, Ca-Na)
      ii) Sobreimposición de asociaciones de alteración: alteración destructiva y reorganización (redistribución) de minerales.
      iii) Efectos tardíos y sorpresas geoquímicas

   b) Sistemas Epitermales de Baja y Alta Sulfuración
      i) Transición: ambientes de pórfidos – epitermales – vetas tipo "Cordilleran"
      ii) Alteración destructiva – argílica avanzada y la paragénesis de minerales
      iii) Sistemas de baja sulfuración – cambios geoquímicos
      iv) Vetas "Cordilleran" - ¿transición a vetas epitermales?

III) Conclusiones y Discusión

AUTOR

EXPOSITOR:

Dr. WILLIAM X. CHÁVEZ, Jr.

William X. Chávez, Jr. es Profesor de Ing. Geológica en la Escuela de Minas de New México, U.S.A.. Recibió títulos en Geología (1976) e Ingeniería de Minas (1977) de esta misma institución; continuó su educación con M.A. (Geología, 1980) y Ph.D (1984) de la Universidad de California en Berkeley.

Desde 1985 ha enseñado en Socorro, con énfasis en procesos hidrotermales y procesos supérgenos aplicados a la exploración minera, y estudios en la geoquímica de remediación minera. Es asesor de empresas mineras y ha trabajado en varios países en aplicación de la geoquímica para la evaluación de prospectos mineros. Ha enseñado cursos en terreno y "workshops" por el Society of Economic Geologists (SEG), y es "Honorary Lecturer" del SEG."

proEXPLO2021
Año del Bicentenario

XII CONGRESO INTERNACIONAL DE PROSPECTORES Y EXPLORADORES

RECURSOS MINERALES PARA UN FUTURO SOSTENIBLE

proexplo.com.pe

Organiza:

INSTITUTO DE INGENIEROS DE MINAS DEL PERÚ