
Clusterización litológica a partir de data multielemental en La Tapada, depósito cordillerano polimetálico del Perú Central

Mario Díaz¹, Susankler Espinoza¹ y Oshin Figueroa¹

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 toda la secuencia sedimentaria y fases intrusivas anteriores (Fig. 2).

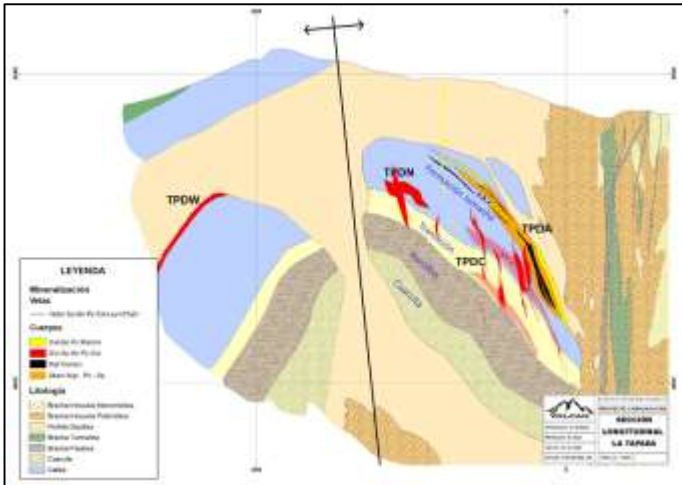


Figura 2. Sección geológica mirando al norte en La Tapada.

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, HNO₃, HF y HClO₄) 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.

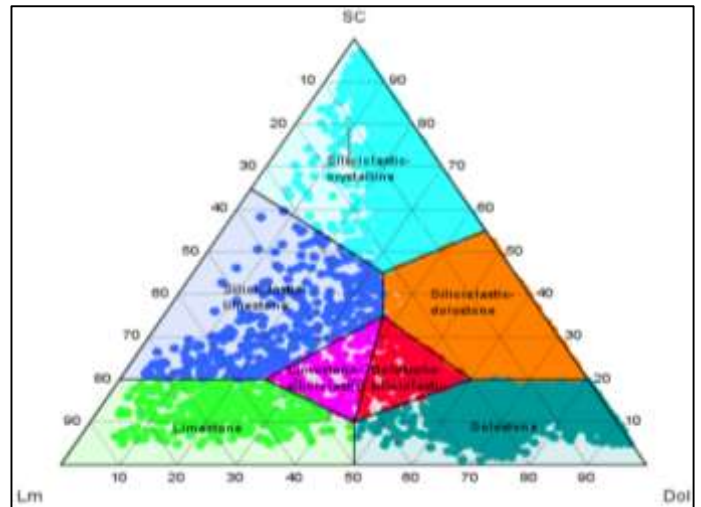


Figura 3. Diagrama para la clasificación de rocas químicas-silicoclásticas según Ordoñez-Calderón et al. (2017), usando datos de La Tapada.

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 carbonatadas 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 presentes, 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.

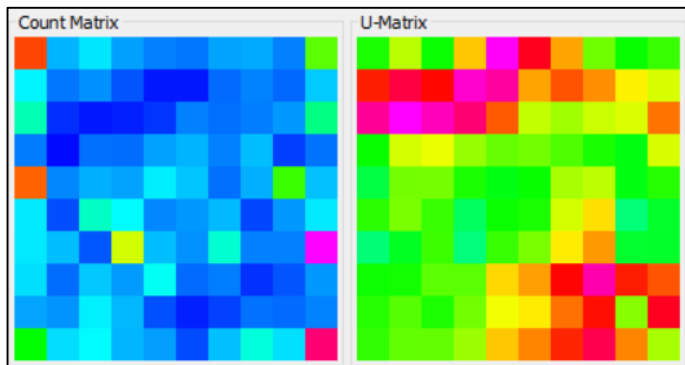


Figura 4. Matrices de conteo (izquierda) y de distancia unificada (derecha).

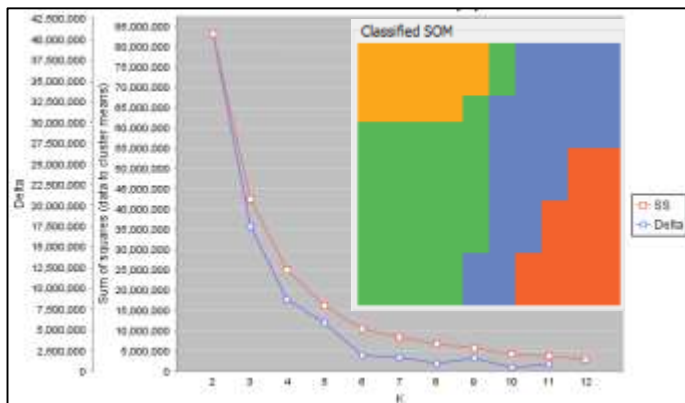


Figura 5. Clasificación SOM por K-means.

Los clústeres fueron correlacionados e interpretados con los logeos geológicos en:

1. Diabasa (naranja claro): corresponde a diabasas de grano fino y alteradas a biotitas y cloritas. Esta unidad fue logeada 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.

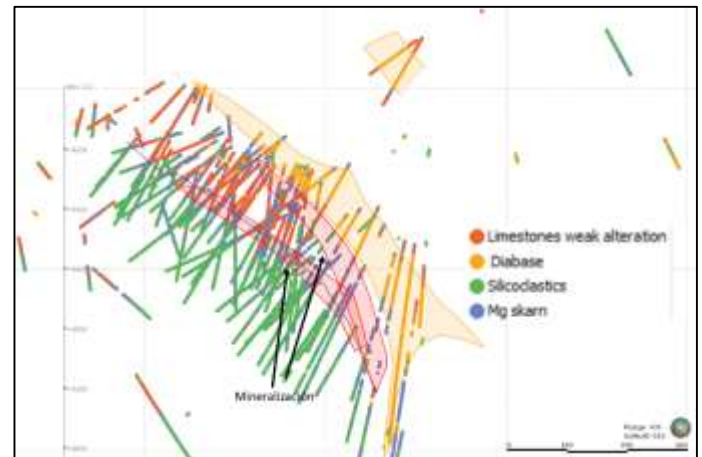


Figura 6. Resultado de la clusterización litológica.

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 Goyllarisquiza), 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.

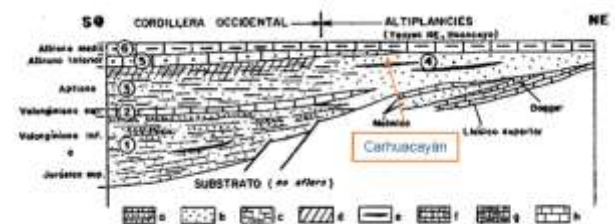


Figura 7. Sección esquemática de la distribución de algunas unidades del cretácico en el centro del Perú: 1) Fm Chimú y Oyón; 2) Fm Santa; 3) Carhuaz; 4) Fm Goyllarisquiza; 5) Fm Parahuancza; 6) Fm Chólec; a) cuarcitas; b) areniscas; c) areniscas y lutitas; d) capas rojas; e) lenfés de carbón; f) calizas arenosas; g) 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.

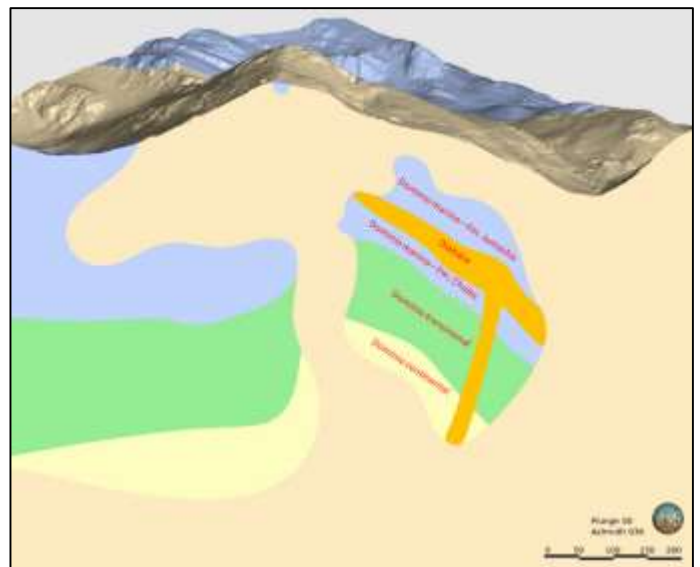


Figura 8. Modelo de Dominios estratigráficos de La Tapada.

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.