

DOI: https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v6i6.3669

Teledetección hiperespectral y exploración geológica para la configuración de modelos geometalúrgicos en sistemas hidrotermales

Mario Domínico Rodríguez Delgado

mario.rodriguez8@unmsm.edu.pe

<https://orcid.org/0000-0001-7621-4214>

Alumno de la Unidad de Posgrado.

Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica.

Universidad Nacional Mayor de San Marcos.

Unidad de Posgrado. Av. Venezuela cuadra 34 s/n, Ciudad

Universitaria, Lima, Perú.

Orlando Alex Siccha Ruiz

orlando.siccha@unitru.edu.pe

<https://orcid.org/0000-0002-0638-2391>

Docente de la escuela de Ing. de Minas

Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Trujillo, Av. Juan

Pablo II s/n – Ciudad Universitaria, Trujillo, Perú.

RESUMEN

Los sistemas hidrotermales desarrollan ensamblajes minerales complejos y las leyes, mineralogía, textura y naturaleza petrológica se distribuyen de forma muy heterogénea en el macizo. Estos minerales pueden identificarse en superficie utilizando teledetección hiperespectral, caracterizando alteraciones hidrotermales, litologías, estructuras tectónicas, halos geoquímicos de áreas extensas, más rápido y a menos costo. Esta investigación tiene como objetivos: (1) Describir como las técnicas hiperespectrales aplicadas a la moderna geometalurgia permiten operaciones mineras más resilientes, (2) Evaluar las técnicas hiperespectrales como herramientas de identificación de mineralogías complejas en sistemas hidrotermales; (3) Resaltar el enfoque geometalúrgico en los mecanismos de toma de decisiones en una empresa minera. Esta investigación de revisión ha sido elaborada luego una búsqueda bibliográfica sistemática con operadores booleanos en las bases de datos Scopus, Springer, Web of Science, Science Direct, Scielo, estableciéndose como criterios de selección información en inglés de la última década sobre las variables. Los resultados muestran que la teledetección hiperespectral, permite la definición de patrones mineralógicos, dominios de conminución y situaciones problema en pilas de lixiviación influyendo en la reducción significativa del CAPEX y OPEX, optimizando la conversión de recursos en reservas al identificar en tiempo real complejas mineralogías y alteraciones, parámetros decisivos en la configuración de modelos geometalúrgicos.

Palabras clave: *teledetección hiperespectral; geometalurgia; sistemas hidrotermales*

Correspondencia: mario.rodriguez8@unmsm.edu.pe

Artículo recibido 10 octubre 2022 Aceptado para publicación: 10 noviembre 2022

Conflictos de Interés: Ninguna que declarar

Todo el contenido de **Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar**, publicados en este sitio están disponibles bajo

Licencia [Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) 

Cómo citar: Rodríguez Delgado, M. D., & Siccha Ruiz, O. A. (2022). Teledetección hiperespectral y exploración geológica para la configuración de modelos geometalúrgicos en sistemas hidrotermales. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 6(6), 2142-2158. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v6i6.3669

Hyperspectral remote sensing and geological exploration for the configuration of geometallurgical models in hydrothermal systems

ABSTRACT

Hydrothermal systems develop complex mineral assemblages and the grades, mineralogy, texture and petrological nature are very heterogeneously distributed in the massif. These minerals can be identified at surface using hyperspectral remote sensing, characterizing hydrothermal alterations, lithology, tectonic structures, geochemical halos of large areas, faster and at less cost. The objectives of this research are: (1) To describe how hyperspectral techniques applied to modern geometallurgy enable more resilient mining operations, (2) To evaluate hyperspectral techniques as tools to identify complex mineralogy in hydrothermal systems, (3) To highlight the geometallurgical approach in the decision making mechanisms of a mining company. This review research has been elaborated after a systematic bibliographic search with Boolean operators in the databases Scopus, Springer, Web of Science, Science Direct, Scielo, establishing as selection criteria information in English of the last decade on the variables. The results show that hyperspectral remote sensing allows the definition of mineralogical patterns, comminution domains and problem situations in leaching heaps, influencing the significant reduction of CAPEX and OPEX, optimizing the conversion of resources into reserves by identifying in real time complex mineralogy and alterations, decisive parameters in the configuration of geometallurgical models.

Keywords: *hyperspectral remote sensing; geometallurgy; hydrothermal systems.*

INTRODUCCION

La teledetección hiperespectral, viene de una larga historia de perfeccionamiento y evaluación, su progreso requirió desarrollos en electrónica, computación y software en la década 80 y 90 (Goetz, 2009). Los sensores hiperespectrales (HS), miden la energía reflejada, la recogen en bandas del espectro electromagnético y lo muestran en curvas espectrales y perfiles HD (Asadzadeh & Filho, 2016), Cada píxel capturado contiene espectros de reflectancia en rangos de resolución nanométrica. En geología, el rango espectral va desde 350 a 14,500 nm de longitud de onda, cubriendo el VNIR (350–1000 nm), SWIR (1000–2500 nm), el menos común MWIR (2500–6000 nm) y TIR (6000–14500 nm), registrando texturas de alteraciones hidrotermales (Merrill-Cifuentes, Cracknell, & Escolme, 2022). (figura 1).

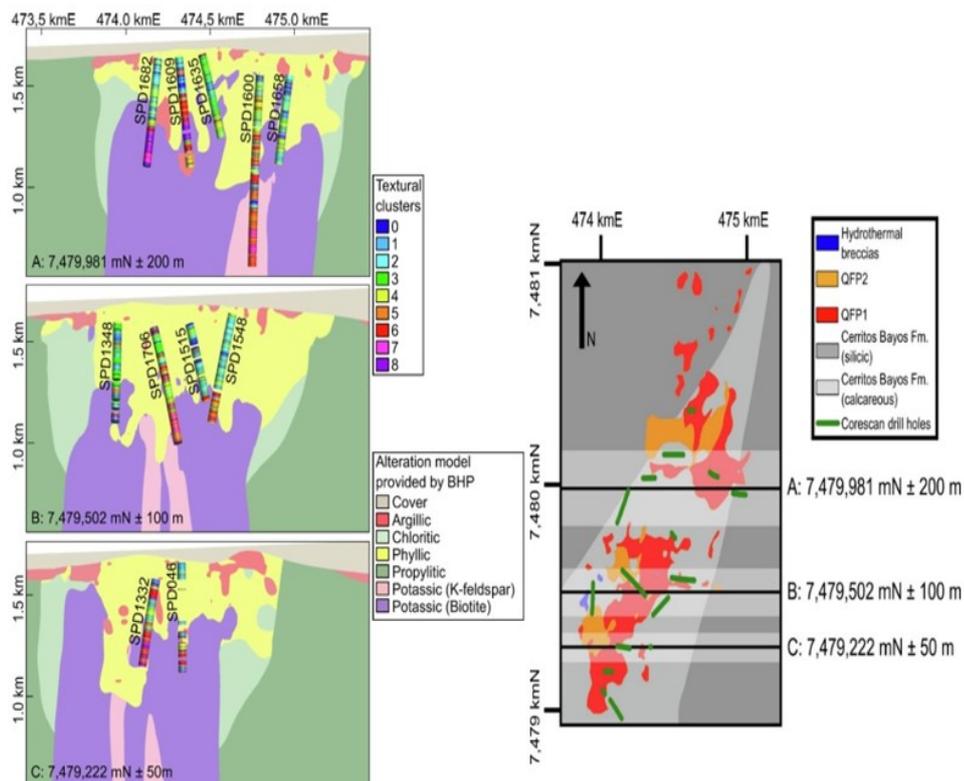


Figura 1. Secciones transversales A, B y C en mina Spence que muestran grupos de texturas en el subsuelo con un modelo de alteración del background. Nota fuente: Adaptado de Merrill-Cifuentes, J., Cracknell, M. J., & Escolme, A. (2022). Unsupervised textural classification of rocks in large imagery datasets. *Minerals Engineering*, 180. doi: 10.1016/j.mineng.2022.107496

Las técnicas de teledetección hiperespectral, se utilizan para detectar patrones mineralógicos, aspecto clave en el entendimiento de procesos geológicos en general y de sistemas minerales en particular (Holliday y Cooke, 2007, Sillitoe y Thompson, 2006, Van

der Meer et al., 2012, Wyborn et al., 1994). Los sistemas hidrotermales desarrollan ensamblajes minerales primarios y secundarios debido a las interacciones entre rocas y fluidos (Pirajno, 2009). Dichos minerales se identifican y mapean con imágenes hiperespectrales y sensores remotos térmicos que complementan la exploración geológica (Rodríguez-Gomez, et al., 2021). Asimismo, Asadzadeh & Filho, (2016) resaltan que, el estudio de patrones petrológicos y mineralógicos requieren metodologías efectivas y prácticas como las técnicas hiperespectrales que evidencian un gran potencial para mostrar la fisicoquímica de las menas no solo en sistemas hidrotermales, sino también en dominios metamorfoseados, metasomatizados y sedimentarios (Cudahy et al., 2008, Duke, 1994, Herrmann et al., 2001, Kurz et al., 2012, Laukamp et al., 2011, Sgavetti et al., 2006, Thompson et al., 1999).

La exploración minera evidencia complejidad por: yacimientos profundamente enterrados con creciente disminución de leyes, geometrías y texturas internas enrevesadas, procesamiento de minerales con complicaciones refractarias, cantidades de desechos, mayores costos de energía, condiciones ambientales y sociales más estrictas, así como volatilidad del mercado de materias primas, es cuando el enfoque de las técnicas hiperespectrales aplicadas a la geometalurgia mitigan o eliminan estos desafíos de la industria extractiva (Bayraktar 2014; Parían 2017). En magnitud al aumento de la complejidad de los yacimientos recién descubiertos y desarrollados, la concepción de geometalurgia se disemina en nuevas direcciones y enfrenta nuevos desafíos, mostrando más perspectivas dentro de un enfoque holístico de la minería (Lang, Ellefmoy, & aasly, 2018). La geometalurgia vincula la geología, el procesamiento de minerales, la economía y criterios socio ambientales en la cadena de valor de la mina para construir un modelo de gestión de la producción cuantificando la incertidumbre y la variabilidad (Dominy, et al., 2018). Numerosos minerales en rocas alteradas, relevantes para la exploración, pueden identificarse como respuestas únicas en regiones específicas del espectro; los minerales de silicato y carbonato presentes en rocas tienen características de reflectancia entre 8,0 y 14,0 μm y permiten delinear zonas mineralizadas, alteraciones hidrotermales, anomalías térmicas y características tectónicas (Aslett, Taranik, & Riley, 2018). Los datos VNIR e SWIR, permiten la detección de sulfatos (alunita, jarosita, yeso), filosilicatos (caolinita, montmorillonita, illita, micas) y

carbonatos (calcita, siderita) (Calvin et al., 2015; Kereszturi et al., 2020; Swayze et al., 2014; van der Meer et al., 2018; Zhang y Li, 2014). La sílice, ópalo y cuarzo tienen características de absorción particulares en la región LWIR, también detectables con sensores hiperespectrales (Aslett et al., 2018; Feng et al., 2018) (figura 2).

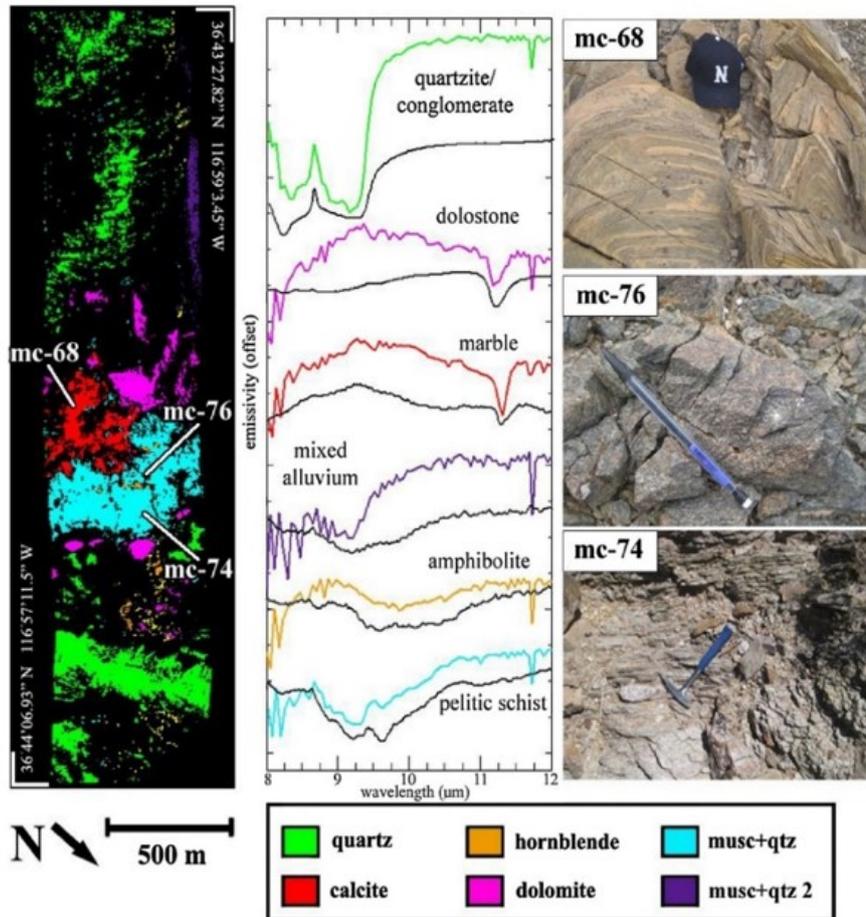


Figura 2. Izquierda, mapa espectral de cuarzo, moscovita, mármol, dolomita, esquisto pelítico y anfibolita. Centro, espectros de muestras mapeadas. Derecha, imágenes áreas del mapa espectral. Nota Fuente Aslett, et al., (2018). Mapping rock forming minerals at Boundary Canyon, Death Valey National Park, California, using aerial SEBASS thermal infrared hyperspectral image data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 64, 326-339. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jag.2017.08.001>

La geología ha usado tecnología de detección remota desde su aparición, inicialmente el escáner multispectral Landsat, brindó técnicas de relación de banda y análisis selectivo de componentes principales para generar imágenes de óxidos e hidroxilos en alteraciones hidrotermales. El Radiómetro Avanzado de Emisión Térmica y Reflectancia Espacial (ASTER) brindó mapas cualitativos de arcillas (caolinita, illita), sulfatos (alunita), carbonatos (calcita, dolomita), óxidos de hierro (hematita, goethita) y sílice (cuarzo)

permitiendo mapear facies de alteración propilítica, argílica, etc. El paso hacia el mapeo mineralógico cuantitativo se dio con el advenimiento de la teledetección hiperespectral de alta resolución (Meer, et al., 2012). Otro elemento clave para el desarrollo de esta tecnología ha sido, los algoritmos de corrección atmosférica que permiten reducir la radiación del sensor a reflectancia espectral cubriendo así disciplinas en ámbitos hídricos y terrestres (Goetz, 2009). En el campo mineralógico, brinda una vista gráfica de patrones de distribución espacial de un área, al concentrarse en los isovalores de distribución de feldespatos que analizados como geotermómetros puede ayudar a reconstruir la historia térmica de esa área y constituirse en un elemento de vectorización (Hecker, Meijde, & Meer, 2010).

La teledetección hiperespectral aplicada a programas geometalúrgicos es un enfoque nuevo, los avances recientes en ámbitos de la mineralogía automatizada, técnicas analíticas, pruebas metalúrgicas y de procesamiento de datos han generado su progresiva viabilidad (Lishchuk & Pettersson, 2020), las cuales combinadas con una verificación sólida del terreno, son un complemento útil para los programas geometalúrgicos en minera (Barton, et al., 2021), y aplicadas a núcleos de perforación son una herramienta valiosa para optimizar las operaciones de procesamiento y en toda la cadena de valor de la mina (Johnson, Browning, & Pendock, 2019) también para la integración de conjuntos de datos geoespaciales multidimensionales que permiten comprender la extensión y profundidad de los cuerpos geológicos (Liu, Carranza, & Xia, 2022). Por otro lado, se sabe que las concentraciones minerales en la corteza son extremadamente bajas y muy variables, resultando en particularidades heterogéneas y los metales preciosos suelen presentarse en formas únicas unidas muchas veces a petrologías complejas lo que hace que su procesamiento sea desafiante (Zhou, Dymov, & Li, 2019). La teledetección hiperespectral facilita la comprensión cuantitativa de estas complejidades que pueden ser incorporadas a modelos y programas geometalúrgicos (Boogaart & Tolosana-Delgado, 2018). (figura 3)

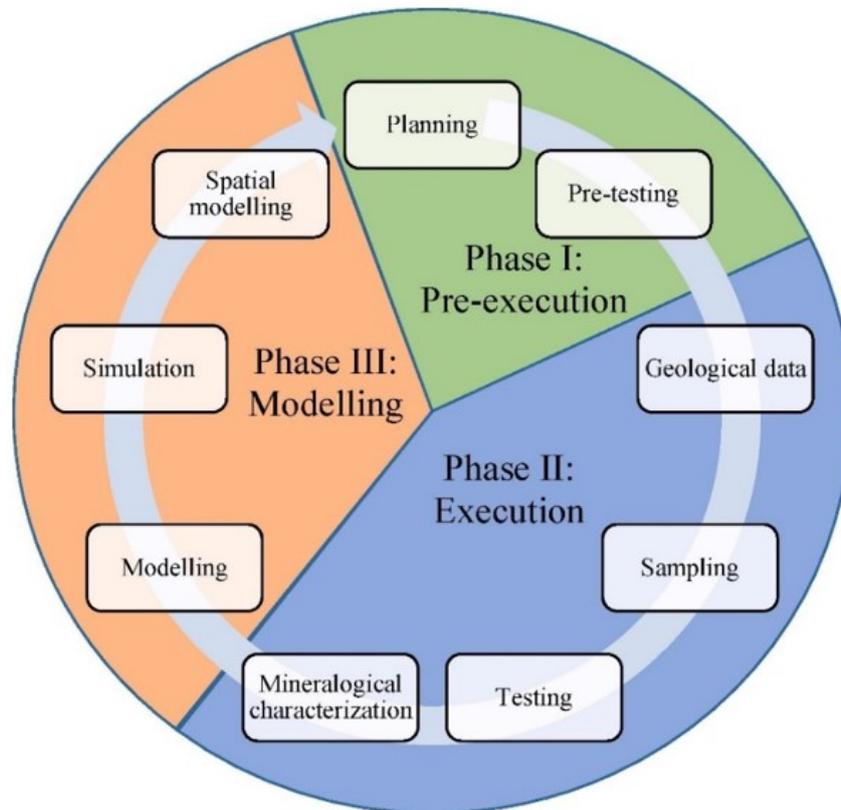


Figura 3. Elementos de un Programa geometalúrgico – enfoque PREP Nota
Fuente: adaptado de Lishchuk, V., Koch, P.-H., Ghorbani, Y., & Butcher.,
A. R. (2020). Towards integrated geometalurgical approach: Critical review
of current practices and future trends. *Minerals Engineering*, 145.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2019.106072>

METODOLOGIA

Con el fin de lograr los objetivos propuestos se ha llevado a cabo una revisión bibliográfica de la literatura científica de las dos últimas décadas sobre los fundamentos, la naturaleza y la interpretación de datos hiperespectrales aspectos que conforman un método preciso de exploración e identificación mineral eficaz en la configuración de modelos geometalúrgicos. Esta investigación es una investigación de revisión de corte no experimental de alcance descriptivo y diseño transversal-causal (Sampieri, 2014), que analiza datos relevantes de sensores hiperespectrales (HS) de núcleos de perforación. Se muestra que el enfoque geometalúrgico es beneficioso para evaluar la variabilidad geológica, mineralógica y de procesamiento dentro de un depósito (Tungpalan, Wightman, Keeney, & Manlapig, 2021).(figura 4)

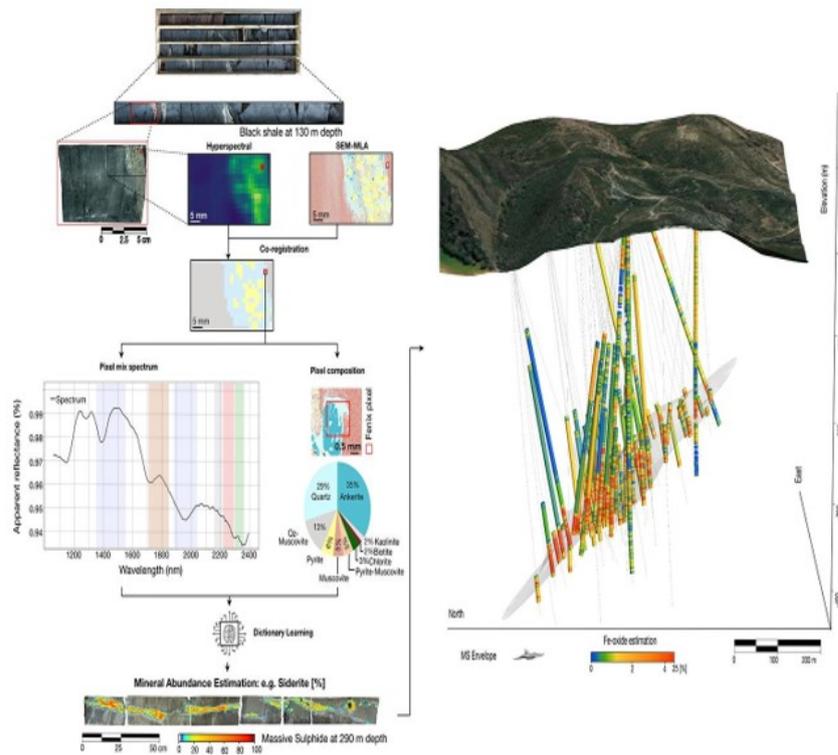


Figura 4. Metodología de la toma, análisis y procesamiento de la información desde la adquisición de datos básicos de HS hasta la representación 3D. Nota Fuente adaptado de Rosa, et al., (2021). Mineral quantification at deposit scale using drill-core hyperspectral data: A case study in the Iberian Pyrite Belt. *Ore Geology Reviews*, 139(Part B), 104514. doi:<https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2021.104514>

RESULTADOS Y DISCUSION

Las técnicas hiperespectrales permiten mapear la distribución de los diferentes tipos de minerales espectralmente activos en afloramientos, macizos, vertederos, plataformas de lixiviación etc. Arcillas, carbonatos y sulfatos se muestran particularmente bien y aspectos problemáticos como la distribución de minerales cianicidas consumidores de ácidos y de arcillas expansivas en pilas de lixiviación son perfectamente identificables (Barton, et al., 2021) incluidos filosilicatos que presentan problemas debido a los distintos tipos de sustitución de Al, Mg, Fe en su estructura tetraédrica (Donoso Droguett, 2020). La teledetección de objetivos desde plataformas o vehículos aéreos no tripulados, requiere un enfoque multidimensional para mejorar su precisión, incluida la mitigación de incertidumbres causadas por el modelado ineficiente de parámetros atmosféricos (Jha, Nidamanuri, & Ientilucci, 2022). Los píxeles hiperespectrales de baja resolución espacial requieren la resolución de sus componentes espectrales o subpíxeles, esta tecnología se basa en que un píxel se compone de respuestas de varios materiales, lo que genera una firma combinada en el espectro reflejado. (Soydan, Koz, & Düzgün, 2019).

Los modelos geometalúrgicos albergan datos a partir de técnicas de modelado multifractal y ponderación espacial que permiten visualizar sondajes, secuencias sedimentarias, unidades litológicas y sus límites finitos (figura 5) aunque no necesariamente estén bien definidas pues la meteorización mecánica, química y física pueden producir convergencia o divergencia de minerales así como las litologías sedimentarias pueden confundir pues diferentes formaciones tienen tipos de rocas similares (Aslett, Taranik, & Riley, 2018).

Las técnicas hiperespectrales permiten entender cuantitativamente las microestructuras que se constituyen en el principal problema en el procesamiento de minerales e influyen directamente en la definición de parámetros de molienda y conminución los cuales a su vez tienen directa incidencia en el gasto de insumos que puede representar hasta el 40% del OPEX de una operación minera y dentro del proceso de molienda el gasto de insumos pueden reflejar hasta el 45% de los costos de operación es así que el tipo de intercrecimiento de los minerales condiciona fuertemente la molienda necesaria e influye fuertemente en los valores económicos que buscan lograr para lograr una liberación suficiente (Boogaart & Tolosana-Delgado, 2018).

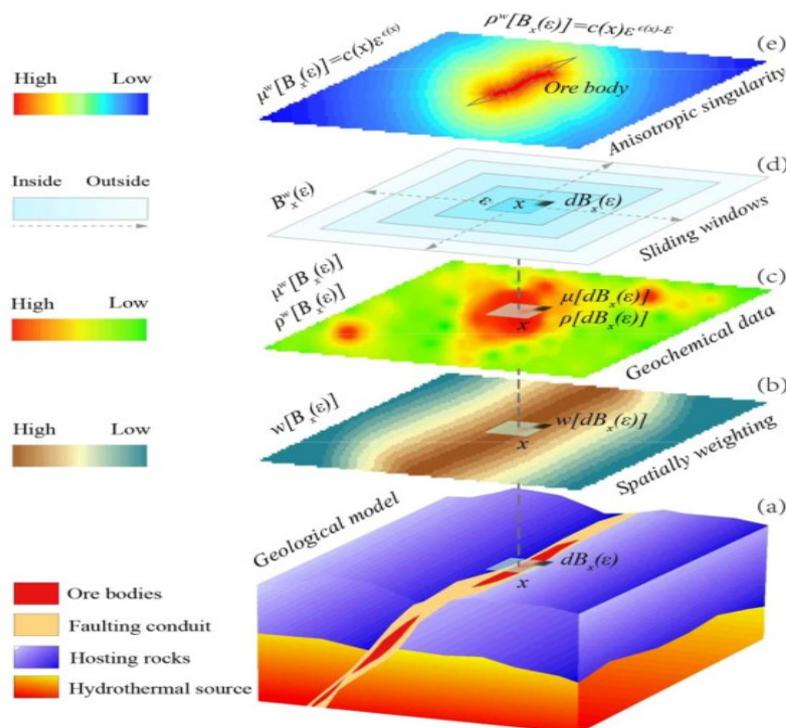


Figura 5. Modelo conceptual multifractal y ponderación espacial de datos hiperespectrales Nota fuente Xiao, F., Wang, K., Hou, W., & Erten., O. (2020). Identifying geochemical anomaly through spatially anisotropic singularity mapping: A case study from silver-gold deposit in Pangxidong district, SE China. *Journal of Geochemical Exploration*, 210(106453). doi:<https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2019.106453>

Teledetección hiperespectral de pórfidos de Cobre (PCD)

La teledetección óptica instrumental de rocas alteradas asociadas a PCD abarca los últimos 40 años de exploración e investigación espectroscópica. Dos clases de sistemas de imágenes, los multispectrales espaciales y los hiperespectrales aerotransportados, se han utilizado principalmente para cartografiar rocas alteradas hidrotérmicamente asociadas a PCDs. Los datos ASTER SWIR tienen suficiente resolución espectral para ilustrar diferentes firmas espectrales para ensamblajes de minerales argílicos avanzados (alunita-caolinita), seríticos (moscovita), propílicos (epidotachlorita-calcita), y supergénicos (figura 6).

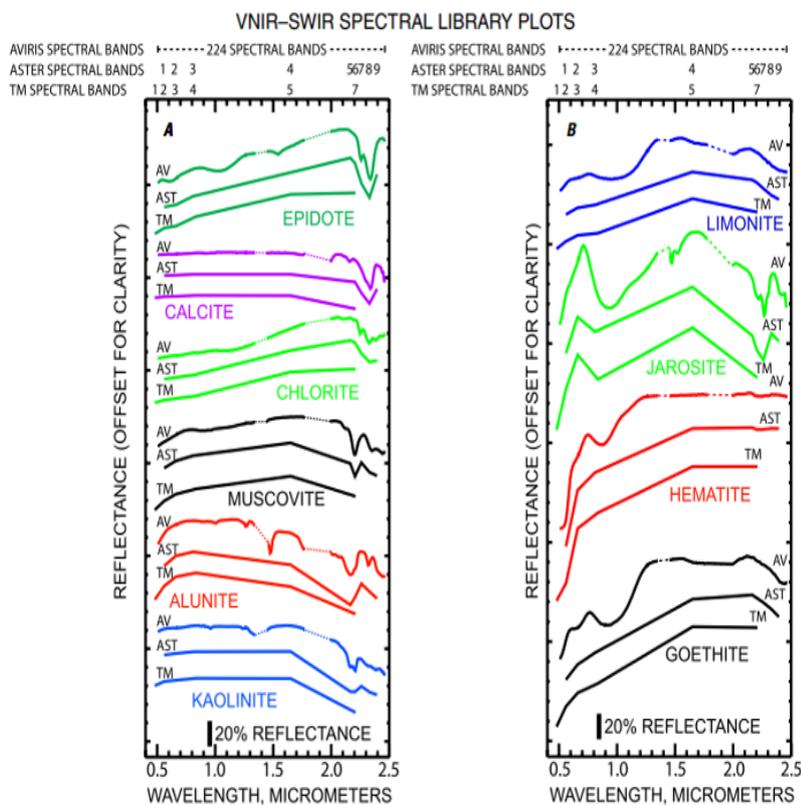


Figura 6. (A) Pares espectrales de epidota, calcita, muscovita, caolinita, clorita y alunite. Las líneas discontinuas en los espectros de AVIRIS representan regiones espectrales de absorción atmosférica. (B) Pares espectrales de limonita, jarosita, hematita y goethita. Las líneas discontinuas en los espectros de AVIRIS representan regiones espectrales de absorción atmosférica. Nota Fuente: Mars, J. C. (2010). VNIR-SWIR and TIR Remote Sensing of Porphyry. In D. John, R. Ayuso, M... P. Taylor Ryan and Vikre, Porphyry Copper Deposit Model. Virginia: Geological Survey Scientific Investigations. Retrieved from <https://pubs.usgs.gov/sir/2010/5070/b/>

Las relaciones de las bandas SWIR de ASTER, (5+7) /6 y (7+9) /8, se han utilizado para mapear la absorción de Al-OH en las rocas sericíticas y la absorción de CO₃ en las rocas propilitizadas, respectivamente. Algoritmos han utilizado las relaciones de banda ASTER 4/6, 5/6 y 7/6 para cartografiar las rocas sericíticas y argílicas avanzadas. La alteración sericítica y argílica avanzada y los minerales supergénicos caolinita y jarosita de los PCD se han cartografiado utilizando datos ASTER VNIR-SWIR (Mars, 2010). También se usa para caracterizar la corteza terrestre y se define utilizando cinco criterios: (1) color en VNIR (infrarrojo cercano visible) y SWIR (infrarrojo de onda corta); (2) diferencia en la textura (3) rugosidad (4) ángulo de inclinación (5) dirección de inclinación. En el Pacífico sur estos criterios reflejan las variaciones en las superficies regionales, así como en el registro de características de mayor escala. Las texturas de las superficies se caracterizan mediante diferentes patrones de drenaje y rasgos tectónicos como las escarpas de fallas (Figura 7). El mapa de elevaciones registra el ángulo deposicional, las descargas de agua, la acumulación de sedimentos, los mecanismos de transporte y los eventos de inclinación posteriores que moldean los estratos sedimentarios (Evenstar, et al., 2017).

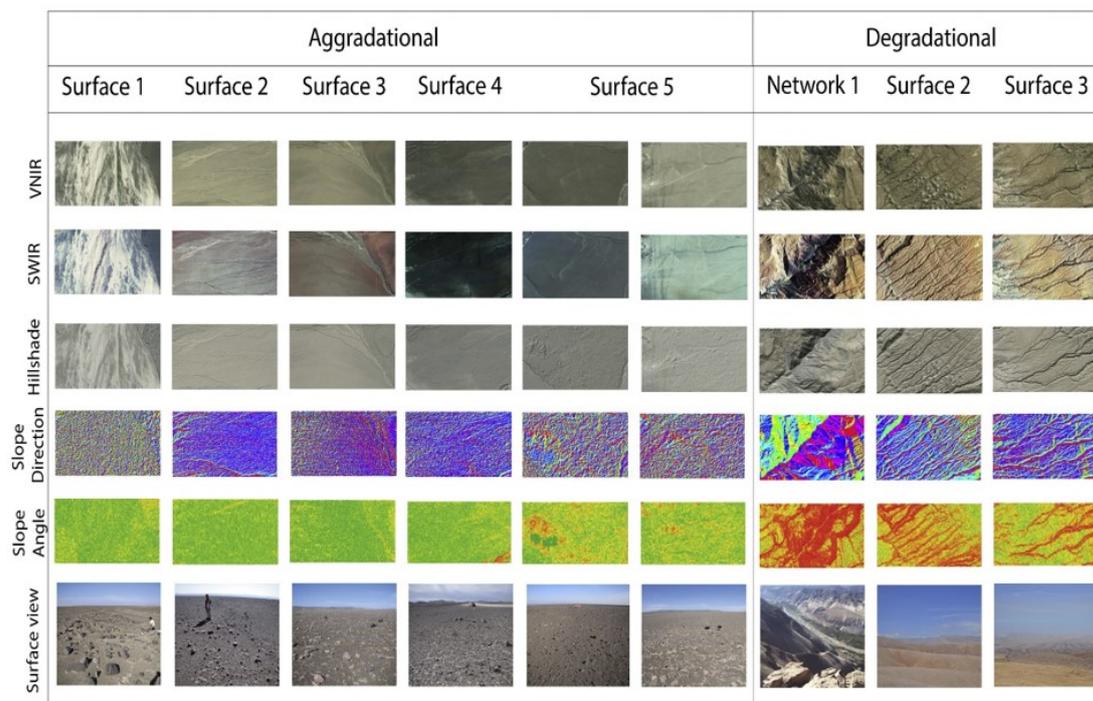


Figura 7. Imágenes hiperespectrales en la caracterización de la corteza terrestre. Superficies agradativas (1-5) y degradativas (red 1 y superficies 2 y 3). VNIR = Banda 7 (2,1-2,35 μm), Verde: Banda 4 (0,75- 0,9 μm), Azul: Banda 2 (0,53-0,61 μm). SWIR = datos satelitales de infrarrojo de onda corta. Nota fuente: Evenstar, et al., (2017). Geomorphology on geologic timescales: Evolution of the late Cenozoic Pacific paleo surface in Northern Chile and Southern Peru. Earth-Science Reviews, 171, 1-27. doi:https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.04.004

Zhou, sostiene que la geometalurgia es una técnica para documentar la variabilidad dentro de un yacimiento y cuantificar y evaluar el impacto de muchos factores, incluida la geología y la mineralogía en los procesos de molienda, flotación, lixiviación y recuperación de metales, mientras que la mineralogía es una de las principales herramientas de predicción y resolución de problemas para muchos proyectos minerales nuevos. y explotación de minas (Zhou, Dymov, & Li, 2019).

El análisis de singularidad anisotrópica, también conocido como mapeo de singularidad ponderada espacialmente que se desarrolló mediante modelado multifractal y ponderación espacial puede incorporar la información anisotrópica de la dirección y rango de variabilidad espacial, que contiene características de control geológico, en el análisis de peculiaridad de las variables en diferentes conjuntos de datos geoespaciales, como datos geoquímicos, geofísicos, geoespaciales y de teledetección (Xiao, Wang, Hou, & Erten., 2020).

Se han divulgado mucho sobre cómo elaborar modelos geometalúrgicos desde una perspectiva técnica. Sin embargo, existe una gran brecha en la percepción de la implementación de la geometalurgia en la producción la cual podría evolucionar hacia un nuevo enfoque de manejo de la variabilidad en el proceso. Además, es un enfoque que busca constantemente nuevas soluciones que no están disponibles y que no son fácilmente aceptables para la geología tradicional, el procesamiento de minerales y la ingeniería minera. Posiblemente, se beneficiará o incluso se fusionará en cierta medida con la automatización, la optimización de procesos, el análisis de datos y la realidad virtual. El nombre de geometalurgia podría cambiar en el futuro, para reflejar más el área extendida de su aplicación (Lishchuk, Koch, Ghorbani, & Butcher., 2020).

CONCLUSIONES

Un programa geometalúrgico fundamentado en aportes multidisciplinarios para predecir el procesamiento, rendimiento y resiliencia de una operación minera, puede ser concebido por valiosos datos de pixeles hiperespectrales para la caracterización cuantitativa de la variabilidad e incertidumbre en etapas clave de la cadena de valor de un yacimiento mineral.

La incorporación de técnicas hiperespectrales de caracterización petrológica y mineralógica, implica la gestión e integración de grandes volúmenes de datos y de los correspondientes ajustes atmosféricos. Esta información contenida en las imágenes se

debe reducir a formatos de hoja de cálculo estándar mediante inspección, evaluación y etiquetado (Merrill-Cifuentes, Cracknell, & Escolme, 2022) (figura 8)

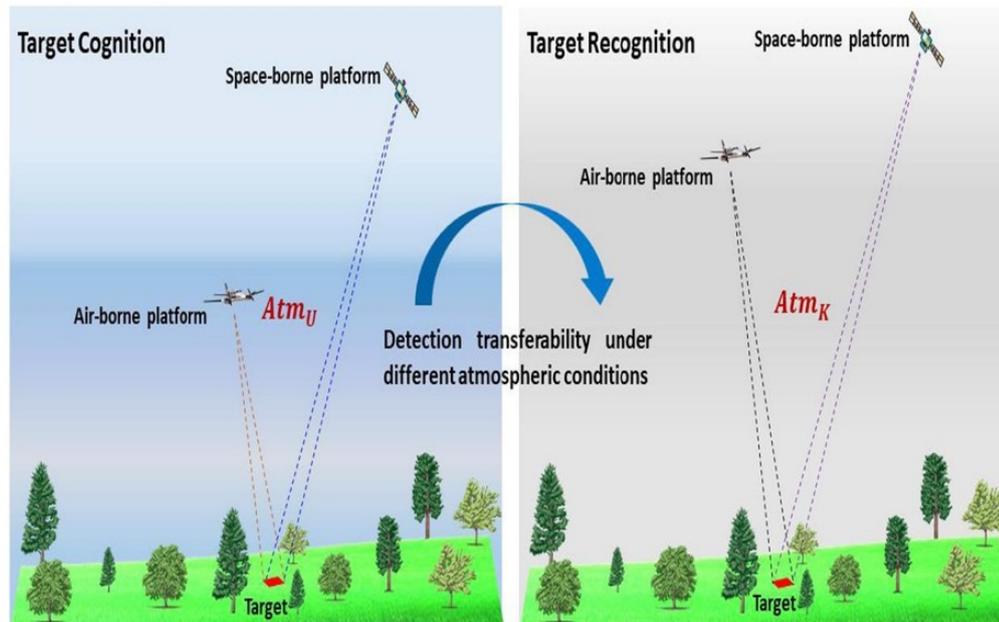


Figura 8. Dos escenarios diferentes de detección de objetivos en el espacio-tiempo, con diferentes condiciones atmosféricas (Atm_U y Atm_K) lo que conduce a un posible desajuste de los parámetros atmosféricos. Nota fuente: Jha, S. S., Nidamanuri, R. R., & Ientilucci, E. J. (2022). Influence of atmospheric modeling on spectral target detection through forward modeling approach in multi-platform remote sensing data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 183, 286-306. doi:<https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2021.11.011>

Los datos hiperespectrales deben servir para concebir un modelo de bloques dejando de lado la tradición donde, los datos espectrales eran interpretados como contenido mineral y luego interpolados con criterios de estimación, esta solución aprovecha un número limitado de datos, es decir, provee una información parcial o incompleta. El enfoque geometalúrgico permite aprovechar toda la información espectral en un modelo 3D, lo cual facilita el procesamiento e interpretación multivariada de los datos plasmado en el modelo de bloques (Donoso Droguett, 2020).

El enfoque geometalúrgico basado en técnicas de teledetección hiperespectral se pueden aplicar a una variedad de depósitos pues normalmente los minerales se asocian a minerales de alteración reconocibles con sensores hiperespectrales y a medida que la probabilidad de encontrar nuevos yacimientos minerales en superficie o cerca de ella disminuye, el modelado geológico 3D basado en estas técnicas se realiza con mayor frecuencia para explorar depósitos minerales ciegos (Liu, Carranza, & Xia, 2022).

El futuro de las técnicas hiperespectrales como estrategias de exploración en todo tipo de yacimientos para la ubicaciones espectrales-espaciales se analizarán con técnicas de aprendizaje automático y supervisado integralmente por algoritmos de desmezcla no lineal, y se realizarán clasificaciones litológicas automáticas integradas con métodos estocásticos 3D (Rosa, et al., 2021).

Acrecentando la naturaleza multidisciplinaria de la geometalurgia. Surgirá una nueva generación de profesionales con diferentes habilidades técnicas en minería. La responsabilidad corporativa, particularmente para las empresas públicas, seguirá aumentando, por lo que la geometalurgia debería incorporarse en última instancia a los códigos de informes internacionales (Dominy, et al., 2018).

REFERENCIAS

- Asadzadeh, S., & Filho, C. R. (2016). A review on spectral processing methods for geological remote sensing. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 47, 69-90. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jag.2015.12.004>
- Aslett, Z., Taranik, J. V., & Riley, D. N. (2018). Mapping rock forming minerals at Boundary Canyon, Death Valey National Park, California, using aerial SEBASS thermal infrared hyperspectral image data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 64, 326-339. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jag.2017.08.001>
- Barton, I. F., Gabriel, M. J., Lyons-Baral, J., Barton, M. D., Duplessis, L., & roberts, C. (2021). Extending geometallurgy to the mine scale with hyperspectral imaging: a pilot study using drone- and ground-based scanning. *Mining, Metallurgy & Exploration*, 38(2), 799-818. doi:10.1007/s42461-021-00404-z
- Boogaart, v. d., & Tolosana-Delgado. (2018). Predictive Geometallurgy: An Interdisciplinary Key Challenge for Mathematical Geosciences. En B. Daya Sagar, Q. Cheng, & F. Agterberg, *Handbook of Mathematical Geosciences: Fifty Years of IAMG* (págs. 673-686). Springer International Publishing. doi:10.1007/978-3-319-78999-6_33
- Dominy, S. C., O'Connor, L., Parbhakar, Fox, A., Vidrio, J., H., & Purevgerel, S. (2018). Geometallurgy—A Route to More Resilient Mine Operations. *Minerals*, 8(12). doi:<https://doi.org/10.3390/min8120560>

- Donoso Droguett, G. A. (2020). *Modelamiento geometalúrgico de recuperación de cobre incorporando datos espectrales*. Tesis para optar al grado de Magíster en Minería, Santiago de Chile. Retrieved from <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/176633>
- Evenstar, L., Mather, A., Hartley, A., Stuart, F., Sparks, R., & Cooper, F. (2017). Geomorphology on geologic timescales: Evolution of the late Cenozoic Pacific paleosurface in Northern Chile and Southern Peru. *Earth-Science Reviews*, *171*, 1-27. doi:<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.04.004>
- Goetz, A. F. (2009). Three decades of hyperspectral remote sensing of the Earth: A personal view. *Remote Sensing of Environment*, *113*(1), S5-S16. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rse.2007.12.014>
- Hecker, C., Meijde, M. v., & Meer, F. D. (2010). Thermal infrared spectroscopy on feldspars — Successes, limitations and their implications for remote sensing. *Earth-Science Reviews*, *103*(1-2), 60-70. doi:<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2010.07.005>
- Jha, S. S., Nidamanuri, R. R., & Ientilucci, E. J. (2022). Influence of atmospheric modeling on spectral target detection through forward modeling approach in multi-platform remote sensing data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, *183*, 286-306. doi:<https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2021.11.011>
- Johnson, C. L., Browning, D. A., & Pendock, N. E. (2019). Hyperspectral Imaging Applications to Geometallurgy: Utilizing Blast Hole Mineralogy to Predict Au-Cu Recovery and Throughput at the Phoenix Mine, Nevada. *Economic Geology*, *114*(8), 1481-1494. doi:<https://doi.org/10.5382/econgeo.4684>
- Lang, A. M., Ellefmoy, S. L., & aasly, k. (2018). Geometallurgical Flowsheet as a Tool for Designing and Communicating Geometallurgical Programs. *Minerals*, *8*(9). doi:10.3390/min8090372
- Lishchuk, V., & Pettersson, M. (2020). The mechanisms of decision-making when applying geometallurgical approach to the mining industry. (Springer, Ed.) *Mineral Economics*, *34*(1), 71-80. doi:10.1007/s13563-020-00220-9
- Lishchuk, V., Koch, P.-H., Ghorbani, Y., & Butcher., A. R. (2020). Towards integrated geometallurgical approach: Critical review of current practices and future trends. *Minerals Engineering*, *145*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2019.106072>

- Liu, Y., Carranza, E. J., & Xia, Q. (2022). Developments in Quantitative Assessment and Modeling of Mineral Resource Potential: An Overview. *Natural Resources Research*, 31(4), 1825-1840. doi:10.1007/s11053-022-10075-2
- Mars, J. C. (2010). VINR-SWIR and TIR Remote Sensing of Porphyry. In D. John, R. Ayuso, M. Barton, R. Blakely, R. Bodnar, J. Dilles, . . . P. Taylor Ryan and Vikre, *Porphyry Copper Deposit Model*. Virginia: Geological Survey Scientific Investigations. Retrieved from <https://pubs.usgs.gov/sir/2010/5070/b/>
- Meer, F. D., Werff, H. M., Ruitenbeek, F. J., Hecker, C. A., Wim H. Bakker, M. F., Meijde, M. v., . . . Woldai, T. (2012). Multi- and hyperspectral geologic remote sensing: A review. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 4(1), 112-128. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jag.2011.08.002>
- Merrill-Cifuentes, J., Cracknell, M. J., & Escolme, A. (2022). Unsupervised textural classification of rocks in large imagery datasets. *Minerals Engineering*, 180. doi:10.1016/j.mineng.2022.107496
- Pirajno, F. (2009). *Skarn Systems. geological survey of western, Australia. Hydrothermal processes and mineral System*. Springer Science.
- Rodríguez-Gomez, C., Kereszturi, G., Reeves, R., Rae, A., Pullanagari, R., Jeyakumar, P., & Procter, J. (2021). Lithological mapping of Waiotapu Geothermal Field (New Zealand) using hyperspectral and thermal remote sensing and ground exploration techniques. *Geothermics*, 96(102195). doi:<https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2021.102195>
- Rosa, R. D., Khodadadzadeh, M., Tusa, L., Kirsch, M., Gisbert, G., Tornos, F., . . . Gloaguen, R. (2021). Mineral quantification at deposit scale using drill-core hyperspectral data: A case study in the Iberian Pyrite Belt. *Ore Geology Reviews*, 139(Part B), 104514. doi:<https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2021.104514>
- Sampieri, R. H. (2014). *Metodología de la Investigación*. Mexico D:F: McGraw-Hill / Interamericana Editores, S.A.
- Soydan, H., Koz, A., & Düzgün, Ş. (2019). Identification of hydrocarbon microseepage induced alterations with spectral target detection and unmixing algorithms. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 74, 209-221. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.08.001>

- Tungpalan, K., Wightman, E., Keeney, L., & Manlapig, E. (2021). A geometallurgical approach for predicting separation performance. *Minerals Engineering*, 171. doi:<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.107065>
- Xiao, F., Wang, K., Hou, W., & Erten., O. (2020). Identifying geochemical anomaly through spatially anisotropic singularity mapping: A case study from silver-gold deposit in Pangxidong district, SE China. *Journal of Geochemical Exploration*, 210(106453). doi:<https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2019.106453>
- Zhou, Dymov, & Li. (2019). Geometallurgy and mineralogy of precious metal ores: Importance and application in process selection and plant optimization. *IMPC 2018 - 29th International Mineral Processing Congress* (págs. 220-229). Moscow: Elsevier. Obtenido de <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85059357177&origin=resultlist>