

Résumé

Le skarn a un type de minéralisation relativement simple, définie par des minéraux calcosilicatés tels que le grenat et le pyroxène. Les gisements se forment au cours d'événements de contact et par une variété de processus métasomatiques impliquant des fluides d'origine magmatique, métamorphique ou météorique. Ces gisements sont les sources les plus importantes de tungstène, de cuivre, et une source considérable de fer, de molybdène, de plomb et de zinc.

Les études de vectorisation dans les gisements minéraux cherchent à obtenir des informations permettant de caractériser les paleo-directions possibles des fluides hydrothermaux, ainsi que les gradients chimiques et thermiques entre différents centres minéralisés. Dans le cas des skarns distaux, l'intrusion causative de la minéralisation ne peut pas être définie. La caractérisation de ces possibles vecteurs chimiques et minéralogiques permet de pointer vers des zones de haute température et les possibles centres d'origine des fluides minéralisateurs.

Le gisement de Santander, situé dans les Andes centrales du Pérou, est un gisement polymétallique de type skarn distal et de remplacement carbonaté. Il est encaissé dans des roches carbonatées du Crétacé supérieur, présentant des caractéristiques similaires à d'autres gisements encaissés dans la même ceinture métallogénique, comme ceux de Huanzalá, Pachapaqui, Raura, Chungar, Antamina, entre autres. La minéralisation à Santander se produit sous un fort contrôle structural, dominé par des failles et des plis régionaux.

Dans la présente étude, plusieurs méthodes analytiques spécifiques (Electron Probe MicroAnalyzer, Laser Ablation ICP-MS, isotopes de soufre et TerraSpec VIR-NIR-SWIR) ont été utilisées pour caractériser la chimie des minéraux de skarn provenant de quatre centres minéralisés du gisement de Santander, notamment la mine actuellement exploitée de Magistrales, l'ancienne mine Santander Pipe et les prospectes Blato et Puajanca. Cette étude a permis la construction de deux importantes bases de données, tant en imagerie qu'en chimie minérale. L'utilisation et la combinaison de techniques analytiques à haute résolution pour compléter l'étude pétrographique (telles que la cathodoluminescence optique et SEM, l'imagerie électronique rétrodiffusée BSE, et la minéralogie quantitative QEMSCAN) permettent une analyse détaillée de la séquence paragenétique en révélant les relations transversales entre les différentes générations de minéraux hydrothermaux. Ainsi, on a réussi à positionner de manière adéquate la minéralisation de quartz et de molybdénite dans la paragenèse du gisement de Santander, ce qui correspond à deux impulsions distinctes de formation de veines porphyritiques. D'autre part, ces analyses ont permis de définir au moins quatre générations de carbonates dans le gisement.

Par la suite, une Analyse en Composantes Principales exhaustive pour connaître le comportement des principaux clusters élémentaires, ainsi que la revue des principaux mécanismes de substitution minérale et des facteurs d'incorporation des éléments dans les minéraux étudiés, permettent de définir quatre vecteurs géochimiques importants, qui permettent une interprétation de la dynamique des températures, des conditions de fO_2 et de l'évolution des fluides dans le gisement de Santander: $Sn + Ga + Ag / Cu + Fe + Mn$ dans les sphalérite, $V + Ti / Ni + Co$ dans les magnétite, $And\% / Mg + Ti$ dans les grenat et $Mn + Ni / Se + Te$ dans les pyrite.

Abstract

Skarn deposits, a relatively simple type of mineralisation defined by its mineralogy, dominated by calc-silicate minerals such as garnet and pyroxene, are formed during regional metamorphic or contact events, and by a variety of metasomatic processes involving fluids of magmatic, metamorphic, or meteoric origin. These deposits are the most important sources of tungsten, a major source of copper, and a considerable source of iron, molybdenum, lead and zinc.

Vectoring studies on mineral deposits seek to obtain information that allows characterisation of the possible directions of hydrothermal fluids, and the chemical and thermal gradients between different mineralised centres. In the case of distal skarns, which do not have a clear causative magmatic source of the mineralizing fluids, the characterisation of these possible chemical and mineralogical vectors allows pointing towards high temperature zones and potentially the causative intrusion.

The Santander deposit, located in the central Andes of Peru, is a polymetallic deposit of distal skarn type and carbonate replacement, which is hosted by Upper Cretaceous carbonate rocks, presenting similar characteristics to other deposits hosted in the same metallogenic belt, such as the Huanzalá, Pachapaqui, Raura, Chungar, Antamina deposits, among others. Mineralisation at Santander occurs under strong structural control, dominated by regional faults and folds.

In the present study, several analytical methods (Electron Probe MicroAnalyzer, Laser-Ablation ICP-MS, Sulphur Isotopes and VIR-NIR-SWIR TerraSpec Data) have been employed to characterise the chemistry of skarn minerals from four mineralised centres in the Santander deposit, including the Magistrales operation mine, the former Santander Pipe mine, and the Blato and Puajanca prospects. This study has allowed the construction of two important datasets: imaging and mineral chemistry. The use and combination of high-resolution analytical techniques to complement the petrographic study (such as Optical and SEM Cathodoluminescence, Backscattered Electron Imaging and Quantitative Mineralogy QEMSCAN) allow a detailed analysis of the paragenetic sequence by revealing cross-cutting relationships between different generations of hydrothermal minerals. Thus, the position of the quartz-molybdenite mineralisation in the paragenesis of the Santander deposit was defined, as formed by two separate pulses of porphyry stockwork formation. The combination of techniques has allowed four generations of carbonates in the deposit to be defined.

Subsequently, an exhaustive Principal Component Analysis was carried out to understand the behaviour of the main clusters of elements. A review of the main mineral substitution mechanisms and element incorporation factors in the studied minerals is proposed, allowing the definition of four important geochemical vectors at Santander. The vectors ($\text{Sn} + \text{Ga} + \text{Ag} / \text{Cu} + \text{Fe} + \text{Mn}$ in sphalerite, $\text{V} + \text{Ti} / \text{Ni} + \text{Co}$ in magnetite, $\text{And}\% / \text{Mg} + \text{Ti}$ in garnet and $\text{Mn} + \text{Ni} / \text{Se} + \text{Te}$ in pyrite) help understanding the temperature and redox dynamics as well as the fluid evolution of the magmatic-hydrothermal system at the origin of the Santander deposit.

Resumen

Los depósitos de skarn, un tipo de mineralización relativamente simple definida por su mineralogía, dominada por minerales calco-silicatados como el granate y el piroxeno, se forman durante eventos de metamorfismo regional o de contacto, y por una variedad de procesos metasomáticos que involucran fluidos de origen magmático, metamórfico o meteórico. Estos depósitos son las más importantes fuentes de tungsteno, una de las principales fuentes de cobre, y una considerable fuente de hierro, molibdeno, plomo y zinc.

Los estudios de vectorización en depósitos minerales buscan obtener información que permita la caracterización de las posibles direcciones de fluidos hidrotermales, y los gradientes químicos y térmicos entre diferentes centros mineralizados. En el caso de los skarn distales, los cuales no tienen una fuente causativa clara de los fluidos hidrotermales que causan la mineralización, la caracterización de estos posibles vectores químicos y mineralógicos permiten apuntar hacia zonas de alta temperatura y sus posibles centros de origen.

El depósito de Santander, ubicado los Andes centrales del Perú, es un yacimiento polimetálico de tipo skarn distal y reemplazamiento de carbonatos, el cual se encuentra hospedado en las rocas carbonatadas del Cretáceo Superior, presentando características similares a otros depósitos alojados en la misma franja metalogenética, como los depósitos de Huanzalá, Pachapaqui, Raura, Chungar, Antamina, entre otros. La mineralización en Santander ocurre bajo un fuerte control estructural, dominado por fallas y pliegues regionales.

En el presente estudio, se han empleado diversos métodos analíticos (Electron Probe MicroAnalyzer, Laser-Ablation ICP-MS, isótopos de azufre y datos de VIR-NIR-SWIR TerraSpec) que permiten caracterizar la química de los minerales de skarn de cuatro centros mineralizados en el depósito de Santander, incluyendo la mina en operación de Magistrales, la antigua mina de Santander Pipe, y los prospectos de Blato y Puajanca. Este estudio ha permitido la construcción de dos importantes bases de datos, tanto de imágenes como de química mineral. El uso y combinación de técnicas analíticas de alta resolución para complementar el estudio petrográfico (tales como catodoluminiscencia óptica y SEM, imágenes de electrones retro dispersados BSE, y mineralogía cuantitativa QEMSCAN) permiten un análisis detallado de la secuencia paragenética al revelar relaciones de corte entre diferentes generaciones de minerales hidrotermales, de este modo, se logró el adecuado posicionamiento de la mineralización de cuarzo y molibdenita en la paragénesis del depósito de Santander, correspondiendo a dos pulsos separados de formación de vetas tipo pórfido. Por otro lado, han permitido la definición de al menos cuatro generaciones de carbonatos en el depósito.

Posteriormente, un exhaustivo Análisis de Componentes Principales para conocer el comportamiento de los principales clústeres elementales, así como el repaso de los principales mecanismos de sustitución mineral y factores de incorporación de elementos en los minerales estudiados, permiten la definición de cuatro importantes vectores geoquímicos, que permiten una interpretación de la dinámica de temperaturas, redox y evolución de fluidos en el depósito de Santander: Sn + Ga + Ag / Cu + Fe + Mn en esfalerita, V + Ti / Ni + Co en magnetita, And % / Mg + Ti en granate y Mn + Ni / Se + Te en pirita.