



SBG SWISSBETTERGOLD
INICIATIVA SUIZA ORO RESPONSABLE

Unil
UNIL | Université de Lausanne
Faculté des géosciences et de l'environnement
bâtiment Géopolis
CH-1015 Lausanne

 Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Departamento Federal de Economía,
Formación e Investigación DEFI
Secretaría de Estado para Asuntos Económicos SECO

Projekt  **Consult**
MEMBER OF GFA GROUP



El pasaporte geoforense Trazabilidad científica del oro:

Estudio MYSAC sobre la pequeña minería en Perú



Barbara Beck
Patrice Kiener
Diciembre de 2022

Edición

Por encargo de Swiss Better Gold
Iniciativa Suiza Oro Responsable

Autores Barbara Beck, Universidad de Lausana, Suiza
Patrice Kiener, InModelia, Paris, Francia

Contacto barbara.beck@unil.ch

Fecha Diciembre 2022

Fotografías de portada: Stefan Ansermet, Museo Geológico de Lausana, Suiza.

Resumen

La declaración de origen de un doré o mineral puede validarse en un contexto de producción artesanal, como la empresa MYSAC - Minera Yanaquihua SAC, en Perú. Esta empresa tiene dos grandes minas y 385 pequeñas minas artesanales. Nuestra confirmación del origen declarado se basa en el "pasaporte geoforens", una herramienta de trazabilidad del oro que interpreta los análisis químicos mediante métodos geoquímicos y estadísticas multivariantes. En el contexto de un recolector artesanal, esta validación se centra en el oro producido en la planta: el doré; y el mineral de oro utilizado para esta extracción.

Para llevar a cabo nuestro estudio, necesitamos conocer (1) la organización de la cadena de suministro; (2) el contexto geológico; y (3) los análisis de la composición química del doré y del mineral. Concretamente, para la empresa estudiada, MYSAC en este caso, pudimos hacer las siguientes observaciones:

(1) La planta de MYSAC desempeña una función importante en la cadena de valor. Los minerales procedentes de pequeñas minas artesanales se depositan allí antes de ser preparados para la cianuración. Todos los minerales depositados en la cancha al mismo tiempo se mezclan. No hay tratamiento separado. El doré producido es, por tanto, una mezcla en proporciones variables entre las dos grandes minas y las 385 pequeñas minas artesanales.

(2) Para una mineralización primaria como la que se encuentra en MYSAC, la composición química dentro de una mina cambia a medida que avanzan las galerías. La mineralización evoluciona progresivamente de un contexto oxidado a un contexto sulfurado o a la inversa. Esta evolución se refleja en la firma química y estadística de un yacimiento.

(3) En el marco de MYSAC, trabajamos sobre dos conjuntos de datos diferentes: datos relativos a los dorés y datos relativos a las minerales. Para el doré, nos basamos en una base de datos de varios años y en análisis químicos de unos 20 elementos. Para el mineral, contamos con unos dos años de datos y sólo 4 elementos químicos analizados. Este corpus de análisis es muy difícil.

Para MYSAC, podemos confirmar el origen de los dorés y del mineral. Nuestro enfoque sigue un protocolo muy riguroso, que utiliza diferentes técnicas estadísticas (gráficos de beeswarm, histogramas, estudios de correlación, clasificaciones jerárquicas ascendentes, análisis de componentes principales y análisis discriminante) y valida los resultados obtenidos mediante la interpretación geoquímica.

En el caso de MYSAC, podemos destacar particularidades para algunos dorés. Incluso podemos detectar pequeñas cantidades de adiciones de oro. Se trata de añadidos repetitivos y, por tanto, plenamente coherentes con esta producción. Para el mineral, optamos por un enfoque más global que nos permite tener mejor en cuenta los cambios en la composición química del mineral ligados a la evolución del yacimiento.

Nuestra herramienta, el pasaporte geoforense, puede aplicarse fácilmente tanto en una empresa minera como MYSAC como en una refinería. De hecho, en ambos casos, los análisis ya están integrados en el flujo de beneficio del mineral o de refinado del oro y no generan costes analíticos adicionales. Así pues, podemos crear una herramienta eficaz, que requiere un coste adicional relativamente bajo, vinculado únicamente a la interpretación estadística y geoquímica de los datos. Esta interpretación se convierte en rutina.

Nuestro enfoque ofrece una herramienta fiable de detección de anomalías y, por tanto, da la credibilidad necesaria a todas las empresas extractivas formalizadas o en proceso de formalización para entrar en una cadena de suministro legal. Esto plantea las siguientes cuestiones:

1. El pasaporte geoforense puede utilizarse como herramienta descentralizada y puede implantarse en cualquier punto de la cadena de suministro, idealmente en un cuello de botella de la cadena de suministro: una cooperativa minera, una planta de transformación, una prerrefinería, etc. ¿Cómo elegir los lugares adecuados, desde el punto de vista administrativo y político, para implantar el pasaporte geoforense?
2. Mis conversaciones con los mineros me han demostrado que la voluntad de formalizarse es escasa. ¿Cómo pueden desarrollarse más incentivos para aumentar la formalización y, por tanto, la aplicación del pasaporte geoforense?
3. El contexto de este estudio fue muy favorable para el desarrollo de nuestro método. Pudimos trabajar en condiciones ideales gracias a la apertura y colaboración de MYSAC. Este no es ni mucho menos el caso de todas las cooperativas mineras. Se plantea entonces la cuestión de cómo aplicar una herramienta como el pasaporte geoforense en un contexto menos transparente. Cómo crear un marco ideal que permita acceder al análisis químico o establecer un protocolo analítico externo que responda a nuestras necesidades: análisis fiables y competentes. ¿Cómo podemos estar seguros de que todas las muestras -de mineral o del doré- se han analizado y pasado a control?
4. Y por último, para reforzar la colaboración con Perú, ¿cómo integrar a una autoridad local (el instituto geológico, una universidad, otra entidad?) en este proceso de control?

Abstract

The declaration of origin of a doré bar or mineral can be validated in a context of artisanal production, such as the company MYSAC - Minera Yanaquihua SAC, in Peru. This company consists of two large mines and 385 small artisanal mines. Our confirmation of declared origin is based on the "geoforensic passport", a gold traceability tool that interprets chemical analyses using geochemical methods and multivariate statistics. In the context of an artisanal collector, this validation focuses on the gold produced at the planta: doré bars; and the gold ore used for this extraction.

To carry out our study, we need to know (1) the organisation of the supply chain; (2) the geological context; and (3) analyses of the chemical composition of the doré bar and the ore. Specifically, for the company studied, MYSAC in this case, we were able to make the following observations:

(1) MYSAC's "planta" plays an important role in the value chain. Ores from small-scale artisanal mines are deposited there before being prepared for cyanidation. All ores deposited on the cancha at the same time are mixed. There is no separate processing. The doré bar produced is therefore a mixture in varying proportions between the two large mines and the 385 small artisanal mines.

(2) For primary mineralisation such as that found at MYSAC, the chemical composition within a mine changes as the mining of the drifts advance. The mineralisation progressively evolves from an oxidised to a sulphidised context or the reverse. This evolution is reflected in the chemical and statistical signature of a deposit.

(3) Within the framework of MYSAC, we worked on two different datasets: data relating to doré bars and data relating to ores. For doré bars, we rely on a database of several years and chemical analyses of about 20 elements. For ore, we rely on about two years of data and only 4 chemical elements analysed. This analytical corpus is very difficult.

For MYSAC, we can confirm the origin of the doré bars and the ore. Our approach follows a very rigorous protocol, which uses different statistical techniques (beeswarm plots, histograms, correlation studies, hierarchical bottom-up classifications, principal component analysis and discriminant analysis) and validates the results obtained through geochemical interpretation.

In the case of MYSAC, we can highlight particularities for some doré bars. We can even detect small amounts of gold additions. These are repetitive additions and therefore fully consistent with this production. For the ore, we opt for a more global approach which allows us to better take into account the changes in the chemical composition of the ore linked to the evolution of the deposit.

Our tool, the geoforensic passport, can easily be implemented both in a mining company such as MYSAC and in a refinery. Indeed, in both cases, the analyses are already integrated into the ore beneficiation or gold refining flow and do not generate additional analytical costs. We can therefore set up an efficient tool, requiring a relatively low additional cost, linked only to the statistical and geochemical interpretation of the data. This interpretation becomes routine.

Our approach offers a reliable anomaly detection tool and thus gives the necessary credibility to all formalized or in the process of formalization extractive companies to enter into a legal supply chain. This raises the following questions:

1. The geoforensic passport can be used as a decentralised tool and can be implemented at any point in the supply chain, ideally at a bottleneck in the supply chain: a mining cooperative, a processing plant, a pre-refinery, etc. How to choose the right places, from an administrative and political point of view, to implement the geoforensic passport?
2. My discussions with miners have shown me that the willingness to formalise is low. How can more incentives be developed to increase formalisation and thus the implementation of the geoforensic passport?
3. The context of this study was very favourable to the development of our method. We were able to work in ideal conditions thanks to the openness and collaboration of MYSAC. This is by far not the case for all mining cooperatives. The question then arises as to how to implement a tool like the geoforensic passport in a less transparent context. How do we create an ideal framework that allows access to chemical analysis or to set up an external analytical protocol that meets our needs: reliable and competent analysis. How can we be sure that all samples - ore or doré bars - have been analysed and passed on for control?
4. And finally, in order to strengthen collaborations with Peru, how can we integrate a local authority (the geological survey, a university, another entity?) in this control process?

Contenido

Resumen	3
Abstract.....	5
Contenido.....	7
1. Marco y contexto	9
1.1 Historia	9
1.2 Colaboraciones analíticas	9
1.3 Publicaciones	10
1.4 Agradecimientos	10
2. Objetivos.....	11
2.1 Doré	12
2.2 Minerales	12
3. El corpus analítico	13
3.1 Los lugares estudiados	13
3.2 Los dorés.....	15
3.2.1 Muestras de dorés de MYSAC	15
3.2.2 Muestras de dorés de minas industriales latinoamericanas.....	15
3.2.3 Muestras de oro de otros yacimientos artesanales de Perú	15
3.3 El mineral de MYSAC.....	16
4. Metodología.....	17
5. Comentarios.....	19
5.1 Estudio de contexto.....	19
5.1.1 La organización de la cadena de suministro	19

5.1.2	El contexto geológico	20
5.1.3	Análisis existentes.....	25
5.2	El oro de MYSAC.....	26
5.2.1	Caracterización del oro MYSAC	26
5.2.2	Diferenciación del doré de Yanaquihua de las minas peruanas	28
5.3	El mineral de MYSAC.....	32
5.3.1	Caracterización de los proveedores de MYSAC.....	32
5.3.2	Diferenciación de los proveedores de MYSAC	41
5.3.3	Contribución de los 4 métodos utilizados para diferenciar las explotaciones	45
5.3.4	Diferenciación de los minerales de MYSAC de otros yacimientos peruanos.....	46
6.	Conclusión	49
6.1	Resultados más importantes.....	49
6.1.1	Desde un punto de vista práctico, los resultados de nuestros investigaciones	49
6.1.2	Desde un punto de vista científico	50
6.1.3	Desde un punto de vista metodológico	50
6.1.4	Desde un punto de vista operativo	50
6.1.5	Otras observaciones	51
6.2	Recomendaciones	51
6.3	Perspectivas	51
Apéndice 1: Lista de muestras MYSAC		52
A1.1	Minas apoyadas por la Swiss Better Gold Association.....	52
A1.2	Minas independientes.....	53

1. Marco y contexto

1.1 Historia

Este informe se basa en una propuesta de investigación preparada específicamente para Mónica Rubiolo, de la Secretaría de Estados para Asuntos Económicos de Suiza - SECO, y Diana Culillas y Thomas Hentschel, del SBGI, tras la conversación mantenida entre ellos y Barbara Beck en enero de 2020 en Tannay.

Esta propuesta se actualizó en agosto de 2021, para tener en cuenta los nuevos resultados de nuestro estudio, basado en el "pasaporte geoforenses". Esta versión se presentó para su financiación en agosto de 2021.

El estudio comenzó en octubre de 2021 con un viaje de investigación a las minas artesanales y la recogida de muestras. Durante nuestro viaje a Perú, tuvimos acceso a datos inesperados, que nos hicieron reorientar nuestro planteamiento. En lugar de una aplicación directa del pasaporte geoforenses que ya habíamos desarrollado, nos enfrentamos a un conjunto de datos sobre minerales, que exigía una investigación de fondo completamente nueva y un estudio estadístico mucho más exhaustivo. El proyecto se modificó en este sentido por correo electrónico el 18 de febrero de 2022.

Los trabajos de investigación propiamente dichos comenzaron en enero de 2022. Estaba previsto que durara 3 meses a tiempo parcial. Sin embargo, debido a la naturaleza de los nuevos datos, este estudio dio un giro que requirió una cantidad relativamente grande de trabajo de investigación previa. Principalmente por este motivo, la duración final del proyecto fue de 5 meses en total.

En mayo de 2022 se firmó una primera modificación para ampliar el periodo del contrato hasta el 31 de octubre de 2022.

En octubre de 2022 se firmó una segunda modificación con una ampliación del plazo del contrato hasta el 15 de diciembre de 2022 y un aumento de la remuneración teniendo en cuenta la presentación para Lima en octubre de 2022.

1.2 Colaboraciones analíticas

Desde el principio de este proyecto, fue importante para nosotros establecer colaboraciones para realizar análisis en Perú en lugar de traer las muestras a Suiza para su análisis. Por eso fui a reunirme con el servicio geológico cuando llegué a Lima. Este planteamiento no fue objeto de seguimiento.

Por otro lado, durante nuestro viaje a MYSAC (Minera Yanaquihua SAC), pudimos acceder a análisis de AAS realizados directamente en MYSAC y que, por tanto, ya están integrados en el proceso de trabajo de esta planta. Por lo tanto, hemos favorecido estos análisis ya existentes y, por exceso, realizados in situ.

1.3 Publicaciones

Estos datos se presentaron

- 11 de octubre de 2022, Evento Swiss Better Gold
- 12 de octubre de 2022, Sociedad Nacional de Minería, Petróleo y Energía, Lima

Los resultados de este estudio también se incorporarán a las siguientes presentaciones:

- Del 12 al 15 de marzo de 2023: LBMA, Assaying & Refining Conference 2023, Londres (enviado)
- 27 y 28 de abril de 2023: Universidad de Lausana, Jornadas de estudio
- 8-10 de mayo de 2023: proEXPLO2023, Convención Internacional de Prospectores y Exploradores, Lima (aceptado)

Además, elaboramos una ficha informativa en colaboración con el SBGI y la Embajada de Suiza en Lima.

Una entrevista relacionada fue publicada por la Sociedad Nacional de Minería, Petróleo y Energía : [“El pasaporte geoforenses da la credibilidad necesaria para entrar en una cadena de suministro legal” - Desde Adentro](#)

1.4 Agradecimientos

Me gustaría dar las gracias a Thomas Hentschel y Diana Culillas, y a Mónica Rubiolo. Sin ellos, este viaje no habría sido posible.

Nuestro trabajo fue facilitado por el equipo de MYSAC, Rodolfo Orozco, Iván Arroyo y Hernán Jiménez, que nos guiaron por las minas, en la planta, nos proporcionaron toda la información necesaria y respondieron a nuestras preguntas. Su apoyo fue absolutamente crucial para el éxito de este proyecto.

Nuestro agradecimiento a Javier Camargo del SBGI por organizar nuestros guías en las diferentes minas; a Claudia Orozco por acogernos en las minas de Sotrami y MYSAC, a Gerardo Smith por ponernos en contacto y acompañarnos a las minas de las zonas de Ananea y La Rinconada, y a Víctor Serrano, nuestro guía en Madre de Dios.

Fuimos recibidos en la Embajada de Suiza en Lima por Paul Garnier, Embajador, y Stefano Vescovi, Jefe de Misión Suplente. Gracias a ellos, pude hacer contactos importantes y crear una red sólida en Perú.

Stefan Ansermet, del Museo de Geología de Lausana me acompañó a todas las minas. Sus incomparables conocimientos mineralógicos nos ayudaron mucho.

En la Universidad de Lausana, pude contar con Benita Putliz en los laboratorios, Olivier Reubi y Martin Robyr para el análisis de la composición química, Nicolas Meisser y Vanessa Terrapon del Museo de Geología por su apoyo infatigable y la catalogación de las muestras, haciéndolas así accesibles al público.

También me gustaría dar las gracias a Jonathan Jodry y Yannick Tueller de Metalor por llevar a cabo el análisis ED-XRF de las muestras de oro.

Y por último, este trabajo ha sido claramente llevadero gracias a las numerosas discusiones mantenidas, para las partes estadísticas, pero también para el resto, con Patrice Kiener y Michel Maignan.

2. Objetivos

El principal objetivo de este estudio es determinar si es posible controlar el origen del oro producido en un contexto artesanal utilizando métodos científicos. Este control se basa en el "pasaporte geoforens", una herramienta de trazabilidad del oro que permite confirmar (o no) la declaración de origen de una muestra (oro o mineral) realizada por un proveedor. Esta validación se basa en la composición química de la muestra y utiliza métodos estadísticos y geoquímicos para interpretar los datos. Ya es eficaz en un contexto de extracción industrial de oro.

En un contexto industrial de producción de oro, el doré de un proveedor tiene una firma geoquímica y geoestadística relativamente bien definida. De hecho, el mineral utilizado para producir el doré procede de una, dos o, a lo sumo, tres minas. En cambio, en el contexto de un recolector artesanal, la materia prima es mucho menos homogénea: el oro procede de varias minas pequeñas, de minerales de varios orígenes. El doré, producido a partir de a veces un centenar de menas de origen diferente, no puede por tanto tener una firma estable, ya que refleja la diversidad de su suministro. A pesar de esta complicación, queremos saber si es posible controlar la producción de oro de un contexto artesanal complejo: garantizar que el mineral procede únicamente de minas declaradas.

Nuestro enfoque se puso a prueba en colaboración con una empresa minera de casi 400 pequeñas minas artesanales: MYSAC - Minera Yanaquihua SAC. Esta empresa está formalizada por la Swiss Better Gold Association. Tuvimos contactos privilegiados con esta empresa y, por lo tanto, tuvimos acceso a toda la "planta", a algunas pequeñas minas artesanales y a todos los datos necesarios para este estudio.

Nuestro estudio se centra en dos cuestiones básicas: en primer lugar, la firma de los oros y, en segundo lugar, la firma de las menas.

2.1 Doré

El origen del oro producido en un contexto industrial puede confirmarse o negarse, ya que puede definirse su firma geoquímica y estadística. La firma del oro producido en un contexto artesanal muestra valores más dispersos que la de un contexto industrial. Queremos evaluar el grado de dispersión de la firma de un recolector artesanal y juzgar si esta dispersión es un obstáculo para la determinación del origen de la producción.

Para probar nuestra hipótesis, estudiamos la producción de oro de MYSAC. En primer lugar, queremos saber si la producción es suficientemente homogénea y caracterizable para definir los dorés "conformes" y "atípicos". En segundo lugar, queremos determinar el grado de diferenciabilidad de la producción de MYSAC en comparación con el oro producido en otras minas, ya sean industriales o artesanales. Los resultados de este estudio se analizan en la sección 4.2.

2.2 Minerales

Como el oro se produce a partir de una mezcla de minerales, no bastaba con controlar sólo el oro. Esta segunda parte se dedica, pues, a comprobar la conformidad del mineral. ¿Sólo procede de las minas, de los proveedores declarados? ¿Es posible distinguir el mineral de un proveedor a otro o sólo de una región a otra; detectar cambios en la explotación del filón; detectar muestras atípicas?

Para controlar el origen del mineral extraído por un proveedor, es necesario caracterizarlo por su firma geoquímica y estadística. Esto permite comprobar la conformidad del mineral producido con esta firma y determinar los cambios en el suministro. La evaluación de los resultados de esta caracterización indica el grado de diferenciación de los proveedores a escala intrarregional, interregional y suprarregional.

Para responder a estas preguntas, examinamos los análisis recibidos por MYSAC. Este conjunto de datos consiste en análisis de minerales procesados en MYSAC. Los resultados se detallan en la sección 4.3.

Nuestro enfoque sigue un procedimiento muy riguroso que repetimos en este informe. Primero presentamos el corpus analítico (§2), luego explicamos nuestro enfoque, nuestra metodología (§3) y, por último, detallamos nuestras observaciones (§4) puestas de relieve por nuestro enfoque. Entre ellas figuran:

- Los resultados más importantes **del estudio contextual** (§4.1): la organización de la cadena de suministro; el contexto geológico y los análisis disponibles.
- El estudio de **la conformidad del oro** producido en MYSAC (§4.2)
- El estudio del **origen del mineral** procesado en MYSAC (4.3): empezamos hablando de cada proveedor de mineral y comprobando la conformidad de su suministro, y terminamos con un estudio de diferenciación dentro de MYSAC y con otros yacimientos artesanales de Perú.

Hemos tenido cuidado de no mencionar las pequeñas explotaciones artesanales estudiadas en este informe. Su identidad sólo se indica en el anexo.

3.El corpus analítico

3.1 *Los lugares estudiados*

En el centro de nuestro estudio se encuentra el sitio MYSAC, Minera Yanaquihua SAC, que se encuentra en la parte sur de los Pequeños Andes peruanos (Figura 1). Es una empresa privada formada por

- dos grandes minas más o menos industriales: las minas "Mina" y "Chaluane", ambas con varias explotaciones diferentes;
- Unas 385 explotaciones a pequeña escala, las minas "SBGI", ya que reciben apoyo para su formalización de la "SBGI", la "Swiss Better Gold Initiative".

Además, también visitamos las siguientes explotaciones mineras:

- Cordillera Andina Menor: Sotrami
- Altiplano: Nuova Teresita, Baltimori Sur, Tumi/Clemencia, Maniro Cinco, Oro Puno Feade
- La Rinconada: Lunar de oro, La Rinconada
- Madre de Dios: Paolita II (Labirinto); Raoul I (Delta I); Empresa Gallo de oro (Huepethue). Sitios estudiados en un viaje anterior: SAC Niconsta Comaania Minera, E. C. Hector Velasquez import trak (ambos en Huepethue), Boca Inambari, Sol Naciente y Fortumil.

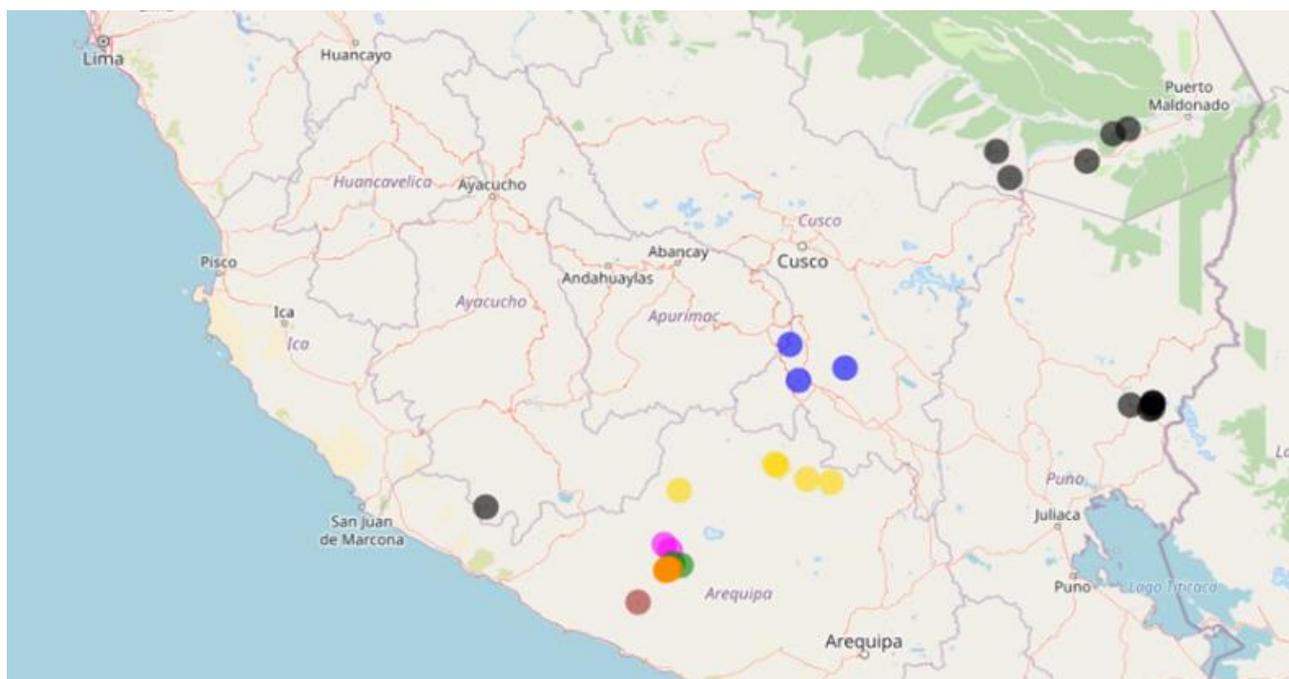


Figura 1: Detalle del emplazamiento del MYSAC. Las minas que forman parte de MYSAC están marcadas en color. En verde: Colindantes; en rosa: Arirahua; en marrón: Soledad; en amarillo: Orcopampa; en azul: Cuzco; en naranja: Amacci, Central y Rey. Además de MYSAC, visitamos los yacimientos marcados en negro: izquierda: Sotrami; centro derecha: los yacimientos mineros del Altiplano y el yacimiento de La Rinconada; arriba derecha: los yacimientos de Madre de Dios.

3.2 Los dorés

3.2.1 Muestras de dorés de MYSAC

A excepción de una única muestra de doré que recogimos nosotros mismos directamente en la planta de procesado de MYSAC, no disponemos de muestras físicas, sino sólo de sus análisis. De hecho, una vez producidos en Yanaquihua, los dorés son transportados a Metalor. Cuando llegan a la refinería, los dorés se analizan sistemáticamente, procedimiento que se integra así en el proceso de refinado de Metalor. En concreto, se trata de análisis de la composición química (por ED-XRF) de 54 dorés.

3.2.2 Muestras de dorés de minas industriales latinoamericanas

Nuestro estudio también utiliza la base de datos utilizada para desarrollar el pasaporte geoforense con Metalor. Se trata de varios miles de análisis químicos (por ED-XRF) de dorés procedentes de minas industriales de todo el continente latinoamericano.

3.2.3 Muestras de oro de otros yacimientos artesanales de Perú

Además de la muestra de doré de MYSAC, nosotros mismos recogimos muestras de diferentes lugares de Perú, entre ellos:

Tabla 1: Origen de las muestras de oro recogidas en octubre de 2021.

Operación	Región	Tipo de muestra	Análisis XRF
Sotrami	Costa	Oro fundido	1
Nuovo Teresita	Ananea	Oro	1
Clemencia A / Tumi	Ananea	Oro	1
Baltimori Sur	Ananea	Arena rica en oro	1
Labor del Contratista Genaro Cadiz	La Rinconada	Oro amalgamado	1
Tienda de oro, La Rinconada	La Rinconada	Pellets de oro tras la amalgamación	3
Tienda de oro, Lunar de oro	La Rinconada	Pellets de oro tras la amalgamación	3
Paolita II, Laberinto	Madre de Dios	Oro fundido	1
Raúl I, Delta I	Madre de Dios	Oro fundido	1
Empresa Gallo de oro, Hupethue	Madre de Dios	Oro fundido	1
MYSAC, Yanaquihua	Costa	Oro fundido	1

3.3 El mineral de MYSAC

Recibimos un conjunto de datos de análisis químicos de 1.472 minerales de la cancha procedentes de 40 yacimientos diferentes (véanse la figura 2 y el anexo 1). La cancha es una plataforma en la que se almacenan los minerales de las pequeñas minas artesanales a la espera de ser procesados. Estos minerales son analizados por AAS (Espectroscopia de Absorción Atómica) directamente por la planta de tratamiento de MYSAC. Por ello, estos análisis se integran sistemáticamente en el proceso de beneficio.

Durante nuestra visita en octubre de 2021, tomamos 70 muestras de diferentes pilas de la cancha. Se analizaron mediante WD-XRF.

También visitamos 8 minas pequeñas, todas ubicadas en la zona de Yanaquihua. Las muestras recogidas se analizaron mediante WD-XRF.

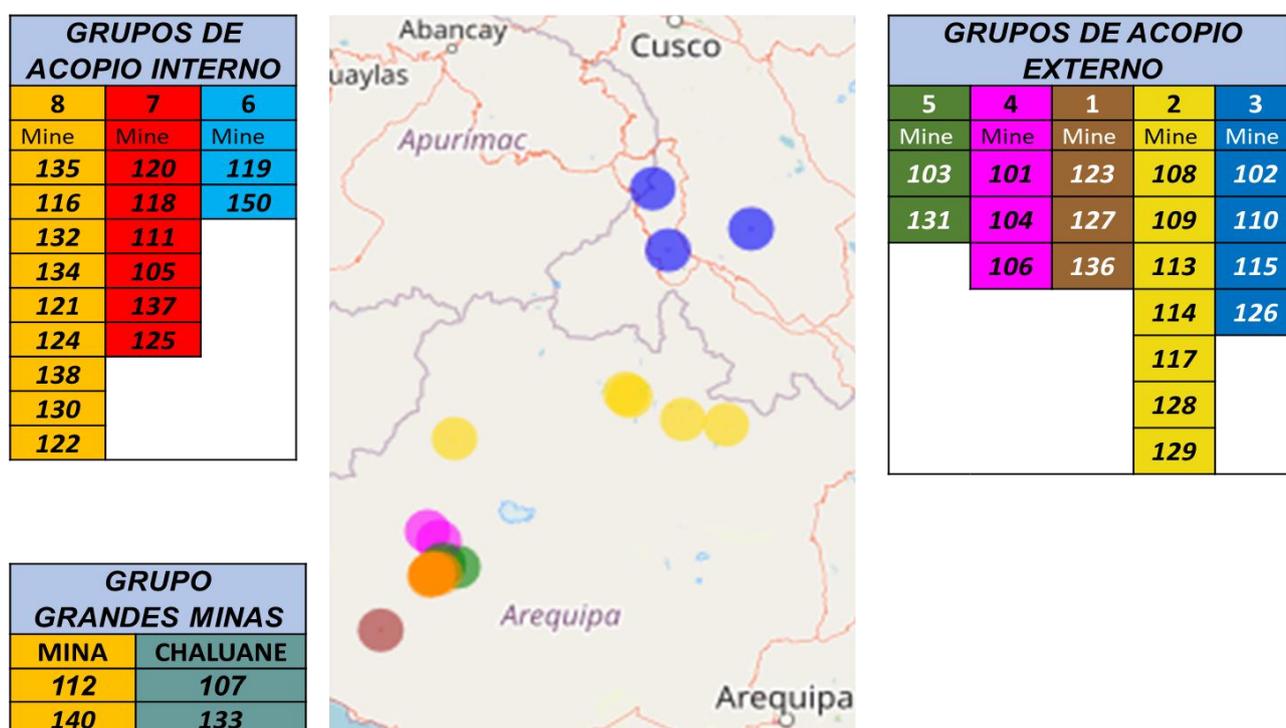


Figura 2: Localización de las minas artesanales integradas en MYSAC. Esta empresa está organizada en dos entidades principales: (A) "grandes minas": Chaluane y Mina (=Yanaquihua) y (B) "artesanos", con los "grupos de acopio externo": 1 : Minas de la región "Soledad"; 2: "Orcopampa"; 3: "Cusco"; 4: Arirahua; 5: Colindantes; y con los "grupos de acopio interno": 6: "Rey"; 7: "Central"; 8: "Amacci". Los números en cursiva se refieren a las pequeñas explotaciones asignadas a los distintos grupos, que se detallan en el apéndice 1.

4. Metodología

El pasaporte geoforense sigue un protocolo científico y técnico muy riguroso (véase la figura 3). Se basa en análisis de composición química que luego se procesan estadísticamente.

En primer lugar, comenzamos con un estudio contextual. Para ello, son necesarios tres requisitos previos a su aplicación:

- La organización de la cadena de suministro de oro y la complejidad de las fuentes de suministro (fuentes únicas, múltiples, mixtas, procesos segregados, etc.).
- El contexto geológico en el que se tomaron las muestras (doré, mineral).
- Un corpus de análisis de la composición química ya existente.

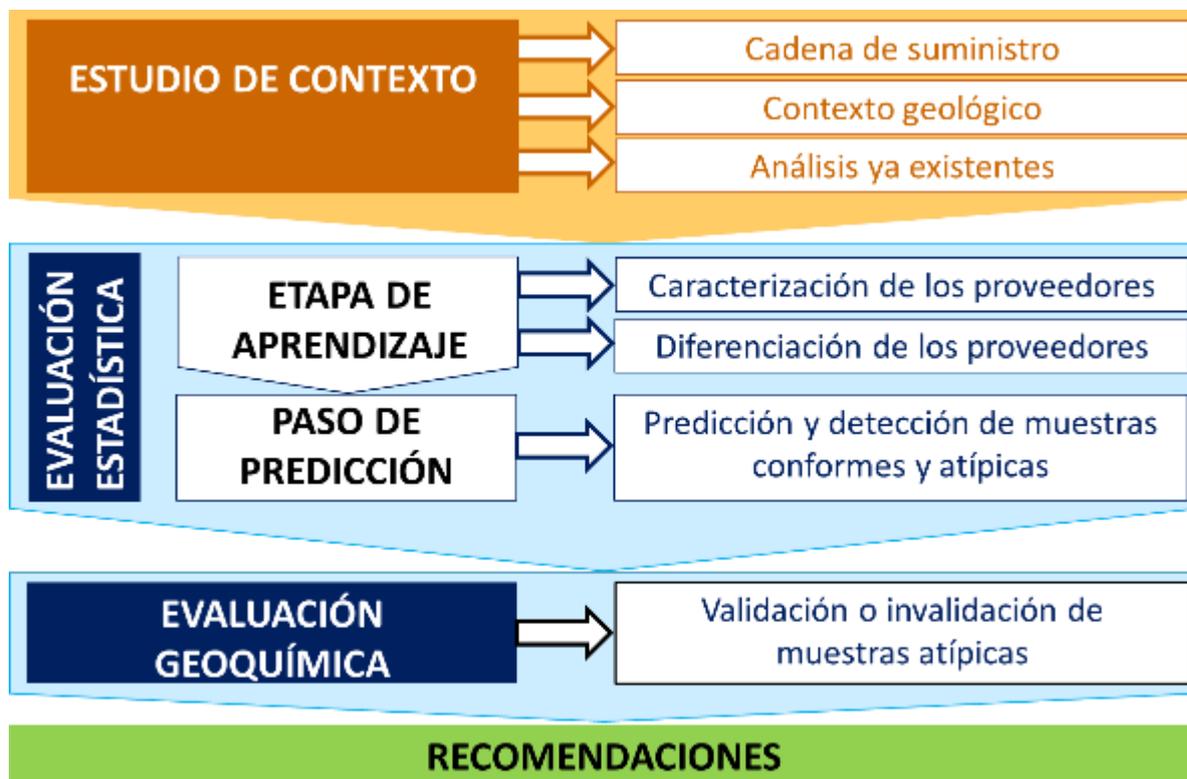


Figura 3: Nuestro procedimiento para validar el origen de una muestra -un doré o un mineral- sigue un protocolo muy preciso que empieza con un estudio del contexto y termina con recomendaciones.

En segundo lugar, nuestro protocolo de pasaporte forense sigue un procedimiento estadístico, que comienza con una fase de aprendizaje para crear un modelo basado en la firma geoquímica y estadística de un proveedor. Para este modelo utilizamos distintas técnicas geoquímicas (diagramas ternarios, diagramas de correlación, informes gráficos, gráficos de beeswarm) y estadísticas (histogramas, clasificaciones jerárquicas ascendentes, análisis de componentes principales y análisis discriminatorios), pero en este reporte sólo se presentan los informes gráficos y los análisis de componentes principales.

A continuación, en la fase de predicción, ponemos a prueba nuestro modelo e identificamos las muestras que no se ajustan al modelo establecido en la fase de aprendizaje. Para ello, introducimos una nueva muestra o grupo de muestras cuya compatibilidad con el modelo establecido ponemos a prueba. Esta muestra o grupo de muestras debe suministrarse con :

- Su declaración de origen (ya que nosotros no determinamos el origen, sino que sólo confirmamos la declaración de origen)
- Su composición química compatible con el modelo.

Por último, validamos los resultados obtenidos del estudio estadístico con una interpretación geoquímica.

5. Comentarios

5.1 Estudio de contexto

5.1.1 La organización de la cadena de suministro

En este capítulo queremos entender la organización de la cadena de suministro del oro y evaluar la complejidad de las fuentes de suministro (fuentes únicas, múltiples, mixtas, procesos segregados, etc.).

En pocas palabras: la planta de MYSAC desempeña un papel importante en la cadena de valor. Los minerales procedentes de pequeñas minas artesanales se depositan aquí antes de ser preparados para la cianuración. Todos los minerales depositados en la cancha al mismo tiempo se mezclan. No hay tratamiento separado. El oro producido es, por tanto, una mezcla entre las dos grandes minas y las 385 pequeñas minas artesanales, en proporciones variables.

En el caso de MYSAC, el oro producido en el yacimiento procede de dos fuentes distintas: el mineral de las "grandes minas", a saber, Chaluan y Mina (incluida Yanaquihua), por un lado, y los "artesanos", una empresa formada por unas 385 pequeñas minas apoyadas en su formalización por la Swiss Better Gold Association. Estos últimos se dividen en "grupos de acopio externo" y "grupos de acopio interno" (véase la figura 2). A continuación, el mineral se recoge en camiones organizados por la estación de tratamiento MYSAC. Por lo tanto, las pequeñas minas no transportan el mineral a MYSAC, sino que lo recogen en camiones de MYSAC. Estos minerales recogidos se almacenan en la cancha, una plataforma. Allí se depositan en pilas separadas y se etiquetan según su origen. El etiquetado lleva información anónima sobre el proveedor. A continuación, todo el mineral, independientemente de su origen, se procesa en el molino de MYSAC. El oro se extrae por cianuración. Que yo sepa, no hay tratamiento separado, todo el mineral se procesa junto. En el caso de MYSAC, nos encontramos pues ante un mineral complejo procedente de dos grandes minas y de unas 385 minas artesanales, repartidas en 8 regiones que distan entre sí desde menos de 1 km hasta unos 120 km.

5.1.2 El contexto geológico

El estudio geológico permite comprender mejor el contexto metalogénico del que proceden las muestras (oro, mineral). Este conocimiento es esencial, por una parte, para comprender la firma química de un yacimiento y su evolución y, por otra, para poner de relieve las diferencias entre proveedores, ya que las condiciones geológicas difieren de un yacimiento a otro.

En pocas palabras: las mineralizaciones explotadas en MYSAC proceden de **contextos geológicos diferentes**, aunque todas están relacionadas con intrusiones magmáticas y, por tanto, asociadas a vetas. Son depósitos primarios. No observamos ningún mineral que pudiera derivar de depósitos secundarios, es decir, depósitos relacionados con depósitos fluviales o morrénicos.

Las mineralizaciones explotadas se formaron durante eventos mineralizadores cronológicamente espaciados. La roca madre también cambia de un yacimiento a otro. Por tanto, la composición química es diferente de un yacimiento a otro, lo que permite distinguir las menas de distintas producciones.

Concretamente, basándonos en criterios geológicos y metalogénicos, podemos agrupar y diferenciar las siguientes zonas:

- las zonas naranja (8: Amacci) y verde (5: Colindantes) son similares, las zonas roja (7: Central) y azul claro (6: Rey) probablemente también
- la zona marrón (1: Soledad)
- la zona amarilla (2: Orcopampa) se divide en dos grupos
- la zona azul (3: Cusco) probablemente también se divide en dos grupos
- la zona rosa (4: Arirahua)

Para una mineralización primaria como la presente en MYSAC, **la composición química** dentro de una explotación cambia a medida que avanza la excavación. La mineralización evoluciona de un contexto oxidado a un contexto mixto a un contexto sulfurado o a la inversa. Esta evolución se refleja en la firma química y estadística de un yacimiento.

Las minas del yacimiento de MYSAC tienen un origen geológico similar, ya que su formación está relacionada con **depósitos primarios** hidrotermales. Concretamente, su origen se debe al magma que se formó por fusión desde y dentro de la corteza. Esta fusión está vinculada a la zona de subducción entre la placa de Nazca y la placa Sudamericana, colisión que también está en el origen de la formación de los Andes. Esta zona de subducción sigue siendo muy activa. Varios fenómenos de mineralización pueden relacionarse con ella. Así que hay varios eventos de mineralización que se han producido hace relativamente poco tiempo en la historia de la Tierra. Con cada evento de mineralización, la composición del magma cambia un poco. Gracias a estos cambios, a veces pequeños, es posible distinguir químicamente una mineralización de otra. Las minas MYSAC explotan estas mineralizaciones.

La geología de la zona explotada por MYSAC puede subdividirse *a grandes rasgos* en 2 regiones diferentes: La zona costera (en rojo en el pequeño recuadro de la Figura 4), y la zona de Cuzco (en azul claro).

La **zona costera** está formada principalmente por 3 unidades diferentes:

- La primera está formada por rocas plutónicas (en rojo en el mapa geológico). Se trata de un acontecimiento magmático que tuvo lugar durante el Cretácico Superior (es decir, hace entre 100 y 66 millones de años). En esa época se creó magma, vinculado a la subducción de la placa de Nazca bajo la placa Sudamericana. Sin embargo, este magma se enfrió en el interior de la Tierra. Este suministro de magma y calor permitió la formación de varios yacimientos de oro.

Estudiamos tres sitios diferentes pertenecientes a esta unidad: (I) las **minas de Sotrami**, (II) las **minas internas de Yanaquihua (grupos 6, 7 y 8)** y (III) las **minas externas de MYSAC, ubicadas cerca de Yanaquihua (grupos 4 y 5)**.

- La segunda unidad (en salmón en el mapa geológico), se caracteriza por importantes eventos volcánicos que se atribuyen al Neógeno - Cuaternario, (por tanto entre hace 23 millones de años y la actualidad). Se trata de acontecimientos magmáticos con enfriamiento del magma en la superficie de la Tierra y, por tanto, con creación de volcanes. Se trata de un acontecimiento geológico importante para la formación de yacimientos.
Algunas explotaciones mineras de la región **de Orcopampa** (Grupo E) pertenecen a esta unidad.
- La tercera unidad, en amarillo en el mapa geológico, se encuentra en toda esta zona costera. Se trata de rocas volcanosedimentarias del Neógeno-Mioceno, que datan de hace entre 23 y 3,6 millones de años. Son sedimentos que se formaron durante eventos volcánicos o por la erosión de rocas volcánicas. Las rocas de esta unidad no están relacionadas con un evento magmático. Por lo tanto, no son una fuente de mineralización, pero pueden ser la roca madre de determinadas mineralizaciones. Algunas explotaciones mineras de la región **de Orcopampa** (Grupo W) pertenecen a esta unidad

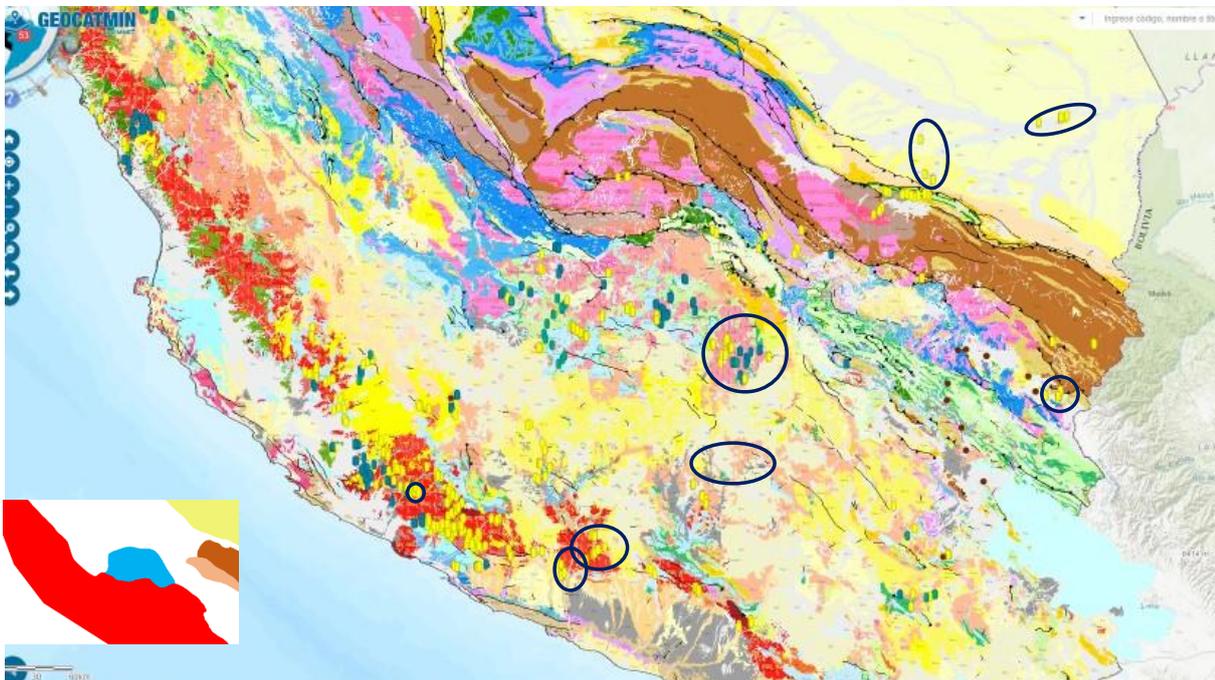


Figura 4: Mapa geológico de la zona de estudio con la ubicación de las minas (según: <https://geocatmin.ingemmet.gob.pe/geocatmin>)

La **zona de Cusco** está dividida en dos partes:

- El primero, representado en rosa en el mapa geológico (figura 4), está formado por un plutón atribuido al Paleógeno - Neógeno, es decir, hace entre 66 y 3,6 millones de años. Es una roca magmática que se enfrió en el interior de la Tierra.
La mayoría de los **yacimientos estudiados en la zona de Cusco (Grupo 3)** se encuentran en esta formación
- La segunda, en azul claro, está formada por depósitos marinos continentales datados en el Jurásico Superior - Cretácico Inferior, un intervalo de tiempo de entre 163 y 113 millones de años. Esta unidad no puede formar yacimientos, pero puede ser el lecho rocoso de un yacimiento.

A nivel regional, es posible hacer subdivisiones más finas (véase la Figura 5). Esto es particularmente interesante para distinguir entre las diferentes minas situadas en las zonas interiores (grupo 8: Amacci en naranja, grupo 7: Central en rojo y grupo 6: Rey en azul claro) y las zonas exteriores cercanas a las zonas interiores (grupo 1: Soledad en marrón, grupo 4: Arirahua en rosa y grupo 5: Colindantes en verde).

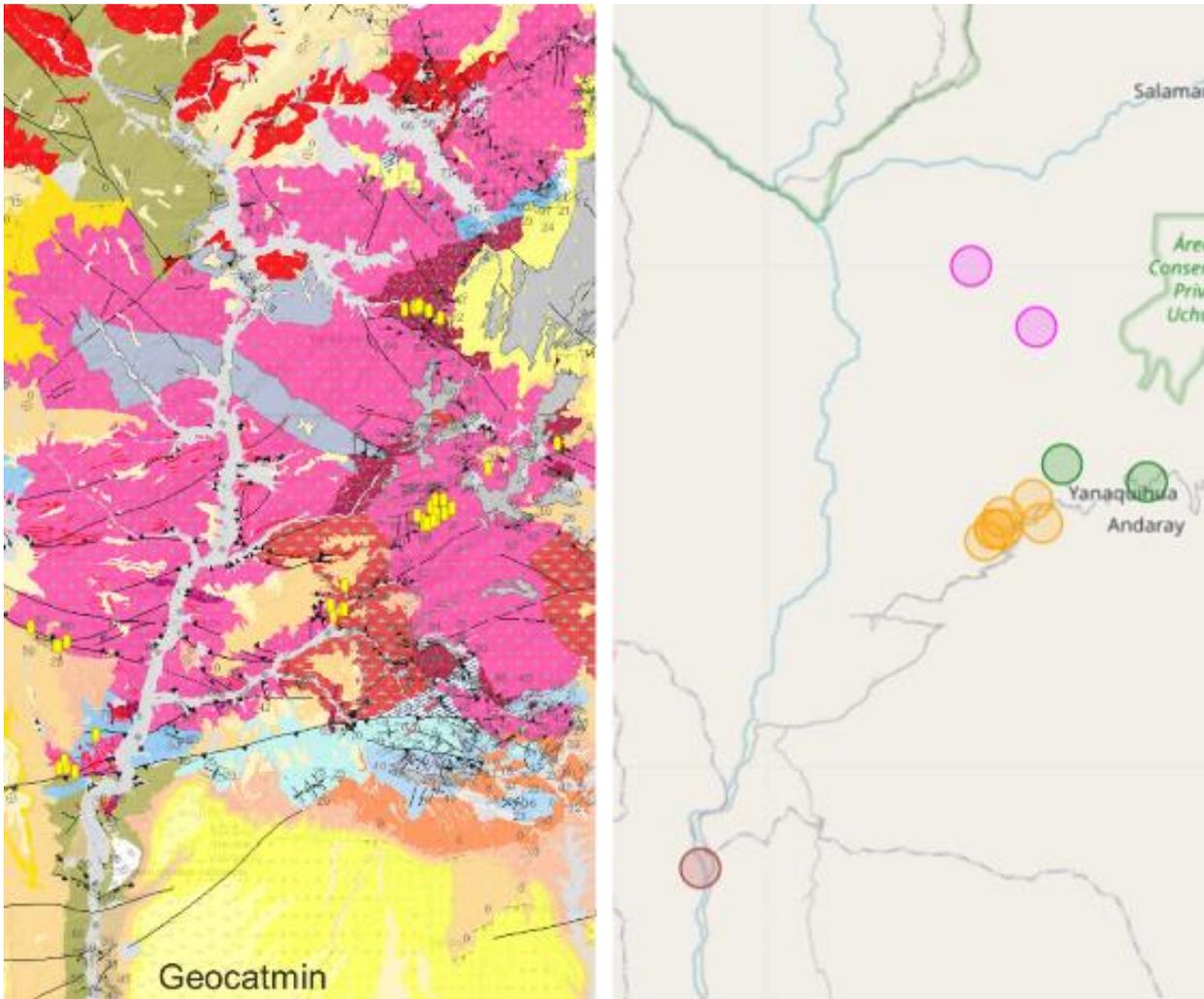


Figura 5: Derecha: localización de las minas "Mina" y grupos internos, a saber: 1: Soledad (marrón), 4: Arirahua (rosa); 5: Colindantes (verde); 8: Amacci (naranja) y Mina (también naranja). Izquierda: Detalle del mapa geológico relativo a las operaciones. Se observa que las distintas minas están situadas en zonas geológicas diferentes. Según Geocatmin: <https://geocatmin.ingemmet.gob.pe/geocatmin>

Los contextos geológicos (<https://geocatmin.ingemmet.gob.pe/geocatmin>) de estos grupos - 4 (rosa), 5 (verde), 8 (naranja) y (1) marrón son diferentes:

- Las minas rosas están asociadas a la zona marcada en rojo burdeos, la superunidad de San Luis, formada por diorita asociada a una intrusión plutónica del Jurásico Superior (periodo comprendido entre hace 164 y 152 millones de años).
- Las minas naranjas están asociadas a la zona marcada en rojo rosado, la unidad "centro volcanico coropuna - evento 1 - toba cristalina".
- Y por último, las minas marrones están asociadas a la zona roja atribuida al Jurásico Superior
- La atribución de las minas verdes no está del todo clara: ¿pertenecen a la misma zona que las minas naranjas o no?

La composición química de la mineralización primaria cambia con la distancia al yacimiento (véase la figura 6). Los yacimientos cercanos al yacimiento son más ricos en cobre. A medida que aumenta la distancia a la cámara magmática, el cobre es sustituido por el oro y la plata. La relación cobre-arsénico también cambia. Cerca de la superficie terrestre también se observan fenómenos relacionados con la alteración de la roca.

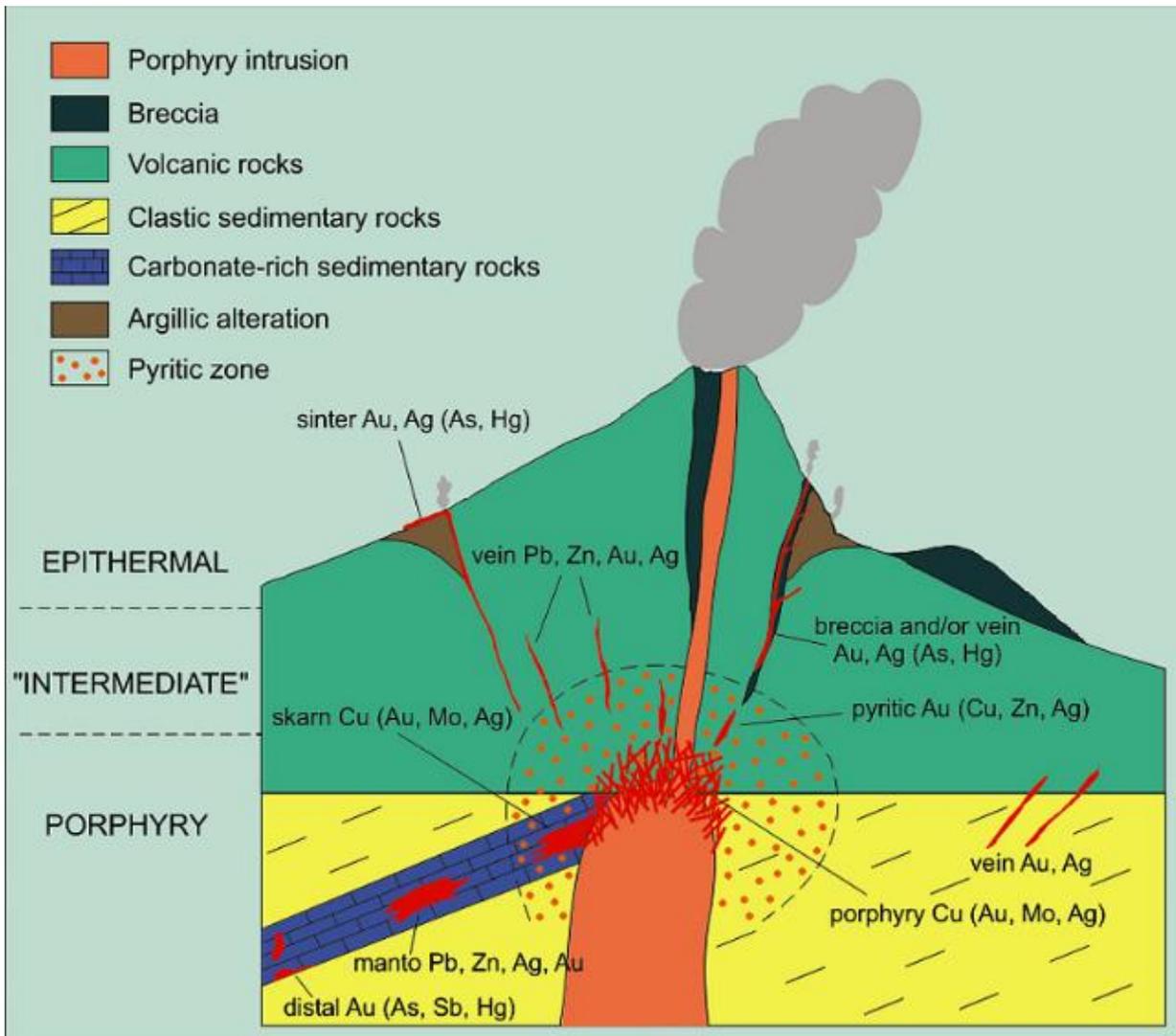


Figura 6: Sección transversal esquemática de los yacimientos relacionados con un contexto de pórfido de cobre, un contexto metalogénico típico para la mineralización del oro.

Otro tipo de yacimientos son los *secundarios*, como los que se pueden encontrar, por ejemplo, en el Altiplano o en la Amazonia. Se trata de depósitos formados por la erosión y acumulación de arenas y gravas en un contexto periglacial (morrenas, región del Altiplano) o fluvial (Madre de Dios).

Nos encontramos, pues, ante contextos geológicos y metalogénicos diferentes (cf. cuadro recapitativo 2), que se reflejan en conjuntos mineralógicos diferentes. Éstas influyen en la composición química del oro extraído de estas mineralizaciones. Por ejemplo, es casi imposible encontrar estaño (un elemento que suele estar asociado a la casiterita, un mineral muy típico de los yacimientos secundarios) en yacimientos primarios (hidrotermales).

Tabla 2: Resumen de las distintas unidades geológicas observadas:

Edad	Acontecimiento mineralizante	Unidad geológica	Roca madre	Localidad
Ordovícico (485-455 millones de años)		Formación de la Rinconada	Metasedimento	La Rinconada, Lunar de Oro
Silúrico-Devónico (444-372 millones de años)		Formación de la Rinconada	Metasedimento	La Rinconada, Lunar de Oro
Cretácico superior (100-66 millones de años)	Intrusión plutónica relacionada con la zona de subducción de la placa de Nazca bajo la placa Sudamericana	Zona costera	Rocas magmáticas y de otros tipos	Sotrami, Yanaquihua Colindantes, Arirahua, Soledad, Chaluane
Paleógeno - Neógeno (66-3,6 millones de años)	Intrusión plutónica relacionada con la zona de subducción de la placa de Nazca bajo la placa Sudamericana	Zona de Cusco	Rocas magmáticas y de otros tipos	Cusco
		Zona de Cusco	Yacimiento marino continental del Jurásico superior al Cretácico inferior (163-113 millones de años)	Cusco
Neógeno-cuaternario (23-0 millones de años)	Acontecimientos volcánicos	Zona costera		Orcopampa
Neógeno-Mioceno (23-3,6 millones de años)	Acontecimientos volcánicos	Zona costera	Rocas volcanosedimentarias	Orcopampa
Neógeno-cuaternario (23-0 millones de años)	Heladería	Ananea	Moraine	Yacimientos de la región de Ananea: Nuovo Teresita, Clemencia A / Tumi, Baltimore Sur
Cuaternario - Holoceno	Depósito fluvial	Madre de Dios	Sedimentos fluviales	Labyrintho, Delta I, Hueypethue

5.1.3 Análisis existentes

Es esencial disponer de un corpus de análisis de la composición química. Para nuestros cálculos, nos basamos en una base de datos histórica de cada proveedor estudiado, compuesta idealmente por muestras recientes de entre 6 y 24 meses antes del examen del doré o del mineral. A menudo, estos análisis químicos ya están integrados en el proceso de beneficio del doré. Sin embargo, también es posible establecer un sistema de análisis externo independiente, fiable y objetivo.

En pocas palabras: trabajamos con dos corpus analíticos diferentes:		
	Doré	Mineral
Producción	Planta de enriquecimiento	2 "grandes minas" y 385 "artesanos"
Lugar de control	Refinería (Metalor)	Planta (MYSAC)
Número de análisis	54	1472 de 40 sitios. El número de análisis disponibles por sitio varía entre 1 y 400 muestras
Método de análisis	ED-XRF (fluorescencia de rayos X)	AAS (espectro de adsorción atómica)
Elementos analizados	20 elementos químicos	Cuatro elementos: Au, Ag, Cu, As
Coste	Ninguno para análisis, bajo para pasaporte geoforense	Ninguno para análisis, bajo para pasaporte geoforense
Aplicación	Totalmente integrado en el proceso de refinado	Los análisis se integran en el proceso de enriquecimiento
Espacio temporal	A partir de abril de 2021 y junio de 2022	Entre enero de 2020 y marzo de 2021
Observaciones	Comparable con la base de datos Metalor	El conjunto de datos es muy difícil de estudiar, ya que es muy heterogéneo y sólo se analizan unos pocos elementos químicos.

En el marco de MYSAC, hemos trabajado con dos conjuntos de datos diferentes: datos de doré y datos de minerales:

- Dorés. Basamos nuestro análisis en la composición química del doré a su llegada a la refinería Metalor Technologies de Neuchâtel. Se analizan 20 elementos, entre ellos: Au, Ag, Cu y elementos deletéreos.
- El mineral. Pudimos acceder a estos análisis, lo que dio un giro absolutamente inesperado a nuestro proyecto y lo convirtió de una aplicación geoforense de pasaportes en una investigación completamente nueva.

Estos análisis se realizan directamente en la planta de transformación de MYSAC: Para remunerar al minero y comprobar su calidad, se analiza el mineral, una vez depositado en la cancha. De cada montón se toman tres muestras. Los elementos Au, Ag, As y Cu se determinan mediante AAS (espectro de adsorción atómica). Si el proveedor está de acuerdo con los resultados analíticos, el mineral entra en el proceso de beneficio. Si el proveedor se opone, se analiza la segunda muestra, de nuevo en el laboratorio de MYSAC. Si el proveedor sigue sin estar de acuerdo con el resultado del análisis, la tercera muestra se envía a un laboratorio externo e independiente de Lima. El proveedor decide entonces si vende o no el mineral.

Los dos conjuntos de datos no se superponen en el tiempo.

5.2 El oro de MYSAC

5.2.1 Caracterización del oro MYSAC

Para comprobar la validez del suministro, creamos un modelo estadístico de la firma geoquímica de todas las muestras de un proveedor. Este modelo cubre la mayoría de las muestras. Los que no se ajustan a este modelo se consideran atípicos y requieren más investigación.

En pocas palabras: el doré producido en MYSAC forma un conjunto relativamente homogéneo, a pesar de la heterogeneidad de sus fuentes minerales. Sin embargo, hay algunos dorés que sobresalen de las predicciones estadísticas:

- Tres dorés ricas en bismuto,
- Un doré con alto contenido en estaño.

Para comprender estas muestras, necesitamos poder vincularlas a las menas y, por tanto, poder utilizar el análisis químico de las menas de los periodos pertinentes, es decir, entre abril de 2021 y junio de 2022.

El doré de Yanaquihua se puede caracterizar. Los análisis muestran un conjunto homogéneo. Es un doré muy puro, compuesto principalmente de oro, plata y cobre (véase la figura 7). En cuanto a los elementos traza, la composición química es más matizada: la mayoría de los valores muestran contenidos por debajo del límites de detección, lo que puede apreciarse con las barras al nivel de 0 en el. En concreto, algunas dorés contienen plomo (Pb), selenio (Se) y, a veces, cinc (Zn) y níquel (Ni). Estos niveles son bastante habituales en el contexto de la producción de doré. Por otra parte, hay algunos valores intrigantes: para los elementos principales, hay dos análisis máximos y mínimos para el oro y la plata; para los elementos traza, hay tres análisis para el bismuto (Bi) y el estaño (Sn).

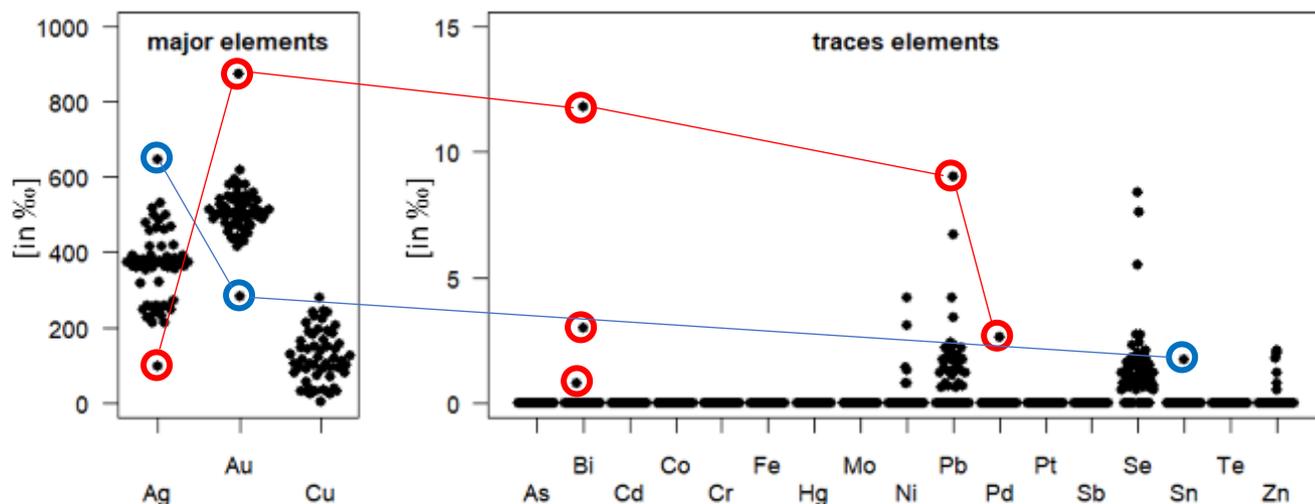


Figura 7: Representación de los datos químicos de las dorés de Yanaquihua en gráficos de beeswarm. Cada punto representa la composición respectiva de un doré. En el eje de abscisas aparecen los elementos individuales analizados y en el de ordenadas el contenido, indicado en por mil.

La identificación de los puntos individuales muestra que se trata siempre de las mismas muestras:

- La muestra con mayor contenido de plata corresponde a la muestra con menor contenido de oro. Se trata de la misma muestra que contiene estaño (véase la figura 6, muestra marcada en azul, y el tabla 3).

- La muestra con menor contenido de plata es la misma que la que tiene mayor contenido de oro. También es la más rica en bismuto (véase la figura 7: muestra marcada en rojo, y la tabla 3).

Dorés ricos en bismuto

Otras dos dorés también contienen bismuto (véase la figura 7: muestras marcadas en rojo, y la tabla 3). Si observamos más detenidamente las tres dorés que contienen bismuto, veremos que existe una correlación casi perfecta entre la plata, el oro, el bismuto y el plomo (véase la figura 8). Esto no puede deberse al azar. Debe haber una fuente común:

- El doré Y1 se compone en un 80-100% de esta fuente común. Fue entregado a Metalor en junio de 2021
- El doré Y2 se compone aproximadamente de un 20-25% de esta fuente común. Se entregó a Metalor en noviembre de 2021.
- El doré Y3 se compone aproximadamente de un 5-7% de esta fuente común. Se entregó a Metalor en octubre de 2021.

Por lo tanto, consideramos que se trata de una fuente identificable, utilizada al menos en tres ocasiones en el suministro de minerales a MYSAC.

Tabla 3: Composición química de 4 dorés de Yanacuyhua, ricas en Bi o Sn

	Ag	En	En	Bi	Cu	Pb	Pd	Ir a	Sn
Y1	99.1	0.0	872.6	11.8	3.3	9.0	2.6	0.0	0.0
Y2	391.9	0.0	547.6	3.0	53.8	1.8	0.0	0.0	0.0
Y3	498.3	0.0	472.8	0.8	25.7	0.7	0.0	0.6	0.0
Y4	645.2	0.0	281.6	0.0	68.3	1.5	0.0	1.2	1.7

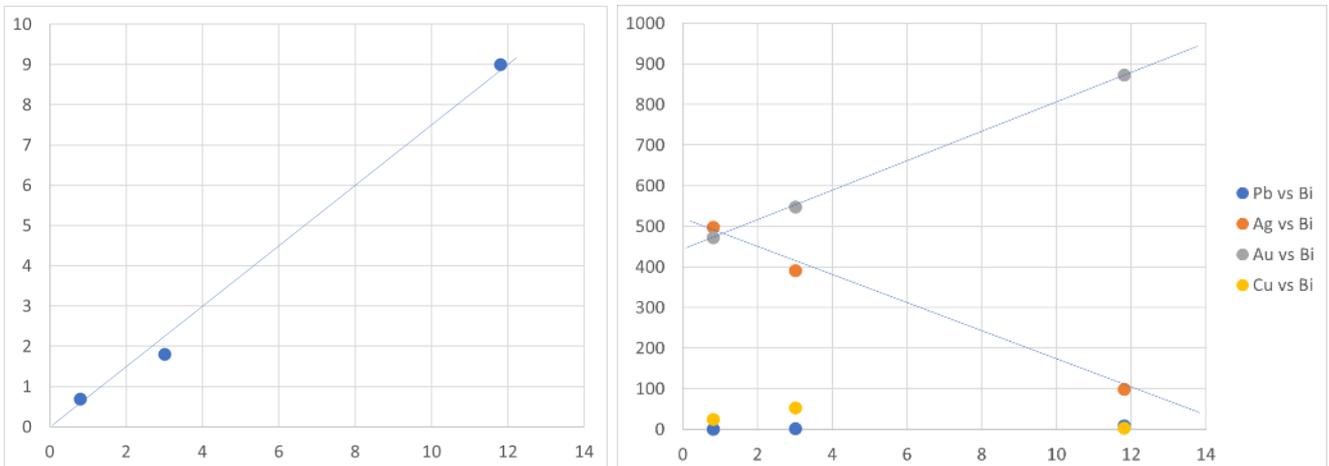


Figura 8: Representaciones de las correlaciones entre los elementos Au, Ag, Cu, Pb y Bi de las tres muestras ricas en Bi. La correlación lineal r (Pearson) es muy buena para $[Pb, Bi] = 0,98$; $[Ag, Bi] = 0,97$; $[Au, Bi] = 0,96$; en cambio es menos buena para $[Cu, Bi] = 0,78$. Obsérvese que puede deducirse una correlación muy buena para $[Ag, Au] = 1,00$. Resultados obtenidos con sólo 3 muestras. Interpretación por consolidar con algunas muestras más.

Doré rico en estaño

Se trata de un único doré, numerado Y4 en la Tabla 3. También muestra niveles muy altos de Ag y muy bajos de Au. ¡Es la única muestra de todos los dorés analizados de Perú que contiene estaño! El estaño no puede asociarse en modo alguno a yacimientos primarios, como es el contexto general de las minas de MYSAC. Su presencia sólo es posible en dos casos muy concretos:

- El estaño es bastante común en depósitos secundarios de tipo aluvial. Este tipo no es muy común en un contexto industrial. Sin embargo, existen algunas minas industriales que explotan yacimientos aluviales que contienen estaño. Su contenido varía entre 1,1 y 1,4 %. Otras muestras procedentes de un contexto artesanal en Madre de Dios contienen entre 15 y 50 % de estaño. No creo que el estaño presente en esta doré pueda atribuirse a un depósito secundario.
- El estaño también puede asociarse a minas muy ricas en plata y pobres en oro. Se trata de mineralizaciones hidrotermales primarias muy específicas. Este es probablemente el caso de nuestra muestra.

Cuestiones pendientes: dado que los dos corpus analíticos sobre las menas y los minerales no se solapan desde un punto de vista temporal, es difícil identificar el origen y, por tanto, el mineral dentro de la empresa MYSAC que se utilizó para la producción.

- de las tres dorés ricos en bismuto
- del doré rico en estaño.

En este contexto, se plantean dos cuestiones:

- ¿Es posible confirmar la validez de estas muestras estudiando los minerales utilizados en aquella época?
- ¿Pueden observarse estas firmas también más tarde, en producciones más recientes?

5.2.2 Diferenciación del doré de Yanaquihua de las minas peruanas

Una vez establecida la caracterización de los proveedores, queremos estudiar la diferenciabilidad geoquímica y estadística entre los proveedores.

En resumen: el doré producido en MYSAC puede distinguirse claramente

- Del doré industrial producido en Perú y algunos lugares de América Latina, dentro de los límites de nuestra base de datos.
- Del doré de los yacimientos artesanales estudiados

Minas industriales

El análisis de componentes principales (ACP) de las figuras 9 y 10 (que representan dos vistas diferentes del mismo ACP) muestra que es posible distinguir el doré de MYSAC (las estrellas rojas, verdes, azules y moradas) de otros proveedores de LSM en Perú y los países vecinos. Se observan algunas peculiaridades:

- En el caso de MYSAC, la firma estadística de la muestra recogida (estrella morada) es idéntica a la de la doré que llegó al refinador, Metalor en este caso (estrellas azules: se fundieron y entregaron al mismo tiempo dos dorés diferentes, una de las cuales tenía exactamente la misma firma que la muestra tomada). Por lo tanto, la pequeña muestra tomada en la planta de transformación de MYSAC es representativa de un doré entero.
- La muestra rica en estaño (estrella verde claro) no se detecta claramente como no conforme en el PCA. De hecho, al ser la única muestra que contenía estaño, no incluimos este elemento en nuestro análisis estadístico.
- Las muestras ricas en Bi (estrellas verde oscuro) se distinguen claramente de las demás.

Las minas artesanales de Perú

La figura 11 muestra un análisis de componentes principales de la doré MYSAC comparada con la doré de otros lugares de producción situados en la costa, en el Altiplano, La Rinconada y en Madre de Dios (véase también la figura 2). Se puede observar que las dorés de estos lugares se distinguen muy claramente de las dorés MYSAC.

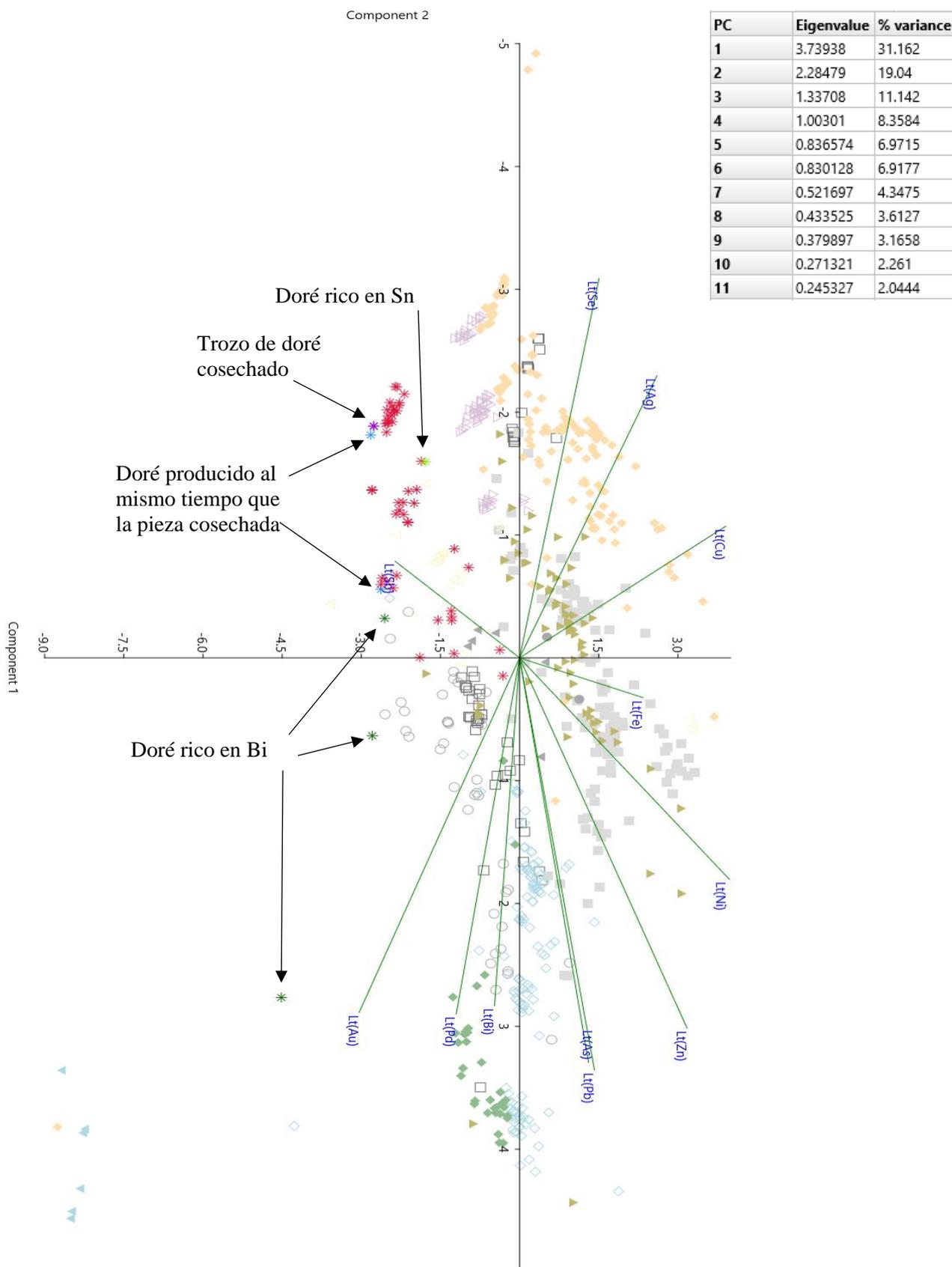


Figura 9: Análisis de componentes principales de los dorés de MYSAC (estrellas en rojo, verde, azul y morado) y de otros centros peruanos de producción industrial de oro (siglas diferentes en colores pálidos). Componentes 1 y 2. Correlaciones

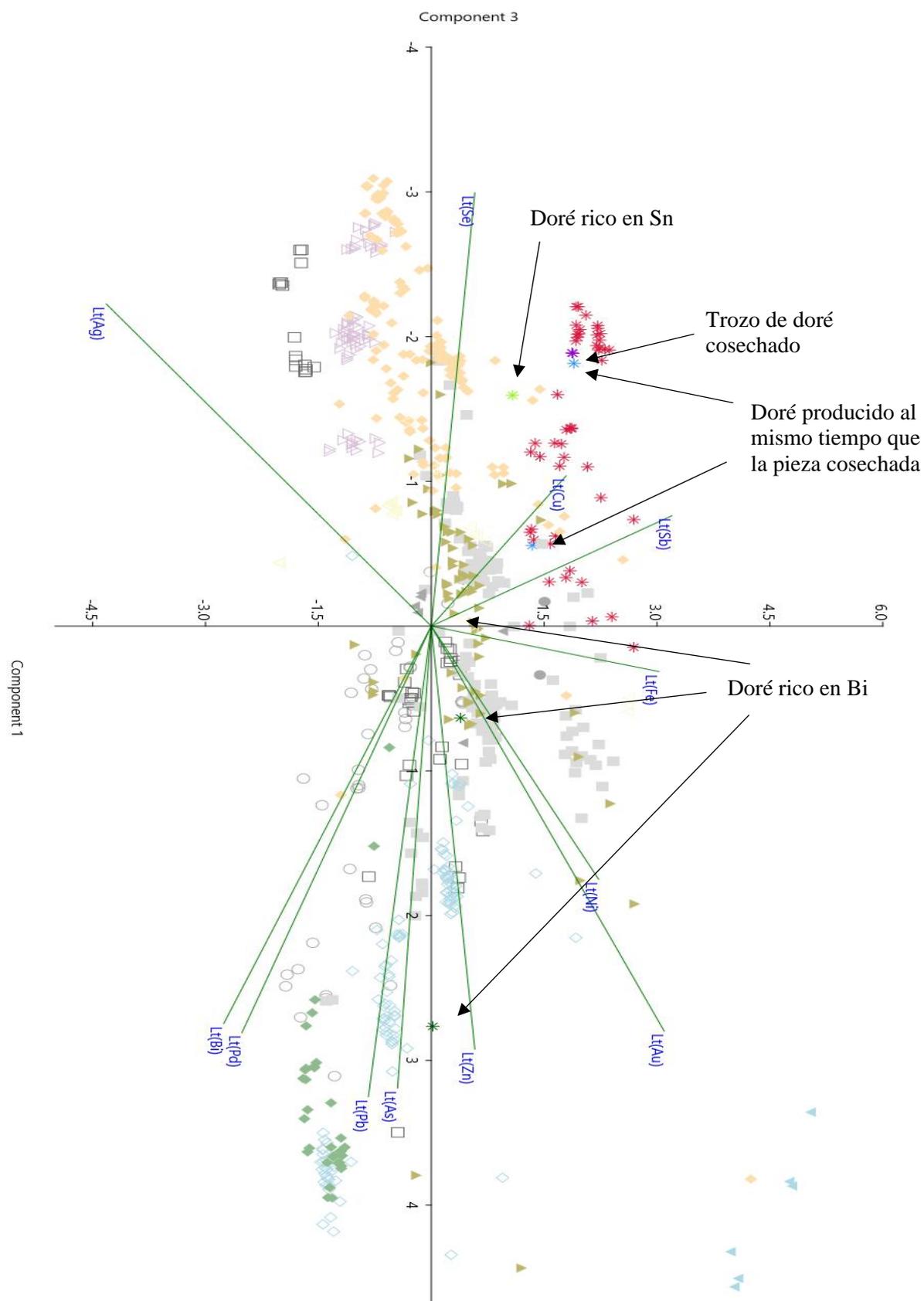


Figura 10: Análisis de Componentes Principales de los dorés de MYSAC (estrellas en rojo, verde, azul y púrpura) y otros sitios peruanos de producción industrial de oro (diferentes siglas en colores pálidos). Componentes 1 y 3, Correlaciones.

PC	Eigenvalue	% variance
1	3.92465	32.705
2	1.7048	14.207
3	1.40046	11.671
4	1.11948	9.329
5	0.971208	8.0934
6	0.764125	6.3677
7	0.69784	5.8153
8	0.565064	4.7089
9	0.389747	3.2479
10	0.251941	2.0995
11	0.140805	1.1734

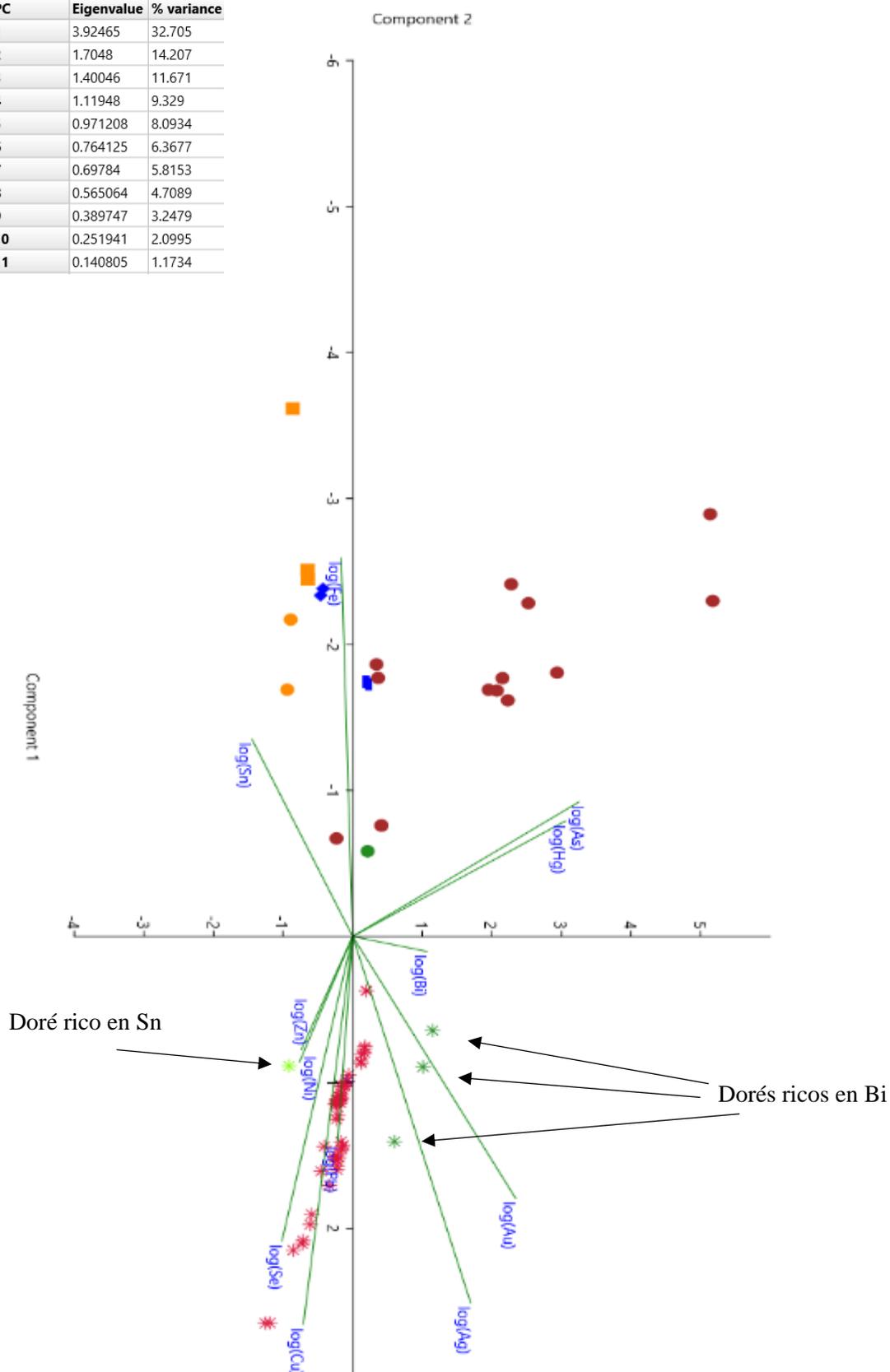


Figura 11: Análisis de componentes principales (correlaciones) de las muestras de oro de los sitios artesanales de Perú, a saber: estrellas en rojo, verde y verde claro: MYSAC; cuadrados en naranja: Madre de Dios; rombos en azul: Altiplano; círculos en marrón: La Rinconada y Lunar de Oro; círculos en verde: Sotrami.

5.3 El mineral de MYSAC

5.3.1 Caracterización de los proveedores de MYSAC

En este capítulo, hablaremos de las firmas de todas las zonas y minas que forman parte del suministro de MYSAC. Destacaremos las muestras conformes y atípicas de cada proveedor. Para ello, hemos utilizado varios métodos geoquímicos, pero en esta sección sólo se presentan los informes gráficos.

En pocas palabras: la confirmación del origen del mineral suministrado a MYSAC debe investigarse en dos etapas.

1. Enfoque global. El objetivo es comprender las tendencias generales y las posibles variaciones a nivel de mina o de región. La mayoría de los productores de MYSAC muestran firmas explicables. Por lo tanto, se puede confirmar el origen del mineral.

Siguen existiendo algunas particularidades

- Arirahua: la firma es muy heterogénea. ¿Hay varias explotaciones pequeñas?
- Yanaquihua: debe aclararse la firma del mineral suministrado en junio de 2020.

2. Enfoque detallado. En el caso de algunos proveedores, hemos observado muestras diferentes en comparación con la tendencia general. En esta fase de la investigación, no siempre sabemos si se trata de un error en el análisis, de un cambio vinculado a la evolución de un yacimiento o de una muestra verdaderamente atípica.

Los informes gráficos (Figuras 13-25) dicen los siguientes:

- Eje X: número de muestras agrupadas según la pertenencia a una mina.
- En la ordenada: Au (línea negra), Ag (línea roja), Cu (línea azul) y As (línea verde). Atención: escala logarítmica: hemos sustituido los valores ND (no detectados) por 0,01. ¡Por lo tanto, $\log(0,01) = -2!$

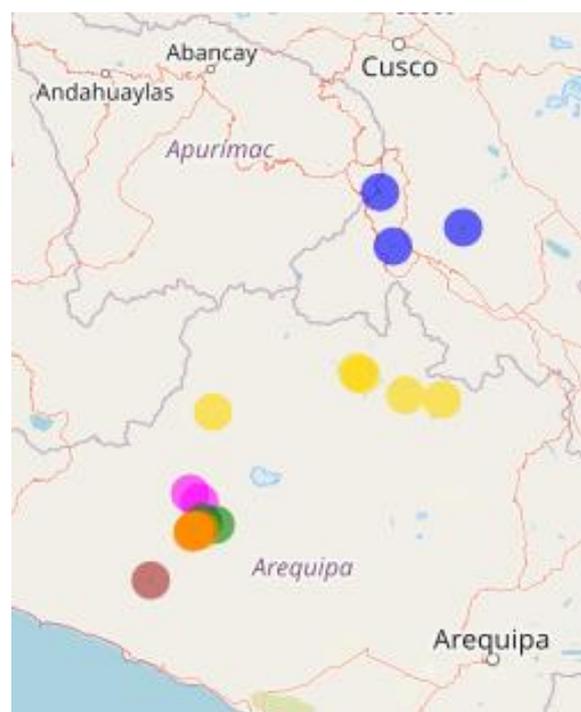


Figura 12: Ubicación geográfica de las regiones estudiadas: en marrón: grupo 1, Soledad; en amarillo: grupo 2, Orcopampa; en azul: grupo 3: Cusco; en rosa: grupo 4: Arirahua; en verde: grupo 5: Colindantes; en naranja: grupo 8, Amacci. No representados: grupo 6: Rey; en rojo: grupo 7: Central; y los grupos Chaluane y Mina (Yanaquihua).

Grupo 1: Soledad (marrón)

En general, el suministro de este grupo está en línea.

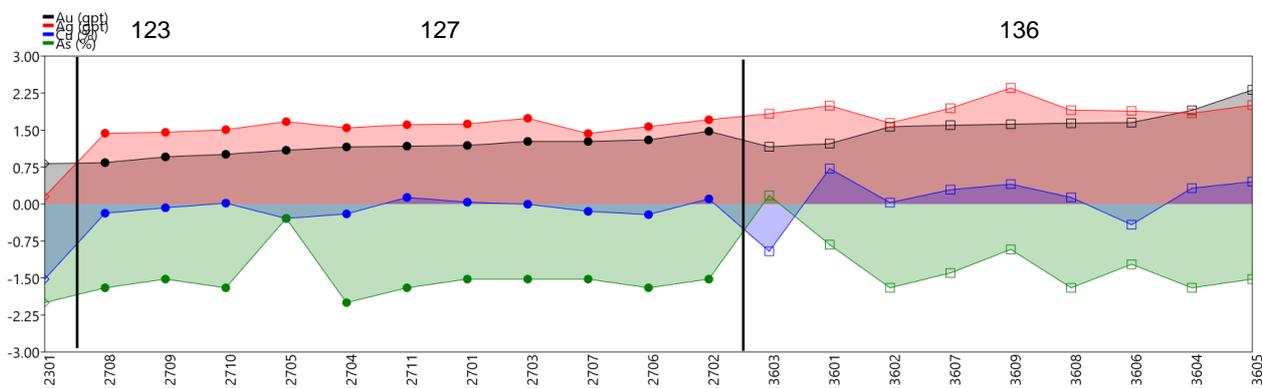


Figura 13 Informe gráfico del Grupo 1 - SOLEDAD, con las minas 123, 127 y 136

- Este grupo se caracteriza generalmente por relaciones Au/Ag cercanas a 1 y Cu/As $\gg 1$.
- La única muestra del proveedor 123 muestra un mayor contenido en oro que en plata. Es algo inusual en este grupo, pero se necesitarían más muestras de este proveedor para ver una tendencia.
- El proveedor 136 presenta dos muestras bastante inusuales (13603 y 13605), pero que son muy posibles si tenemos en cuenta la evolución de un yacimiento. Continuará.

Grupo 2: Orcopampa (amarillo)

En general, el suministro de este grupo está en línea. Continuará.

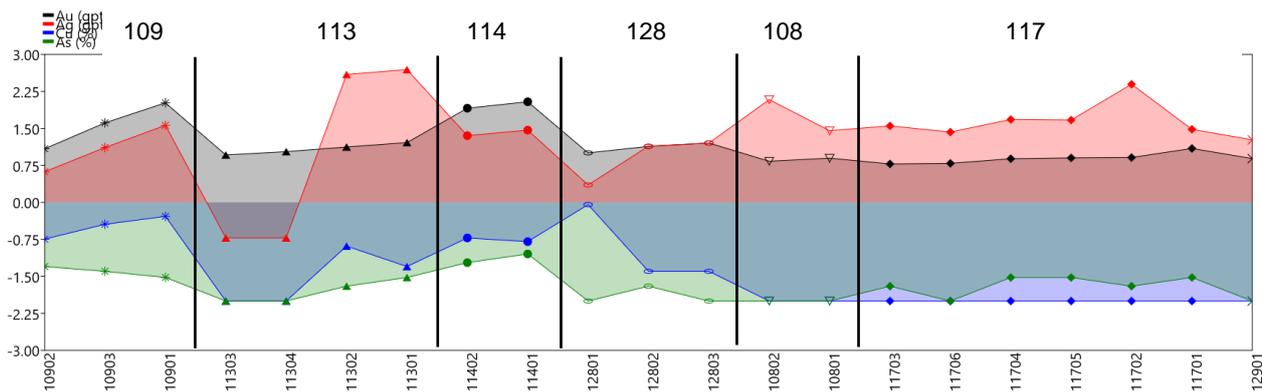


Figura 14: Informe gráfico del Grupo 2 - ORCOPAMPA, con las minas 108, 109, 113, 114, 117 y 128.

- Este grupo se subdivide en dos, según las relaciones Au/Ag y Cu/As.
 - Las minas situadas más al oeste, en la zona de Orcopampa, son más ricas en plata que en oro: la relación Au/Ag < 1 y Cu/As < 1
 - Las minas de la parte oriental de la zona de Orcopampa son más pobres en plata que en oro: la relación Au/Ag > 1 y Cu/As $\approx \pm 1$, con valores próximos a 0.
- Las minas 113 y 128 muestran firmas ligeramente diferentes de los dos grupos definidos anteriormente. Químicamente están más cerca de las minas situadas al este de la zona de Orcopampa. Por el momento, este cambio no puede explicarse. Continuará.

Grupo 3: Cuzco (azul)

El suministro de este grupo es conforme.

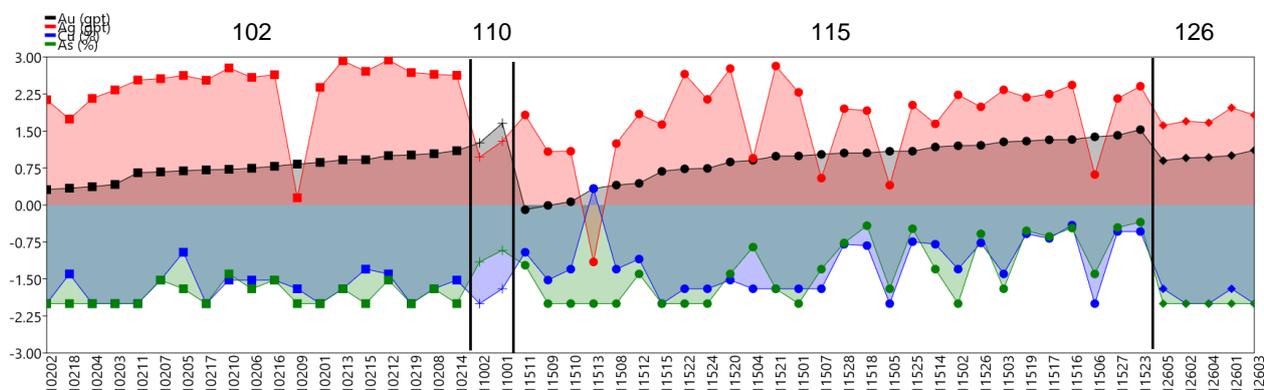


Figura 15.: Informe gráfico del Grupo 3 - CUZCO, con las minas 102, 110, 115, 126.

- Este grupo se caracteriza generalmente por relaciones $Au/Ag \ll 1$ y $Cu/As = \pm 1$.
- Para la muestra 11513, los valores de Ag y Cu probablemente se invirtieron
- La muestra 10209 muestra un valor muy bajo de plata. ¿Se trata de un error analítico?
- Las muestras 11507, 11505 y 11506 también muestran valores inferiores a la norma. Sin embargo, estos valores ligeramente atípicos se encuentran en las relaciones Cu/As .
- Los dos valores disponibles para la mina 110 muestran proporciones inversas a las de las demás minas de este grupo. Esta mina es la que se encuentra más al oeste de las explotaciones de la zona de Cusco.

Grupo 4: Arirahua (rosa)

El suministro de las minas 101 y 104 de este grupo es conforme. La mina 106 debe estudiarse con más detalle (véase p. 30)

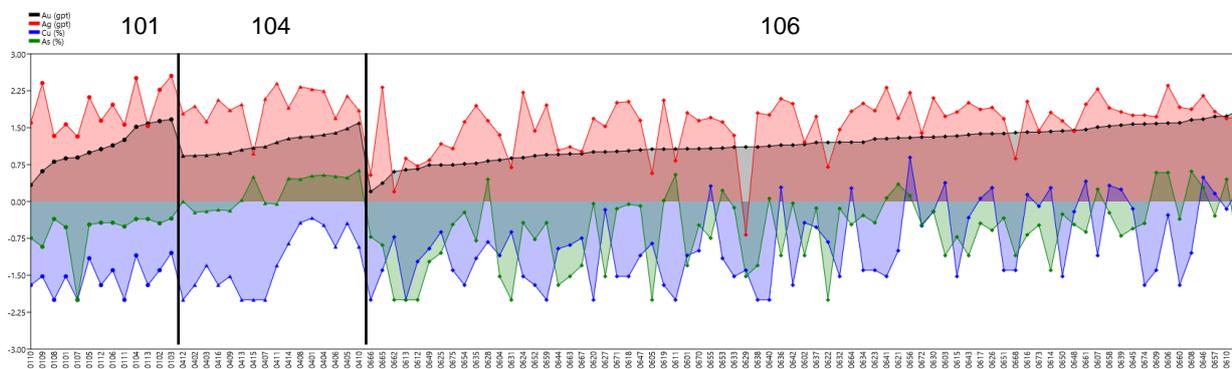


Figura 16: Informe gráfico a del Grupo 4 - ARIRAHUA, con las minas 101, 104 y 106.

- Las minas 101 y 104 de este grupo se caracterizan por relaciones $Au/Ag < 1$ y $Cu/As \gg 1$.
- La mina 106 muestra una firma química muy heterogénea.

Particularidad de la operación 106 de la zona de Arirahua

El proveedor 106 de la región de Arirahua (rosa) muestra una firma química extremadamente heterogénea, lo que hace que su firma sea casi impredecible. No puede caracterizarse a partir de la información disponible. Desde el punto de vista geológico, este proveedor se sitúa en un contexto muy accidentado, en una zona que marca la transición entre una zona oxidada y una zona de sulfuros: estas dos zonas se distinguen por la relación Cu/As, que puede ser superior a 1 (parte derecha de la figura 17) o inferior a 1 (parte izquierda de la figura 17). Por lo tanto, sería interesante comprender mejor la dinámica de la explotación. ¿Se trata de una única explotación o de varias minas pequeñas?

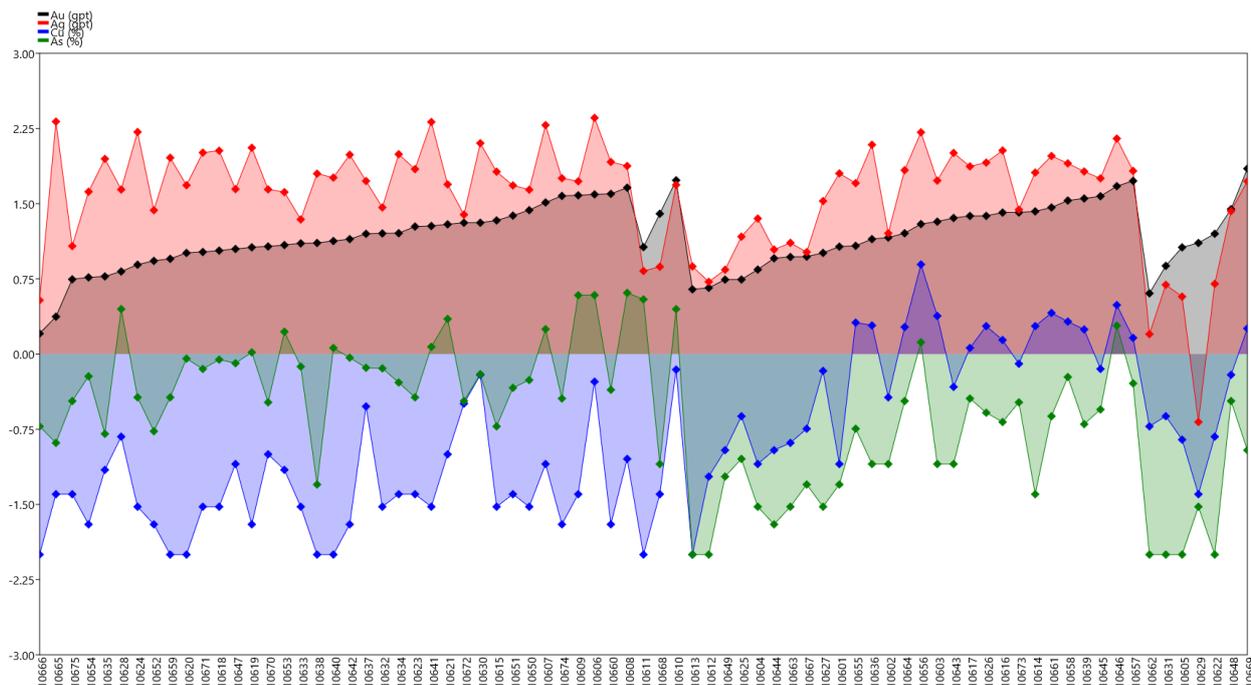


Figura 17: Informe gráfico de la mina 106 en la región de Arirahua. Se pueden distinguir claramente dos firmas químicas diferentes, en función de la relación Cu/As.

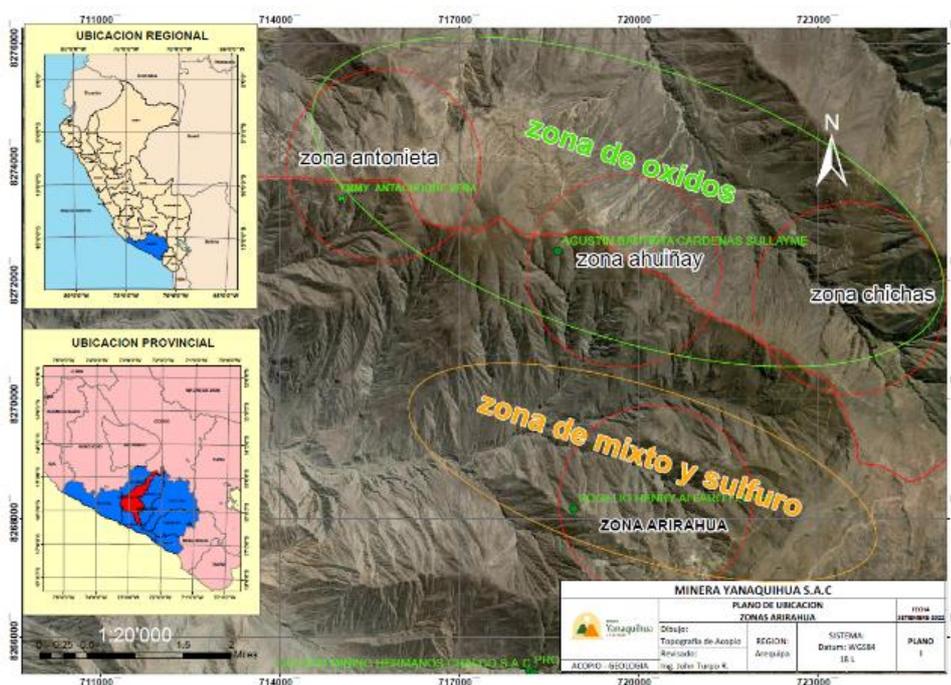


Figura 18: Ubicación geográfica de las minas en la zona de Arirahua

Grupo 5: Colindantes (verde)

El suministro de este grupo es conforme.

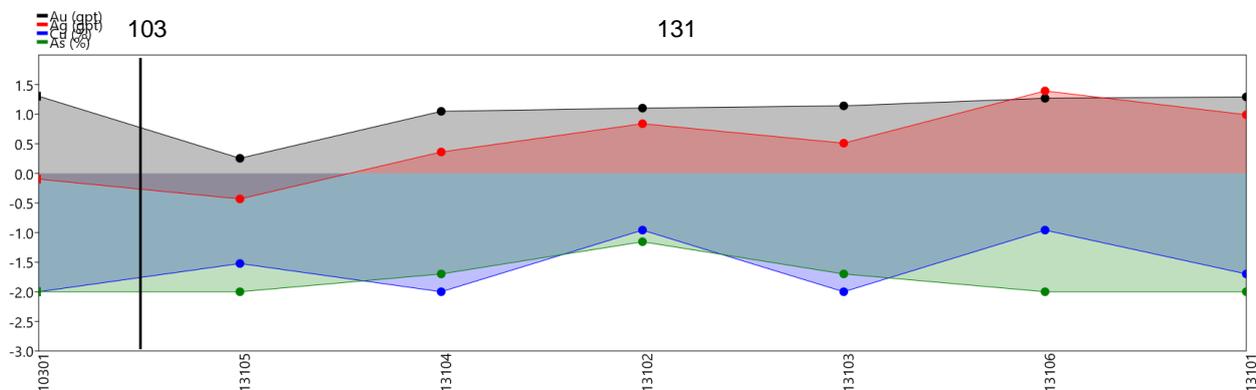


Figura 19: Informe gráfico del Grupo 5 - COLINDANTES, con las minas 103 y 131.

- Este grupo se caracteriza generalmente por unas leyes de oro ligeramente superiores a las de plata y unas relaciones Cu/As también cercanas a 1.

Grupo 6: Rey (azul claro)

El suministro de este grupo es conforme.

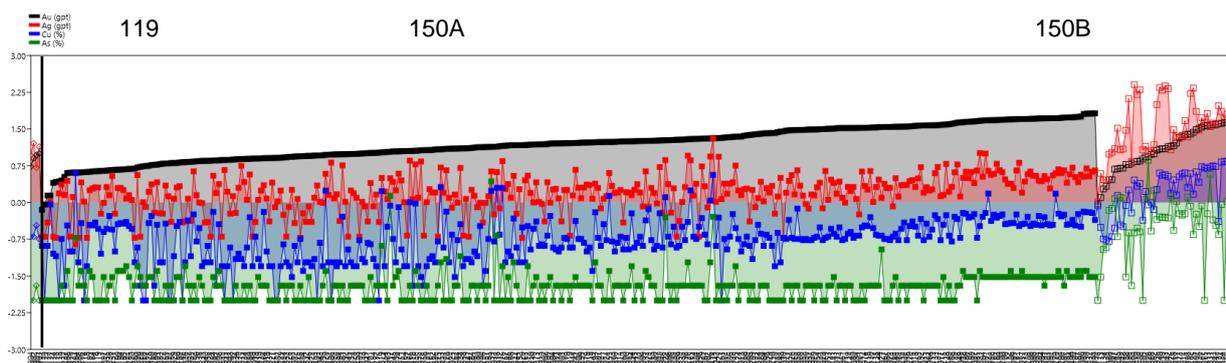


Figura 20: Informe gráfico del Grupo 6 - REY, con las minas 119 y 150. La mina 150 presenta dos calidades diferentes, 150 A (más rica en oro que en plata) y 150 B (más rica en plata que en oro).

- Este grupo muestra dos tendencias diferentes:
 - La primera con relaciones $Au/Ag > 1$ y $Cu/As \gg 1$. La mayoría de las muestras se asignan a este grupo.
 - La segunda con proporciones invertidas para el oro y la plata, de modo que $Au/Ag < 1$ y $Cu/As > 1$
- Este cambio puede explicarse por la transición de la mineralización de la zona de sulfuros a la zona de óxidos y viceversa (véase el Grupo 4: Arirahua) y marca, en este contexto particular, la transición a un mineral de menor calidad (y por tanto con mayores leyes de plata que de oro).

Grupo 7: Central (rojo)

El suministro de este grupo es conforme.

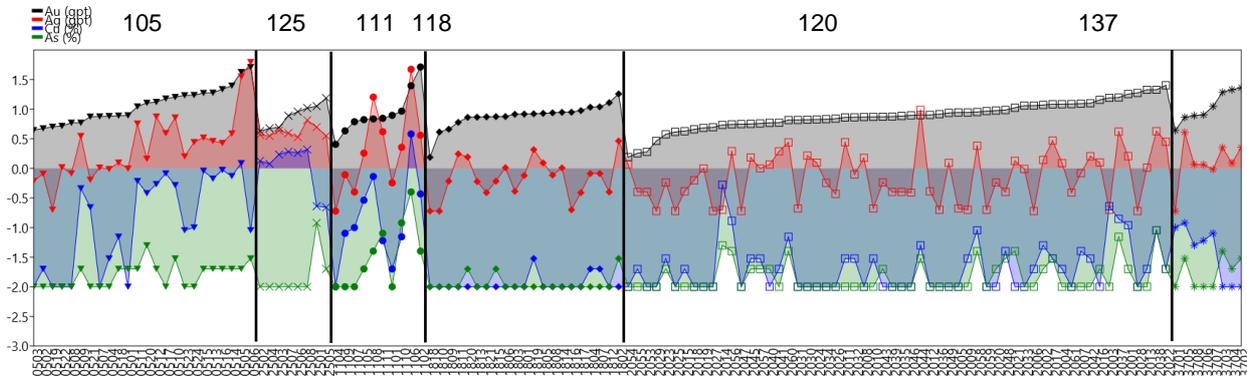


Figura 21: Informe gráfico del Grupo 7 - CENTRAL, con las minas 105, 111, 118, 120, 125 y 137.

- Este grupo debe subdividirse en tres subgrupos. Estos tres subgrupos muestran proporciones muy similares para $Au/Ag > 1$, pero difieren para las proporciones Cu/As .
 - La primera se caracteriza por relaciones $Cu/As \gg 1$. Se trata de las minas 125, 111.
 - La segunda por relaciones $Cu/As = \pm 1$ y cercanas a 0. Estas relaciones cuentan para las minas 118 y 120.
 - La tercera muestra las características de ambos grupos, relacionadas con los cambios en la mineralización. Se trata de las minas 105 y 137.

Grupo 8: Amacci (naranja)

El suministro de este grupo es conforme.

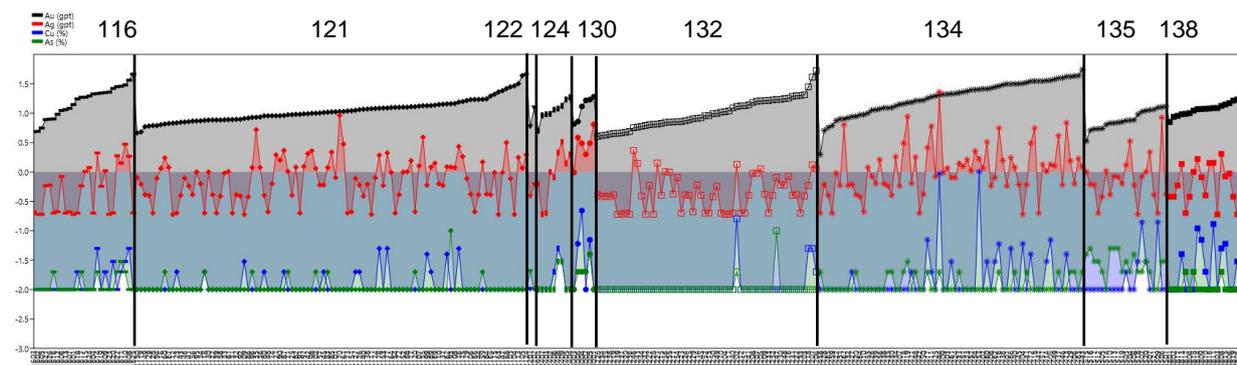


Figura 22: Informe gráfico del Grupo 8 - AMACCI, con las minas 116, 121, 122, 124, 130, 132, 134, 135 y 138.

- Este grupo se caracteriza en general por relaciones $Au/Ag \gg 1$ y $Cu/As = \pm 1$ y cercanas a 0, con una tendencia general a una cantidad ligeramente mayor de cobre que de arsénico. Estas minas están muy cerca de las minas 118, 120 y posiblemente 137 del Grupo 7 (Central). Esto está probablemente relacionado con la proximidad geográfica de las operaciones.
- La mina 135 es quizás un poco diferente, ya que las proporciones $Cu/As < 1$, por lo que hay un poco más de arsénico que de cobre.

Grupo Chaluane

El suministro de este grupo es conforme.

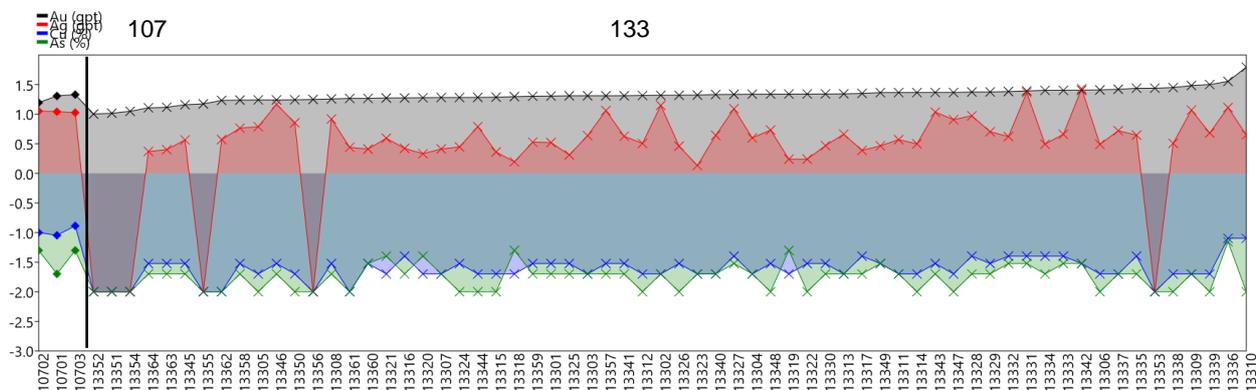


Figura 23: Informe gráfico del grupo CHALUANE, formado por las minas 107 y 133.

- Este grupo forma un conjunto muy homogéneo y se caracteriza por relaciones $Au/Ag > 1$ y $Cu/As \approx \pm 1$.
- Para las muestras Chaluane 13351-13356, sólo se analizó el contenido de oro y no el de plata, cobre y arsénico.

Grupo Mina

El suministro de este grupo requiere una explicación.

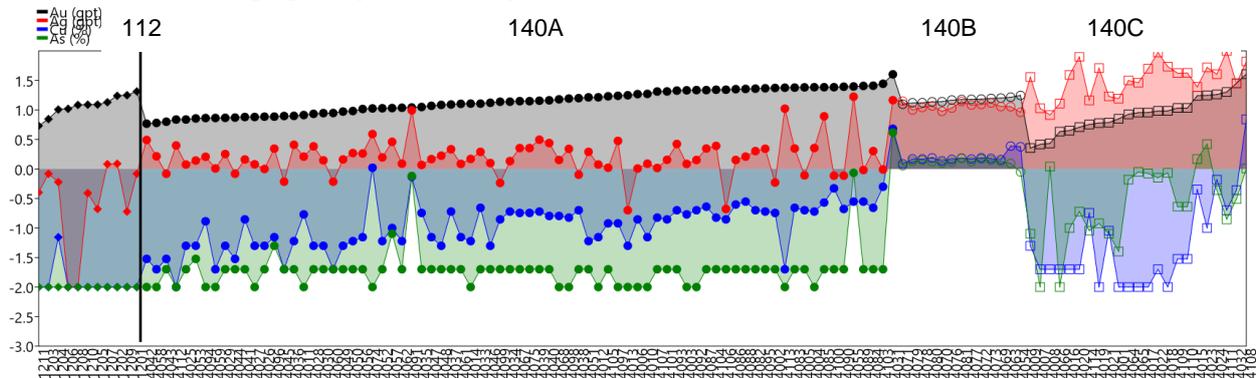


Figura 24: Informe gráfico del grupo MINA, con las minas 112 y 140.

- Este grupo se caracteriza generalmente por relaciones $Au/Ag \gg 1$ y $Cu/As \gg 1$. La mina 140 es muy especial (véase más abajo)
- Para las muestras de la mina 112: 11206 y 12208, sólo se analizó el contenido en oro y no en plata, cobre y arsénico.

Particularidad de la mina 140 Yanaquihua

Los informes gráficos de la mina de Yanaquihua muestran algunas particularidades. Se observan tres firmas químicas diferentes (Figura 24):

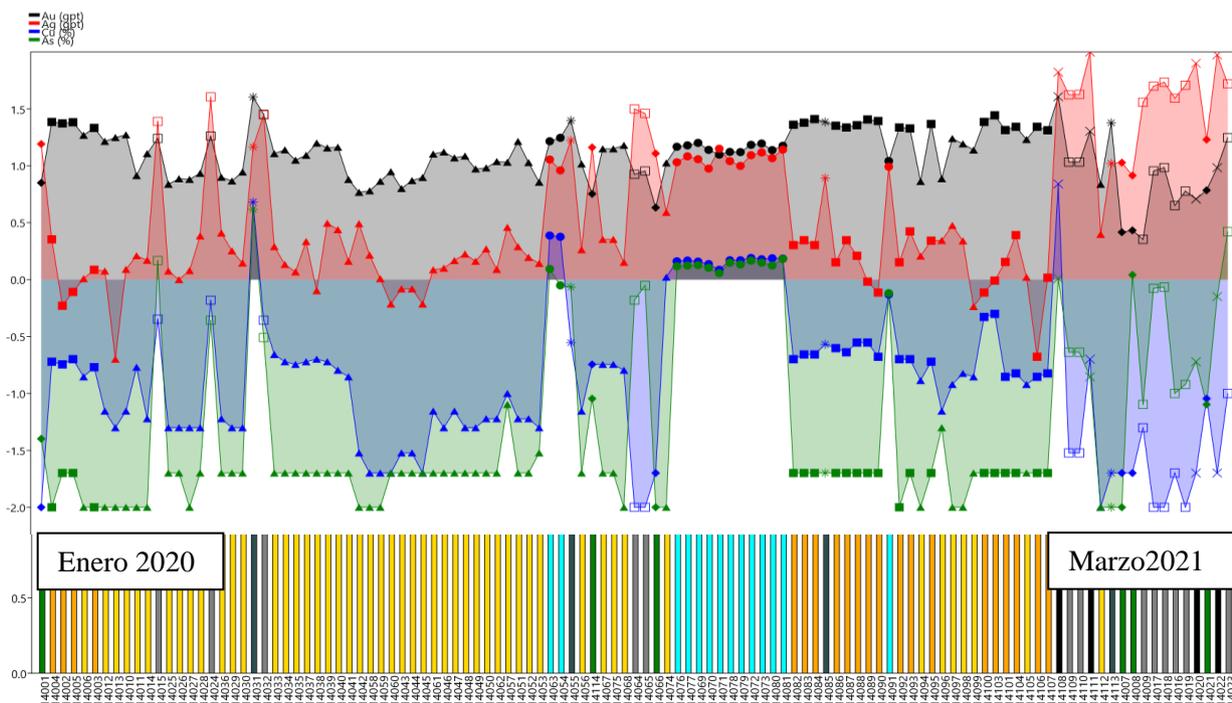


Figura 25: Arriba: informe gráfico de la composición en Au, Ag, Cu y As del mineral extraído en Yanaquihua. Pueden observarse tres firmas químicas diferentes (véase el texto). Abajo: Distribución de las muestras a lo largo del tiempo: a la izquierda, el mineral extraído en enero de 2020; a la derecha, el de marzo de 2021. Además, cada muestra se ha coloreado según su composición química: amarillo y naranja si $Au > Ag$, gris-negro-verde si $Au < Ag$. Aqua si $Au = Ag$. La distribución de estas firmas no es aleatoria y sigue una lógica temporal. Hasta finales de 2020, el mineral presentaba una calidad superior (por ser más rico en oro que en plata) que a partir de 2021 (por ser en general más pobre en oro y mucho más rico en plata). El mineral marcado en turquesa es especial por su composición química y por la época de producción (casi exclusivamente en junio de 2020).

- Firmas 1: $Au/Ag > 1$: hay más oro que plata; $Cu/As > 1$: hay más cobre que arsénico. La mayoría de los minerales presentan esta característica
- Firmas 2: $Au/Ag < 1$: hay más plata que oro; $Cu/As < 1$: hay más arsénico que cobre. Ambas tendencias pueden explicarse por el cambio de mineralización de una zona oxidada a una zona de sulfuros. Este fenómeno también puede observarse en las minas de la zona de Arirahua (figura 18) o en la mina 150 (véase la figura 20).
- Firmas 3: $Au/Ag = 1$: hay tanta plata como oro; $Cu/As = 1$: hay tanto cobre como arsénico. Una decena de muestras de mineral presentan esta firma, que, además, es extremadamente homogénea, con pocas variaciones en su contenido absoluto. Esta homogeneidad no se ha observado en ningún otro lugar en todos los datos estudiados del yacimiento MYSAC. Además, esta firma es observable casi exclusivamente para el mineral extraído en junio de 2020 (otros dos ya dos meses antes). ¿Cómo se explica esta firma?

Observaciones generales

En conjunto, los minerales de los proveedores de MYSAC pueden clasificarse según criterios geoquímicos: presentan relaciones Au/Ag y Cu/As características para cada mineralización explotada. Estos ratios son diferentes de una región a otra y, a veces, incluso dentro de una misma región y, por tanto, de un proveedor a otro. Estas relaciones permiten agrupar a los proveedores con composiciones químicas similares (véase la figura 26).

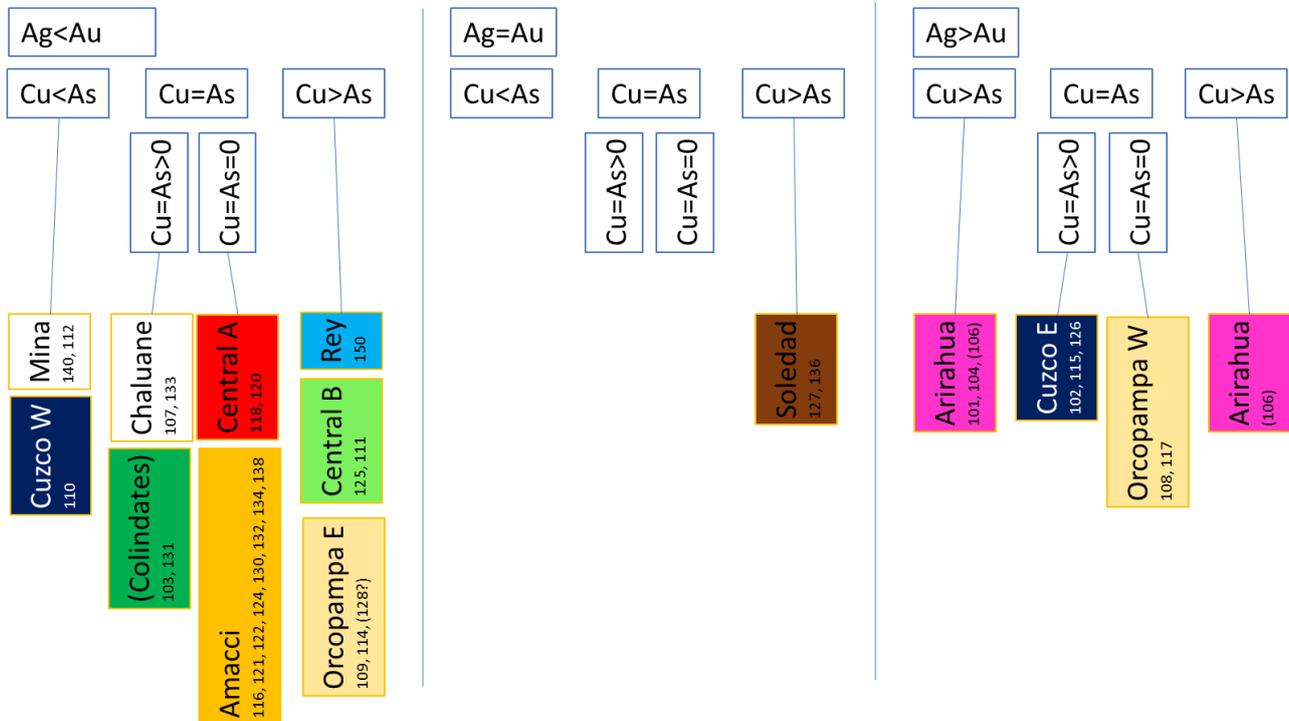


Figura 26: Clasificación de los sitios basada en los informes gráficos detallados en las figuras 13 a 25.

En detalle, la asignación de una muestra específica a uno de estos subgrupos puede ser difícil, ya que estos subgrupos no tienen en cuenta la evolución de la firma dentro de una mineralización. Por consiguiente, la asignación de una muestra a uno de estos subgrupos debe ir seguida de un estudio más detallado, teniendo en cuenta los informes gráficos (Figuras 15 a 25) y otros enfoques estadísticos no representados en este informe. Sólo después de este estudio completo es posible distinguir entre una muestra conforme, un error analítico, una composición química diferente ligada a la evolución del yacimiento o una muestra verdaderamente atípica.

Preguntas abiertas : Es necesario aclarar las firmas químicas de dos minas:

- ¿La mina 106 de la zona de Arirahua está formada por varias subminas?
- ¿El mineral extraído en junio de 2020 en la mina Yanaquihua corresponde a una mineralización en particular?

5.3.2 Diferenciación de los proveedores de MYSAC

En pocas palabras: las distintas regiones productoras de mineral de MYSAC pueden distinguirse entre sí sobre la base de una evaluación estadística. En el caso de las explotaciones que presentan mayores leyes de plata que de oro, la distinción entre las distintas regiones es bastante clara. Esto afecta principalmente a los proveedores externos. En las regiones geográficamente muy próximas, la diferenciación es más difícil. En estos casos, hay tendencias más que límites claros entre los distintos grupos.

Cabe señalar que la asignación de una muestra concreta a un proveedor es a veces difícil, pero la confirmación de la declaración de origen es casi siempre posible.

Las minas artesanales tienen una firma estadística mucho más precisa que las grandes minas. La elección del mineral es probablemente mucho más selectiva en una explotación pequeña que en una mina más grande.

El gráfico de la figura 27 muestra que hay minas ricas en oro que contienen relativamente poca plata. Son las minas representadas por los puntos de la parte superior del gráfico. Algunas minas tienen más plata que oro en sus muestras. Se trata de las minas que aparecen en la parte inferior del gráfico.

La frontera entre los dos grupos es relativamente clara: o bien un proveedor pertenece a las minas de oro y, por tanto, $Au > Ag$, o bien pertenece a las minas que aún contienen cantidades significativas de oro, pero en las que el contenido de plata es superior al de oro: $Au < Ag$.

A continuación, examinaremos los dos tipos de minas por separado.

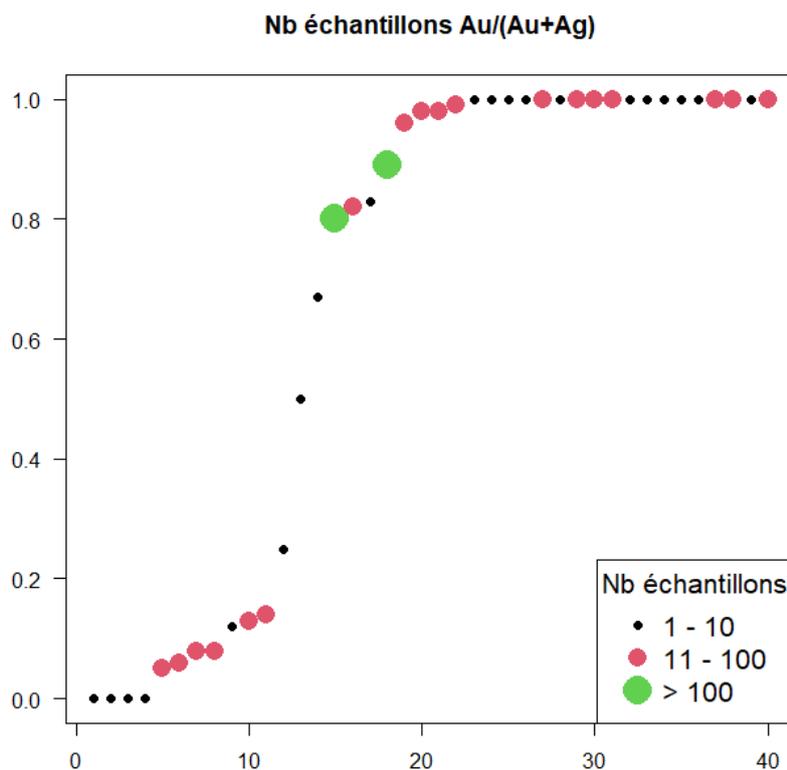


Figura 27: Los puntos de este gráfico representan a un proveedor. En negro están los proveedores de los que teníamos entre 1 y 10 muestras de mineral, en rojo entre 11 y 100 muestras y en verde más de 100 muestras. En la parte superior de este gráfico figuran los proveedores para los que todas las muestras contienen más oro que plata. En la parte inferior ocurre lo contrario: todas las muestras de una mina son más ricas en plata que en oro. Los puntos intermedios representan a los proveedores con menas a veces más ricas en plata y a veces más ricas en oro. En conjunto, tenemos dos grupos: minas más ricas en oro o con tendencia a serlo (parte superior) y minas más ricas en plata o con tendencia a serlo (parte inferior).

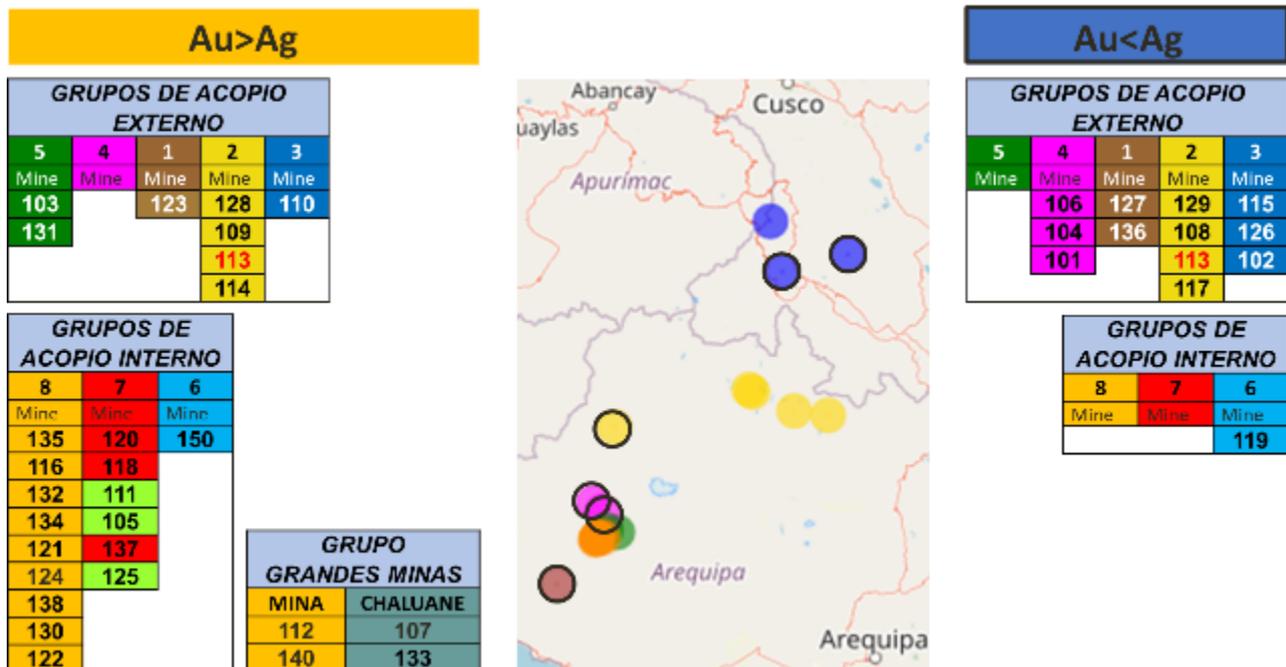


Figura 28: Localización geográfica de las minas con muestras que contienen más oro que plata: Au > Ag: redondo macizo sin borde; y menos oro que plata: Au < Ag: redondo sólido con borde.

Grupo Au < Ag

En esta sección, sólo examinaremos las minas en las que el contenido de plata es superior al de oro. Se trata principalmente de las minas de los "grupos de acopio externo", es decir, de las siguientes regiones:

- Soledad (grupo 1, marrón)
- Orcopampa W (grupo 2, amarillo)
- Cusco E (grupo 3, azul)
- Arirahua (grupo 4, rosa)

Para algunas minas que forman parte de los "grupos de acopio externo", esta observación no se aplica: el contenido de oro es superior al de plata. Estos son:

- las minas situadas en la región de Orcopampa E
- una mina en la región de Cuzco W.
- Minas agrupadas bajo Colindantes (grupo 5, verde)

Estas minas no se tratan en esta sección.

El análisis de componentes principales de la figura 28 de los grupos exteriores muestra claramente las posibilidades de discriminación dentro de los distintos grupos. Las muestras de las minas amarillas coinciden en gran medida con las de las minas azules. En cambio, las minas rosas, marrones y parcialmente verdes se distinguen claramente.

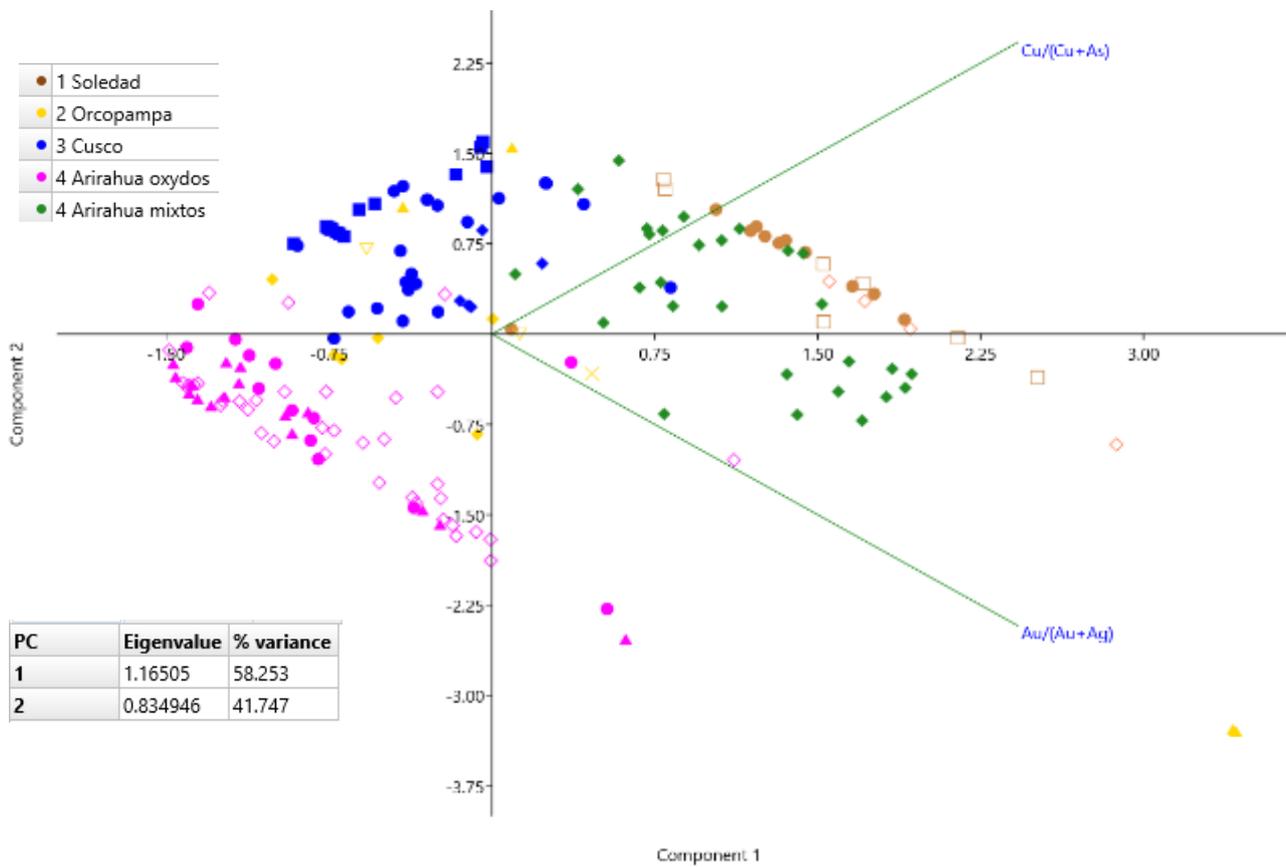


Figura 29: Análisis de componentes principales, correlación. $Au < Ag$, con azul: minas de la región de Cuzco, marrón: minas de la región de Soledad, amarillo: minas de la región de Orcopampa, rosa: minas de la región de Arirahua para las que $Au < Ag$, verde: minas de la región de Arirahua para las que $Au > Ag$.

Grupo $Au > Ag$

Así pues, los minerales ricos en oro proceden principalmente de los "grupos de acopio interno", es decir, los yacimientos azul (6 Rey), rojo o verde claro (7 Central), naranja (8 Amacci), Mina y Chaluane, y algunos azules y amarillos (véase la figura 28).

La figura 30 muestra un análisis de componentes principales de estas regiones. Se puede ver:

- El grupo 3 (cruz azul) destaca sobre los demás, pero hay muy pocos datos disponibles.
- El grupo 6 (verde azulado) se superpone en gran medida al grupo Mina (marrón doré) y al grupo 7 (verde claro): se trata de yacimientos geográficamente muy próximos.
- Las muestras de los grupos 2 (amarillo) y 7 (rojo) están dispersas por todas partes.

En el siguiente gráfico (Figura 31), presentamos el mismo análisis, pero sin el proveedor azul-verde (grupo 6, Rey), que es, por tanto, uno de los principales proveedores de MYSAC. Los diferentes grupos no muestran límites claros de un grupo a otro, pero pueden observarse tendencias, por ejemplo, para los grupos verde claro (7 Central B), marrón doré (Mina), azul claro (Chaluane) y naranja (8 Amacci).

Este gráfico muestra claramente que es interesante separar las minas artesanales de las minas a mayor escala. De hecho, las minas artesanales tienen una firma química mucho más precisa. La elección del mineral es probablemente mucho más selectiva que en una mina más grande.

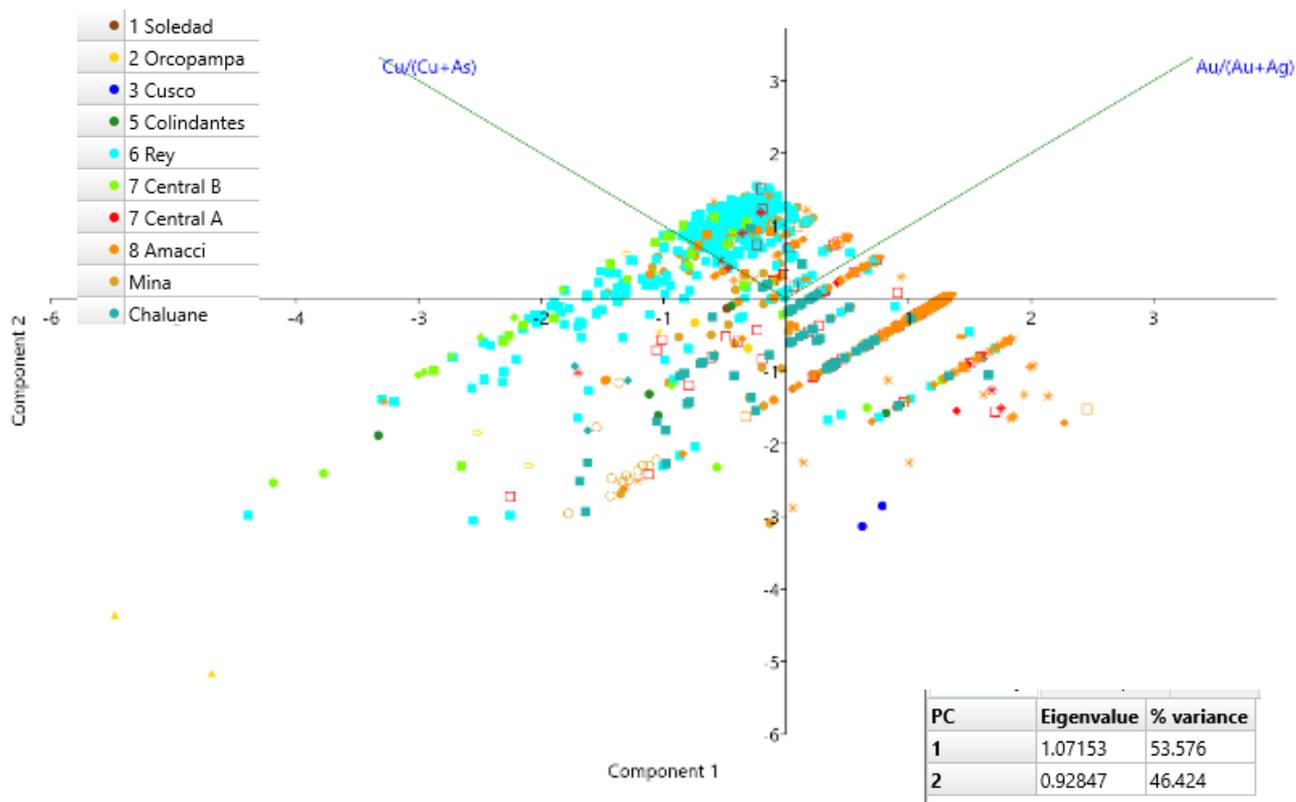


Figura 30: Análisis de componentes principales de los proveedores cuyo mineral es más rico en oro que en plata (véase también la figura 27. Datos sin elementos atópicos. Correlaciones.

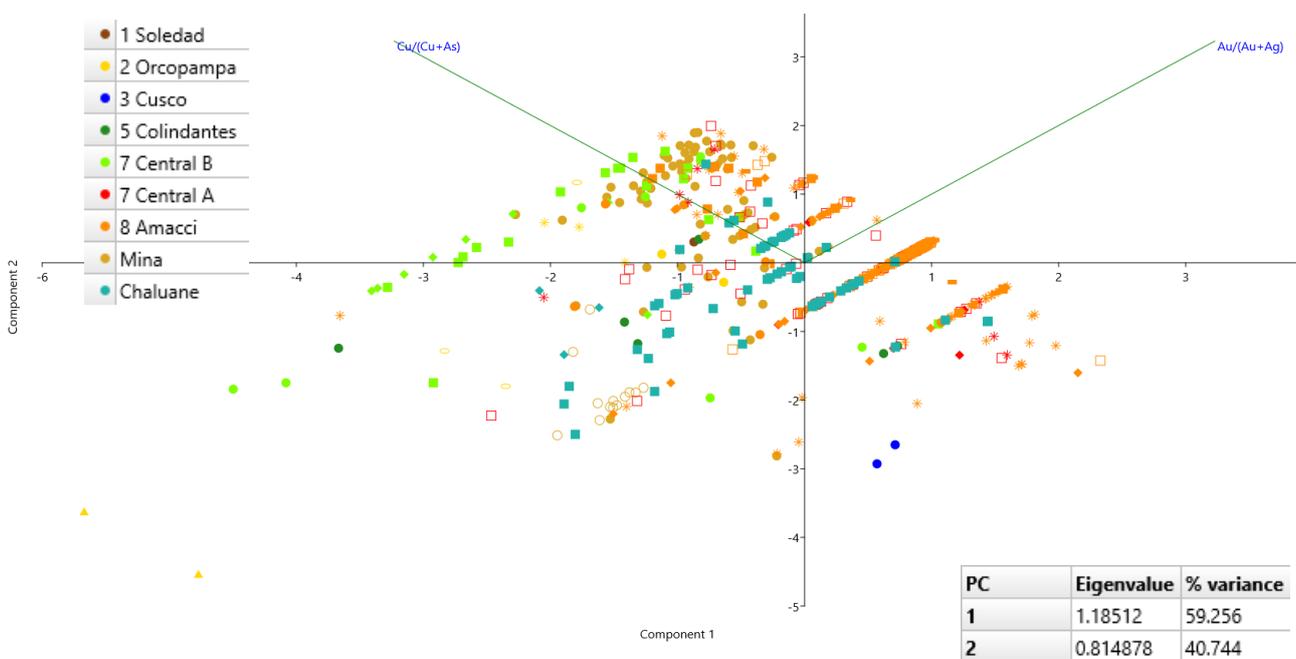


Figura 31: Análisis de componentes principales de los proveedores cuyo mineral es más rico en oro que en plata (véase también la figura 28. Mismo gráfico que la figura 30, pero sin el proveedor 150 (Rey). Correlaciones.

5.3.3 Contribución de los 4 métodos utilizados para diferenciar las explotaciones

En este capítulo queremos discutir y comparar los distintos métodos utilizados para discriminar entre explotaciones y estimar el potencial de mejora de nuestro enfoque.

En pocas palabras: cruzando los distintos enfoques -geográfico, geológico, geoquímico y estadístico- es posible diferenciar entre sí casi todas las regiones productoras. Esta diferenciación se basa únicamente en 4 elementos químicos analizados.

La distinción entre minas o regiones se basa en cuatro criterios (cuadro 4): localización geográfica, estudio geológico, interpretación geoquímica y evaluación estadística. El análisis geoquímico y la interpretación estadística son los más discriminantes y se complementan entre sí. Observamos:

- Las minas de los grupos externos no sólo son distintas de las de los grupos internos, sino también entre sí.
- Las minas internas tienen firmas relativamente similares. La diferenciación se consigue mejor cruzando enfoques.
- El enfoque geológico sigue siendo algo incompleto. Un mejor conocimiento de la geología y la metalogenia permitiría comprender mejor los yacimientos y, por tanto, también los elementos característicos de las mineralizaciones explotadas. Esto nos permitiría seleccionar elementos adicionales a los elementos analizados y aumentar así el potencial discriminatorio de nuestros análisis.

Tabla 4: Comparación entre los 4 métodos de investigación para discriminar las regiones productoras de minerales. Las regiones con características similares (por columna) están marcadas con el mismo color.

Grupo minero	Situación geográfica	Edad geológica (lecho rocoso)	Análisis geoquímico		Interpretación estadística
			Ag=Au	Cu>As	
1 Soledad (127, 136)	separar	Jurásico superior	Ag=Au	Cu>As	Único
2 Orcopampa W (109, 114, (128))	separar	Neógeno-Mioceno	Ag<Au	Cu>As	Dispersos
2 Orcopampa E (108, 117)	separar	Neógeno - Cuaternario	Ag>Au	Cu=As=0	Cerca de Cusco E
3 Cusco W (110)	separar	Neógeno-Mioceno	Ag<Au	Cu<As	Único
3 Cusco E (102, 115, 126)	separar	Paleógeno - Neógeno	Ag>Au	Cu=As>1	Cerca de Orcopampa E
4 Arirahua oxidada (101, 104)	Cerca de Yanaquihua	Jurásico superior	Ag>Au	Cu<As	Único
4 Arirahua mixto (106)	Cerca de Yanaquihua	Jurásico superior	Ag>Au		± único
5 Colindantes (103, 131)	Cerca de Yanaquihua	Cretácico superior	Ag<Au	Cu=A>0s	Dispersos
6 Rey (150)	¿Cerca de Yanaquihua?	Cretácico superior	Ag<Au	Cu>As	
7 Central A (118, 120, (105, 137))	¿Cerca de Yanaquihua?	Cretácico superior	Ag<Au	Cu=As=0	Dispersos
7 Central B (125, 111, (105, 137))	¿Cerca de Yanaquihua?	Cretácico Superior	Ag<Au	Cu>As	Diferenciación parcial **
8 Amacci (116, 121, 122, 124, 130, 132, 134, 138, (135))	Cerca de Yanaquihua	Cretácico superior	Ag<Au	Cu=As=0	Diferenciación parcial
Mina (112, 140)	Cerca de Yanaquihua	Cretácico superior	Ag<Au	Cu<As	Diferenciación parcial
Chaluane (107, 133)	¿Cerca de Yanaquihua?	Cretácico superior	Ag<Au	Cu=As>0	Diferenciación parcial

* Sin grupo 6: Rey

** Muy similar al Grupo 6, Rey, al que este grupo es casi idéntico

5.3.4 Diferenciación de los minerales de MYSAC de otros yacimientos peruanos

Nos preguntamos si era posible distinguir los minerales procedentes de otros lugares de producción, es decir, Sotrami, Altiplano (región de Puno), La Rinconada o Madre de Dios, de los integrados en el centro de enriquecimiento MYSAC.

En pocas palabras: en el contexto de una inspección de MYSAC, es muy probable que se detecte mineral procedente de otros lugares, en particular del Altiplano, La Rinconada y Madre de Dios. Este no es necesariamente el caso del mineral procedente de un contexto geológico similar, como Sotrami. Al seleccionar más elementos químicos para el análisis, el poder discriminatorio aumenta considerablemente.

Esta comparación se enfrentó a varios obstáculos:

- Representatividad de las muestras recogidas. Observamos una gran heterogeneidad en los resultados analíticos de las muestras que recogimos nosotros mismos en las minas. En efecto, como las vetas son heterogéneas, la composición química de la muestra depende mucho de la elección que hagamos. No encontramos este problema en los depósitos secundarios (arena), que muestran muy poca variabilidad química.
- Protocolo analítico. Para situarnos en el contexto de MYSAC, primero intentamos hacer esta comparación basándonos únicamente en los elementos analizados en MYAC, es decir, oro, plata, cobre y arsénico. Sin embargo, el oro no puede ser detectado por WD-XRF. Por lo tanto, basamos nuestro análisis únicamente en los tres elementos restantes.

La diferenciación de menas de distinto origen no es evidente (figuras 31 y 32). Con los tres elementos: plata, cobre y arsénico, no es posible distinguir el mineral de MYSAC del de Madre de Dios, Altiplano y, a veces, Sotrami. El mineral de La Rinconada es, sin embargo, distintivo. Por otra parte, si aceptamos que la relación oro/plata es la misma en el mineral y en el oro producido (el oro), podemos ver que esta relación asciende a **1 a 1,5** para el oro de MYSAC. Concretamente, en el oro de MYSAC hay o bien tanto oro como plata, o bien aproximadamente 1,5 veces más oro que plata. Si nos fijamos en la producción de otros sitios, esta proporción asciende a :

- casi 100 para el oro de Madre de Dios, lo que significa que el oro está compuesto casi exclusivamente de oro sin plata.
- entre 5 y 100 veces más ricas en oro que en plata las dorés producidas en La Rinconada
- De 20 a 100 veces más rica para las dorés del Altiplano

Suponiendo, por tanto, que estos coeficientes se apliquen también al mineral, es posible distinguir el mineral de MYSAC del de los otros yacimientos mencionados.

Otro enfoque para aumentar el poder discriminatorio entre menas de distinto origen (véase la figura 34) consiste en elegir elementos característicos de los distintos tipos de yacimientos o de los procesos metalúrgicos:

- Algunos elementos se encuentran más a menudo en depósitos secundarios (es decir, de tipo arenoso): Sn, Zr
- Otros elementos son característicos de los yacimientos primarios (relacionados con las vetas), como As, Se, Bi, Mo
- Algunos elementos pueden estar presentes debido a la contaminación ambiental general. Es el caso del mercurio.

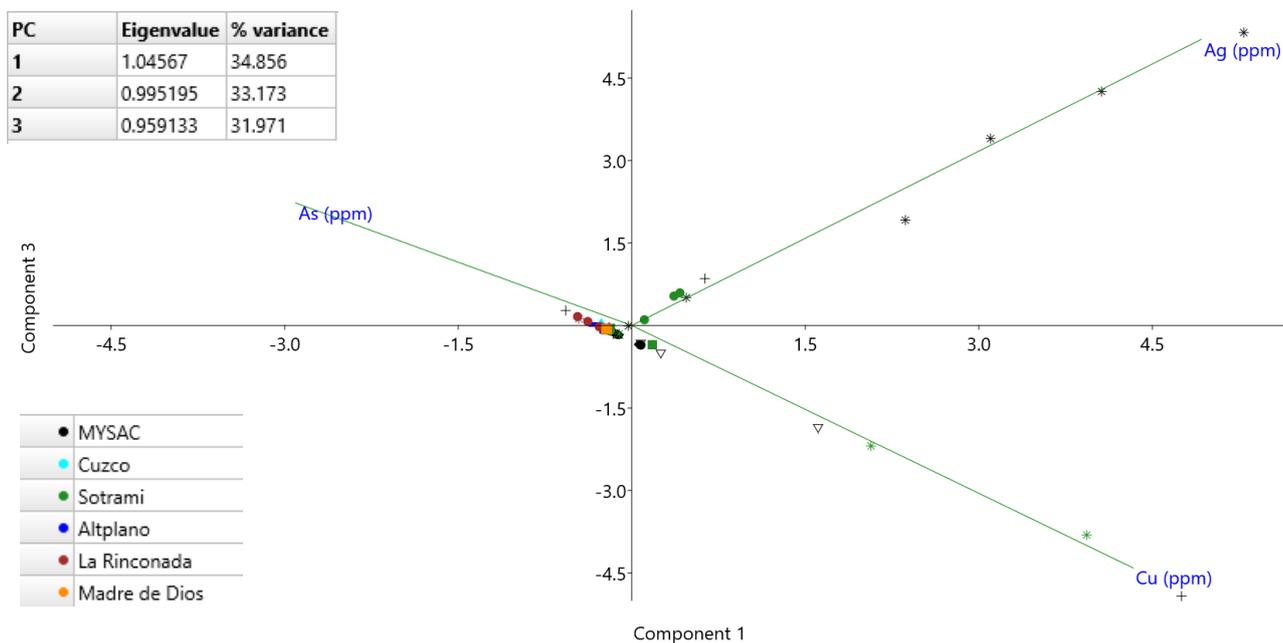


Figura 32: Análisis de componentes principales de minerales procedentes de varias minas artesanales. Estas muestras se analizaron mediante WD-XRF en la Universidad de Lausana. Para poder comparar estas muestras con las analizadas en MYSAC, este análisis sólo tiene en cuenta las leyes de cobre, plata y arsénico. El oro no está representado, ya que no fue detectado por WD-XRF. Los colores se refieren a las regiones mineras, las siglas a explotaciones concretas.

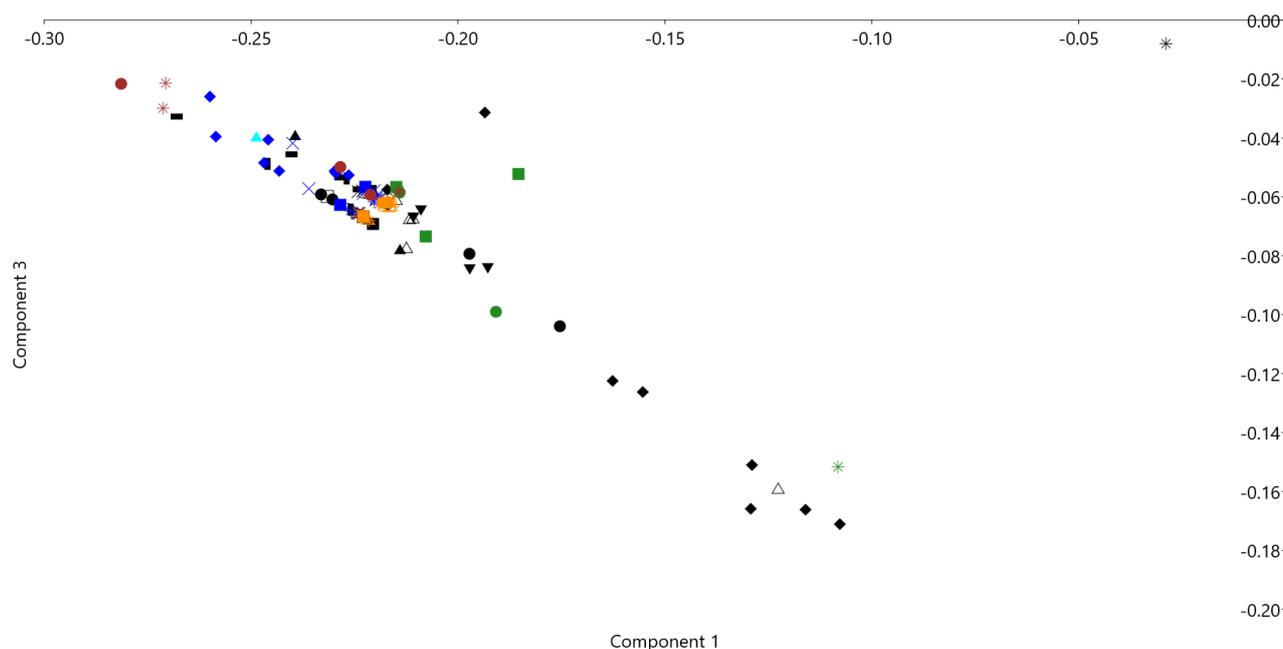


Figura 33: Extracto de la figura 32.

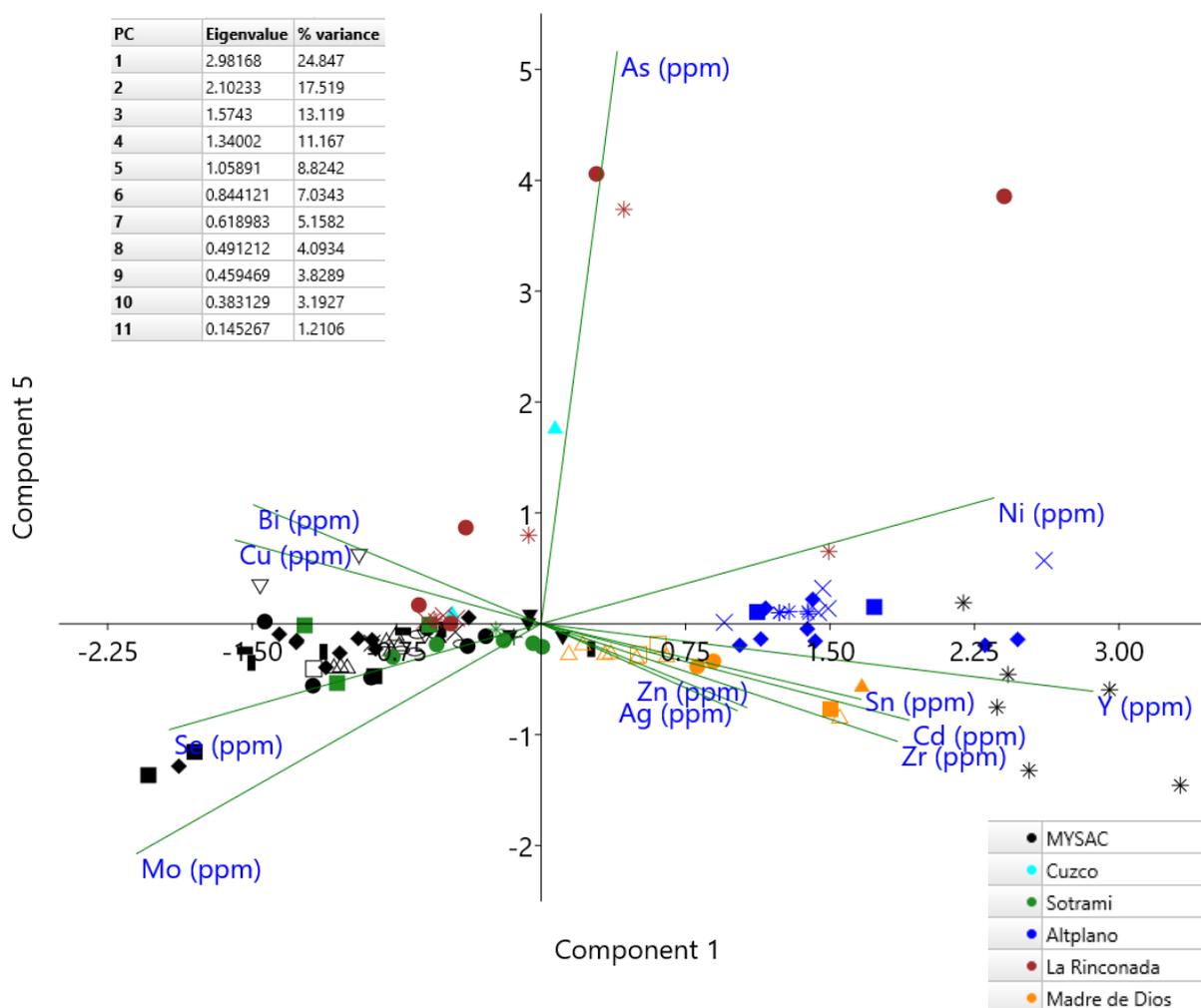


Figura 34: Análisis de componentes principales de minerales procedentes de varias minas artesanales. Para aumentar el poder discriminante de este análisis, hemos complementado el análisis de los dos gráficos anteriores con elementos típicos de los yacimientos (por ejemplo, Sn, Zr, Se, As, Mo, Bi) o tratamientos metalúrgicos (Zn, Hg). Se puede observar que el mineral de MYSAC es muy diferente del de La Rinconada, del Altiplano y de Madre de Dios, pero muy cercano al mineral de Sotrami. De hecho, los contextos geológicos de Sotrami y MYSAC son muy similares en general.

6. Conclusión

6.1 Resultados más importantes

¿Puede controlarse el origen del doré producido en un entorno de minería artesanal para una empresa como MYSAC? Sí, se puede validar el origen de los dorés y el suministro de mineral.

Especifiquemos:

6.1.1 Desde un punto de vista práctico, los resultados de nuestras investigaciones

Este estudio muestra que la producción de MYSAC es una mezcla de las dos grandes minas, Yanaquihua y Chaluane, y aproximadamente 385 minas artesanales. Por lo tanto, los dorés producidos son una mezcla de proporciones variables entre estas dos grandes minas y las minas artesanales. Para nuestro estudio, tuvimos acceso a los datos de las dos grandes minas y de unas 40 minas pequeñas.

Pudimos destacar algunas particularidades en relación con los dorés. Por ejemplo, tres dorés ricos en bismuto con distintos grados. Este contenido de bismuto debe tener un origen específico que aún no hemos podido identificar. Dado que este contenido está presente en tres dorés diferentes, se trata para nosotros de un suministro repetitivo y, por tanto, totalmente constante. Pero también un doré rico en estaño y pobre en plata. Su fuente, posible en un contexto metalogénico de MYSAC, tampoco ha podido determinarse aún.

En cuanto a las minerales, hemos observado algunas particularidades en el estudio general de un proveedor

- Arirahua: la firma es muy heterogénea. ¿Hay varias operaciones pequeñas?
- Yanaquihua: falta aclarar la firma del mineral suministrado en junio de 2020

Para algunos minerales muy específicos, no siempre sabemos, en la fase actual de la investigación, si se trata de un error de análisis, de un cambio vinculado a la evolución de un yacimiento o de una muestra realmente atípica. En general, nos inclinamos por una de las dos primeras posibilidades.

A excepción de estas pocas peculiaridades que conviene aclarar, comprobamos que la producción de dorés y el suministro de minerales de MYSAC están conforme.

6.1.2 Desde un punto de vista científico

En el caso del doré, es posible, a partir de 20 elementos analizados, determinar una firma química y estadística relativamente homogénea: el proceso de beneficio en MYSAC utiliza las técnicas más modernas, eliminando una gran parte de los elementos deletéreos. Por tanto, la influencia del origen de las pequeñas minas se elimina en gran medida mediante un proceso controlado de refinado previo. Sin embargo, se observan diferencias en comparación con LSM, cuya firma es aún menos dispersa.

De este modo, podemos confirmar el origen de los dorés producidos en MYSAC, así como detectar mezclas con cantidades muy pequeñas añadidas al doré.

En cuanto a las menas, comprobamos que los datos no son tan dispersos como se suponía en un principio. Por el contrario, las minas artesanales tienen una firma química y estadística mucho más precisa que las dos grandes minas de MYSAC. Esto se debe probablemente a que las minas pequeñas son más selectivas a la hora de clasificar el mineral. Por lo tanto, es posible confirmar la declaración de origen del mineral, y ello sólo basándose en 4 elementos químicos analizados. La conformidad del mineral extraído puede validarse en su conjunto y requiere dos etapas de investigación:

1. Enfoque global. Esto implica comprender las tendencias generales y las posibles variaciones a nivel de mina o de región. De hecho, es posible que se produzcan cambios en la composición química con el avance de las galerías excavadas: la mineralización puede pasar gradualmente de una zona oxidada a una zona sulfurada. Teniendo en cuenta esta evolución de los yacimientos minados, hemos podido confirmar la declaración de origen de la mayoría de los productores de MYSAC.

2. Planteamiento detallado. En el caso de algunos proveedores, observamos muestras que diferían de la tendencia general. Al tratarse de muestras aisladas, no siempre es fácil encontrar una explicación a este posible incumplimiento.

Y, por último, se plantea la cuestión de si es posible detectar adiciones de oro o minerales procedentes de yacimientos ilegales. Ya podemos descartar material de, por ejemplo, La Rinconada o Madre de Dios; pero desconocemos el yacimiento de producción ilegal del Valle de Ocoño, que se encuentra en un contexto geológico similar al de MYSAC y del que no tenemos datos comparativos.

6.1.3 Desde un punto de vista metodológico

Hemos podido poner en marcha una metodología basada en herramientas de análisis muy precisas. Estas herramientas proceden de los campos de la geoquímica y la estadística multivariante. Una vez establecido el procedimiento de análisis e interpretación de los datos, la labor de validación de la declaración de origen del doré y los minerales se verá enormemente facilitada en el futuro.

6.1.4 Desde un punto de vista operativo

Nos basamos en los análisis efectuados en MYSAC para los minerales (4 elementos químicos analizados) y a la llegada a la refinería de Metalor para los dorés (20 elementos químicos analizados). Estos análisis ya están integrados en el flujo de beneficio del mineral en MYSAC o de refinado del doré en Metalor, por lo que no generan costes analíticos adicionales.

Por lo tanto, podemos poner en marcha una herramienta eficaz, que requiere un coste adicional relativamente bajo, vinculado únicamente a la interpretación estadística y geoquímica de los datos.

6.1.5 Otras observaciones

Como la firma química de un yacimiento no es constante, es necesario basarse en un corpus analítico relativamente amplio que abarque los últimos 6 meses a dos años anteriores a un estudio como el que se propone en este informe.

6.2 Recomendaciones

Para validar definitivamente el suministro de mineral y la producción de dorés de MYSAC, se agradecerían datos adicionales:

1. Nuestro enfoque se basa en dos conjuntos de datos. Un conjunto se refiere a los dorés suministrados a Metalor entre abril de 2021 y junio de 2022 y el otro a los minerales suministrados a MYSAC entre enero de 2020 y marzo de 2021. El análisis de los minerales proporciona información sobre 40 de las 385 pequeñas minas artesanales y las dos grandes minas. Por lo tanto, sería eficaz (1) disponer del conjunto completo de datos de las pequeñas minas y (2) contar con corpus analíticos que abarquen el mismo periodo de tiempo.
2. Disponer del conjunto de datos completo nos permitiría comprender mejor las cuestiones planteadas en el apartado 5.1.1. y dar un paso adelante en la comprensión de la evolución de la firma química de las dorés y los minerales en función de la mineralización explotada.

Una vez concluido el estudio actual, proponemos realizar una validación periódica del suministro de MYSAC. Sugerimos un nuevo estudio de conformidad al menos cada tres años aproximadamente.

6.3 Perspectivas

A pesar de las cuestiones abiertas, nuestro enfoque ofrece una herramienta fiable de detección de anomalías y, por tanto, da la credibilidad necesaria a todas las empresas extractivas formalizadas o en proceso de formalización para entrar en una cadena de suministro legal. Esto plantea las siguientes cuestiones:

1. El pasaporte geoforense puede utilizarse como herramienta descentralizada y puede implantarse en cualquier punto de la cadena de suministro, idealmente en un cuello de botella de la cadena de suministro: una cooperativa minera, una planta de transformación, una prerrefinería, etc. ¿Cómo elegir los lugares adecuados, desde el punto de vista administrativo y político, para implantar el pasaporte geoforense?
2. Mis conversaciones con los mineros me han demostrado que la voluntad de formalizarse es escasa. ¿Cómo pueden desarrollarse más incentivos para aumentar la formalización y, por tanto, la aplicación del pasaporte geoforense?
3. El contexto de este estudio fue muy favorable para el desarrollo de nuestro método. Pudimos trabajar en condiciones ideales gracias a la apertura y colaboración de MYSAC. Este no es ni mucho menos el caso de todas las cooperativas mineras. Se plantea entonces la cuestión de cómo aplicar una herramienta como el pasaporte geoforense en un contexto menos transparente. Cómo crear un marco ideal que permita acceder al análisis químico o establecer un protocolo analítico externo que responda a nuestras necesidades: análisis fiables y competentes. ¿Cómo podemos estar seguros de que todas las muestras -de mineral o del doré- se han analizado y pasado a control?
4. Y por último, para reforzar la colaboración con Perú, ¿cómo integrar a una autoridad local (el instituto geológico, una universidad, otra entidad?) en este proceso de control?

Apéndice 1: Lista de muestras MYSAC

A1.1 Minas apoyadas por la Swiss Better Gold Association

Tabla A1: Distribución de las minas en dos grupos

ACOPIO INTERNO	Zonas de trabajo de mineros artesanos dentro de concesiones Minera Yanaquihua
ACOPIO EXTERNO	Zonas de trabajo de mineros artesanos fuera de concesiones Minera Yanaquihua

Tabla A2: Grupos de Acopio externo

GRUPOS DE ACOPIO EXTERNO									
COLINDANTES		ARIRAHUA		SOLEDAD		ORCOPAMPA		CUZCO	
5		4		1		2		3	
	LA PAMPA	106	ARIRAHUA	127	MARCHANTE	129	PAULA	115	CHUMBIVILCAS
	JENCHO	104	ANTONIETA	136	SOLEDAD	108	CASTILLA	126	LIVITACA
	ALPACAY	101	AHUIÑAY		CISERNILLO	128	ORCO-PAMPA	102	ALCA VICTORIA-CUSCO
131	QUIROZ		C.P. SAN CRISTÓBAL		ALTO MOLINO	117	COTAHUASI	110	CCOMER-CCOCHA II
103	ANDARAY		OLVIDADA		URASQUI	113	CHACHAS		COLQUEMARCA
	SINCHI				BARRERA	109	CAYLLOMA		
	4 DE AGOSTO			123	ISPACAS	114	CHOCO		

Tabla A3: Grupos de acopio interno

GRUPOS DE ACOPIO INTERNO							
AMACCI		CENTRAL			REY		
8		7			6		
135	SOL DE ORO	120	ENCARNA			150	REY
116	CONSUELO	118	CRUZ BLANCA			119	DOLORES PATA
132	SAN ANTONIO	111	CENTRAL				AMANCAES
134	SANTA TERESA	105	ARAURO				
121	ESPERANZA	137	TIQUIMBRO				

182	CONSUELO II	125	LA Y		
124	LA U		NIÑO JESÚS		
	HUALLANGUITA				
138	ZONA 70				
130	PECHUGÓN				
122	GERTRUDIS				
	SAN JOSÉ				
	TASTITAYOQ				
181	CONSUELO I				
	MOLLES				
	GERTRUDIS MARIA				

A1.2 Minas independientes

Grupo Chaluane:

107: Buenos Aires
133: Sangre de Toro

Mina Group:

112: Cerro Rico
140: Yanaquihua

Tabla A4: Resumen de las minas, número asignado y número de muestras analizadas por AAS (elementos Au, Ag, Cu, As, proporcionados por MYSAC) o por WD-XRF (análisis proporcionados por la Universidad de Lausana).

Mina	AAS		XRF analysis
	No	analysis	
AHUIÑAY	101	13	
ALCA VICTORIA-CUSCO	102	19	
ANDARAY	103	1	
ANTONIETA	104	16	
ARAURO	105	24	
ARIRAHUA	106	75	3
BUENOS AIRES	107	3	
CASTILLA	108	2	
CAYLLOMA	109	3	
CCOMERCCOCHA II	110	2	
CENTRAL	111	11	6
CERRO RICO	112	11	
CHACHAS	113	4	
CHALUANE			4
CHOCO	114	2	
CHUMBIVILCAS	115	28	
CONSUELO	116	5	1
CONSUELO I	181	15	
CONSUELO II	182	6	
COTAHUASI	117	6	
CRUZ BLANCA	118	21	
CUSCO			2
DOLORES PATA	119	4	
ENCARNA	120	61	
ESPERANZA	121	99	5
GERTRUDIS	122	2	

HUALLANGUITA		2
ISPACAS	123 1	
LA U	124 9	3
LA Y	125 8	
LIVITACA	126 5	
MARCHANTE	127 12	
ORCOPAMPA	128 3	8
PAULA	129 1	
PECHUGÓN	130 6	1
Quiroz	131 6	
Rey	150 432	10
San Antonio	132 56	8
SANGRE DE TORO	133 64	
Santa Teresa	134 67	4
Sol de oro	135 21	4
Soledad	136 9	3
Tiquimbro	137 8	
Yanaquihua	140 114	7
ZONA 70	138 19	
Muestras totales	1274	71
Superficies totales	40	9