

Universidad Nacional de Ingeniería
Facultad de Ingeniería Geológica Minera y Metalúrgica



TESIS

**Firma geoquímica de depósitos IOCG y caracterización geológica
aplicada en el proyecto Tosantos, Atiquipa-Arequipa**

Para obtener el título profesional de Ingeniero Geólogo

Elaborado por

Toribio Santos Cutipa Ramírez

 [0009-0000-0556-1366](https://orcid.org/0009-0000-0556-1366)

Asesora

M.Sc. María Luz Marquina Robles

 [0009-0003-9145-2298](https://orcid.org/0009-0003-9145-2298)

LIMA – PERÚ

2025

Citar/How to cite	Cutipa Ramírez [1]
Referencia/Reference	[1] T. Cutipa Ramírez, “ <i>Firma geoquímica de depósitos IOCG y caracterización geológica aplicada en el proyecto Tosantos, Atiquipa-Arequipa</i> ” [Tesis de pregrado]. Lima (Perú): Universidad Nacional de Ingeniería, 2025.
Estilo/Style: IEEE (2020)	

Citar/How to cite	(Cutipa, 2025)
Referencia/Reference	Cutipa, T. (2025). <i>Firma geoquímica de depósitos IOCG y caracterización geológica aplicada en el proyecto Tosantos, Atiquipa-Arequipa</i> . [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio institucional Cybertesis UNI.
Estilo/Style: APA (7ma ed.)	

Dedicatoria

Dedico este trabajo a mi hija Isabella y esposa Norma, por su cariño y amor, por ser las razones que me empujan a ser mejor siempre. A mis padres Alejandro y Olga, por su apoyo incondicional hacia mi persona, por su amor incondicional, por educarme y hacerme un hombre de bien. Sobre todo, a Dios, que siempre está conmigo guiando mi camino, cuidándome y realizando milagros en mi vida.

Agradecimientos

Agradezco al Ing. Arturo Correa, Gerente de exploraciones de Minera Anaconda Perú S.A., y al Ing. Ricardo Panez, Geólogo senior, por permitirme realizar este trabajo de investigación con información de la empresa, por sus consejos y recomendaciones. Un gran agradecimiento a mis asesores M.Sc. María Luz Marquina Robles y al Dr. Eitel Rolando Carrascal Miranda, por su mentoría, consejos y recomendaciones.

Resumen

El presente estudio analiza la firma geoquímica y la geología del proyecto Tosantos para evaluar su pertenencia a un sistema de mineralización tipo IOCG. Tosantos pertenece al distrito de Atiquipa, departamento de Arequipa, y es de propiedad de Minera Anaconda Perú S.A., el proyecto se ubica en un contexto geológico volcanosedimentario que corresponde a la Formación Río Grande del Jurásico superior, y controlado estructuralmente por el sistema de fallas Iquipi con orientación E-O. La Formación Río Grande y el sistema E-O Iquipi controlan la ubicación de depósitos minerales IOCG en el distrito de Chala, Atiquipa y Chaparra, como son los depósitos Parcoy, Playa Kali y Cerro de Hierro.

La metodología del trabajo consistió en caracterizar la geología del proyecto mediante un cartografiado geológico al detalle (1:2000), acompañado de estudios petrográficos, mineragráficos y análisis geoquímicos. Además, se aplicaron análisis estadísticos multivariantes (matriz de Pearson, análisis factorial y análisis clúster) para identificar los elementos químicos asociados a la mineralización. Finalmente, se analizó la dispersión geoquímica de los elementos asociados a la mineralización y se integró con la geología al detalle para entender mejor la asociación de los elementos químicos con la alteración hidrotermal y mineralización.

Este trabajo permitió concluir que el proyecto Tosantos tiene la firma geoquímica de un depósito IOCG que comprende a los elementos Cu-Au-Ag-U-Bi-Mo-In-Fe-Co-Ni-K-Ba-Na-Ca, y la geología al detalle confirma que el proyecto presenta mineralización y alteración hidrotermal distal correspondiente a un sistema hidrotermal tipo IOCG.

Palabras clave — Depósitos IOCG, firma geoquímica, caracterización geológica, análisis multivariantes.

Abstract

This study analyzes the geochemical signature and geology of the Tosantos project to assess whether it belongs to an IOCG-type mineralization system. Tosantos is in the district of Atiquipa, Arequipa department, and is owned by Minera Anaconda Perú S.A. The project is in a volcano-sedimentary geological context corresponding to the Río Grande Formation of the Upper Jurassic and is structurally controlled by the Iquipi fault system with an E-W orientation. The Río Grande Formation and the E-W Iquipi system control the location of IOCG mineral deposits in the districts of Chala, Atiquipa and Chaparra, such as the Parcoy, Playa Kali, and Cerro de Hierro deposits.

The methodology consisted of characterizing the project's geology through detailed geological mapping (1:2000), accompanied by petrographic and mineragraphic studies, as well as geochemical analysis. In addition, multivariate statistical analyses (Pearson matrix, factor analysis, and cluster analysis) were applied to identify the chemical elements associated with mineralization. Finally, the geochemical dispersion of the elements associated with mineralization was analyzed and integrated with detailed geological data to better understand the association of chemical elements with hydrothermal alterations and mineralization.

This study led to the conclusion that the Tosantos project has the geochemical signature of an IOCG deposit, comprising the elements Cu-Au-Ag-U-Bi-Mo-In-Fe-Co-Ni-K-Ba-Na-Ca, and that detailed geological data confirm the presence of mineralization and distal hydrothermal alterations consistent with an IOCG-type hydrothermal system.

Keywords — IOCG deposits, geochemical signature, geological characterization, multivariate analysis.

Tabla de Contenido

	Pág.
Resumen	v
Abstract	vi
Introducción	xiii
Capítulo I. Parte introductoria del trabajo	1
1.1 Generalidades	1
1.1.1 Ubicación.....	1
1.2 Descripción del problema de investigación	1
1.3 Objetivos del estudio	2
1.3.1 Objetivo General.....	2
1.3.2 Objetivos específicos.....	2
1.4 Hipótesis.....	2
1.4.1 Hipótesis general.....	2
1.4.2 Hipótesis específicas	2
1.5.1 Antecedentes internacionales.....	3
1.5.2 Antecedentes nacionales.....	5
Capítulo II. Marcos teórico y conceptual.....	6
2.1 Marco teórico.....	6
2.1.1 Depósitos de óxidos de Fe-Cu-Au (IOCG).....	6
2.1.2 Marco tectónico y magmatismo de los depósitos IOCG en los Andes	6
2.1.3 Modelos genéticos de los depósitos IOCG	8
2.1.4 Alteración y mineralización en los depósitos IOCG.....	9
2.1.5 Firma geoquímica de los depósitos IOCG	10
2.2 Marco conceptual	11
2.2.1 Exploración geoquímica	11
2.2.2 Dispersión geoquímica	12
2.2.3 Ambiente geoquímico primario	12

2.2.4	Ambiente geoquímico secundario.....	13
2.2.5	Elemento indicador.....	14
2.2.6	Elemento explorador	14
2.2.7	Background	14
2.2.8	Threshold	14
2.2.9	Anomalía geoquímica.....	15
2.2.10	Análisis univariable.....	15
2.2.11	Análisis multivariable	15
2.2.12	Análisis factorial.....	15
2.2.13	Análisis de conglomerados o clúster.....	15
2.2.14	Matriz de Pearson	16
Capítulo III. Desarrollo del trabajo de investigación		17
3.1	Geología regional y metalogenia	17
3.1.1	Geomorfología.....	17
3.1.2	Estratigrafía	18
3.1.3	Rocas intrusivas y metamórficas	19
3.1.4	Geología estructural	23
3.1.5	Metalogenia.....	24
3.2	Geología del proyecto.....	25
3.2.1	Litologías	29
3.2.2	Alteración hidrotermal.....	35
3.2.3	Alteración supérgena.....	39
3.2.4	Mineralización	40
3.2.5	Geología estructural	46
3.3	Geoquímica y estadística	47
3.3.1	Muestreo geoquímico	48
3.3.2	Procesamiento de datos geoquímicos	50
3.3.3	Análisis Multivariable	53

3.3.4	Dispersión geoquímica	61
Capítulo IV. Análisis e interpretación de resultados		63
4.1	Geología.....	63
4.2	Geoquímica y estadística multivariable.....	66
4.2.1	Cu vs (Au-Ag).....	67
4.2.2	Cu vs (Bi-U-Mo-In).....	68
4.2.3	Cu vs (Fe-Co-Ni)	69
4.2.4	Cu vs (Ba-K).....	70
4.2.5	Cu vs (Na-Ca)	71
4.3	Geoquímica y geología de la zona principal del proyecto Tosantos.....	72
Conclusiones		75
Recomendaciones		76
Referencias bibliográficas.....		77
Anexos		80

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1: Elementos químicos y sus límites de detección por el método ICP-MS.....	49
Tabla 2: Coeficiente de variación de los elementos químicos del proyecto Tosantos.....	52
Tabla 3: Matriz de los factores con rotación varimax y sus cargas.....	58
Tabla 4: Umbrales geoquímicos estimados para el proyecto Tosantos.....	62

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1 : Ubicación del proyecto Tosantos	1
Figura 2 : Localización de los principales depósitos IOCG a nivel mundial	4
Figura 3 : Depósitos IOCG y su relación con los contextos tectónicos	7
Figura 4 : Orígenes y arquitecturas hidrotermales alternativos para sistemas IOCG.....	9
Figura 5 : Modelo esquemático de los tipos de alteración en depósitos IOCG	10
Figura 6 : Dispersión primaria y ambiente primario	13
Figura 7 : Dispersión secundaria en suelos	14
Figura 8 : Mapa geológico 1:50,000 y la ubicación de los depósitos IOCG/Pórfido de Cobre en el distrito de Chala y Atiquipa.....	21
Figura 9 : Columna estratigráfica del distrito de Chala y Atiquipa.....	22
Figura 10: Geología estructural regional del proyecto Tosantos	23
Figura 11: Sistema de fallas Iquipi-Clavelinas y la ubicación del proyecto Tosantos.....	24
Figura 12: Franja prospectable por depósitos IOCG	25
Figura 13: Plano geológico y muestras con contenido de cobre en el proyecto Tosantos	27
Figura 14: Estratigrafía del proyecto Tosantos.....	28
Figura 15: Muestra de mano de la toba de cristales y ceniza.....	29
Figura 16: Muestra de mano del aglomerado volcánico	30
Figura 17: Muestra de mano de la andesita porfirítica.....	31
Figura 18: Muestra de mano de la brecha volcánica.....	32
Figura 19: Muestra de mano de la arenisca cuarzosa.....	33
Figura 20: Muestra de mano de la andesita porfirítica máfica	34
Figura 21: Fotografía de la muestra de mano de la diorita hornbléndica.....	35
Figura 22: Mapa de alteración del proyecto Tosantos.....	37
Figura 23: Mapa de la mineralización en el proyecto Tosantos.....	42
Figura 24: Estilos de mineralización en el proyecto Tosantos	43
Figura 25: Fotomicrografías de rocas alteradas y mineralizadas de Tosantos parte 1	44

Figura 26: Fotomicrografías de rocas alteradas y mineralizadas de Tosantos parte 2	45
Figura 27: Secuencia paragenética de los procesos hidrotermales y supergenos en Tosantos	46
Figura 28: Geología estructural del proyecto Tosantos	47
Figura 29: Ubicación de las muestras de rocas tomadas en el proyecto Tosantos	50
Figura 30: Boxplot de Tukey y sus partes	53
Figura 31: Matriz de correlación de Pearson.....	55
Figura 32: Grafica de sedimentación y el numero óptimo de factores	57
Figura 33: Dendrograma de los elementos asociados al proyecto Tosantos.....	60
Figura 34: Mapa integral de la geología, la alteración hidrotermal y mineralización del proyecto Tosantos.....	65
Figura 35: Mapa de dispersión del cobre y su relación espacial con el oro y la plata.....	68
Figura 36: Mapa de dispersión del cobre y su relación espacial con el bismuto, uranio, molibdeno e indio	69
Figura 37: Mapa de dispersión del cobre y su relación espacial con el hierro, cobalto y níquel	70
Figura 38: Mapa de dispersión del cobre y su relación espacial con el bario y potasio ...	71
Figura 39: Mapa de dispersión del cobre y su relación con el sodio y calcio	72
Figura 40: Geología integrada, concentración de cobre y resumen geoquímico del proyecto Tosantos.....	74

Introducción

Tosantos es un proyecto de Minera Anaconda Perú S.A., ubicado en el departamento de Arequipa y distrito de Atiquipa. El proyecto presenta mineralización de cobre en superficie principalmente en forma óxidos de cobre, y está hospedado en rocas volcánicas de la Formación Rio Grande del Jurásico Medio-Superior, estructuralmente asociado al sistema de fallas Iquipi.

El proyecto fue descubierto en enero de 2022 como resultado de un trabajo de prospección en las concesiones de la empresa, sin antecedentes de exploración. En febrero de 2022, se inició un plan de muestreo de rocas y suelos, junto con un cartografiado geológico, con el objetivo de delimitar la mineralización y evaluar su potencial económico. Estos trabajos continuaron hasta junio de 2022. Actualmente, el proyecto está sin actividades y en evaluación por parte del equipo de Minera Anaconda Perú S.A.

El proyecto Tosantos se clasifica como un depósito oculto que presenta en superficie mineralización y alteración distal de un posible depósito IOCG. Por ello, la presente tesis busca sostener dicha hipótesis mediante la aplicación de la firma geoquímica de los depósitos IOCG y una caracterización geológica detallada del proyecto.

Para alcanzar los objetivos de este estudio, se realizó una cartografía detallada de la zona principal del proyecto a escala 1:2000. Asimismo, se tomaron muestras de mano para estudios petrográficos y minerográficos, además de muestras de roca para análisis químicos. También se llevaron a cabo tres análisis multivariantes: matriz de Pearson, análisis factorial y análisis de clúster, con el fin de identificar los elementos asociados a la mineralización.

Los resultados obtenidos confirman que el proyecto Tosantos se encuentra en un contexto geológico favorable para albergar depósitos del tipo IOCG. El cartografiado geológico detallado evidencia la presencia de mineralización y alteración hidrotermal asociadas a estos sistemas. Asimismo, los análisis multivariantes y los mapas de dispersión revelaron una fuerte asociación entre Cu, Au, Ag, U, Bi, Mo, In, Fe, Co, Ni, K,

Ba, Na y Ca, lo que confirma que el proyecto presenta una firma geoquímica característica de la mineralización tipo IOCG. En consecuencia, estos hallazgos respaldan el potencial geológico del proyecto Tosantos para la exploración de un depósito IOCG en profundidad.

Capítulo I. Parte introductoria del trabajo

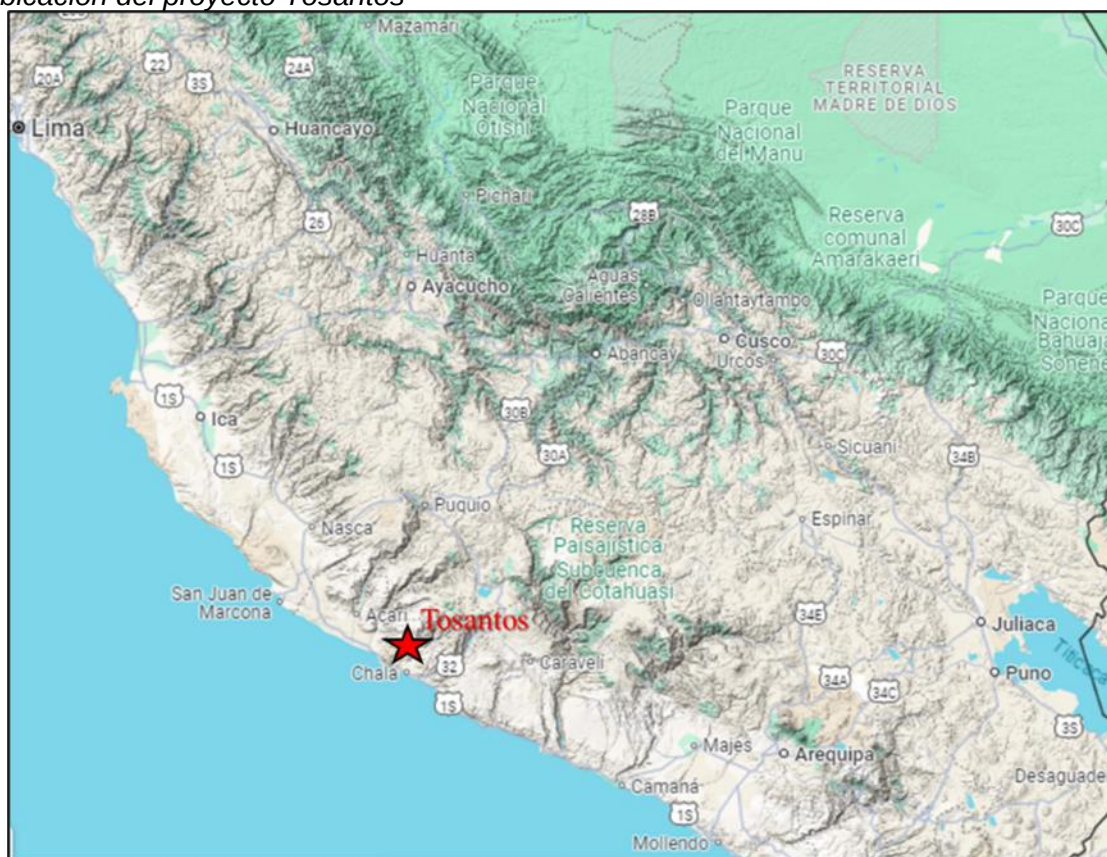
1.1 Generalidades

1.1.1 Ubicación

Tosantos se ubica en el Perú, departamento de Arequipa, provincia de Caravelí y distrito de Atiquipa. Sus coordenadas UTM (WGS 84, zona 18) son: 582920 E y 8271930 N, con una altitud de 1,825 msnm. Para llegar al proyecto, se debe viajar por la Panamericana Sur desde Lima hasta Chala, recorriendo aproximadamente 641 km. Luego, se toma un acceso que lleva al pueblo de Pullo y, tras recorrer aproximadamente 40 km por una trocha, se llega al proyecto en unas 2 horas.

Figura 1

Ubicación del proyecto Tosantos



Fuente: Imagen adaptada del Google maps.

1.2 Descripción del problema de investigación

Tosantos, proyecto de Minera Anaconda Perú, ha obtenido valores geoquímicos anómalos de cobre en afloramientos y zonas cubiertas por suelo. Aún no se tiene claridad

sobre si el objetivo en profundidad corresponde a un depósito IOCG (Cu-Au-Fe), ya que las ocurrencias observadas en superficie consisten principalmente en óxidos de cobre (crisocola y malaquita), presentándose en forma de pequeños mantos, vetillas y cúmulos. La falta de exposición de la mineralización hipógena, la deformación de las rocas, la cobertura del suelo y la ausencia de trabajos geocientíficos en la zona dificultan la confirmación del objetivo a explorar y la estrategia a utilizar.

1.3 Objetivos del estudio

1.3.1 Objetivo General

Determinar si el Proyecto Tosantos corresponde a la parte distal de un sistema de mineralización tipo IOCG, mediante la aplicación de la firma geoquímica de la mineralización y una caracterización geológica.

1.3.2 Objetivos específicos

- Determinar la firma geoquímica y los elementos asociados a la mineralización mediante técnicas estadísticas multivariantes, como análisis Clúster, análisis Factorial y matriz de Pearson.
- Caracterizar la geología del proyecto a una escala de detalle, mediante un cartografiado geológico a escala de depósito (1:2000) y un estudio mineralógico-petrográfico de muestras de mano, de manera que encaje en un modelo IOCG oculto.
- Integrar los resultados para evaluar si el proyecto Tosantos podría corresponder a la parte distal de un sistema hidrotermal tipo IOCG.

1.4 Hipótesis

1.4.1 Hipótesis general

El proyecto Tosantos corresponde a la parte distal de un sistema de mineralización tipo IOCG y tiene potencial para albergar un depósito de cobre de gran tonelaje.

1.4.2 Hipótesis específicas

- El proyecto presenta una firma geoquímica característica de los depósitos IOCG, con una fuerte asociación entre Cu-Au-Fe-Ag-Bi-U-Co y otros elementos

relacionados, la cual será verificada mediante la aplicación de técnicas estadísticas multivariantes.

- La caracterización geológica detallada indica que la mineralización de cobre en el proyecto Tosantos está estructuralmente controlada por la falla regional Cateador, perteneciente al sistema Iquipi, y se encuentra hospedada en rocas volcanosedimentarias de la Formación Río Grande del Jurásico medio a superior.
- La alteración hidrotermal identificada en el proyecto Tosantos, como resultado de la caracterización geológica detallada, correspondería a la zona distal de un sistema hidrotermal tipo IOCG, y los estilos de mineralización presentes serían consistentes con los característicos de este tipo de depósito.

1.5.1 Antecedentes internacionales

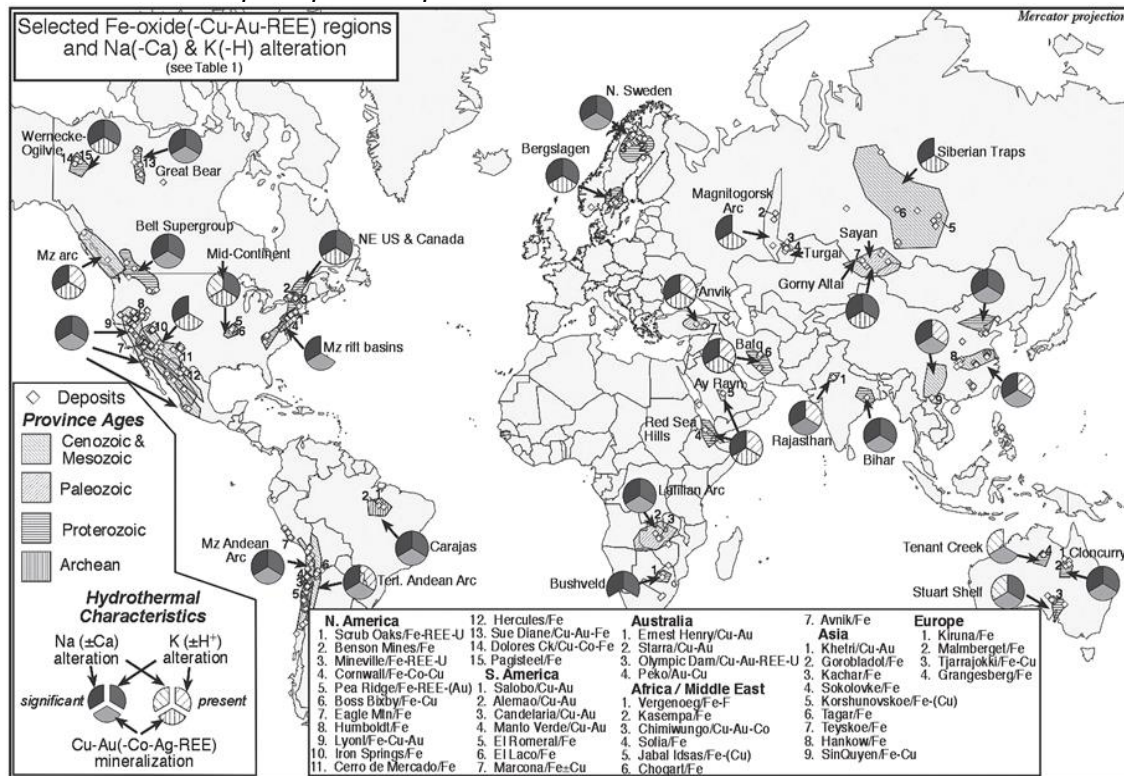
Los depósitos IOCG han sido ampliamente estudiados y, a la vez, han sido muy discutidos respecto a su origen. El primer depósito clasificado como IOCG fue el depósito de Olympic Dam, descubierto en 1975 en Australia. Este depósito produce cobre, uranio, oro y plata, y es el depósito más grande de uranio en la actualidad

Los depósitos de óxido de Fe-Cu-Au son abundantes y están ampliamente distribuidos en todos los continentes, formándose en varios tiempos geológicos (ver Figura 2).

Los yacimientos IOCG más importantes pueden contar con recursos superiores a los 100 millones de toneladas métricas (Mt) y hasta más de 1,000 Mt, con leyes de cobre y oro que incluso pueden ser superiores a las de los depósitos tipo pórfidos de Cu-Au. Ejemplos de estos son Salobo, Cristallino, Sossego y Alemão en Carajás; Olympic Dam en el cratón Gawler; Ernest Henry en el distrito de Cloncurry; y Candelaria-Punta del Cobre y Manto Verde en Chile (Williams et al., 2005).

Figura 2

Localización de los principales depósitos IOCG a nivel mundial



Fuente: Imagen Tomada de Williams (2005).

Los depósitos IOCG pueden contener altos contenidos de Co, U y REE (elementos de tierras raras), lo que les agrega un valor adicional y aumenta su rentabilidad. Estudios en depósitos como Olympic Dam en Australia, Candelaria en Chile, Salobo y Sossego en Brasil han demostrado que tienen una relación importante con fallas profundas y con eventos tempranos de magnetita-actinolita, seguidos de mineralización de cobre y otros elementos (del Real et al., 2023).

Según Skirrow (2022), un sistema de mineralización IOCG se caracteriza por una secuencia de eventos hidrotermales que comienzan con una alteración temprana de Na-Ca, generalmente a escala regional, con minerales como albita, actinolita y escapolita. Un evento más tardío está dominado por una alteración de minerales Fe $\pm$ Ca (magnetita, actinolita, apatito) y $\pm$ K, como biotita secundaria o feldespato potásico, que precede o acompaña la mineralización de Cu-Au, con minerales como calcopirita, bornita y oro.

Según autores importantes en el tema mencionan que los IOCG presentan asociaciones geoquímicas distintivas:

- Sillitoe (2003): Cu-Au-Co-Ni-As-Mo-U-(LREE).
- Barton (2014): Cu-Au-REE-P-U-Ag-Co.
- Richards & Mumin (2013): Fe-Cu-Au con menor U-REE-Co-Ag.
- McQueen (2005): Cu-U-Au-Ag-REE en Olympic Dam y Ernest Henry.
- Skirrow (2022): Cu-Au con bajos valores de P-Co-Ni-REE-U-F-Ba en Candelaria y Marcona.

En los Andes, los IOCG tienen menores contenidos de U-REE y Co en comparación con los depósitos de basamento cratónico.

1.5.2 Antecedentes nacionales

En el Perú, los depósitos IOCG se han clasificado en dos franjas: la franja V, que agrupa los depósitos de Cu-Fe-Au del Jurásico medio-superior, con edades entre 165 y 160 Ma, y la franja VIII, que incluye los depósitos de Cu-Fe-Au del Cretácico inferior, con edades entre 100 y 115 Ma. Entre los ejemplos más importantes se encuentran Marcona, Mina Justa, Rosa María, Raúl-Condestable, Monterrosas, Eliana y Acarí (Acosta et al., 2020).

En Perú y Chile, los depósitos IOCG se formaron entre el Jurásico medio y el Cretácico en un contexto de arcos volcánicos asociados a la subducción de placas. Según Chen et al. (2013), su génesis está ligada a un magmatismo toleítico a calcoalcalino en un entorno de convergencia tectónica, influenciado por la separación de Gondwana. La última etapa, entre 120 y 100 Ma, se caracterizó por un régimen transtensional dextral y compresivo, con levantamientos e inversión de cuencas, lo que favoreció la formación de los principales depósitos IOCG de los Andes Centrales. Durante el Mesozoico, en el sur de Perú y el norte de Chile, el magmatismo generó complejos plutónicos y rocas volcánicas de arco de isla, mientras que, al este de estos arcos, se desarrollaron cuencas volcanosedimentarias en un régimen extensivo debido a la subducción de placas (Sillitoe, 2003).

Capítulo II. Marcos teórico y conceptual

2.1 Marco teórico

2.1.1 Depósitos de óxidos de Fe-Cu-Au (IOCG)

Los depósitos de hierro, cobre y oro, también llamados IOCG, son unos de los más importantes en el mundo, ya que aportan cerca del 12% del cobre mundial (Hamisi, Pitcairn, Tomkins, Brugger & Micklethwaite, 2020). Estos depósitos se caracterizan por su alto contenido de magnetita y hematita, además de concentraciones significativas de cobre y oro. “Los depósitos de óxidos de hierro-cobre-oro (IOCG), caracterizados por la abundancia de óxidos de hierro (mayor al 10%, magnetita/hematita), y económicamente importante con concentraciones de cobre y oro formados desde el Arqueano tardío hasta el Mesozoico” (del Real, W. Allmendinger, F.H Thompson, & Creizell, 2023, pág. 1).

Los depósitos de óxidos de hierro-cobre-oro son yacimientos con un alto contenido de magnetita y hematita. Estos depósitos están relacionados con complejos plutónicos y estructuras geológicas, y comparten una relación espacial con otros tipos de depósitos, como los de magnetita, pórfidos de cobre y depósitos tipo mantos. Presentan diversos estilos de mineralización, incluyendo vetas, stockworks, brechas hidrotermales, mantos de reemplazamiento, skarns cálcicos y combinaciones de estos. Además, se asocian con alteraciones sódicas, cálcicas y potásicas (Sillitoe, 2003).

2.1.2 Marco tectónico y magmatismo de los depósitos IOCG en los Andes

Los depósitos IOCG en el mundo se formaron en diferentes ambientes tectónicos y en diferentes tiempos geológicos. En el Perú y Chile, estos depósitos se desarrollaron desde el Jurásico medio-superior hasta el Cretácico, en un contexto de arcos volcánicos ubicados en márgenes de subducción de placas (ver Figura 3).

Según Chen, Cooke y Baker (2013), los depósitos IOCG de los Andes Centrales se habrían formado en un entorno tectónico de convergencia de placas, donde se establece una conexión entre la formación de la mineralización IOCG y un magmatismo toleítico a calcoalcalino. Además, Chen et al. (2013) vincularon estos procesos con la separación de

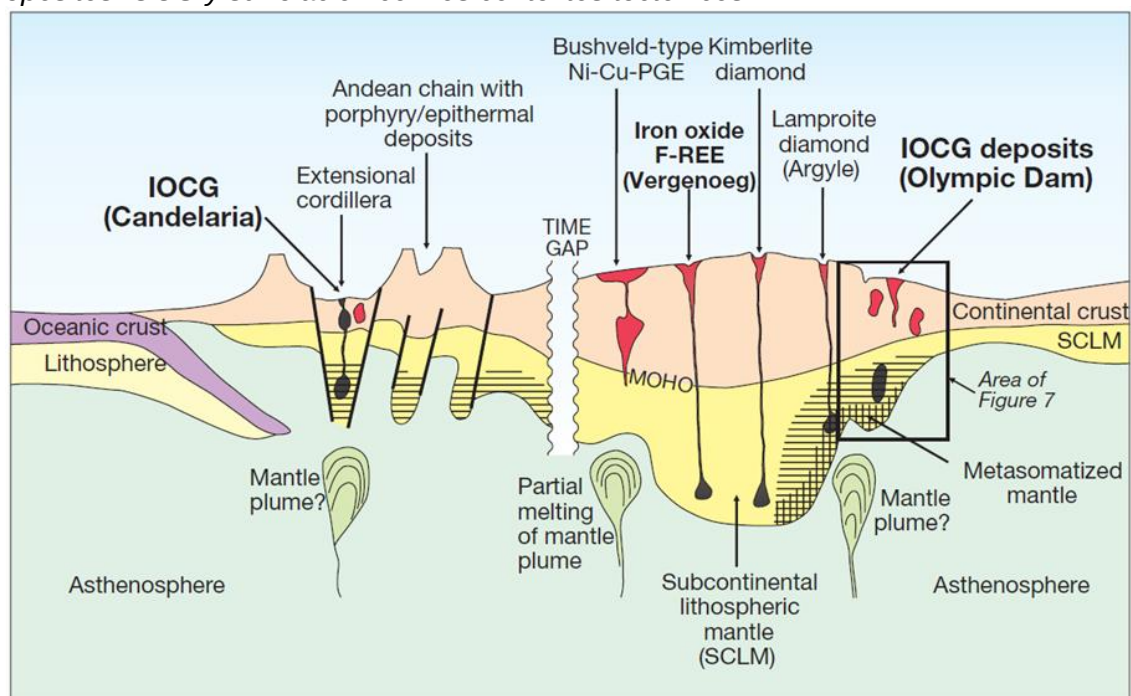
Gondwana y los dividieron en seis etapas, siendo la última, entre 120 y 100 Ma, caracterizada por un régimen transtensional dextral y compresivo, con levantamientos e inversión de cuencas, lo que estaría fuertemente relacionado con la formación de los principales depósitos IOCG de los Andes Centrales.

Durante el Mesozoico, en el sur de Perú y el norte de Chile, se desarrollaron procesos magmáticos que dieron origen a complejos plutónicos y rocas volcánicas de arco de isla. Además, al este de estos arcos volcánicos, se formaron cuencas donde se acumuló material volcanosedimentario en un régimen extensivo, en respuesta a la subducción de las placas tectónicas (Sillitoe, 2003).

Existe evidencia de que algunos depósitos IOCG, como Candelaria en Chile, se habrían formado en un contexto compresivo. Según del Real et al. (2023), el depósito IOCG de Candelaria se habría originado durante una fase transpresiva sincrónica con la mineralización de cobre. Estas evidencias sugieren que los depósitos IOCG en los Andes se forman en cuencas de arco y están relacionados con magmas toleíticos a calcoalcalinos en contextos tanto extensivos como compresivos, durante el Jurásico medio y el Cretácico.

Figura 3

Depósitos IOCG y su relación con los contextos tectónicos



Fuente: Imagen tomada de Groves (2010).

2.1.3 Modelos genéticos de los depósitos IOCG

El origen de los depósitos IOCG es un tema aún controversial dentro de la comunidad científica, y existen diversas posturas al respecto. Según Barton (2014), se han propuesto cuatro hipótesis sobre el origen de los fluidos mineralizantes en estos depósitos (ver Figura 4).

- Origen magmático-hidrotermal: Los fluidos provienen directamente de magmas y participan en la mineralización.
- Origen superficial o de cuenca: Los fluidos mineralizantes son salmueras no magmáticas, provenientes de cuencas con contenido de evaporitas, que circulan debido al calor de cuerpos ígneos o de la corteza terrestre.
- Origen metamórfico: Los fluidos resultan de procesos metamórficos que liberan elementos mineralizantes.
- Fundido inmiscible de óxido de hierro: La mineralización se origina a partir de un fluido clave compuesto por un fundido inmiscible de óxido de hierro con contenido de volátiles.

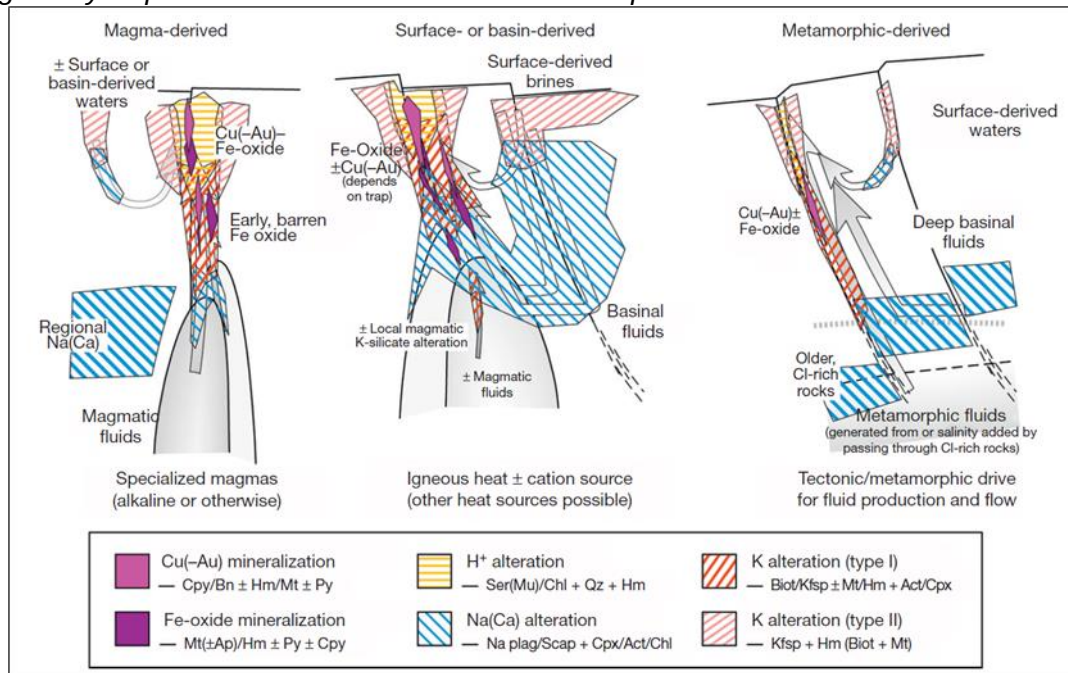
Es probable que los fluidos mineralizantes sean de origen magmático-hidrotermal y que hayan sido contaminados por fluidos metamórficos o de cuenca; sin embargo, estos últimos no serían cruciales para la formación de un depósito IOCG, a diferencia de los de origen magmático-hidrotermal, que sí juegan un papel fundamental (Sillitoe, 2003).

Según del Real, Thompson, Simon y Reich (2020), en el distrito de Candelaria-Punta del Cobre, los fluidos tendrían principalmente un origen magmático-hidrotermal, y un fluido externo, posiblemente de cuenca, habría ingresado a dicho sistema.

Actualmente, las dos hipótesis más aceptadas son: el origen magmático-hidrotermal y la teoría de los fluidos de cuencas ricas en evaporitas, en la que las rocas ígneas solo actúan como fuentes de calor (Tornos, Carriedo, Velasco y Tomé, 2008).

Figura 4

Orígenes y arquitecturas hidrotermales alternativas para sistemas IOCG



Fuente: Imagen tomada de Barton (2014).

2.1.4 Alteración y mineralización en los depósitos IOCG

La alteración en los depósitos IOCG puede ser intensa y depende en gran medida de la roca huésped. En general, en profundidad se presenta una alteración sódica; en la parte intermedia, una alteración potásica; y en la zona más superficial, una alteración sericitica y silicificación. Además, las rocas sufren un metasomatismo de Fe (Hirtzman, Oreskes y Einaudi, 1992) (ver Figura 5).

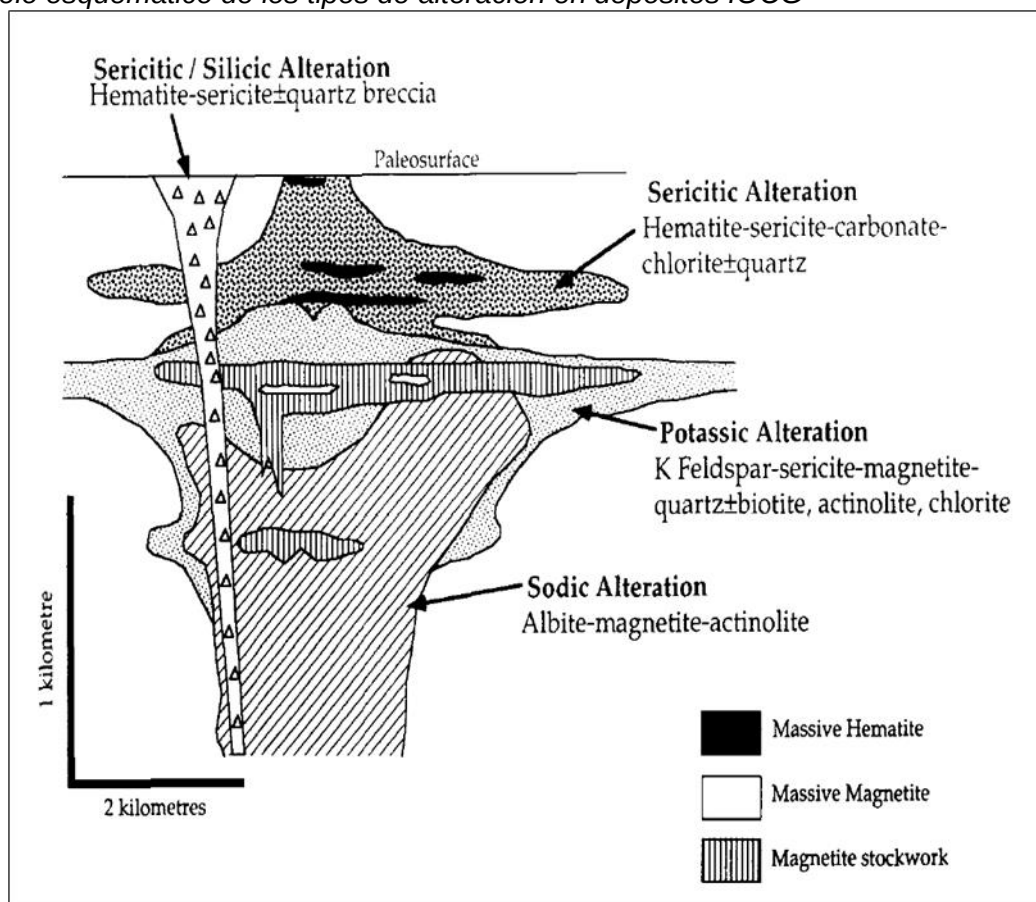
Los depósitos IOCG presentan alteraciones sódicas, cálcicas y potásicas, ya sea por separado o en combinación, con una zonación que se extiende hacia arriba y hacia afuera, pasando de magnetita, actinolita y apatito hasta especularita, cloritas y sericitita (Sillitoe, 2003). Según Barton (2014), todos los sistemas IOCG exhiben un extenso intercambio de Na-Ca-K(-Fe), junto con ganancias y pérdidas de Fe, Si y otros elementos menores (ver Figura 4).

La mineralogía, además de los óxidos de hierro, puede contener hasta un 5 % de sulfuros, así como silicatos accesorios, carbonatos y titanita. La calcopirita y la pirita son

los sulfuros más comunes, seguidos de bornita, pirrotita, calcosina, esfalerita y sulfuros dispersos de Ni-Co; en algunos depósitos también se encuentra digenita.

Figura 5

Modelo esquemático de los tipos de alteración en depósitos IOCG



Fuente: Imagen Tomada de Hirtzman (1992).

2.1.5 Firma geoquímica de los depósitos IOCG

Los depósitos IOCG, al igual que otros tipos de depósitos, presentan una marcada asociación de elementos químicos o firma geoquímica que los caracteriza y sirve como guía de exploración. Según Sillitoe (2003), los depósitos IOCG poseen una firma geoquímica de Cu-Au-Co-Ni-As-Mo-U-(LREE) (elementos ligeros de tierras raras) Para Barton (2014), los depósitos IOCG contienen más del 10 % de óxidos de Fe con bajo contenido de Ti, en combinación con concentraciones geoquímicamente elevadas de Cu-Au-REE-P-U-Ag-Co.

Según Richards y Mumin (2013) los depósitos IOCG tienen una asociación fuerte entre Fe-Cu-Au y menor U-REE-Co-Ag. McQueen (2005) señala que los depósitos IOCG

como Olympic Dam y Ernest Henry presentan una asociación de elementos como Cu-U-Au-Ag-REE (S-F); mientras en que Tennant Creek Cu-Au-Bi. Según Skirrow (2022), en los Andes, los depósitos IOCG contienen asociaciones de Cu-Au con valores bajos de P-Co-Ni-REE-U-F-Ba, como es el caso de Candelaria, Raúl-Condestable y Marcona. En depósitos como Mantoverde y Mina Justa, la asociación es de Cu-Au-Ag, con menor presencia de REE y U, además de valores generalmente bajos de P-Co-Ni-F-Ba.

Diferentes investigadores concluyen que la asociación o firma geoquímica de los depósitos IOCG involucra los elementos Cu-Au-Fe-Ag-REE-U-Bi-Co-Ni-F-Ba-As-Mo-P, con sus respectivas variaciones, pero que, en esencia, mantiene una fuerte relación entre los elementos menores Cu-Au-Ag-Fe-U-REE-Co. En el caso de los Andes, los valores de U, REE y Co son relativamente bajos en comparación con los depósitos IOCG de basamento cratónico.

2.2 Marco conceptual

2.2.1 Exploración geoquímica

La exploración geoquímica es parte de la geoquímica aplicada y constituye una herramienta fundamental en la exploración mineral, cuyo objetivo es identificar anomalías geoquímicas relacionadas con depósitos minerales. La prospección geoquímica se lleva a cabo mediante mediciones sistemáticas o no sistemáticas de uno o más elementos químicos. Generalmente, el muestreo se realiza en materiales que se encuentran de manera natural en la corteza terrestre.

Las muestras recolectadas incluyen rocas, escombros, suelos, sedimentos de gossan, arroyos, lagos, aguas subterráneas, vapor, vegetación, entre otros. Estas muestras son analizadas mediante diversos métodos analíticos, y los resultados obtenidos se procesan y evalúan con el fin de identificar valores superiores al background regional. Cuando esto ocurre, se considera la presencia de una "anomalía geoquímica".

Dicha anomalía geoquímica puede estar relacionada con un depósito mineral oculto, ya sea cercano a la superficie o en profundidad. Por esta razón, la exploración

geoquímica es una herramienta esencial en la actualidad y la más utilizada para la identificación de depósitos minerales, tanto expuestos como ocultos en profundidad.

2.2.2 Dispersión geoquímica

La dispersión geoquímica es el proceso natural por el cual los elementos metálicos se movilizan desde su fuente hasta concentrarse en otro lugar, que generalmente corresponde a un depósito mineral. Esta distribución o redistribución de elementos es causada por agentes físicos y/o químicos y ocurre en ambientes geoquímicos primarios y secundarios.

La dispersión de elementos genera halos alrededor de los depósitos minerales, cuyos valores son bajos en comparación con las zonas mineralizadas, pero mayores que el background de la zona. Estos valores se encuentran en trazas y pueden estar presentes en suelos, rocas y aguas subterráneas.

Se formarán halos primarios o secundarios según el ambiente geoquímico en el que ocurra el proceso de dispersión. Un halo primario se desarrollará en un ambiente geoquímico primario, mientras que un halo secundario se formará en un ambiente geoquímico secundario.

2.2.3 Ambiente geoquímico primario

Este ambiente abarca aquellas áreas que se extienden por debajo de los niveles de circulación de aguas meteóricas, hasta incluir procesos de origen profundo, como el magmatismo y el metamorfismo (ver Figura 6). Las condiciones presentes generalmente son:

- Gran profundidad.
- Temperatura y presión relativamente altas.
- Escasez de oxígeno.
- Limitado movimientos de fluidos.

Es en este ambiente donde se lleva a cabo la dispersión primaria, la cual forma los halos primarios de elementos alrededor de un depósito mineral debido a procesos hidrotermales.

2.2.4 Ambiente geoquímico secundario

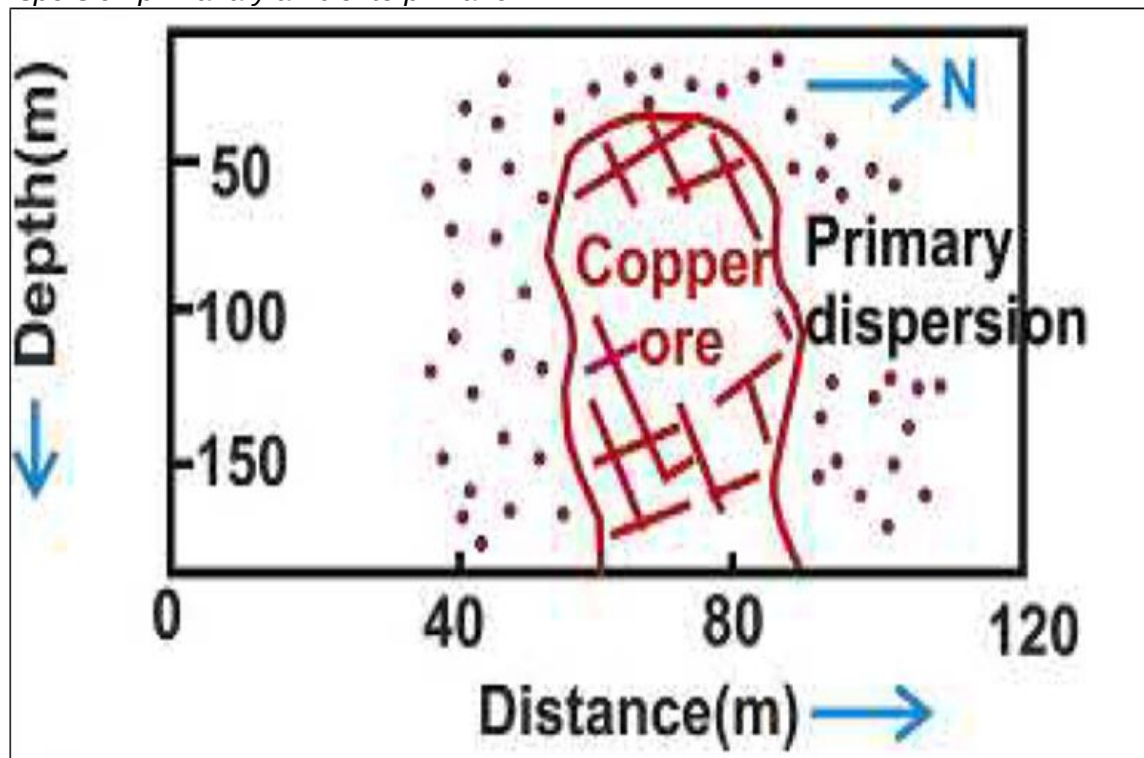
El ambiente geoquímico secundario comprende los procesos superficiales de erosión, formación de suelos, transporte y sedimentación (ver Figura 7). Las condiciones que caracterizan este ambiente son:

- En superficie.
- Temperatura y presión bajas.
- Presencia abundante de oxígeno libre y otros gases, particularmente CO₂.
- Flujo de fluidos relativamente libre.

En este ambiente se forman los halos secundarios por removilización de los elementos en condiciones superficiales.

Figura 6

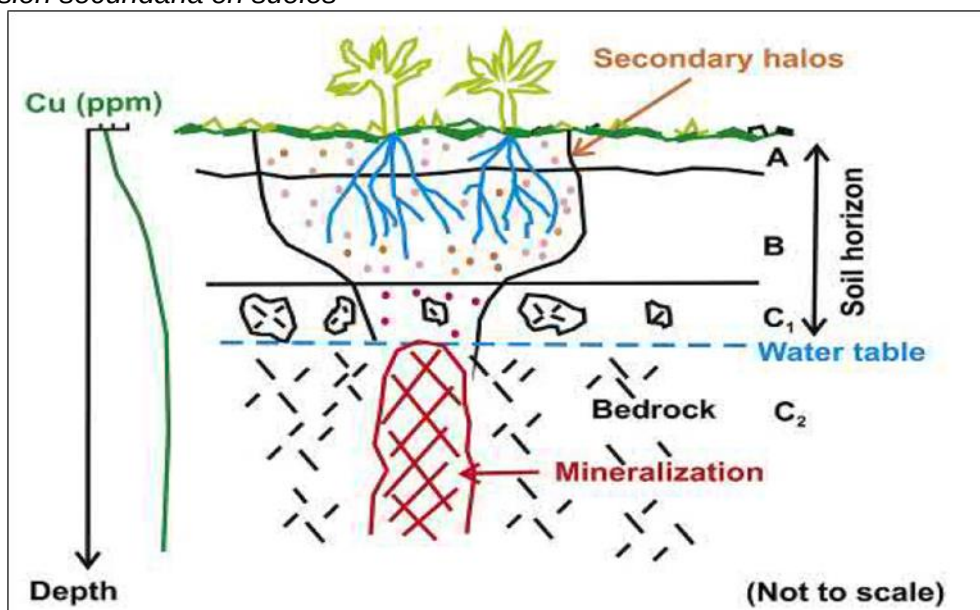
Dispersión primaria y ambiente primario



Fuente: Imagen tomada de Haldar (2018).

Figura 7

Dispersión secundaria en suelos



Fuente: Imagen tomada de Haldar (2018).

2.2.5 Elemento indicador

El Elemento indicador, también llamado elemento blanco o target element, se refiere a uno de los elementos principales del depósito mineral, que se espera encontrar.

2.2.6 Elemento explorador

El elemento explorador, también conocido como elemento pionero (pathfinder element), se refiere a un elemento asociado con el depósito mineral, pero que puede ser detectado más fácilmente en comparación con el elemento blanco. Esto se debe a que puede dispersarse en un área más extensa o ser reconocido con mayor facilidad mediante métodos analíticos.

2.2.7 Background

Se define como el rango normal de concentración de un elemento químico en un área, excluyendo las muestras mineralizadas. Los valores del background pueden determinarse para cada elemento, área y tipo de roca, suelo, sedimento y agua.

2.2.8 Threshold

Se denomina umbral geoquímico, y cualquier valor por encima de este podría considerarse anómalo.

2.2.9 Anomalía geoquímica

Se refiere a una variación en la abundancia de un elemento en comparación con su abundancia normal en un área definida. Una anomalía geoquímica puede estar relacionada o no con un depósito mineral.

2.2.10 Análisis univariable

En estadística el análisis univariable es el estudio de una sola variable a la vez, con el objetivo de describir su comportamiento y características dentro de un conjunto de datos. Este análisis permite resumir y visualizar la distribución de la variable, identificar patrones y detectar posibles valores atípicos o anómalos.

El análisis univariable implica evaluar los siguientes parámetros, según el requerimiento:

- Medidas de tendencia central (media, moda, mediana)
- Medida de frecuencias (frecuencia absoluta, relativa, acumulada)
- Medidas de dispersión (rango o recorrido, desviación típica, varianza)
- Medidas de las formas de distribución (Asimetría, curtosis)

2.2.11 Análisis multivariable

El análisis multivariable comprende un conjunto de técnicas estadísticas que estudian la dependencia e interdependencia de variables. En exploración geoquímica, la interdependencia entre dos o más elementos químicos representa la asociación o firma geoquímica de un área, la cual podría estar relacionada con un depósito mineral.

2.2.12 Análisis factorial

Es una técnica multivariable de reducción de datos cuyo objetivo es identificar grupos de variables de manera que las correlaciones entre las variables dentro de cada grupo sean superiores a las correlaciones entre variables de distintos grupos.

2.2.13 Análisis de conglomerados o clúster

También denominado análisis cluster, es una técnica multivariable diseñada para clasificar distintas observaciones en grupos, de manera que cada grupo (conglomerado o cluster) sea homogéneo respecto a las variables utilizadas para caracterizarlo. Es decir,

cada observación contenida en él debe ser similar a las demás dentro del mismo grupo, y los grupos deben ser lo más distintos posible entre sí en función de las variables consideradas.

2.2.14 Matriz de Pearson

Es un método que estima el grado de asociación lineal entre dos variables y utiliza un coeficiente denominado coeficiente de correlación de Pearson. Este coeficiente se obtiene como el cociente entre la covarianza de dos variables y el producto de sus respectivas desviaciones estándar.

El coeficiente de correlación de Pearson varía en un rango de -1 a +1. Los valores positivos indican una relación directa entre las variables, mientras que los valores negativos señalan una relación inversa. Un valor de -1 o +1 indica una correlación lineal perfecta, mientras que un valor de 0 refleja la ausencia de relación lineal entre las variables.

Capítulo III. Desarrollo del trabajo de investigación

3.1 Geología regional y metalogenia

La geología regional y distrital del proyecto Tosantos se encuentra representada en la hoja 32Ñ del cuadrángulo de Atiquipa, publicada por el INGEMMET. Esta hoja contiene la base geológica elaborada por Olchauski (1980), con posteriores actualizaciones realizadas por el INGEMMET (ver Figura 8).

3.1.1 Geomorfología

Según Olchauski (1980), en la hoja 32Ñ se identificaron tres unidades geomorfológicas en función de las características del relieve topográfico, la estructura geológica, la litología y el clima. Estas unidades son las siguientes:

- **Faja litoral.** Se trata de una franja angosta que comprende varias superficies escalonadas, casi horizontales, que se extienden desde el nivel del mar hasta una altura de 300 m. Estas superficies han sido modeladas por diversos procesos geológicos.
- **Cadena costanera.** Ubicada al este de la faja litoral, a partir de los 400 m s. n. m., donde el perfil de los cerros se torna progresivamente más empinado, dando lugar a una topografía accidentada. La altitud de los cerros varía, alcanzando elevaciones de hasta 2,500 m s. n. m. Esta unidad está disectada por valles transversales y numerosas quebradas que han modificado significativamente la antigua superficie de erosión.
- **Peneplanicie subandina.** Representa una superficie de erosión inclinada hacia el SSO, atravesada por múltiples quebradas y ríos que drenan hacia el océano Pacífico. La diferencia de altitud aumenta progresivamente de SO a NE, desde los 2,500 hasta los 3,200 m s. n. m. Se estima que esta superficie comenzó a formarse en el Terciario medio por acción marina, a una altitud mucho menor que la actual, alcanzando las rocas del batolito. Dichas rocas han quedado expuestas debido a

una intensa erosión, aunque en algunas áreas se encuentran cubiertas por depósitos tobáceos más recientes.

3.1.2 Estratigrafía

Las unidades litoestratigráficas del área abarcan un amplio rango cronológico, desde el Jurásico Inferior hasta el Cuaternario (ver Figura 9).

A continuación, se describen las unidades litoestratigráficas presentes en el distrito.

3.1.2.1 Formación Chocolate. La Formación Chocolate está compuesta por una serie de brechas volcánicas y lavas andesíticas de color marrón, correspondientes al Jurásico Inferior. Estas rocas descansan discordantemente sobre las unidades del Grupo Tarma o del Complejo Basal e infrayacen concordantemente a las rocas del Jurásico Medio y Superior. Debido a procesos de intemperismo, adquieren un matiz marrón-rojizo.

3.1.2.2 Formación Río Grande. La Formación Río Grande, anteriormente denominada Formación Guaneros en la zona de Atiquipa por Olchouski (1980), fue redefinida por Santos et al. (2014) con su nombre actual. Esta unidad comprende una serie de rocas volcanosedimentarias del Jurásico Medio-Superior, incluyendo areniscas de grano fino a medio, flujos piroclásticos, brechas andesíticas y potentes niveles de lavas andesíticas. La Formación Río Grande suprayace a la Formación Chocolate e infrayace al Grupo Yura.

3.1.2.3 Formación Labra. La Formación Labra, perteneciente al Grupo Yura, está compuesta por una serie de rocas sedimentarias, incluyendo areniscas cuarzosas de grano medio y color blanco grisáceo, intercaladas con niveles de lutitas hacia la base. Esta Formación, de edad Jurásico Superior, suprayace a la Formación Río Grande e infrayace a la Formación Moquegua.

3.1.2.4 Formación Milo. La Formación Milo está compuesta por tobas de color gris blanquecino, con niveles de arenisca tobácea y capas delgadas de conglomerados. Esta Formación, de edad Plioceno, cubre a las formaciones Río Grande y Chocolate en el extremo sureste.

3.1.3 Rocas intrusivas y metamórficas

Los intrusivos predominantes en la zona corresponden a las unidades Punta Coles, Médanos, Atiquipa, Sacota, Jaqui y Pampahuasi, todas ellas pertenecientes al Batolito de la Costa. Además, se encuentra un intrusivo subvolcánico denominado Complejo Bella Unión. A continuación, se detallan las características de las rocas intrusivas según los estudios realizados por Olchowski (1980), Santos et al. (2014) y Santos, Weimin, Tassinari, Soberón y Ccallo (2016).

3.1.3.1 Super unidad Punta Coles. La súper unidad Punta Coles comprende gabros a gabrodioritas del Jurásico Inferior. Presentan una morfología alargada con orientación N160° y se presentan como cuerpos aislados. Su edad se estima entre 189-184 Ma.

3.1.3.2 Super unidad Medanos. La súper unidad Medanos comprende monzogranitos del Jurásico Medio, sus afloramientos conforman un cinturón de orientación E-O, y tendrían una edad entre 168 y 164 Ma.

3.1.3.3 Super unidad Atiquipa. La súper unidad Atiquipa comprende monzodioritas con variaciones a dioritas del Jurásico Medio-Superior, sus afloramientos presentan formas semicirculares, y tendrían una edad entre 161 y 157 Ma.

3.1.3.4 Super unidad Sacota. La super unidad Sacota está compuesta por tonalitas a granodioritas del Cretácico Inferior. Sus afloramientos representan una actividad magmática de gran volumen y su edad se estima entre 140 y 133 Ma.

3.1.3.5 Super unidad Jaqui. La super unidad Jaqui está compuesta por monzodioritas con variaciones a monzonitas y cuarzomonzonitas del Cretácico Inferior-Superior. Sus afloramientos presentan una geometría alargada con orientación N120° y su edad se estima entre 100 y 99 Ma.

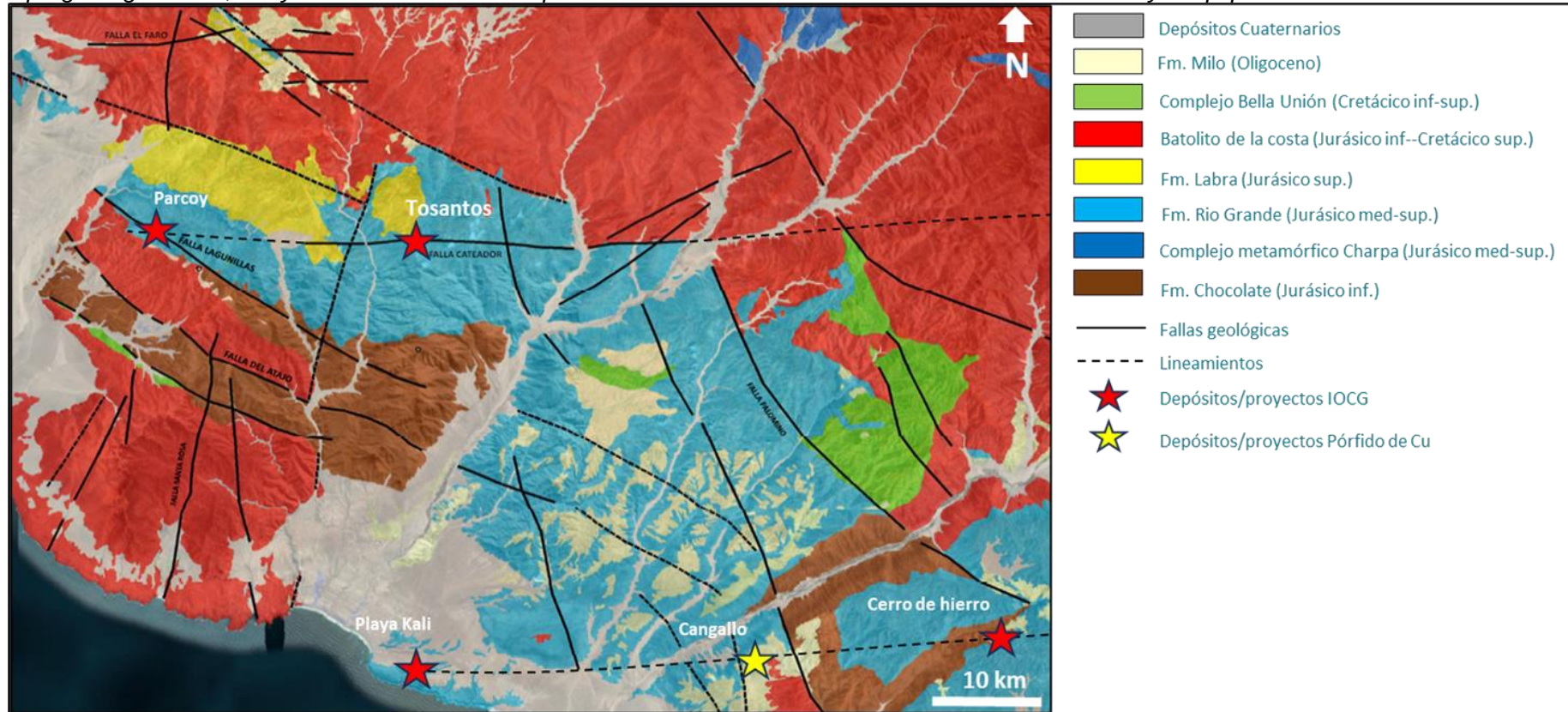
3.1.3.6 Super unidad Pampahuasi. La superunidad Pampahuasi está compuesta por dioritas y granodioritas del Cretácico Superior. Sus afloramientos presentan formas semicirculares aisladas y su edad se estima entre 95 y 92 Ma.

3.1.3.7 Complejo Bella Unión. El Complejo Bella Unión es un conjunto de rocas volcánicas y subvolcánicas, correspondiente al Cretácico Inferior-Superior. La composición predominante de los intrusivos es andesítica o dacítica, aunque también se encuentran cuerpos más básicos, como diabasas porfíricas.

3.1.3.8 Complejo metamórfico Charpa. El Complejo Metamórfico Charpa está compuesto por rocas metamórficas del Jurásico Inferior. Las litologías predominantes son esquistos pardos y milonitas, las cuales se encuentran sobre el Batolito de la Costa.

Figura 8

Mapa geológico 1:50,000 y la ubicación de los depósitos IOCG/Pórfido de Cobre en el distrito de Chala y Atiquipa



Fuente: Imagen adaptada del Geocatmin (2025)

Figura 9

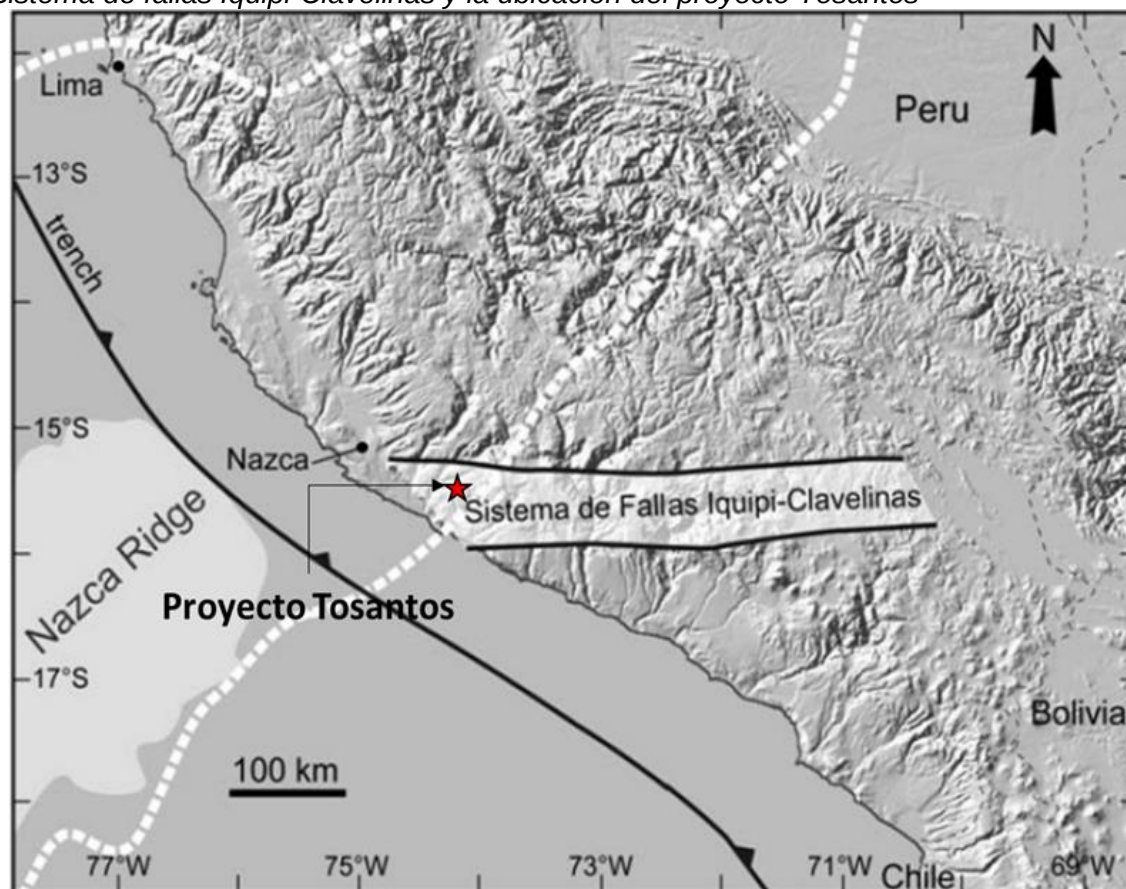
Columna estratigráfica del distrito de Chala y Atiquipa

EÓN	ERA	SISTEMA	SERIE	PISO	M.A.	UNIDAD LITOLOGICA	POTENCIA (m)	LITOLOGIA	DEPOSITOS IOCG	DESCRIPCION
FANEROZOICO	CENOZOICO	CUATERNARIO	PLEISTOCENO	GELASIANO	-	Depósitos cuaternarios	-			Depositos eólicos y aluviales. Comprenden arenas, limos y cantos rodados.
		NEÓGENO	PLIOCENO	ZANDIANO	2.58	Fm. Milo	150	000000 000000 000000		Comprende tobas de color gris blanquecina con niveles de arenisca tobácea y capas delgadas de conglomerados.
	MESOZOICO	JURÁSICO	SUPERIOR	OXFORDIANO	163.5	Fm. Labra	706			Comprende areniscas cuarzosas de grano medio y color blanco gris, intercalada con niveles de lutitas.
		JURÁSICO	MEDIO	CALLOVIANO	166.1	Fm. Rio Grande	915		Mina Justa Playa Kali Cerro de Hierro Parcoy	Comprende areniscas de grano fino medio, flujos piroclásticos, brechas andesíticas y potentes niveles de lavas andesíticas.
		JURÁSICO	MEDIO	AALENIANO	174.1	Complejo metamórfico Charpa	-			Comprende esquistos de color pardo y milonitas.
		JURÁSICO	INFERIOR	SINEMURIANO	199.3	Fm. Chocolate	723			Comprende una serie de brechas volcánicas y lavas andesíticas de color marrón.

Nota: Columna realizada en base a información del Geocatmin (2025), BC: Batolito de la costa, CB: Complejo Bella Unión. Fuente: Elaboración propia.

Figura 11

Sistema de fallas Iquipi-Clavelinas y la ubicación del proyecto Tosantos



Fuente: Imagen adaptada de Mamani (2011).

3.1.5 Metalogenia

En la zona sur de Ica y el norte de Arequipa, dentro de la franja costera, se encuentran los depósitos IOCG del Jurásico Medio-Superior. La roca huésped de estos depósitos corresponde a las rocas volcanosedimentarias de la Formación Río Grande del Jurásico Medio-Superior, las cuales están asociadas a los sistemas de fallas Ica e Iquipi, con excepción de Cobrepampa, que se encuentra hospedado en forma de vetas dentro del Batolito de la Costa.

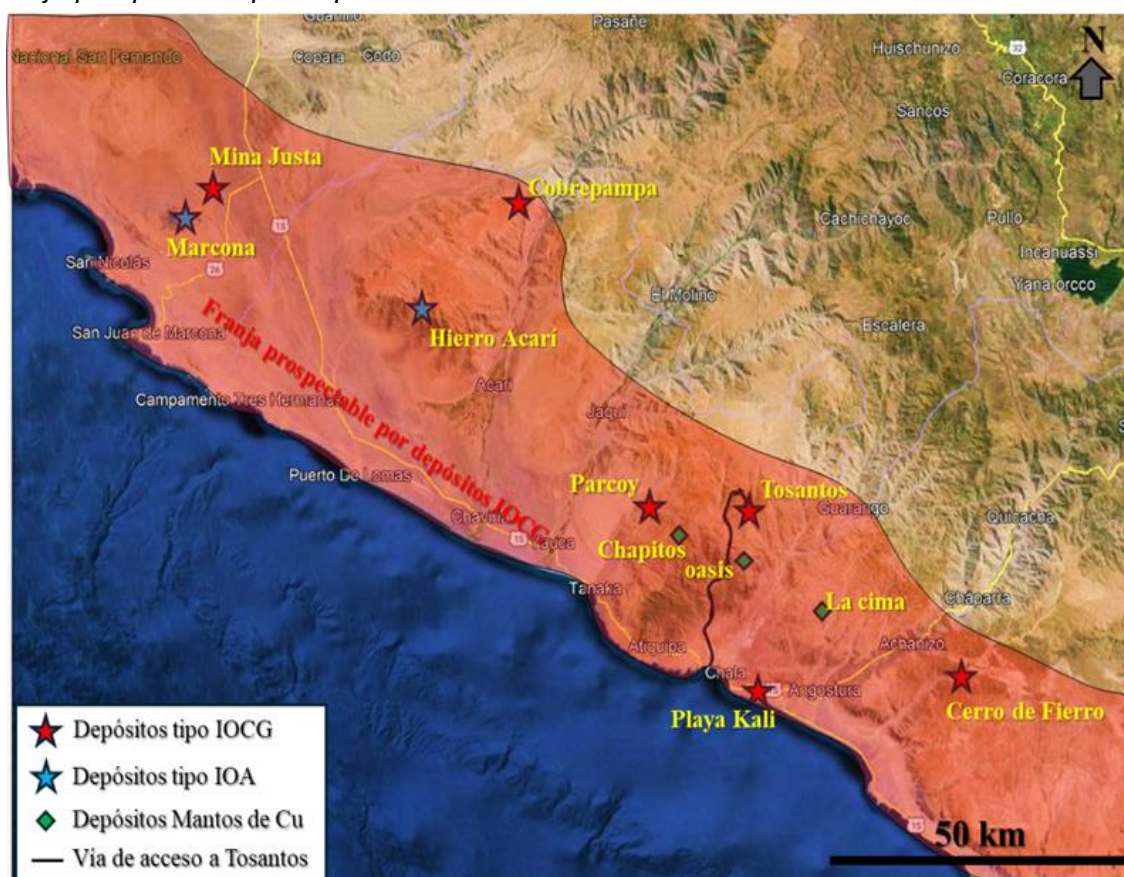
Estos depósitos IOCG presentan una orientación andina noroeste-sureste (NO-SE), siendo Mina Justa el depósito IOCG más grande conocido en el Perú, con un recurso de 475 Mt y una ley de 0.65 % Cu. Según Chen (2013), su edad se encuentra entre 104 y 95 Ma. Además, estos depósitos IOCG están espacial y genéticamente relacionados con los depósitos de hierro masivo o tipo IOA, siendo Marcona su mejor representante.

Asimismo, presentan una relación espacial con otros estilos de mineralización, como los mantos de cobre estilo Chileno, entre los que se incluyen Chapitos, Oasis y La Cima (ver Figura 12).

En este contexto metalogenético se encuentra Tosantos, ubicado al este del depósito Parcoy y siguiendo la tendencia de depósitos IOCG con orientación andina.

Figura 12

Franja prospectable por depósitos IOCG



Fuente: Elaboración propia.

3.2 Geología del proyecto

En este subcapítulo se aborda la geología del proyecto Tosantos, definido a partir del cartografiado geológico de detalle a escala 1:2000, así como de estudios petrográficos y mineragráficos (ver Figura 15).

Tosantos se encuentra dentro de la Formación Río Grande del Jurásico Medio-Superior. Localmente, la zona presenta tobas, aglomerados volcánicos, lavas andesíticas porfiríticas y brechas volcánicas. Al norte y suprayacente a la Formación Río Grande, en

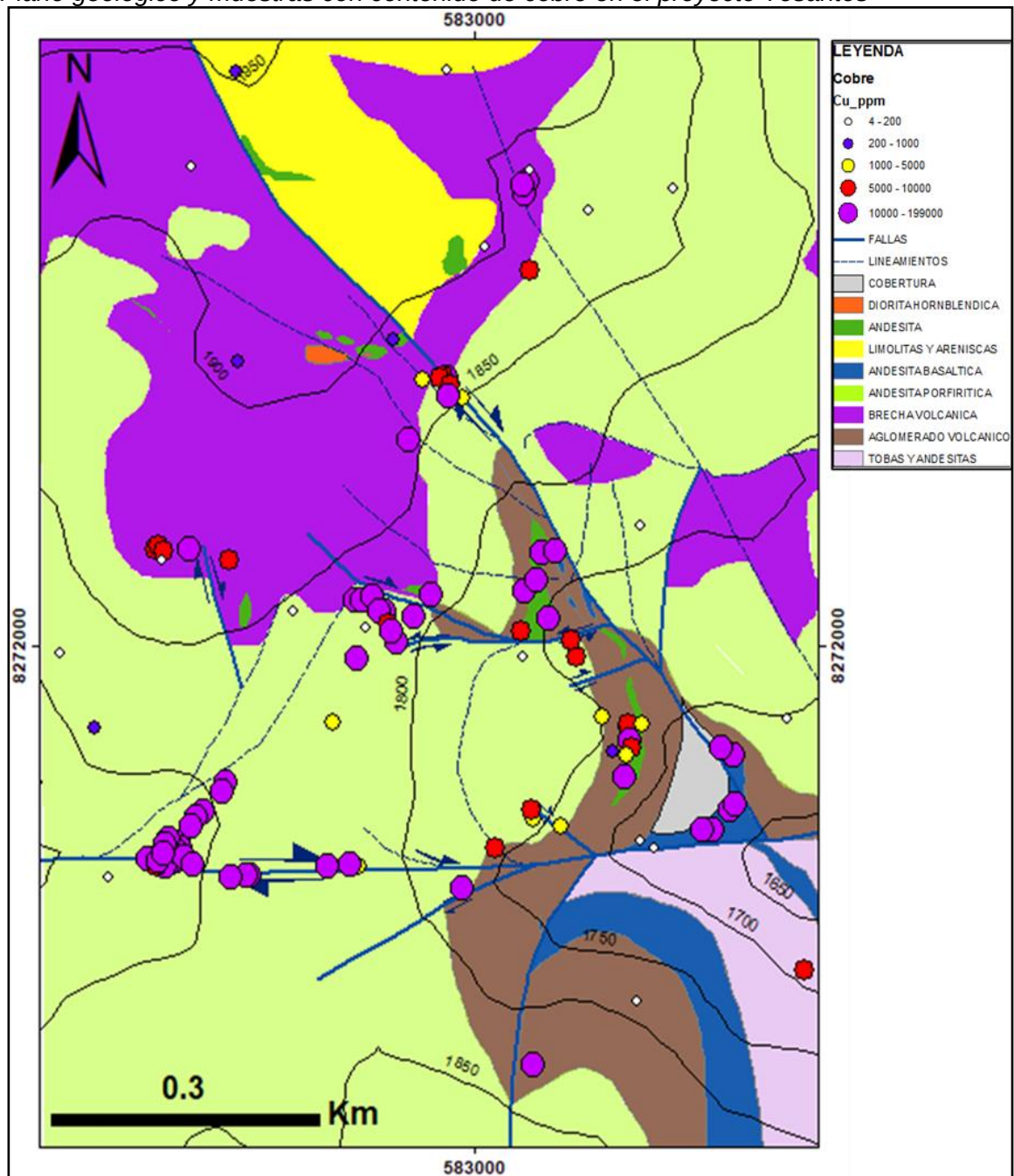
discordancia erosional, se encuentra la Formación Labra, que forma parte del Grupo Yura del Jurásico Superior y está compuesta principalmente por limolitas y areniscas cuarzosas. Además, estas formaciones han sido intruidas por digitaciones y sills subvolcánicos de composición andesítica y diorítica.

La alteración predominante incluye asociaciones de cuarzo-sericita-clorita-epidota-hematita-calcita, con menor presencia de arcillas y biotita secundaria. La mineralización está compuesta principalmente por óxidos de cobre, con menor proporción de sulfuros de cobre y hierro, como calcopirita, calcosina hipogénica y pirita.

Tosantos está afectado por una falla de escala distrital-regional denominada Cateador, de orientación este-oeste (E-O), la cual forma parte del sistema de fallas Iquipi. Esta falla y sus estructuras conjugadas corresponden a fallas normales dextrales y sinestrales que han actuado como conductos para la circulación de fluidos mineralizantes, generando alteración y mineralización en la zona.

Figura 13

Plano geológico y muestras con contenido de cobre en el proyecto Tosantos



Nota: El plano se encuentra en escala 1:2000 y fue elaborado en base a un cartografiado de terreno y estudios petrográficos. Fuente: Elaboración propia.

Figura 14

Estratigrafía del proyecto Tosantos

EÓN	ERA	SISTEMA	SERIE	PISO	M.A.	UNIDAD LITOLÓGICA	POTENCIA (m)	LITOLOGÍA	DEPÓSITOS IOCG	DESCRIPCIÓN
FANEROZOICO	MESOZOICO	JURÁSICO	SUPERIOR	OXFIRDUANO	163.5	Fm. Labra-Grupo Yura	100>			Areniscas cuarzosas en partes con pequeñas intercalaciones de limolitas. Presenta hematita en fracturas.
		JURÁSICO	MEDIO	CALLOVIANO	166.1	Fm. Río Grande	55≥		Mina Justa Playa Kali Cerro de Hierro	Brechas volcanicas de composicion andesítica, en partes alterada por cuarzo-cloritas-hematita. Presenta mantos de hematita con contenido de crisocola-malaquita.
							50≥			Andesitas de textura porfirítica, alteradas por cuarzo-sericita-clorita-epidota-calcita-albíta y bitotita secundaria. Presenta cumulos y vetillas con contenido de pirita-calcopirita-crisocola-malaquita.
							50≥			Aglomerado volcanico de composicion andesítica, en partes alteradas por cuarzo-clorita-epidota-calcita. Presenta cumulos y rellenos en los intersticios de crisocola-malaquita
							50≥			Andesita oscura alterado por cuarzo-cloritas-sericita-epidota-calcita. Presenta fracturas , vetillas y zonas de reemplazamiento con contenido de crisocola-malaquita-calcopirita
							80≥			Intercalaciones de tobas de cristales y andesitas de textura afanítica, alterados por epidota-calcita-cuarzo-cloritas. Presenta fracturas y vetillas de cuarzo y calcita con contenido de calcopirita-crisocola-malaquita.

Nota: Columna fue elaborada en base a las observaciones de terreno, en naranja la diorita hornbléndica y en verde la andesita subvolcánica. Fuente: Elaboración propia.

3.2.1 Litologías

3.2.1.1 Tobas. Las tobas se presentan en la base de la zona como una capa con orientación casi norte-sur (N-S) y un buzamiento entre 15° y 18° hacia el oeste. Se encuentran infrayacentes al aglomerado volcánico y están intruidas por diques y sills subvolcánicos de composición andesítica máfica. Estas tobas son de color blanco, con tonalidades verde claro en algunas áreas debido a la alteración hidrotermal. Presentan una textura fragmental y una composición riolítica. Están constituidas por cristales de cuarzo, plagioclasas y feldespatos potásicos, con tamaños menores o iguales a 2 mm, además de ceniza volcánica. También contienen algunos fragmentos líticos de tamaño lapilli.

Figura 15

Muestra de mano de la toba de cristales y ceniza



Fuente: Elaboración propia.

3.2.1.2 Aglomerado volcánico. El aglomerado volcánico se presenta ampliamente en la zona de interés como una capa con orientación norte-sur (N-S) y un buzamiento entre 20° y 30° hacia el oeste. Se encuentra suprayacente a las secuencias tobáceas e infrayacente a la andesita porfirítica. Además, está intruido por diques y sills subvolcánicos de composición andesítica. Este aglomerado presenta diferentes

tonalidades, como violáceo, pardo y grisáceo. Su textura es aglomerádica y su composición andesítica. Está conformado por clastos subredondeados a redondeados de andesitas, inmersos en una matriz de ceniza con lava andesítica. En algunos casos, se pueden observar clastos con tamaños superiores a 20 cm.

Figura 16

Muestra de mano del aglomerado volcánico



Fuente: Elaboración propia.

3.2.1.3 Andesita porfirítica. La andesita porfirítica se encuentra ampliamente extendida en la zona de interés, con orientación noreste-suroeste (NE-SO) y un buzamiento entre 25° y 30° hacia el noroeste. Se encuentra suprayacente al aglomerado volcánico e infrayacente a las brechas volcánicas. Además, está intruida por diques subvolcánicos andesíticos. Esta andesita es de color gris verdoso y presenta una textura fluidal y porfirítica con una matriz afanítica. Su composición mineralógica incluye aproximadamente un 25 % de fenocristales de plagioclasas, con tamaños iguales o mayores a 2 mm. El cuarzo no es visible, mientras que los minerales ferromagnesianos representan menos del 5 %. En algunas zonas, se observan xenolitos polimícticos mayores a 5 mm, y la roca presenta un débil magnetismo.

Figura 17

Muestra de mano de la andesita porfirítica



Fuente: Elaboración propia.

3.2.1.4 Brecha volcánica. La brecha volcánica se presenta ampliamente en la zona de interés como una capa con orientación norte-sur (N-S) y un buzamiento entre 20° y 30° hacia el oeste. Se encuentra suprayacente a la andesita porfirítica e infrayacente a las areniscas de la Formación Labra. Además, está intruida por diques subvolcánicos andesíticos. Esta brecha presenta diversas tonalidades, como violáceo, pardo, grisáceo y blanquecino, este último debido a la alteración hidrotermal. Su textura es fragmental y su composición andesítica. Está conformada por clastos angulosos a subangulosos de andesitas, inmersos en una matriz de ceniza con lava andesítica.

Figura 18

Muestra de mano de la brecha volcánica



Fuente: Elaboración propia.

3.2.1.5 Arenisca cuarzosa. La arenisca cuarzosa de la Formación Labra se presenta al norte de la zona de interés como una capa con orientación norte-sur (N-S) y un buzamiento entre 30° y 35° hacia el oeste. Se encuentra suprayacente a las brechas volcánicas y está intruida por diques de diorita hornbléndica. Esta arenisca presenta tonalidad gris blanquecino y, en algunas áreas, un color naranja pardo debido a la meteorización de posibles piritas. Su textura es detrítica, con granos de arena de tamaño medio. Está compuesta por arenas de cuarzo bien seleccionadas y redondeadas. En algunas zonas, presenta fracturas con relleno de óxidos de hierro.

Figura 19

Muestra de mano de la arenisca cuarzosa



Fuente: Elaboración propia.

3.2.1.6 Andesita porfirítica máfica. Se presenta en forma de sills concordantes con la estratificación, acomodados entre el aglomerado volcánico y las tobas. Además, aparece en pequeños diques y digitaciones que cortan al aglomerado volcánico. No se ha observado que corte las secuencias superiores al aglomerado volcánico. Su color varía de gris oscuro a verde oscuro en algunas áreas debido a la alteración hidrotermal. Su textura es porfirítica y su composición andesítica. Está compuesto por un 20 % de fenocristales de plagioclasas y un 10 % de piroxenos con tamaños menores a 2 mm, inmersos en una matriz afanítica. Además, presenta un moderado magnetismo.

Figura 20

Muestra de mano de la andesita porfirítica máfica



Fuente: Elaboración propia.

3.2.1.7 Diorita hornbléndica. Se presenta en forma de pequeñas digitaciones que cortan el aglomerado volcánico, las brechas volcánicas y las areniscas de la Formación Labra. Su color es gris verdoso y presenta una textura porfirítica. Está compuesto por un 10 % de fenocristales de plagioclasas y un 20 % de hornblendas con tamaños mayores a 1 cm, inmersos en una matriz fanerítica de grano medio compuesta por plagioclasas.

Figura 21

Fotografía de la muestra de mano de la diorita hornbléndica



Fuente: Elaboración propia.

3.2.2 Alteración hidrotermal

La alteración en el proyecto está controlada por las fallas y las litologías preexistentes. Se manifiesta en forma de halos de decenas de metros en zonas fracturadas y brechadas, como resultado de la deformación estructural y la interacción con fluidos hidrotermales. En superficie, la alteración está compuesta principalmente por sericita, clorita, epidota, cuarzo y calcita, con menor presencia de biotita secundaria y, localmente, baritina.

3.2.2.1 Biotita secundaria. La biotita secundaria es el evento más temprano de alteración hidrotermal identificado en la zona. Afecta principalmente a la andesita porfírica, en aquellas áreas donde la roca presenta mayor fracturamiento y brechamiento. Se observa rellenando oquedades, fracturas e intersticios de la matriz de la roca. Además,

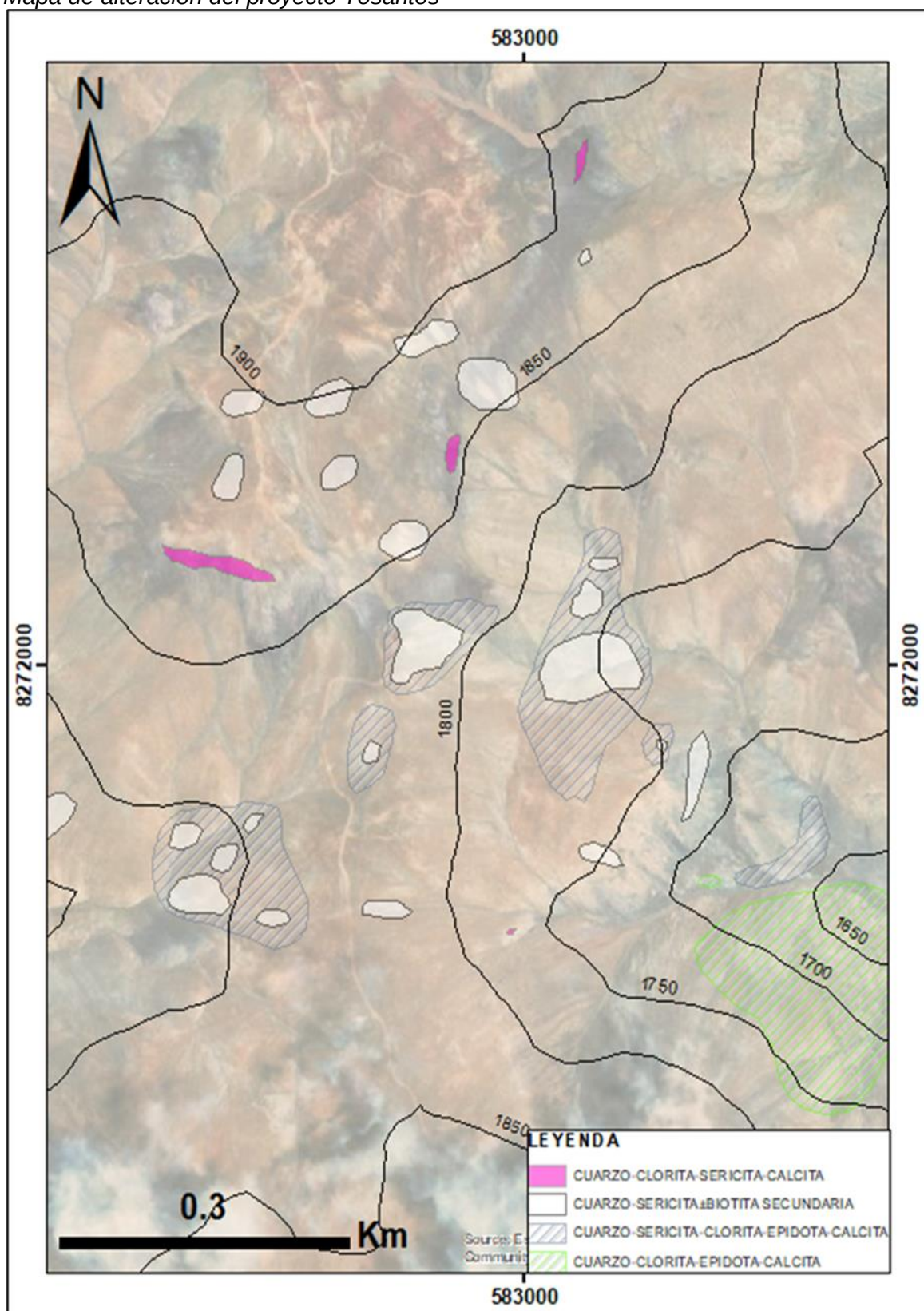
ha sufrido una ligera alteración por óxidos de hierro. La intensidad de esta alteración es débil y solo se presenta puntualmente en la andesita porfírica.

3.2.2.2 Sericitización. La sericita es más tardía que la biotita secundaria, y altera a la andesita porfírica máfica, la andesita porfírica y el aglomerado volcánico. Se presenta en forma de agregados escamosos a microescamosos, reemplazando a las plagioclasas y la matriz de las rocas. Está acompañada de arcillas y, en algunas zonas, es parcialmente reemplazada por carbonatos. La intensidad de la alteración varía de moderada a fuerte en la andesita porfírica máfica, mientras que en la andesita porfírica y el aglomerado volcánico es débil.

3.2.2.3 Argilización. Las arcillas están asociadas a la sericita y son más tardías que la biotita secundaria. Alteran a la andesita porfírica máfica, el aglomerado volcánico, la andesita porfírica, las brechas volcánicas y las tobas. Se presentan en forma de agregados criptocristalinos que reemplazan a las plagioclasas, en asociación con la sericita y, en algunas zonas, parcialmente reemplazadas por carbonatos. Asimismo, pueden aparecer como agregados terrosos, alterando completamente el posible material vítreo de la matriz de la toba. En ciertos sectores, han sido reemplazadas por cloritas. La intensidad de la alteración es débil en toda la zona.

Figura 22

Mapa de alteración del proyecto Tosantos



Nota: El mapa está elaborado en base a un cartografiado de terreno y estudios petrográficos de muestras de mano. Fuente: Elaboración propia.

3.2.2.4 Cloritización. Las cloritas se presentan en dos eventos. El primero, más temprano, altera a las arcillas y la sericita, y se encuentra acompañado de calcita. Posteriormente, un evento más tardío de cloritas corta a las cloritas tempranas y está asociado con la piritita y la calcopiritita. Estas alteran a la andesita porfírica máfica, el aglomerado volcánico, la andesita porfírica, las brechas volcánicas y las tobas. Se presentan en forma de agregados microescamosos, alterando moldes de fenocristales tabulares de posibles minerales ferromagnesianos. Asimismo, han invadido fuertemente la matriz, previamente alterada por agregados de sericita y arcillas. Posteriormente, han sido cortadas por venillas rellenas de cloritas más tardías, malaquita y crisocola. La intensidad de la alteración es fuerte en la andesita porfírica máfica y débil a moderada en las demás rocas.

3.2.2.5 Calcita. La calcita se presenta en tres eventos. El primero, más temprano, se superpone a la sericita y las arcillas. Posteriormente, un evento más tardío se encuentra asociado con cuarzo, cloritas y epidota. Finalmente, un tercer evento, aún más tardío, contiene calcopiritita y calcosina. La calcita altera a la andesita porfírica máfica, el aglomerado volcánico y la andesita porfírica. Se presenta en forma de agregados de pequeños cristales anhedral y irregulares, alterando los fenocristales de plagioclasas y ferromagnesianos, así como los cristales de plagioclasa presentes en la matriz. Además, se encuentra en forma de parches que invaden la matriz de las rocas. En su fase más tardía, la calcita aparece en venillas junto con calcopiritita y calcosina, y en algunas zonas, con crisocola y malaquita. La intensidad de la alteración es débil a moderada en las rocas.

3.2.2.6 Epidotización. La epidota se presenta en dos eventos. El primero, más temprano, altera las rocas en asociación con cuarzo, calcita y cloritas. El segundo, más tardío, se encuentra asociado con cuarzo y calcopiritita. La epidota altera a la andesita porfírica máfica, el aglomerado volcánico, la andesita porfírica y las tobas. Se presenta en forma de pequeños cristales anhedral y irregulares, reemplazando a las plagioclasas y los minerales ferromagnesianos. Ocasionalmente, en conjunto con las cloritas, ha relleno cavidades en las matrices de las rocas. Además, se encuentra en fracturas,

formando venillas junto con cuarzo y calcopirita. La intensidad de la alteración es débil a moderada en las rocas.

3.2.2.7 Silicificación. La silicificación es una de las alteraciones hidrotermales dominantes. El cuarzo se presenta en tres eventos. El primer evento altera la matriz de las rocas y la sericita. El segundo evento corta al cuarzo temprano y está acompañado de pirita y calcopirita. El tercer evento, el más tardío, corta los anteriores y también se asocia con pirita y calcopirita, además de epidota, cloritas y calcita. La silicificación altera a la andesita porfirítica máfica, el aglomerado volcánico, la andesita porfirítica, las brechas volcánicas y las tobas. Se presenta reemplazando de manera pervasiva a la sericita y la matriz de las rocas, así como en forma de venillas y rellenos de fracturas con contenido de pirita y calcopirita. La intensidad de la alteración es moderada a fuerte en las rocas.

3.2.2.8 Baritina. La baritina forma parte de la alteración hidrotermal y se presenta localmente en la zona principal del proyecto, tanto en fracturas como en las periferias, donde aparece en vetas con un espesor promedio de 20 cm. Está principalmente asociada con cuarzo y calcita. En algunas zonas, se ha observado con contenido puntual de óxidos de cobre. La intensidad de la alteración es moderada en las rocas.

3.2.3 Alteración supérgena

Como resultado de la exposición de las rocas y minerales en la superficie, se llevaron a cabo procesos supergénicos, como la oxidación de minerales primarios y rocas mineralizadas.

3.2.3.1 Oxidación. La oxidación ocurre de manera tardía con respecto a la alteración hidrotermal y la mineralización hipogénica. Afecta a todas las rocas y se manifiesta principalmente en la formación de hematita, goethita, leucoxeno y minerales de óxidos de cobre, como malaquita, crisocola y atacamita. La intensidad de la oxidación es moderada en toda la zona.

3.2.4 Mineralización

La mineralización está compuesta principalmente por óxidos de cobre, como malaquita, crisocola y, de manera puntual, atacamita. También incluye sulfuros de cobre y hierro, como calcopirita, calcosina y pirita. La mineralización se presenta en forma de pequeños mantos, con espesores que varían desde centímetros hasta metros, con un contenido predominante de malaquita y crisocola. Además, se observa en vetillas de cuarzo y calcita con pirita, calcopirita y calcosina, las cuales han sido parcialmente reemplazadas por malaquita y crisocola. También se encuentran cúmulos de cuarzo con malaquita y crisocola en rocas alteradas que abarcan decenas de metros. A continuación, se presenta una breve descripción de los minerales que componen la mineralización.

3.2.4.1 Hematita primaria. Se presenta en forma de mantos masivos compuestos principalmente por hematita masiva y compacta, estos mantos se encuentran alojados en las brechas volcánicas. En partes se presenta con mineralización de óxidos de cobre como malaquita y crisocola, y acompañada por cuarzo, sericita y cloritas. Se observa que la hematita primaria es un evento previo a la mineralización de cobre.

3.2.4.2 Pirita. La pirita está asociada con cuarzo, cloritas y calcopirita, y se presenta en forma de cristales cúbicos y anhedrales contenidos en fracturas y vetillas rellenas de cuarzo. También se encuentra junto a la calcopirita en los intersticios de los agregados microescamosos de las cloritas. Además, se observa como relictos junto a la calcopirita en las zonas mineralizadas con malaquita y crisocola.

3.2.4.3 Calcopirita. La calcopirita está asociada con cuarzo, calcita, epidota, cloritas y pirita, y se presenta en forma de cristales anhedrales contenidos en fracturas y vetillas rellenas de cuarzo, calcita, cloritas y epidota. Además, se encuentra junto a la pirita en los intersticios de los agregados microescamosos de las cloritas. También se observa como relictos junto a la pirita en las zonas mineralizadas con malaquita y crisocola.

3.2.4.4 Calcosina. La calcosina hipogénica se presenta en forma de cristales anhedrales contenidos en vetillas de cuarzo y calcita. Además, se encuentra como relictos

o núcleos englobados por malaquita y crisocola. La calcosina se forma como parte del proceso hidrotermal de la mineralización de cobre, junto a la pirita y calcopirita.

3.2.4.5 Crisocola. La crisocola está asociada con calcita, cloritas, cuarzo, epidota, hematita, malaquita, atacamita, pirita, calcopirita y calcosina. Se presenta en forma de cristales anhedrales irregulares, reemplazando a la calcopirita y la calcosina desde sus bordes. Además, rellena oquedades y fracturas formando venillas junto a la malaquita.

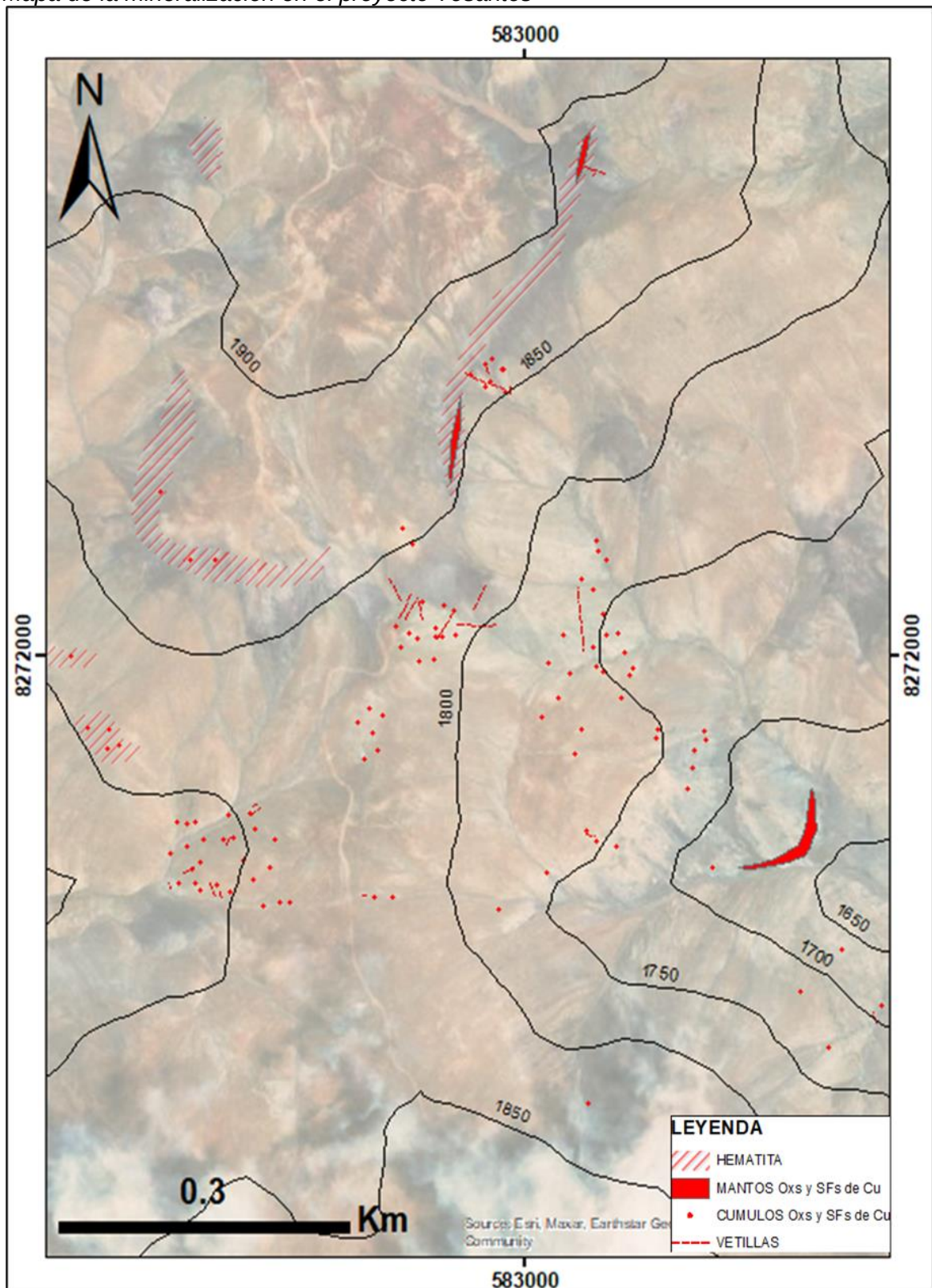
3.2.4.6 Malaquita. La malaquita está asociada con calcita, cloritas, cuarzo, epidota, hematita, crisocola, atacamita, pirita, calcopirita y calcosina.

Se presenta en forma de cristales anhedrales irregulares, reemplazando a la calcopirita y la calcosina desde sus bordes, además de rellenar oquedades y fracturas en forma de venillas junto a la crisocola. En algunas zonas, se observa en parches dentro del aglomerado volcánico.

3.2.4.7 Atacamita. La atacamita está asociada con calcita, cuarzo, hematita, malaquita, calcopirita y pirita. Se presenta en forma de cristales anhedrales irregulares, rellenando los intersticios del cuarzo y ocupando espacios en la matriz de la andesita porfírica. Además, en algunas zonas se observa englobada por hematita.

Figura 23

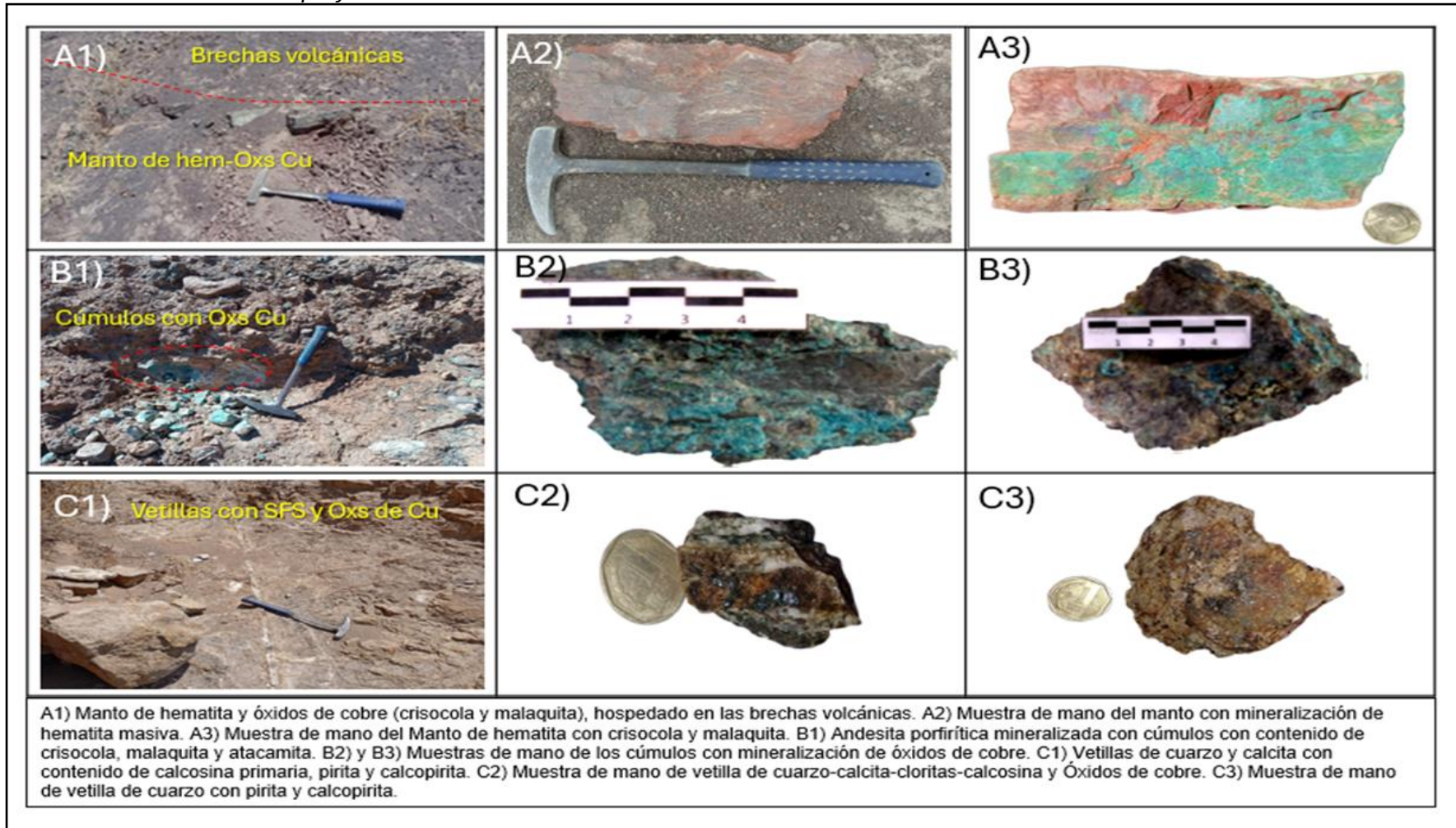
Mapa de la mineralización en el proyecto Tosantos



Nota: El mapa fue elaborado en base a trabajos en terreno y estudios mineragráficos. Fuente: Elaboración propia.

Figura 24

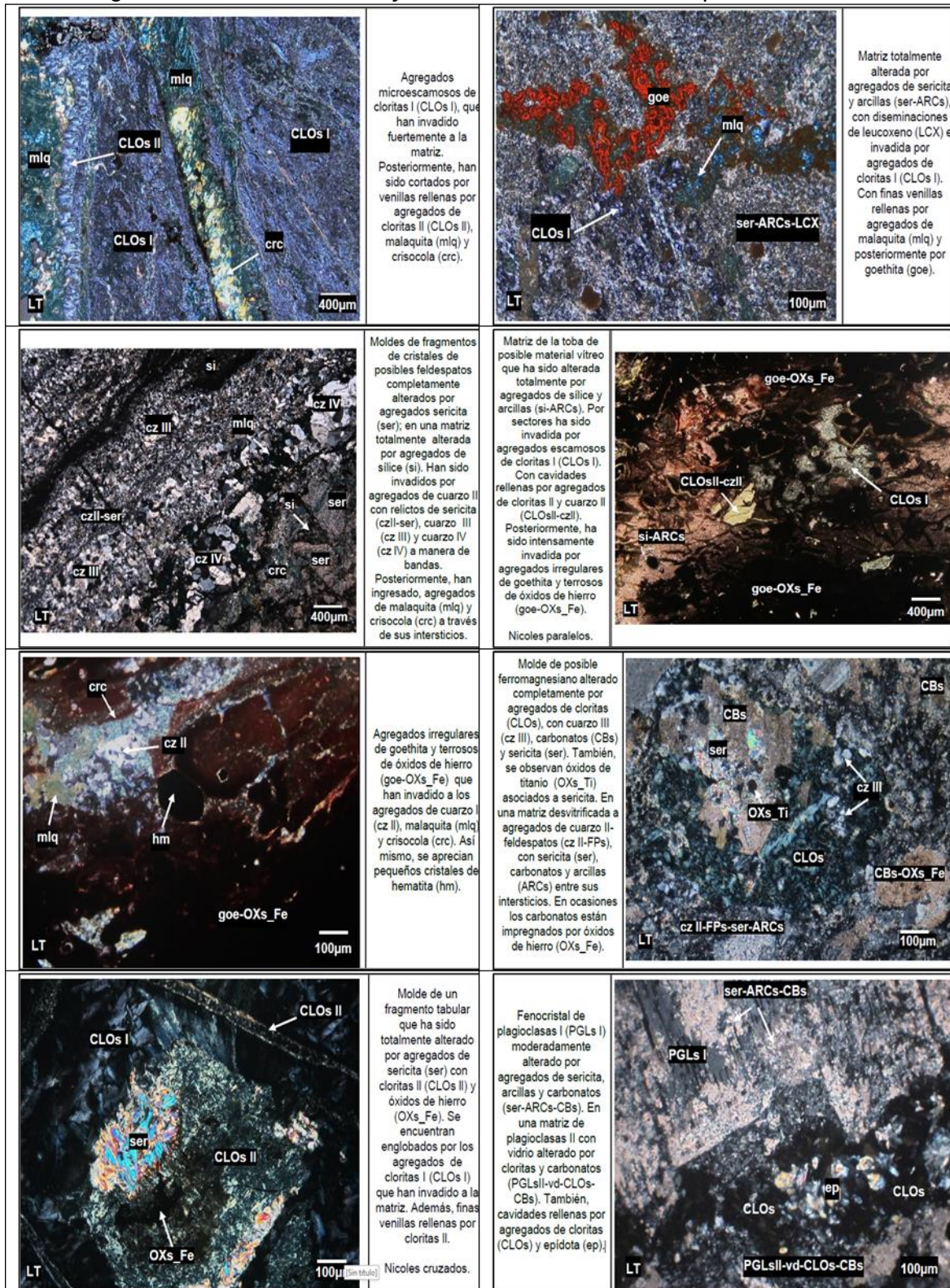
Estilos de mineralización en el proyecto Tosantos



Fuente: Elaboración propia.

Figura 25

Fotomicrografías de rocas alteradas y mineralizadas de Tosantos parte 1



Nota: Fotomicrografías tomadas del Anexo 1. Fuente: Elaboración propia.

Figura 26

Fotomicrográficas de rocas alteradas y mineralizadas de Tosantos parte 2

	Matriz de posible material vítreo que ha sido totalmente alterado por agregados de sílice y arcillas (si-ARCs). Posteriormente, ha sido invadida intensamente por agregados irregulares de goethita y terrosos de óxidos de hierro (goe-OXs_Fe) con escasos y pequeños cristales de hematita (hm).		Sector de la roca invadido por agregados de malaquita (mlq) y crisocola (crc). Posteriormente, ha sido invadido por agregados terrosos de óxidos de hierro. Nicoles cruzados.
	Fragmentos de roca volcánica de textura porfírica (FRs I), han sido cortados por agregados de sílice (si) que forman la matriz de la brecha. Agregados de biotita II alterados por óxidos de hierro (btll-OXs_Fe) han invadido a los fragmentos de roca y a la matriz de brecha. Además, han sido cortados por fracturas rellenas por agregados de cuarzo II con malaquita y óxidos de hierro (cziI-mlq-OXs_Fe). Nicoles cruzados.		Agregados de cuarzo II (cz II) con relictos de biotita II alterada por óxidos de hierro (btll-OXs_Fe). Además, por sus intersticios han ingresado agregados de posible atacamita (atc) y óxidos de hierro (OXs_Fe) terrosos.
	Fragmento de roca II (FRs II) de textura porfírica. Compuesta por moldes de fenocristales alterados por sericita (ser) con impregnaciones de óxidos de hierro (OXs_Fe), en matriz reemplazada por cuarzo secundario con sericita y arcillas (cz-ser-ARCs). Con venillas rellenas por agregados de cuarzo III (cz III) y otras por goethita con jarosita y óxidos de hierro (goe-jar-OXs_Fe).		Matriz de la brecha formada por agregados de cuarzo II (cz II) que ha sido invadida por agregados de goethita (goe) y crisocola (crc). Nicoles cruzados.
	Agregados de cloritas I que han invadido a los agregados de sericita y arcillas (CLOs I-ser-ARCs). Por sus intersticios han ingresado diminutos cristales de pirita (py).		Agregados microscamosos de cloritas I (CLOs I) que han sido cortados por venillas rellenas por agregados de malaquita (mlq), en sus intersticios se aprecian diminutos cristales de calcopirita (cp) y agregados de goethita (goe).

Nota: Fotomicrográficas tomadas del Anexo 1. Fuente: Elaboración propia.

Figura 27

Secuencia paragenética de los procesos hidrotermales y supergenos en Tosantos

	Etapa de alteración hidrotermal y mineralización de Fe				Mineralización de Cu	Procesos supergenos
Biotita secundaria	---	-----				
sericita			=====	=====		
arcillas			=====			
calcita				=====	=====	
Cloritas				=====	=====	
Cuarzo				=====	=====	
epidota				=====	=====	
Baritina				-----		
pirita					=====	
calcopirita					=====	
calcosina					=====	
malaquita						=====
crisocola						=====
atacamita						=====
hematita		=====				=====
Goethita						=====
Oxidos de titanio						-----
			=====	Moderado a abundante		
			=====	localmente		
			-----	traza		

Nota: Secuencia paragenética elaborada en base a las observaciones de terreno y relación de cortes en secciones delgadas. Fuente: Elaboración propia.

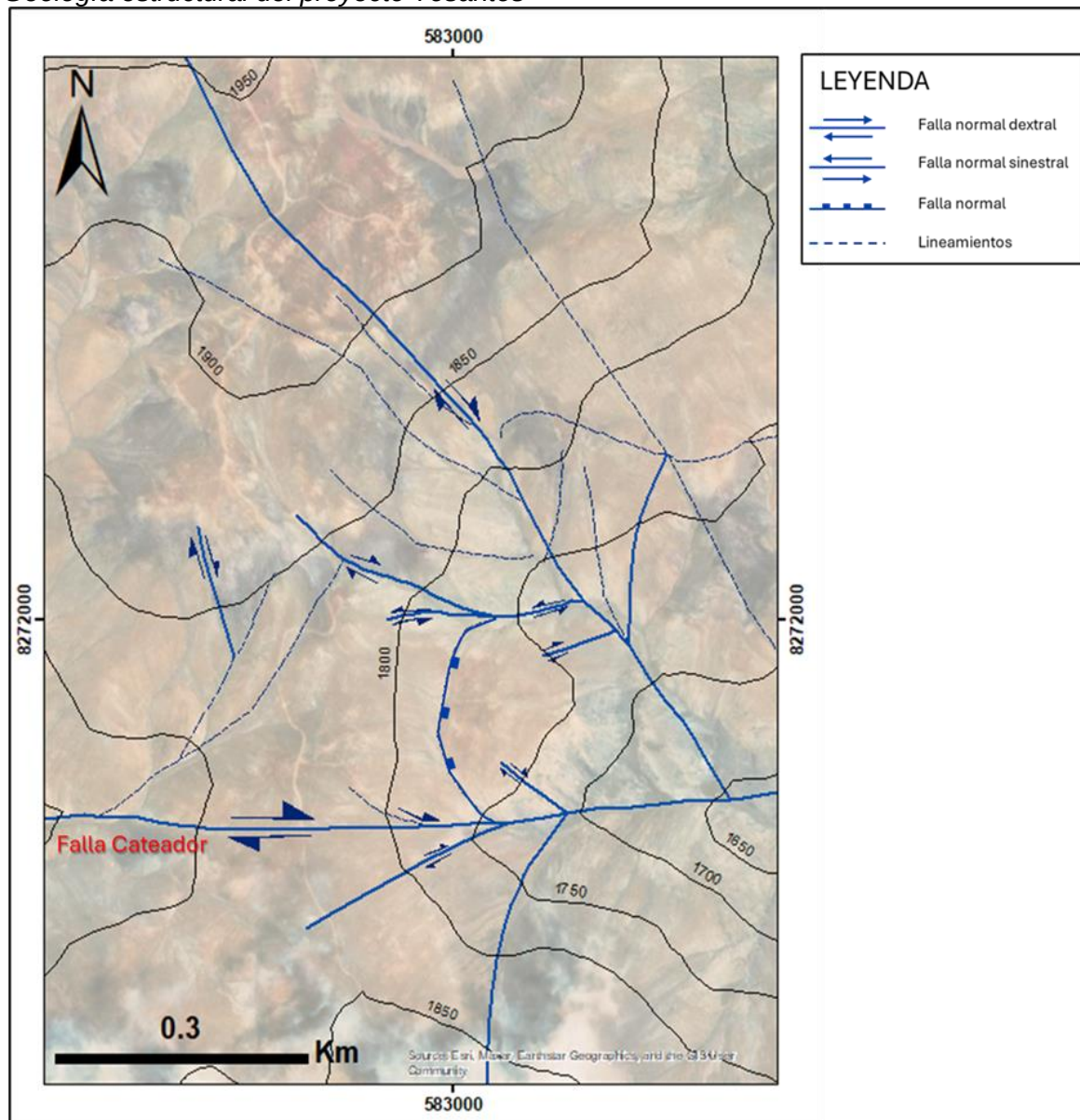
3.2.5 Geología estructural

La zona de interés se encuentra en un contexto estructural regional denominado "zona de fallamiento en bloques". La estructura más relevante en el proyecto es una falla distrital llamada Cateador, la cual tiene una orientación este-oeste (E-O) y divide en dos bloques la zona de interés. El bloque sur se encuentra levantado y el bloque norte hundido (Olchauski Lomparte, 1980). Además, la falla Cateador forma parte del sistema regional de fallas de Iquipi.

Cateador es una falla normal-dextral de influencia distrital-regional que controla la deformación en el proyecto Tosantos, el cual presenta una intensa deformación. Asociadas a la falla Cateador existen otras fallas menores de carácter normal-dextral y normal-sinistral. Como resultado de la deformación en la zona, se formó un graben, y varios bloques fueron rotados y desplazados hacia el suroeste de la zona principal debido a la acción de fallas normales-dextrales.

Figura 28

Geología estructural del proyecto Tosantos



Fuente: Elaboración propia.

3.3 Geoquímica y estadística

El presente subcapítulo aborda la información geoquímica de las muestras de roca tomadas en el proyecto Tosantos, así como su preparación para la aplicación de métodos estadísticos multivariados, como la matriz de Pearson, el análisis de factores y el análisis de conglomerados o clúster, con el objetivo de identificar asociaciones geoquímicas. Además, se incluyen la creación de mapas de dispersión geoquímica de los elementos asociados a la mineralización.

3.3.1 Muestreo geoquímico

Se recolectaron 196 muestras de rocas selectivas en un área de aproximadamente 3 km × 2 km (ver Figura 29). El tipo de muestra tomada corresponde a rock chips, que consiste en recolectar esquirlas de una zona específica. El estándar del laboratorio recomienda tomar 1 kg de esquirlas, las cuales son embolsadas y etiquetadas para luego ser enviadas al laboratorio, donde se analizan mediante espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS). Este método permite determinar hasta 48 elementos químicos (ver Tabla 1).

En el caso del Au, el método utilizado es el ensayo al fuego, el cual tiene un límite de detección de 0.005-10 ppm de Au. En los casos en que el Cu sobrepase el límite de detección del ICP-MS, se analiza mediante el método de cobre total, que permite detectar valores en el rango de 0.001-50 % de Cu.

Los materiales utilizados para tomar las muestras de rocas (rock chips) son: cincel, comba, bolsa, etiqueta, GPS y plumón indeleble. La muestra de roca es tomada con la ayuda del asistente de campo, personal capacitado para cumplir esta función. Para ello, se sigue el siguiente flujo de trabajo:

- Delimitación del punto de muestreo: El geólogo es el responsable de elegir la zona a muestrear.
- Limpieza del área: Se retira el material suelto o la vegetación seca que pueda cubrir la roca.
- Extracción de la muestra: Se toman 1 kg de esquirlas, obtenidas mediante golpes con el cincel y la comba. Las esquirlas deben tener un tamaño menor a 5 cm.
- Empaquetado y registro: Las esquirlas son embolsadas y etiquetadas. Finalmente, el geólogo toma las coordenadas del punto y registra la información en el aplicativo de la empresa.

Tabla 1*Elementos químicos y sus límites de detección por el método ICP-MS*

Elemento	Rango (ppm)	Elemento	Rango (ppm)	Elemento	Rango (ppm)
Ag	0.01-100	Hf	0.1-500	Sb	0.05-10000
Al	0.01-50%	In	0.005-500	Sc	0.1-10000
As	0.2-10000	K	0.01-10%	Se	1-1000
Ba	10-10000	La	0.5-10000	Sn	0.2-500
Be	0.05-1000	Li	0.2-10000	Sr	0.2-10000
Bi	0.01-10000	Mg	0.01-50%	Ta	0.05-500
Ca	0.01-50%	Mn	5-100000	Te	0.05-500
Cd	0.02-1000	Mo	0.05-10000	Th	0.1-10000
Ce	0.01-10000	Na	0.01-10%	Ti	1-10000
Co	0.1-10000	Nb	0.1-500	Tl	0.02-10000
Cr	1-10000	Ni	0.2-10000	U	0.1-10000
Cs	0.05-10000	P	10-10000	V	1-10000
Cu	0.2-10000	Pb	0.5-10000	W	0.1-10000
Fe	0.01-50%	Rb	0.1-10000	Y	0.1-500
Ga	0.05-10000	Re	0.002-50	Zn	2-10000
Ge	0.05-500	S	0.01-10%	Zr	0.5-500

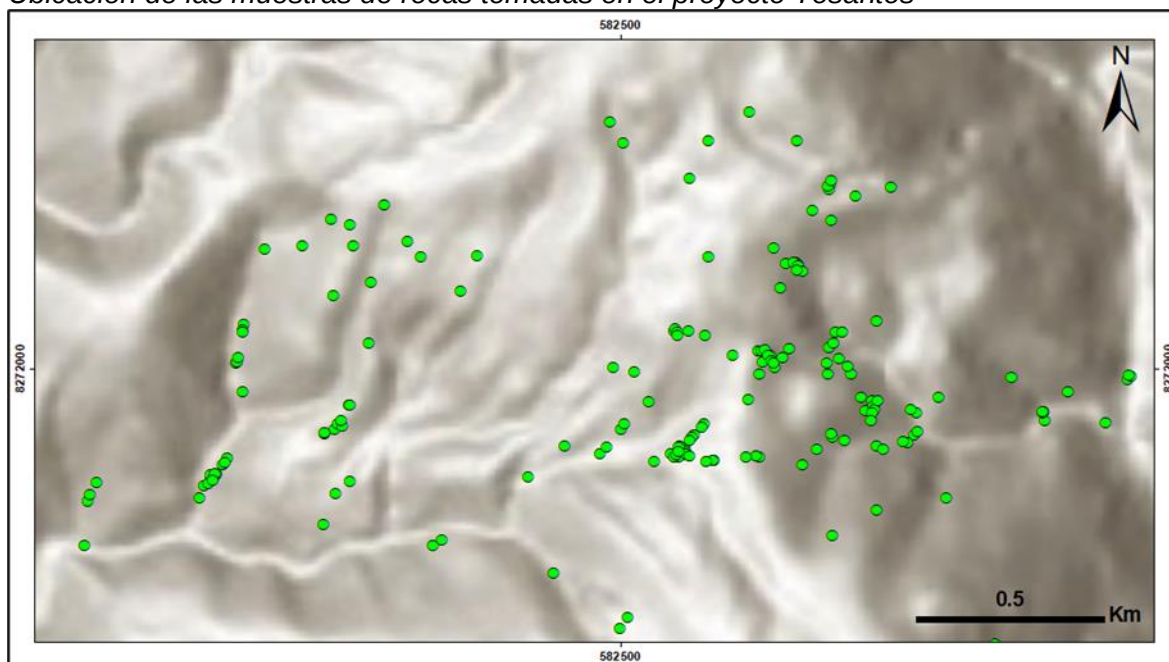
Nota: Tabla adaptada de ALS (2024).

El uso de un aplicativo para la toma de muestras asegura que la información fue registrada en terreno, ya que está vinculado al GPS del celular y almacena los datos directamente en la base de datos de la empresa. Es importante mencionar que, como buena práctica en la recopilación de información, el personal evita contaminaciones en terreno, asegurando una adecuada limpieza de los materiales utilizados, así como de sus guantes y manos.

Además de las muestras de rocas tomadas en Tosantos, se enviaron al laboratorio las siguientes muestras de control de calidad: muestras duplicadas, muestras estándar y muestras blanco. El objetivo de las muestras duplicadas es controlar la precisión del análisis. Asimismo, la inserción de muestras estándar permite evaluar la exactitud del análisis. Por otro lado, las muestras blanco, al estar compuestas únicamente por ganga y no contener valores metálicos, permiten detectar posibles contaminaciones durante la preparación de las muestras en el laboratorio.

Figura 29

Ubicación de las muestras de rocas tomadas en el proyecto Tosantos



Fuente: Elaboración propia.

3.3.2 Procesamiento de datos geoquímicos

El objetivo del procesamiento de datos es contar con información significativa para los análisis posteriores. Para ello, seguiremos el siguiente flujo de trabajo:

- Recopilar la información, seleccionar la población a trabajar, verificar que los resultados de las muestras de control (duplicados, estándar y blancos) estén en conformidad y homogeneizar las unidades.
- Identificar y reemplazar los valores por debajo del límite de detección.
- Depurar aquellos elementos con una variabilidad menor al 70%.
- Transformar los datos a base logarítmica, identificar valores atípicos y asegurar que los datos tengan una distribución normal o casi normal.
- Estandarizar los datos, centrarlos en cero y escalarlos.

Se recopilaron 196 muestras de rocas, de las cuales 137 corresponden a muestras con mineralización de cobre identificadas en terreno. Dado que buscamos las asociaciones geoquímicas que comprende la firma geoquímica de la mineralización, utilizaremos solo la población de muestras mineralizadas.

Los resultados de laboratorio de las muestras de control (duplicados, estándar y blancos) están en conformidad. Se homogeneizaron las unidades, convirtiendo todos los valores a ppm. Además, se realizó una amalgamación de cinco elementos de tierras raras (Ce, Y, Nb, Sc y La) presentes en la base de datos. Dado que estos elementos suelen tener un comportamiento similar, se consideró apropiado sumarlos y reemplazarlos por su valor total, denominado REE* (ver Anexo 2).

En este subcapítulo, consideraremos como datos censurados aquellos cuyos valores están por debajo del límite de detección (LD). En caso de que existan, aplicaremos la metodología recomendada por el Manual de Metodologías Geoquímicas de Países Iberoamericanos (Iberoamericanos, 2022), que establece:

- Si el porcentaje de datos censurados es menor al 15%, se recomienda reemplazarlos por LD / 2, LD o utilizar el método de Máxima Verosimilitud (MLE).
- Si el porcentaje oscila entre 15% y 50%, se debe emplear el método MLE.
- Si el porcentaje es superior al 50% pero menor al 90%, se debe estimar los percentiles situados por encima del porcentaje censurado. Sin embargo, un porcentaje tan alto de datos censurados dificulta una evaluación estadística integral, por lo que su uso en modelamiento no es recomendable.

En nuestro caso, los elementos S, Se, Te y Re presentaron más del 50% de datos censurados, por lo que fueron excluidos de la base de datos. Para los demás elementos, cuyo porcentaje de datos censurados fue menor al 15%, los valores censurados fueron reemplazados por LD / 2.

En geoquímica, los elementos con mayor variabilidad proporcionan información más significativa, especialmente aquellos asociados a la mineralización, que suelen presentar una variabilidad muy alta. Para identificar los elementos con mayor variabilidad, aplicamos el Coeficiente de Variabilidad (CV), “como vemos en la ecuación 1”:

$$CV = \frac{(\text{desviación estándar})}{\text{media}} \times 100\% \quad (1)$$

Si $CV > 70\%$, los datos tienen alta variabilidad y son útiles para el análisis. Aplicando este método, encontramos que los elementos Th, V, Ti, Al, Hf, Ta, Zr, Be, Ga y REE* (Ce, Y, Nb, Sc y La) tienen un $CV < 70\%$, por lo que fueron excluidos del análisis (ver Tabla 2).

Para realizar correlaciones o asociaciones con la información, es necesario que los datos sigan una distribución normal o casi normal. Para ello, los datos fueron transformados mediante el logaritmo natural, dado que los elementos químicos tienden a seguir una distribución normal o casi normal cuando se transforman a escala logarítmica (Ahrens, 1957).

El siguiente paso es identificar si en la base de datos transformada existen valores atípicos o outliers. Los valores atípicos se definen como aquellos que superan el tercer cuartil más 1.5 veces la distancia intercuartil, o que son menores al primer cuartil menos 1.5 veces la distancia intercuartil. Además, se considera como muestras outliers aquellas en las que más del 50 % de sus datos son valores atípicos. En caso de identificar muestras outliers, estas serán excluidas de los análisis posteriores.

Tabla 2

Coeficiente de variación de los elementos químicos del proyecto Tosantos

Elemento	CV%	Elemento	CV%	Elemento	CV%	Elemento	CV%
Au	160	As	199	Ba	137	Sn	196
Ag	196	U	145	Ti	38	Ta	48
Cu	142	Th	50	Al	32	Zr	51
Mo	171	Sr	146	Na	113	In	160
Zn	119	Cd	148	K	70	Be	42
Pb	297	Sb	585	W	71	Li	114
Bi	202	V	69	Tl	79	Ga	38
Ni	129	Ca	123	Cs	80	REE*	33
Co	255	P	83	Ge	144		
Mn	90	Cr	98	Hf	48		
Fe	74	Mg	90	Rb	77		

Nota: En rojo aquellos elementos con un porcentaje de coeficiente de variación (CV%) menor a 70. Fuente: Elaboración propia.

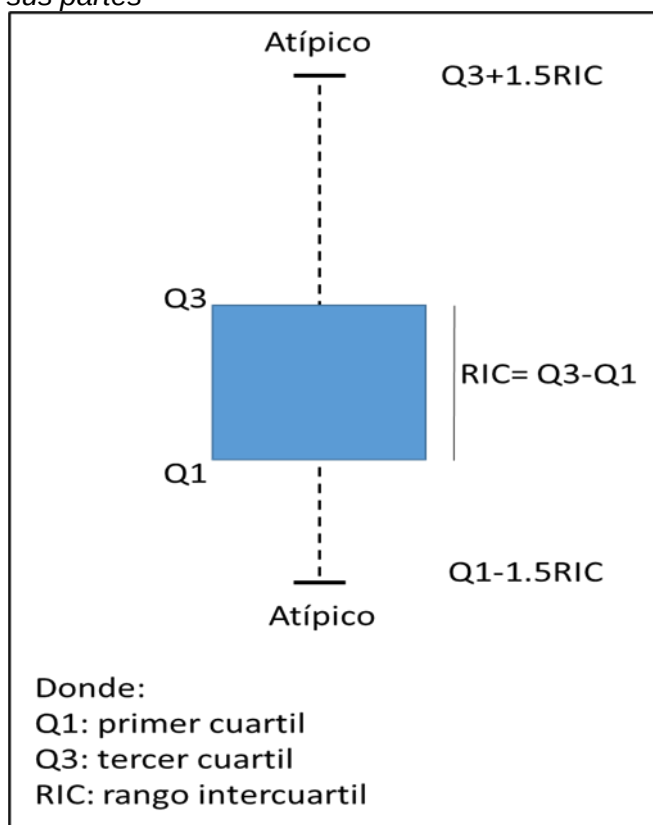
Para evaluar la presencia de valores atípicos, se aplicó la metodología del boxplot de Tukey (1977) (ver Figura 30). Se evaluaron los valores atípicos de los elementos

restantes, los cuales son: Cu, Au, Ag, Mo, Zn, Pb, Bi, Ni, Co, Mn, Fe, As, U, Sr, Cd, Sb, Ca, P, Cr, Mg, Ba, Na, K, W, Tl, Ge, Rb, Sn, In, Li y Cs. No se identificaron muestras atípicas.

Finalmente, el siguiente paso fue estandarizar los datos, lo que implica realizar un centrado y un escalado de los valores. Para lograr la estandarización, a cada valor se le restó su media y se dividió entre la desviación estándar. La aplicación del centrado permite llevar la distribución de las variables al origen de coordenadas, mientras que el escalado transforma el rango de cada variable, de modo que los elementos mayoritarios, minoritarios y trazas sean comparables en las técnicas multivariantes subsecuentes.

Figura 30

Boxplot de Tukey y sus partes



Fuente: Elaboración propia.

3.3.3 Análisis Multivariable

3.3.3.1 Matriz de correlación de Pearson. La matriz de correlación de Pearson (MP) es una técnica multivariable que mide la fuerza o el grado de asociación lineal entre

dos variables. Para ello, utiliza el coeficiente de correlación de Pearson, el cual varía entre -1 y 1, con los siguientes valores de referencia:

- 1 indica una correlación positiva perfecta.
- 0 indica que no hay correlación.
- -1 indica una correlación negativa perfecta.

El coeficiente de correlación se obtiene a partir del cociente entre la covarianza de dos variables y el producto de sus respectivas desviaciones estándar. La matriz de correlación es especialmente útil cuando se analiza un conjunto de datos con múltiples variables, ya que permite comprender las relaciones entre ellas. Esta matriz tiene una estructura cuadrada, en la que cada casilla representa el coeficiente de correlación de Pearson entre dos variables.

Según Evans (1996), los valores del coeficiente de correlación de Pearson se clasifican de la siguiente manera:

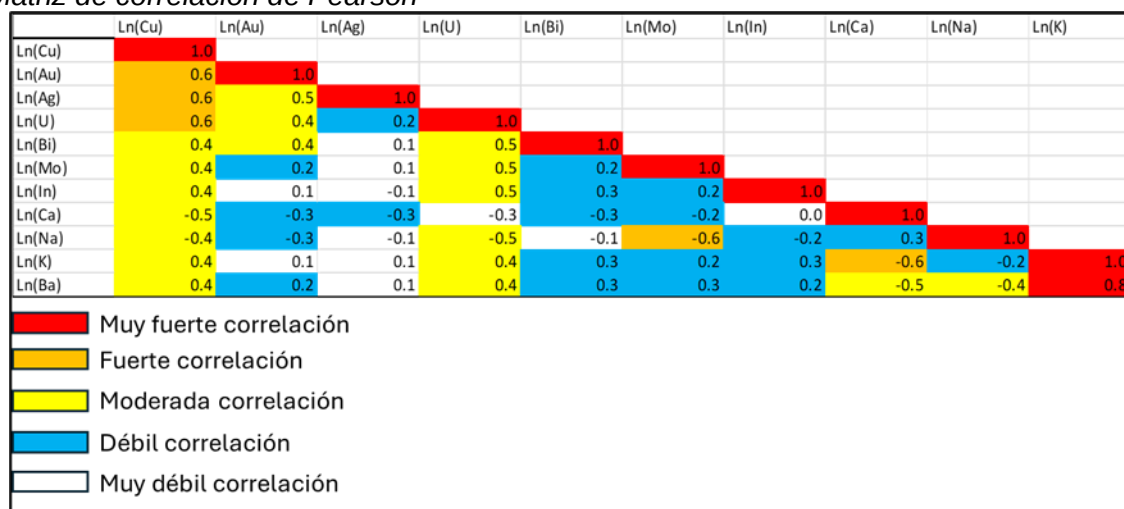
- 0.20 <: Muy débil
- 0.20 - 0.39: Débil
- 0.40 - 0.59: Moderada
- 0.60 - 0.79: Fuerte
- 0.80 - 1.00: Muy fuerte

Se aplicó la matriz de correlación de Pearson a los datos previamente procesados, transformados mediante logaritmo natural y estandarizados. A partir de ello, se calculó la matriz de correlación de Pearson para los 31 elementos de la base de datos (ver Anexo 3). Como resultado de la matriz de correlación completa, se generó una matriz con las correlaciones más significativas para la mineralización de cobre (ver Figura 31).

Se observa que el Cu tiene una fuerte correlación con el Au, U y Ag, moderada correlación con el Bi, Mo, In, K y Ba. Además, una moderada correlación negativa con Ca y Na.

Figura 31

Matriz de correlación de Pearson



Fuente: Elaboración propia.

3.3.3.2 Análisis de factores. El análisis de factores (AF) es una técnica multivariable utilizada para reducir la dimensionalidad de los datos, formando grupos de variables homogéneas que se correlacionan significativamente entre sí, siendo cada grupo independiente de los demás. Estos grupos homogéneos, también llamados factores, representan asociaciones entre variables que reflejan estructuras subyacentes en un conjunto de datos. El análisis factorial permite identificar y comprender estas relaciones subyacentes o asociaciones geoquímicas, con el objetivo de explicar la mayor cantidad de información posible en el menor número de dimensiones.

Según Reimann, Filzmoser, Garrett y Dutter (2008), para aplicar el análisis factorial es necesario que los datos estén transformados logarítmicamente, homogenizados, estandarizados, sigan en la medida de lo posible una distribución normal y que los valores atípicos hayan sido corregidos. Además, es fundamental determinar si los datos presentan correlaciones significativas entre sí, para lo cual se emplea el test de esfericidad de Bartlett. Un valor $p < 0.05$ indica que las variables están correlacionadas y que es viable aplicar el método de reducción de dimensionalidad. En este caso, se obtuvo un valor $p = 0.00$, lo que confirma la existencia de correlaciones entre los datos.

Por otro lado, es importante evaluar si las correlaciones entre pares de variables pueden ser explicadas por otras, para lo cual se emplea la medida de adecuación muestral

de Kaiser-Meyer-Olkin (KMO). Un valor superior a 0.7 sugiere una interrelación óptima entre las variables. En el presente análisis, se obtuvo un valor de 0.79, lo que corrobora la idoneidad de los datos para un análisis factorial.

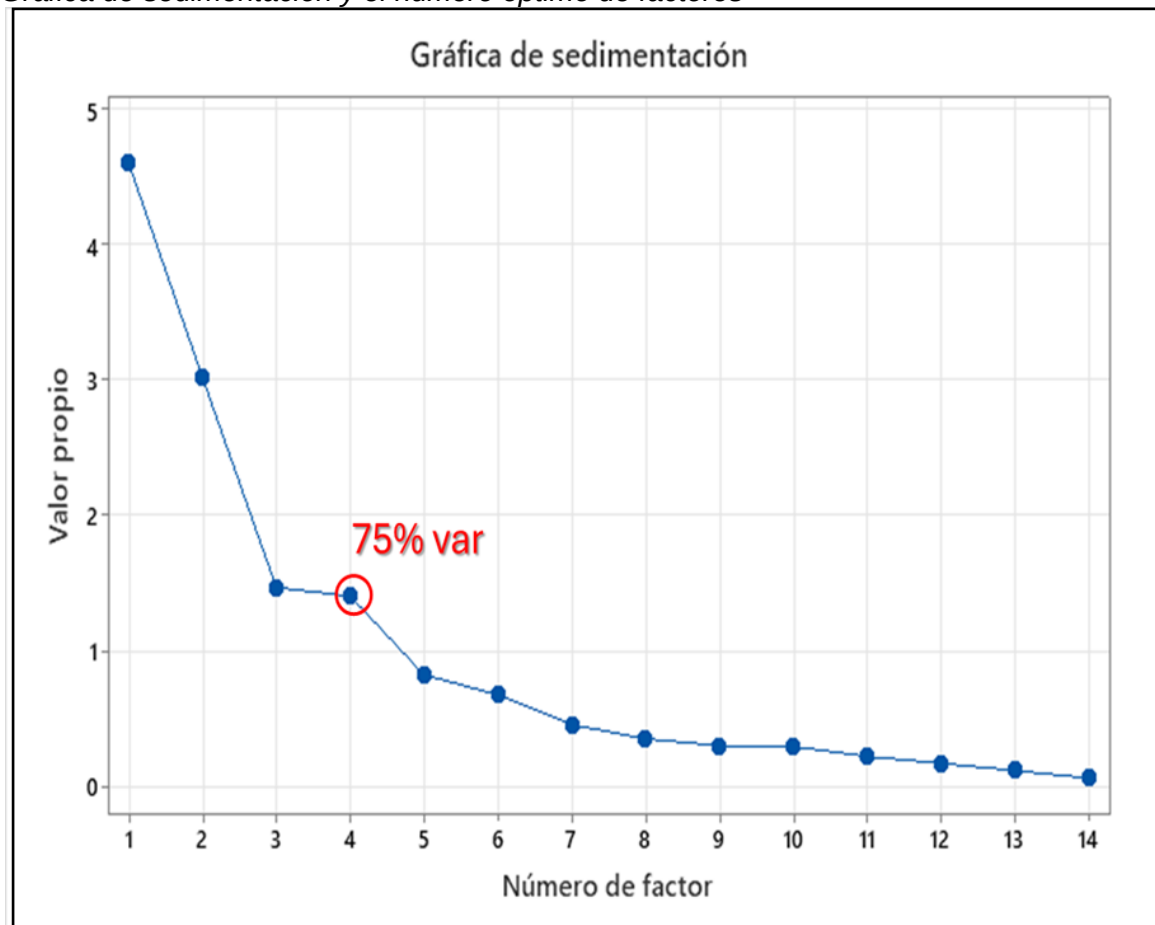
Asimismo, es esencial determinar la dimensionalidad adecuada o el número óptimo de muestras para llevar a cabo un análisis factorial robusto. Tabachnick y Fidell (2019) sugieren, como regla general, una proporción de entre 5 y 10 muestras por variable. Dado que la base de datos cuenta con 137 muestras, lo más recomendable sería analizar un máximo de 14 variables en el análisis factorial. Para reducir el número actual de variables (31) a una cantidad más adecuada, se utilizó el siguiente criterio: se seleccionaron los elementos que presentan correlaciones significativas con la mineralización de cobre (Au, Ag, Mo, Bi, U, Ca, Na, Ba, K, In y Cu; ver Tabla 5.3). Además, dado que se postula que el yacimiento Tosantos corresponde a un depósito tipo IOCG, se incluyeron Fe, Co y Ni.

En el análisis factorial, el número de factores inicialmente equivale al número de variables. Sin embargo, es necesario determinar la cantidad óptima de factores, es decir, aquellos que expliquen la mayor variabilidad de los datos. Cada factor tiene un eigenvalue o valor propio, una carga factorial y un porcentaje estimado de variabilidad que representa. Para determinar el número óptimo de factores, se emplea el gráfico de sedimentación (scree plot), en el cual el eje y representa los valores propios y el eje x el número de factores. Según el criterio de selección, se consideran los factores cuyo valor propio sea mayor o igual a 1 y cuya deflexión en la curva del gráfico indique la mayor retención de variabilidad.

Para la extracción de la matriz de factores y la elaboración del gráfico de sedimentación, se utilizó el software R. Como resultado, se determinó que el número óptimo de factores es 4, los cuales explican el 75 % de la variabilidad de los datos (ver Figura 32).

Figura 32

Grafica de sedimentación y el numero óptimo de factores



Fuente: Elaboración propia.

Para determinar los factores, se aplicó la rotación varimax a la matriz de factores con el fin de mejorar la interpretación de las cargas factoriales. Estas cargas varían entre 0 y 1, y se consideraron como componentes de cada factor aquellas variables con cargas mayores o iguales a $|0.50|$. Se determinaron las variables correspondientes a cada factor:

- Factor 1: Ni, Co y Fe, negativo Mo
- Factor 2: Au, Ag y Cu
- Factor 3: Ba y K, negativo Ca
- Factor 4: Bi, U y In

Tabla 3

Matriz de los factores con rotación varimax y sus cargas.

VARIABLE	FACTOR 1	FACTOR 2	FACTOR 3	FACTOR 4
Ln (Au)	0.13	0.81	0.08	0.21
Ln (Ag)	0.03	0.83	0.10	-0.15
Ln (Cu)	-0.10	0.74	0.28	0.44
Ln (Mo)	-0.66	0.29	-0.01	0.44
Ln (Bi)	0.25	0.21	0.39	0.55
Ln (Ni)	0.86	0.10	-0.26	-0.08
Ln (Co)	0.95	0.09	-0.02	0.04
Ln (Fe)	0.76	0.17	-0.22	0.38
Ln (U)	-0.20	0.30	0.25	0.76
Ln (Ca)	-0.03	-0.42	-0.72	-0.03
Ln (Ba)	-0.28	0.09	0.84	0.18
Ln (K)	-0.21	0.01	0.89	0.18
Ln (In)	0.01	-0.10	0.06	0.86
Ln (Na)	0.49	-0.39	-0.10	-0.36

Nota: En color rojo, las cargas mayores a valor absoluto 0.5. Fuente: Elaboración propia.

3.3.3.3 Análisis clúster o conglomerados. El análisis clúster, también conocido como análisis de conglomerados, es un método multivariable basado en machine learning no supervisado. Su objetivo es identificar estructuras dentro de conjuntos de datos no agrupados y organizarlos de manera que los objetos dentro de un mismo grupo sean similares entre sí y distintos de los objetos pertenecientes a otros grupos. La hipótesis del análisis clustering es que los elementos dentro de un mismo grupo compartirán características más similares entre sí que con aquellos de otros grupos. En este sentido, el análisis busca minimizar la distancia intra-clúster y maximizar la distancia inter-clúster.

Existen dos métodos principales para agrupar los datos: el particional y el jerárquico. En el agrupamiento particional, cada muestra se asigna a un único grupo, mientras que en el agrupamiento jerárquico, las muestras más semejantes se agrupan progresivamente hasta formar una estructura en forma de árbol o dendrograma. Además, hay diversos algoritmos de agrupamiento, y cada uno puede generar resultados distintos,

por lo que la selección del método más adecuado dependerá de la naturaleza de la investigación y del criterio del investigador.

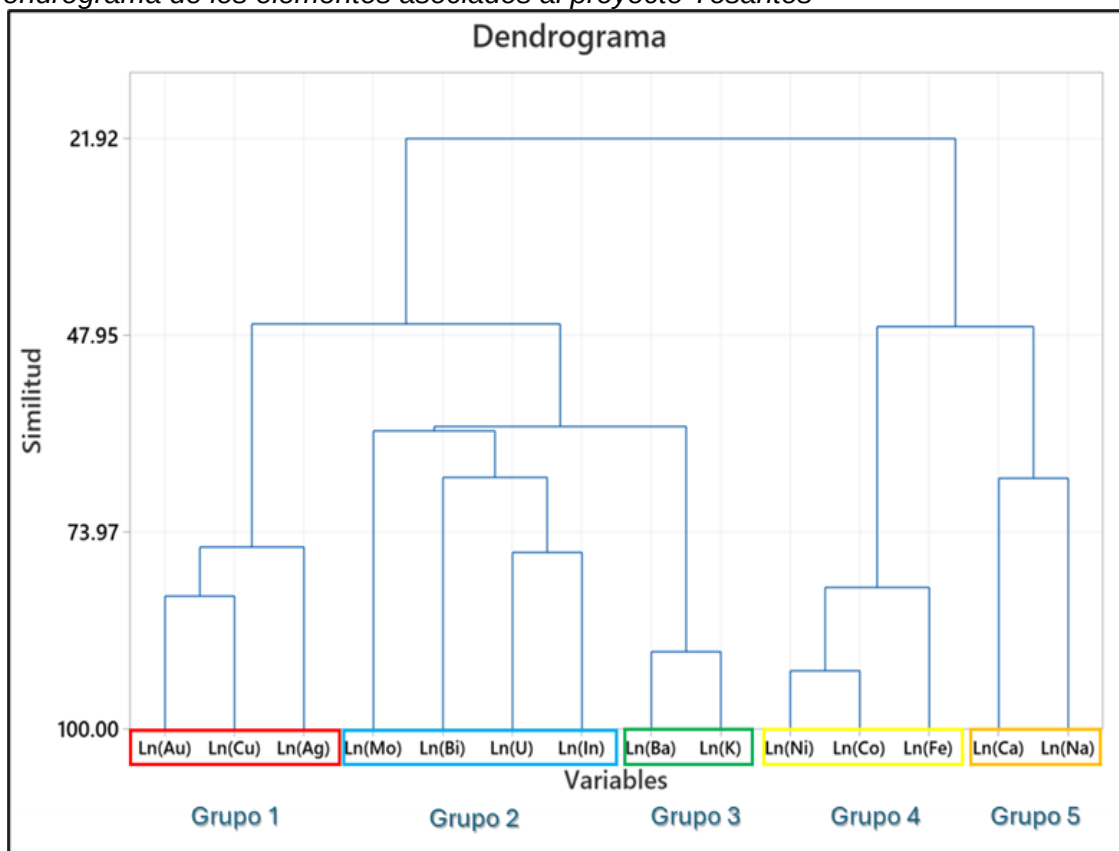
Según Reimann et al. (2008), es fundamental preparar adecuadamente la matriz de datos antes de realizar el análisis clúster. Esto incluye la transformación y estandarización de los datos, así como la eliminación de valores atípicos y datos censurados, ya que estos pueden distorsionar los resultados del análisis.

Como recomendación, después de realizar un análisis factorial, se deben utilizar las variables pertenecientes a los factores que explican la mayor variabilidad. En este estudio, las variables seleccionadas fueron: Au, Ag, Cu, Mo, Bi, Ni, Co, Fe, U, Ca, Ba, K, In y Na. La matriz de estos datos fue previamente procesada, transformada y estandarizada para garantizar la validez del análisis multivariable.

Para este estudio, se utilizó el clúster jerárquico como método de agrupamiento. Como resultado, se generó un dendrograma en el que las variables se agruparon esquemáticamente según su grado de semejanza, facilitando así su interpretación. Se empleó el método de vinculación “completo”, el cual maximiza la distancia entre grupos de variables. Para medir la distancia entre variables, se utilizó la “correlación” como métrica. Este método establece distancias entre 0 y 1 para correlaciones positivas y entre 1 y 2 para correlaciones negativas, lo que implica que las variables con correlaciones negativas están más alejadas entre sí que aquellas con correlaciones positivas.

Figura 33

Dendrograma de los elementos asociados al proyecto Tosantos



Fuente: Elaboración propia.

Las variables que aparecen más próximas en el dendrograma representan aquellas con mayor similitud, mientras que cada rama del dendrograma indica un grupo de elementos asociados. En el eje y, la escala vertical representa el grado de similitud entre las variables, de manera que los grupos que se encuentran más cercanos entre sí presentan una mayor relación. El dendrograma obtenido permitió identificar cinco grupos, los cuales corresponden a asociaciones geoquímicas entre elementos:

- Grupo 1: Au, Cu y Ag
- Grupo 2: Mo, Bi, U y In
- Grupo 3: Ba y K
- Grupo 4: Ni, Co y Fe
- Grupo 5: Ca y Na

3.3.4 Dispersión geoquímica

La dispersión geoquímica se refiere a la distribución y concentración de los elementos químicos en la corteza terrestre. En el caso de los depósitos minerales, esta dispersión está asociada a procesos geológicos como la alteración hidrotermal y la mineralización.

Los análisis estadísticos previos sobre la asociación de elementos químicos en el proyecto “Tosantos” han proporcionado datos numéricos que requieren ser representados cartográficamente mediante mapas de dispersión geoquímica por elemento (Au, Ag, Cu, Mo, Bi, Ni, Co, Fe, U, Ca, Ba, Na, K e In). Estos mapas permitirán corroborar la asociación espacial de estos elementos con la mineralización de cobre en la zona de interés.

3.3.4.1 Umbrales geoquímicos de los elementos asociados. Antes de elaborar los mapas de dispersión geoquímica por elemento, es fundamental establecer los límites o umbrales geoquímicos que permitan diferenciar los valores dentro del background de la zona de aquellos que corresponden a anomalías geoquímicas. Dado que la base de datos fue clasificada en muestras con y sin mineralización observable, en este caso se utilizará la población de datos sin mineralización de cobre, ya que las muestras mineralizadas, por su naturaleza, ya representan valores anómalos.

Para calcular el umbral de los valores anómalos, se aplicaron dos metodologías. La primera fue el método del boxplot de valores atípicos de Tukey (1977), (ver Anexo 4). La segunda metodología utilizada fue el cálculo del umbral basado en la media más dos veces la desviación estándar de los datos transformados a logaritmo. Además, se tomaron como referencia las concentraciones promedio de la corteza terrestre reportadas por Rudnick (2003) (ver Tabla 4).

Se determinó que los valores calculados mediante el método de Tukey (1977) eran más adecuados para los elementos traza, con la excepción del Ba. Para los elementos mayores (Fe, Ca, Na y K), así como para el Ba, se utilizaron como umbrales los valores de referencia de Rudnick (2003).

Tabla 4*Umbrales geoquímicos estimados para el proyecto Tosantos*

Variable	Q3+1.5 (Rango intercuartil)	Media+2 (desviación estándar)	R.L Rudnick (2003)	Umbral utilizado
Au (ppm)	0.005	0.006	0.0015	0.005
Ag (ppm)	0.4	2	0.053	0.4
Cu (ppm)	200	317	28	200
Mo (ppm)	4	13	1.1	4
Bi (ppm)	0.3	0.6	0.16	0.3
Ni (ppm)	12	13	47	12
Co (ppm)	34	47	17.3	34
Fe (ppm)	89000	98519	39170	39170
U (ppm)	4	6	2.7	4
Ca (ppm)	80950	272393	25680	25680
Ba (ppm)	1475	2821	624	624
Na (ppm)	60550	162105	24240	24240
K (ppm)	58900	182956	23240	23240
In (ppm)	0.10	0.17	0.056	0.1

Fuente: Elaboración propia.

3.3.4.2 Mapas de dispersión por elementos. Para la elaboración de los mapas de dispersión geoquímica, se empleó el software ArcGIS Pro y se utilizaron un total de 196 muestras de roca, incluyendo tanto aquellas con mineralización observable como aquellas sin mineralización (ver Anexo 5). Se establecieron cinco rangos de concentración, siendo el primer rango aquel que comprende los valores hasta el umbral determinado (ver Tabla 4), los cuales no se consideran anómalos.

Capítulo IV. Análisis e interpretación de resultados

El presente capítulo aborda el análisis de los resultados de la caracterización geológica del proyecto, los resultados de los análisis estadísticos multivariantes y la relación entre la geológica y la geoquímica de los elementos asociados al proyecto Tosantos.

4.1 Geología

El cartografiado geológico del distrito de Chala y Atiquipa, a escala 1:50,000, sugiere un control estructural distrital y regional, asociado al sistema de fallas Iquipi, el cual presenta una orientación este-oeste. Este sistema controla la ubicación de diversos depósitos tipo IOCG en el distrito (ver Figura 8). La columna estratigráfica regional destaca la importancia de las secuencias volcanosedimentarias de la Formación Río Grande como roca huésped de depósitos IOCG como Mina Justa, Playa Kali, Cerro de Hierro y Parcoy (ver Figura 9).

El cartografiado geológico a detalle, a escala 1:2,000, permitió identificar los estilos de mineralización en la zona, la alteración hidrotermal asociada y las principales litologías receptivas a la mineralización. Además, se confirmó la influencia de la falla "Cateador", de orientación este-oeste, la cual forma parte del sistema Iquipi, como un control estructural clave en la zona. Esta falla es de tipo normal dextral y su desarrollo generó una serie de fallas menores, incluyendo fallas normales, así como fallas de cinemática dextral y sinistral (ver Figura 28). Estas estructuras controlaron la circulación de los fluidos hidrotermales, lo que promovió la alteración y mineralización en la zona.

El cartografiado detallado muestra que la alteración hidrotermal asociada a la mineralización está principalmente controlada por las fallas, mientras que el estilo de mineralización depende de las litologías presentes (ver Figura 34).

Se observó que las brechas volcánicas presentan principalmente mineralización tipo manto, con contenido de hematita primaria, malaquita y crisocola. La alteración hidrotermal asociada incluye ensambles de cuarzo-clorita-sericita y calcita.

La andesita porfirítica muestra mineralización en forma de cúmulos y vetillas. Los cúmulos están compuestos por cuarzo con contenido de pirita, calcopirita, crisocola, malaquita y atacamita. Las vetillas, por su parte, están formadas por cuarzo y calcita, con presencia de pirita, calcopirita, calcosina, malaquita y crisocola. La alteración asociada consiste en un ensamble de cuarzo-sericita-clorita-epidota-calcita, con menor proporción de biotita secundaria, y presenta un núcleo con un ensamble de cuarzo-sericita.

El aglomerado volcánico exhibe mineralización tipo cúmulos de crisocola y malaquita, así como mineralización en fracturas y en la matriz. La alteración asociada está compuesta por un ensamble de cuarzo-sericita-clorita-epidota-calcita.

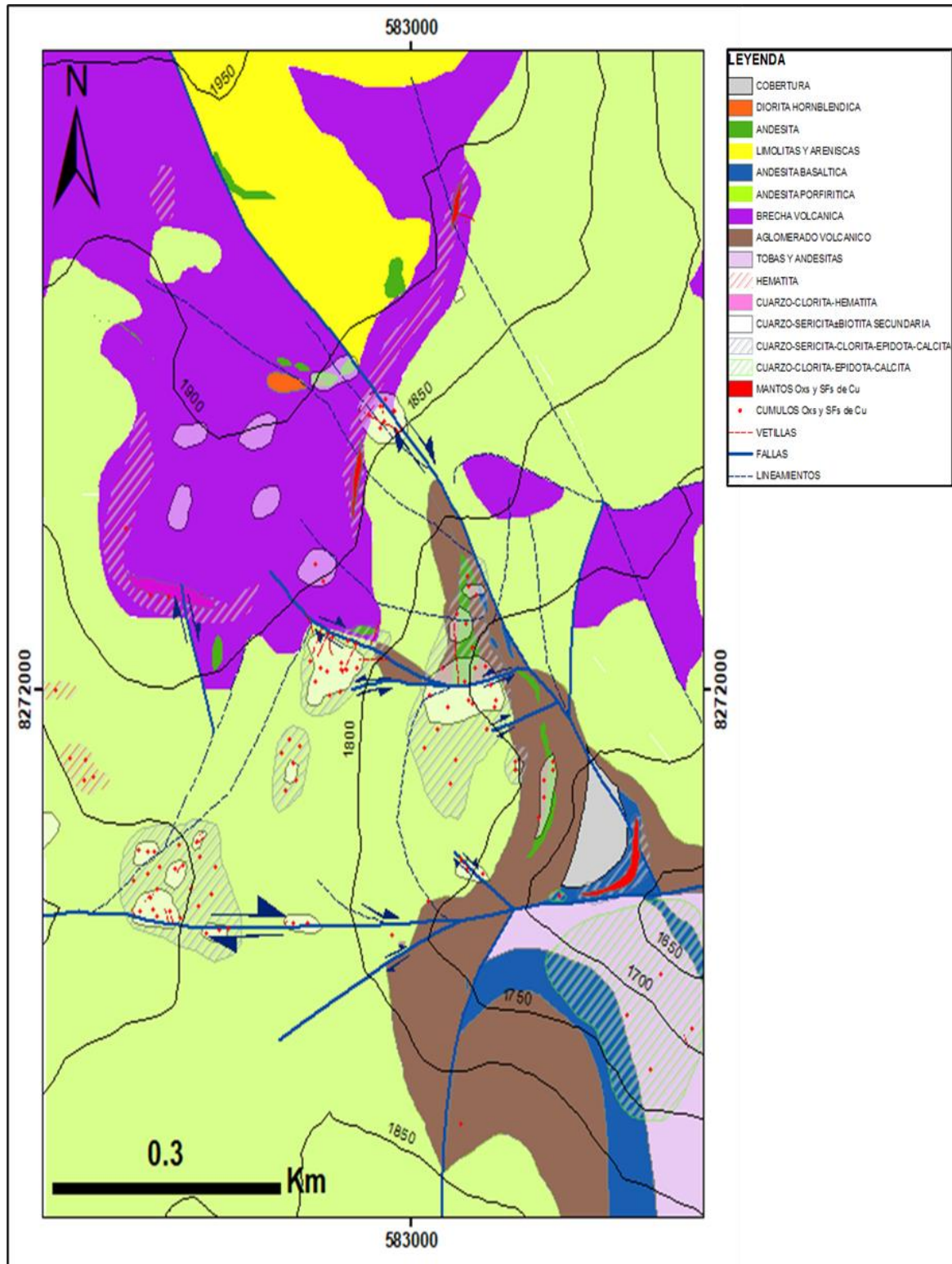
La andesita basáltica presenta mineralización tipo manto, con contenido de calcopirita, pirita, crisocola y malaquita. La alteración hidrotermal asociada está dominada por un ensamble de clorita-cuarzo-sericita, con menor proporción de epidota y calcita.

Las tobas y andesitas muestran mineralización de manera puntual en forma de cúmulos aislados, los cuales contienen principalmente crisocola y malaquita. La alteración asociada incluye un ensamble de cuarzo-clorita-epidota-calcita.

Las demás unidades litológicas, como las areniscas y la diorita hornbléndica, no presentan mineralización de cobre. Estas unidades se encuentran al norte de la falla principal que controla la mineralización, la cual corresponde a la falla Cateador.

Figura 34

Mapa integral de la geología, la alteración hidrotermal y mineralización del proyecto Tosantos



Nota: El mapa está a la escala 1:2000 y fue elaborado en base a trabajos de terreno y estudios petrográficos y minerográficos. Fuente: Elaboración propia.

La secuencia paragenética, elaborada a partir de observaciones de campo, estudios petrográficos y minerográficos, sugiere que el proyecto atravesó tres fases principales: una fase de alteración hidrotermal, seguida de una fase de mineralización y, finalmente, una fase supérgena (ver Figura 27). La fase de alteración hidrotermal comienza con una débil formación de biotita secundaria y hematita primaria. Posteriormente, se desarrollaron sericita, calcita, clorita, cuarzo, baritina y epidota. Un fluido más tardío, que corta a los minerales previamente formados, generó calcita, clorita, cuarzo y epidota, acompañando la mineralización de pirita, calcopirita y calcosina hipógena. La erosión expuso la zona mineralizada, y bajo condiciones supérgenas se dio lugar a la formación de malaquita, crisocola, atacamita, hematita-goethita y óxidos de titanio.

4.2 Geoquímica y estadística multivariable

Los resultados de la matriz de correlación de Pearson identificaron una fuerte correlación (0.6) entre Cu-Au, Cu-Ag y Cu-U, así como una correlación moderada (0.4) entre Cu-Bi, Cu-Mo, Cu-In, Cu-K y Cu-Ba. Asimismo, se observó una correlación negativa moderada entre Cu-Ca y Cu-Na. Dado que esta matriz solo evalúa la relación entre pares de elementos, para establecer asociaciones entre múltiples elementos se aplicaron dos métodos: análisis factorial y el análisis clúster. Ambos métodos fueron utilizados con el objetivo de corroborar los resultados y determinar la forma más adecuada de agrupar los elementos para una mejor interpretación.

El análisis factorial requirió una reducción en el número de variables a analizar debido a la necesidad de una mayor cantidad de muestras. Por ello, antes de aplicar este método, se elaboró la matriz de Pearson, en la que se identificó una correlación lineal significativa del cobre con 11 elementos. Adicionalmente, se incorporaron tres elementos más: hierro, cobalto y níquel, debido a su asociación con depósitos IOCG. De esta manera, el conjunto de variables se redujo a 14 elementos, los cuales fueron analizados mediante los métodos multivariados de análisis factorial y de clúster. Cabe destacar que estos 14 elementos presentan concentraciones anómalas en el proyecto (ver Anexos 4 y 5). El análisis factorial identificó cuatro factores que representan asociaciones entre los

elementos analizados (ver Tabla 3). Estas asociaciones son: Cu-Au-Ag, Bi-U-In, Ba-K (con correlación negativa con Ca) y Fe-Co-Ni (con correlación negativa con Mo).

En el análisis de clúster, identificó una fuerte asociación entre Cu-Au-Ag, U-Bi-Mo-In, Ba-K, Fe-Co-Ni y Ca-Na. Los resultados son similares a los obtenidos en el análisis factorial; sin embargo, a diferencia de este último, el análisis de clúster reveló una asociación entre Mo y el grupo Bi-U-In, así como entre Ca y Na, elementos que previamente presentaban valores negativos.

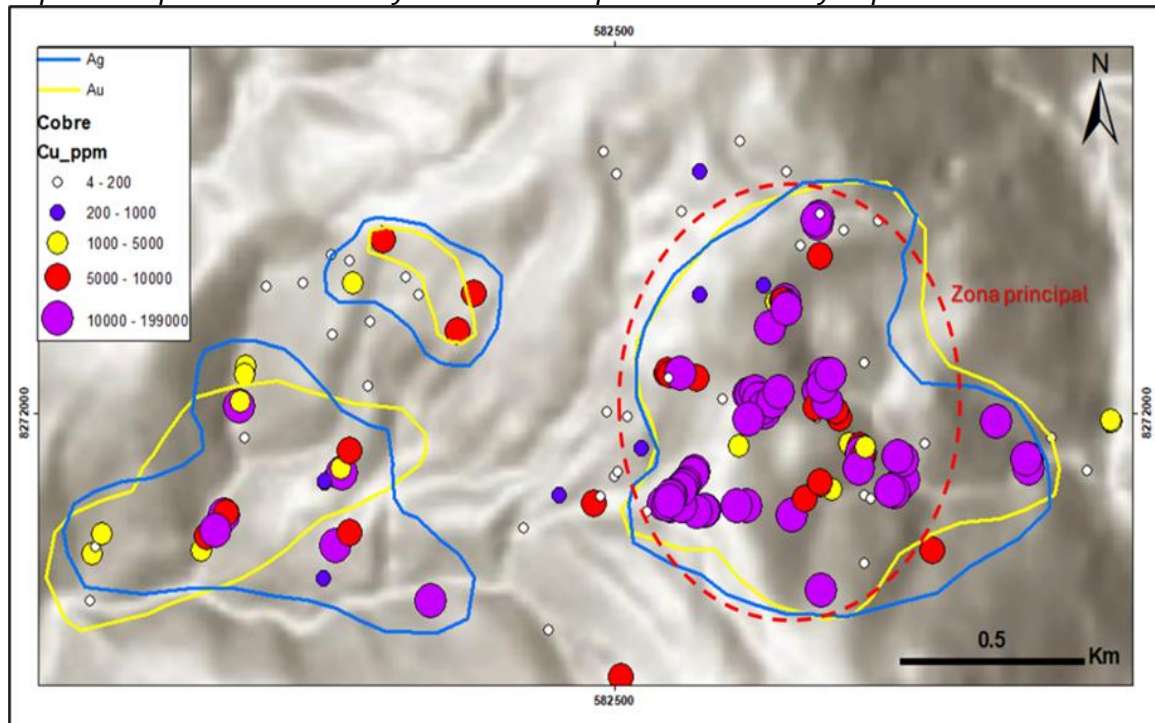
Es necesario validar estas asociaciones obtenidas en ambos métodos, ya que los resultados de los análisis multivariantes son datos numéricos que requieren ser corroborados en el espacio. Para ello, se comparó la dispersión del cobre con las asociaciones de los elementos determinados, con el fin de confirmar su relación con la mineralización de cobre.

4.2.1 Cu vs (Au-Ag)

Para este análisis, se utilizó como base el mapa de dispersión del cobre, sobre el cual se superpusieron líneas coloreadas que representan las zonas donde el oro y la plata presentan concentraciones por encima de sus respectivos umbrales geoquímicos determinados (ver Tabla 4). Se observa una buena relación espacial entre las áreas de concentración de cobre, oro y plata, tanto dentro de la zona principal como al oeste de esta (ver Figura 35). Este patrón sugiere la presencia de dos posibles zonas prospectivas adicionales.

Figura 35

Mapa de dispersión del cobre y su relación espacial con el oro y la plata



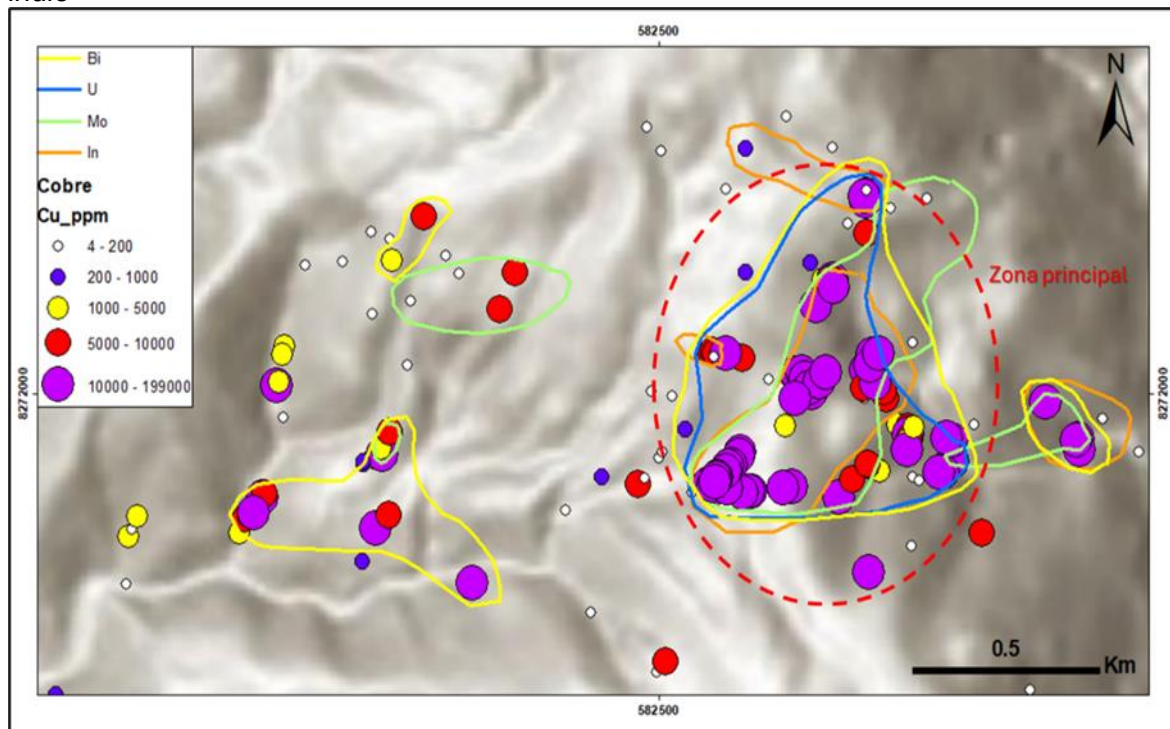
Fuente: Elaboración propia.

4.2.2 Cu vs (Bi-U-Mo-In)

Al igual que en el caso anterior, se utilizó como base el mapa de dispersión del cobre, sobre el cual se superpusieron líneas que representan las zonas donde el bismuto, uranio, molibdeno e indio presentan concentraciones por encima de sus respectivos umbrales geoquímicos determinados (ver Tabla 4). Se observa una buena relación espacial en la zona principal entre el cobre, bismuto, uranio, indio y molibdeno (ver Figura 36). El uranio muestra una concentración anómala exclusivamente en la zona principal, mientras que el indio se distribuye tanto en la zona principal como en áreas próximas a esta. Por su parte, el bismuto y el molibdeno también se concentran en las zonas al oeste, donde se ha identificado la presencia de cobre.

Figura 36

Mapa de dispersión del cobre y su relación espacial con el bismuto, uranio, molibdeno e indio



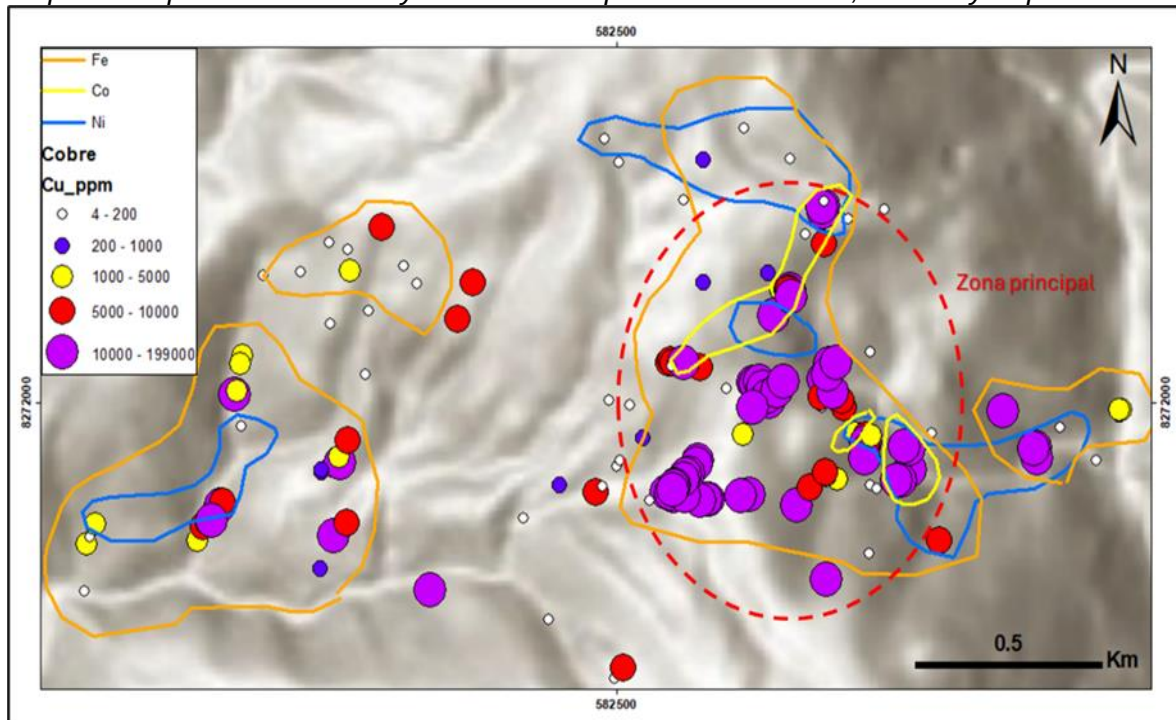
Fuente: Elaboración propia.

4.2.3 Cu vs (Fe-Co-Ni)

Al igual que en los casos anteriores, se utilizó como base el mapa de dispersión del cobre, sobre el cual se superpusieron líneas que representan las zonas donde el hierro, cobalto y níquel presentan concentraciones por encima de sus respectivos umbrales geoquímicos determinados (ver Tabla 4). Se observa una buena relación espacial entre el cobre y el hierro en toda la zona. El hierro, cobalto y níquel muestran una correlación moderada en la zona principal. Los valores anómalos de cobalto se concentran exclusivamente en la zona principal, pero de manera localizada, mientras que el níquel presenta una mejor correlación con el hierro (ver Figura 37).

Figura 37

Mapa de dispersión del cobre y su relación espacial con el hierro, cobalto y níquel



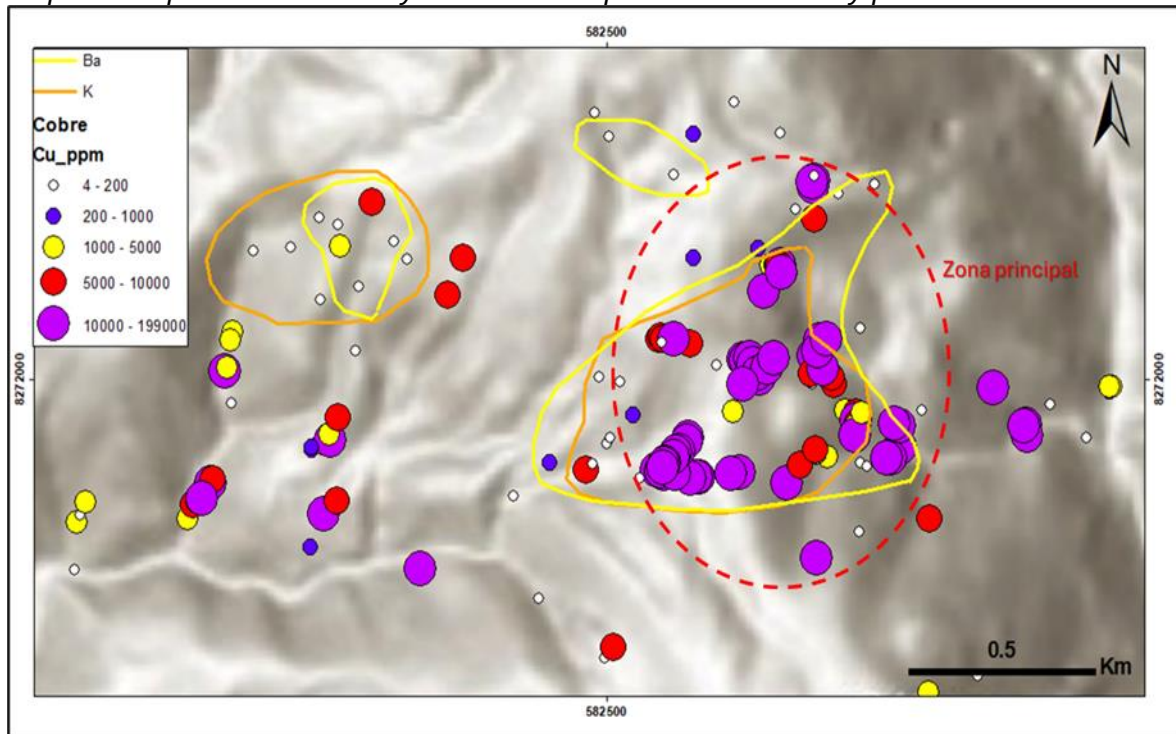
Fuente: Elaboración propia.

4.2.4 Cu vs (Ba-K)

Al igual que en los casos anteriores, se utilizó como base el mapa de dispersión del cobre, sobre el cual se superpusieron líneas que representan las zonas donde el bario y el potasio presentan concentraciones por encima de sus respectivos umbrales geoquímicos determinados (ver Tabla 4). Se observa una buena relación espacial entre el cobre, el bario y el potasio en la zona principal. Asimismo, la correlación entre el bario y el potasio es muy alta, evidenciando una distribución espacial similar (ver Figura 38).

Figura 38

Mapa de dispersión del cobre y su relación espacial con el bario y potasio



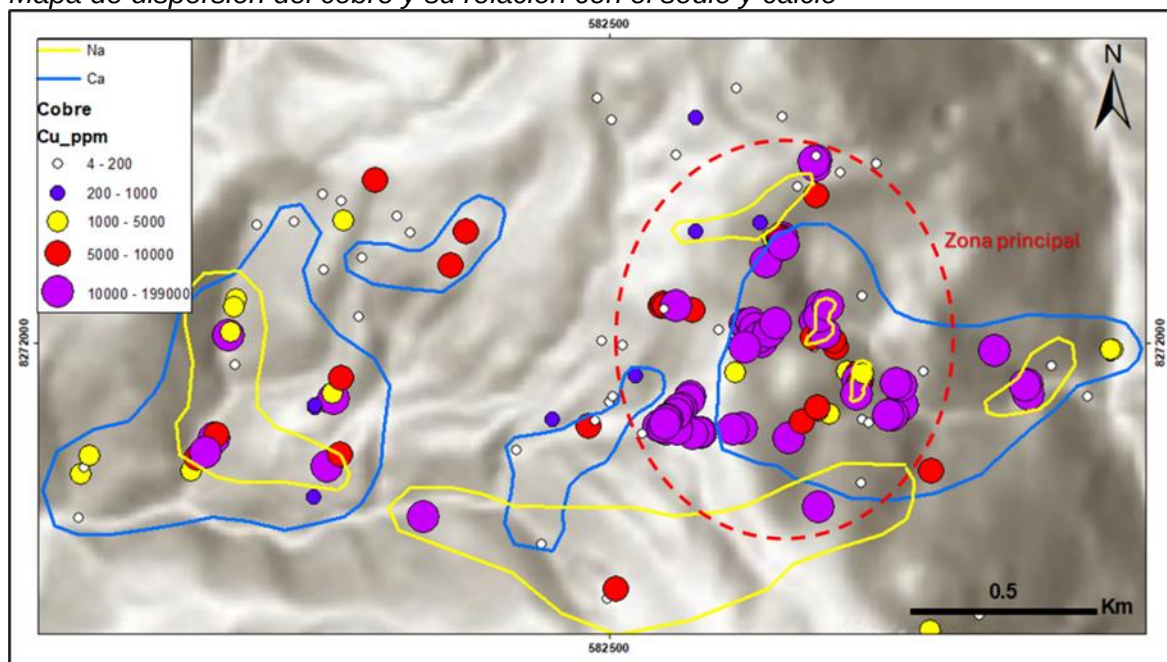
Fuente: Elaboración propia.

4.2.5 Cu vs (Na-Ca)

Se utilizó como base el mapa de dispersión del cobre, sobre el cual se superpusieron líneas coloreadas que representan las zonas donde el sodio y el calcio presentan concentraciones por encima de sus respectivos umbrales geoquímicos determinados (ver Tabla 4). Se observa una relación espacial moderada entre el sodio y el calcio. El calcio muestra una correlación moderada con el cobre y se concentra ampliamente en el centro y el este de la zona principal, así como al oeste de esta. Por su parte, el sodio se encuentra principalmente en la periferia de la zona principal (ver Figura 39).

Figura 39

Mapa de dispersión del cobre y su relación con el sodio y calcio



Fuente: Elaboración propia.

4.3 Geoquímica y geología de la zona principal del proyecto Tosantos

El cartografiado geológico se realizó exclusivamente en la zona principal del proyecto. Por este motivo, para integrar la geología y la geoquímica del área, solo se utilizará la información proveniente de dicha zona, ya que concentra una cantidad significativa de muestras de roca y cuenta con un mapa geológico detallado que integra aspectos estructurales, litológicos, mineralización y alteración hidrotermal. Esto permitirá comprender mejor el comportamiento geoquímico del proyecto.

Se ha superpuesto el contenido de cobre de las muestras de roca sobre la base de la geología detallada de la zona principal. Además, se ha elaborado una tabla resumen con las concentraciones de los elementos asociados al proyecto (ver Figura 40). Se observa que el cobre se concentra principalmente en zonas con alteración hidrotermal del tipo cuarzo-sericita-clorita-epidota-calcita y cuarzo-clorita-hematita, donde los valores de cobre, principalmente en forma de óxidos, superan el 1 % de Cu. El control estructural juega un papel clave en la dispersión del cobre en el área. Asimismo, dado que Cu-Au-Ag

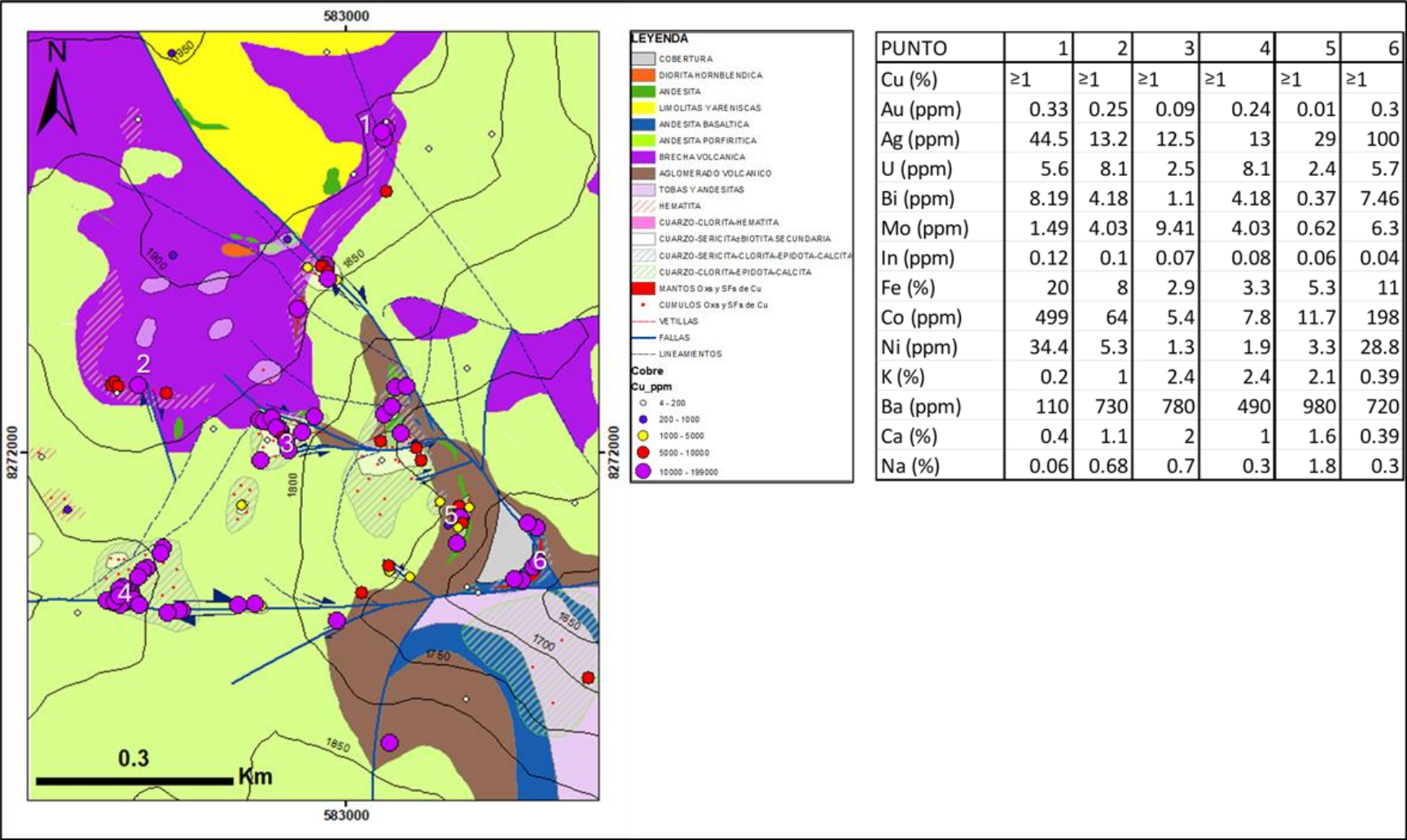
presentan una fuerte asociación y un comportamiento geoquímico similar (ver Anexo 5), se analizará la relación de otros elementos con la mineralización y la alteración.

El contenido de U-Bi-Mo-In es anómalo en toda la zona con mineralización de cobre (ver Anexo 5) y está asociado a la alteración hidrotermal del tipo cuarzo-sericita-clorita-epidota-calcita y cuarzo-clorita-hematita, al igual que Cu-Au-Ag. Por otro lado, en las brechas volcánicas con alteración de cuarzo-clorita-hematita y mineralización de cobre, los valores de Fe-Co-Ni son los más elevados, alcanzando hasta un 20 % de Fe, aproximadamente 500 ppm de Co y 34.4 ppm de Ni. Se interpreta que Fe-Co-Ni están principalmente asociados a la hematita primaria.

El potasio se concentra en zonas con alteración de tipo cuarzo-sericita-clorita-epidota-calcita, probablemente asociado a la sericita, con valores superiores al 2 % de K. El bario, por su parte, podría estar relacionado con trazas de baritina en la zona. El calcio muestra valores moderados en áreas con alteración cuarzo-sericita-clorita-epidota-calcita, probablemente asociado a la calcita y epidota. Finalmente, el sodio presenta concentraciones bajas en la zona mineralizada y valores más altos en la periferia, lo que podría indicar la formación de halita asociada a baritina.

Figura 40

Geología integrada, concentración de cobre y resumen geoquímico del proyecto Tosantos



Fuente: Elaboración propia.

Conclusiones

El proyecto Tosantos se encuentra en un contexto geológico volcanosedimentario perteneciente a la Formación Rio Grande, con una fuerte influencia del sistema de fallas Iquipi, de orientación E-O, el cual controla la formación de depósitos IOCG en el distrito de Chala, Atiquipa y Chaparra.

La mineralización en Tosantos está compuesta principalmente por hematita, crisocola y malaquita, con menor presencia de pirita, calcopirita y calcosina hipógena. Esta mineralización se encuentra asociada a una alteración hidrotermal caracterizada por la presencia de biotita secundaria, cuarzo, sericita, clorita, calcita y epidota.

Las anomalías de cobre, oro y plata presentes en el proyecto se encuentran alojadas principalmente en las andesitas de textura afanítica y porfirítica, aglomerados y brechas volcánicas, pertenecientes al Formación Rio Grande y controladas por las estructuras geológicas.

Tosantos presenta una firma geoquímica tipo IOCG, con una asociación entre los elementos Cu-Au-Ag-Bi-Mo-U-In-Co-Fe-Ni-K-Ba-Ca y Na. La asociación Cu-Au-Ag, que corresponde a los elementos económicos del proyecto, se considera como los “target elements” o elementos indicadores. Por otro lado, la asociación U-Bi-Mo-In representa los “pathfinder elements” o elementos pioneros asociados a la mineralización. Finalmente, los elementos Fe-Co-Ni-K-Ba-Ca y Na están vinculados principalmente a la alteración hidrotermal relacionada con la mineralización.

El proyecto Tosantos se encuentra en un contexto geológico favorable para albergar mineralización tipo IOCG, con evidencia de alteración hidrotermal y una firma geoquímica característica de estos sistemas. Según los modelos genéticos de depósitos IOCG, la alteración hidrotermal observada sugiere que el proyecto se encuentra en la parte distal de la mineralización de magnetita y sulfuros de cobre.

El proyecto Tosantos tiene el potencial geológico para explorar un depósito IOCG de tamaño y ley importante para la empresa Minera Anaconda Perú S.A.C.

Recomendaciones

Se recomienda continuar con el cartografiado geológico a detalle en la zona oeste del proyecto, debido a que presenta considerables valores anómalos de Cu-Au-Ag, y podría representar un nuevo target de exploración.

Evaluar las implicancias del sistema de fallas Iquipi en el distrito de Chala, Atiquipa y Chaparra, como guía en la prospección de depósitos ocultos tipo IOCG.

Realizar un programa geofísico de magnetometría terrestre y polarización inducida (IP) en una extensión de 3 km x 2 km, que cubra la zona principal y oeste, para identificar cuerpos magnéticos y cargables en profundidad asociados a magnetita y mineralización de sulfuros de cobre.

Caracterizar mejor la geología de los alrededores del proyecto con cartografiado geológico a escala 1:10,000, acompañado de estudios petrográficos y mineragráficos.

Tomar muestras de rocas para dataciones radiométricas, para conocer la edad de la mineralización y generar más conocimiento de los depósitos IOCG en el distrito.

Referencias bibliográficas

- Acosta, J., Rivera, R., Valencia, M., Chirif, H., Huanacuni, D., Rodríguez, I., Santisteban, A. (2020). *Mapa metalogenético del Perú 2020*. Lima: Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico.
- Ahrens, L. (1957). *The lognormal distribution of the elements - a fundamental law of geochemistry and its subsidiary*. *Geochimica et cosmochimica acta*, 49-73.
- Barton, M. (2014). *Iron Oxide(-Cu-Au-REE-P-Ag-U-Co) Systems*. Treatise on Geochemistry (Second Edition), 515-541.
- Chen, H., Cooke, D., & Baker, M. (2013). *Mesozoic Iron Oxide Copper-Gold Mineralization in the Central Andes and the Gondwana Supercontinent Breakup*. *Society of Economic Geologists*, 37-44.
- Closas, A., Arriola, E., Kuc, C., Amarilla, M., & Jovanovich, E. (2013). *Análisis multivariante, conceptos y aplicaciones en Psicología Educativa y Psicometría*. *Enfoques*, 65-92.
- Del Real, I., Reich, M., C. Simon, A., Deditius, A., Barra, F., Rodríguez Mustafa, M., P. Roberts, M. (2023). *Formation of giant iron oxide copper gold deposits by superimposed episodic hydrothermal pulses*. *Scientific reports*, 1-14.
- Del Real, I., W. Allmendinger, R., F.H Thompson, J., & Creizell, C. (2023). *Evidence for tanspression during formation on the Candelaria Punta del Cobre IOCG - district and regional implications*. *Journal of South American Earth Sciences*, 1-13.
- Del Real, I., Thompson, J., Simon, A., & Reich, M. (2020). *Geochemical and Isotopic Signature of Pyrite as a Proxy for Fluid Source and Evolution in the Candelaria-Punta del Cobre Iron Oxide Copper-Gold District, Chile*. *Society of Economic Geologists*, 1493–1518.
- Evans, J. D. (1996). *Straightforward Statistics for the Behavioral Sciences*. Pacific Grove. California: Brooks/Cole.

- Groves, D., Bierlein, F., Meinert, L., & Hitzman, M. (2010). *Iron Oxide Copper-Gold (IOCG) Deposits through Earth History: Implications for Origin, Lithospheric Setting, and Distinction from*. Society of Economic Geologists, 641-654.
- Haldar, S. (2018). *Mineral exploration principles and applications*. Perth: El Sevier, second edition.
- Hamisi, J., Pitcairn, I., Tomkins, A., Brugger, J., & Micklethwaite, S. (2020). *Element mobility and alteration types in Iron Oxide Copper and Gold (IOCG) systems*. EGU General Assembly.
- Hirtzman, M., Oreskes, N., & Einaudi, T. (1992). *Geological characteristics and tectonic setting of Proterozoic iron oxide (Cu-U-Au-REE) deposits*. Precambrian Research, 241-287.
- Iberoamericanos, A. d. (2022). *Manual de metodologías geoquímicas de países Iberoamericanos*. Madrid: ASGMI.
- Mamani, M., & Rivera, F. (2011). *Sistema de fallas Iquipi-Clavelinas: zona de transición cortical e implicancias para el emplazamiento de depósitos minerales*. Sociedad Geológica del Perú, 37-50.
- McQueen, K. (2005). *Ore Deposit Types and their primary expressions*. CRC LEME, Australian National University, Canberra, ACT 0200 and School of REHS, University of Canberra, ACT 2601, 1-14.
- Olchauski, E. (1980). *Geología de los cuadrángulos de Jaqui, Coracora, Atiquipa y Chaparra*. Lima-Perú: Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico.
- Reimann, C., Filzmoser, P., Garrett, R. G., & Dutter, R. (2008). *Statistical Data Analysis Explained: Applied Environmental Statistics with R*. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd.
- Richards, J., & Mumin, A. (2013). *Magmatic-hydrothermal processes within an evolving Earth: Iron oxide-copper-gold and porphyry Cu $\pm$ Mo $\pm$ Au deposits*. Geology, 767–770.
- Rudnick, R. L. (2003). *Composition on the Continental Crust*. ResearchGate, 1-64.

- Santos, A., Aguilar, R., Ccayo, W., & Ortiz, D. (2014). *Mapa geológico del cuadrángulo de Atiquipa - hoja 32Ñ4, carta geológica nacional digital 1:50,000*. Lima-Perú: Instituto Geológico Minero y Metalúrgico.
- Santos, A., Weimin, G., Tassinari, C., Soberon, D., & Ccallo, W. (2016). *Geocronología U-Pb sobre zircones en la contrastación de la evolución Geocronología U-Pb sobre zircones en la contrastación de la evolución espacial-temporal del magmatismo y la metalogenia del batolito de la costa "segmento Arequipa"*. Sociedad Geológica del Perú, 1-4.
- Sillitoe, R. H. (2003). *Iron oxide-copper-gold deposits: an Andean view*. Mineralium Deposita, 787–812.
- Skirrow, R. (2022). *Iron oxide copper-gold (IOCG) deposits – A review (part 1): Settings, mineralogy, ore geochemistry and classification*. Ore Geology Reviews.
- Tabachnick, B. G., & Fidell, L. S. (2019). *Using Multivariate Statistics*. Nueva York: Pearson.
- Tornos, F., Carriedo, J., Velasco, F., & Tomé, C. (2008). *La génesis de los depósitos de tipo IOCG: Geología y geoquímica de mineralizaciones en los Andes e Iberia*. Instituto Geológico y Minero de España, 1-5.
- Tukey, J. (1977). *Exploratory data analysis*. Massachusetts: Addison-wesley.
- Williams, P. J., Barton, M., Johnson, D., Fontboté, L., de Haller, A., Mark, G., Marschik, R. (2005). *Iron Oxide Copper-Gold Deposits: Geology, Space-Time Distribution, and Possible Modes of Origin*. Society of Economic Geologists, 371-405.

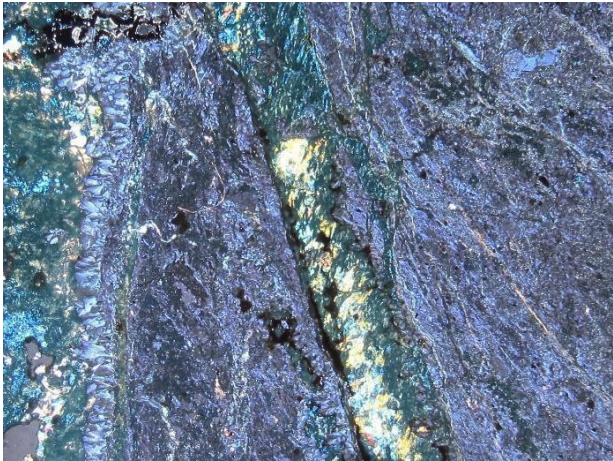
Anexos

	Pág.
Anexo 1: Estudios petrográficos y petrominerográficos del proyecto Tosantos	1
Anexo 2: Base de datos para el análisis multivariable.....	32
Anexo 3: Matriz de Pearson del proyecto Tosantos	34
Anexo 4: Boxplot de los elementos asociados al proyecto Tosantos	36
Anexo 5: Mapas de dispersión de los elementos asociados al proyecto Tosantos.....	43

Anexo 1: Estudios petrográficos y petrominerográficos del proyecto Tosantos

Muestra TOS-952

ESTUDIO PETROMINERAGRÁFICO	
CODIGO MUESTRA	TOS-952
CLASIFICACIÓN DE LA ROCA	ANDESITA PORFIRÍTICA
DESCRIPCIÓN MACROSCÓPICA	
Andesita, de textura porfirítica, alterado intensamente por sericita y clorita, mineralizado en fracturas y en venillas por malaquita y crisocola, con trazas de calcopirita y pirita.	

DESCRIPCIÓN MICROSCÓPICA	
	La muestra es una roca con textura porfirítica. Se aprecian moldes de fenocristales tabulares que han sido completamente alterados por agregados de cloritas I con escaso leucoxeno, y pequeños moldes de posibles ferromagnesianos alterados totalmente por agregados de leucoxeno con óxidos de hierro. La matriz ha sido alterada totalmente por agregados de sericita y arcillas, por zonas ha sido intensamente invadida por agregados de cloritas I. Diminutos cristales de piritita y calcopiritita han ingresado por los intersticios de las cloritas I. Con finas venillas rellenas por agregados de cloritas II, malaquita y crisocola, con impregnaciones de óxidos de hierro. Además, finas venillas rellenas por goethita.

MINERALES PRIMARIOS			
MINERAL	DESCRIPCIÓN	%	μm
Moldes	De fenocristales tabulares que han sido alterados completamente por agregados escamosos de cloritas I, en ocasiones, junto con escaso leucoxeno. Algunos han sido cortados por venillas rellenas de agregados de cloritas II, malaquita y crisocola. Escasamente, presentan ligeras impregnaciones de óxidos de hierro.	-	≤ 1000
Moldes	De pequeños cristales anhedral, de posibles ferromagnesianos, que han sido completamente alterados por agregados de leucoxeno y escasamente por óxidos de hierro.	-	≤ 400

MATRIZ
Ha sido completamente alterada por agregados microescamosos de sericita junto con arcillas terrosas. Además, presenta finas diseminaciones de agregados de leucoxeno. Por sectores, ha sido intensamente invadida por agregados microescamosos de cloritas I. Así mismo, ha sido cortada por venillas rellenas por cloritas II, malaquita y crisocola. Presenta ligeras impregnaciones de óxidos de hierro y venillas de goethita.

MINERALES SECUNDARIOS			
MINERAL	DESCRIPCIÓN	%	μm
Sericita	Agregados microescamosos que, junto con arcillas terrosas, han alterado totalmente a la matriz de la roca. Por sectores, han sido invadidos intensamente por agregados microescamosos de cloritas I. En ocasiones, se hallan rellenando finas venillas. Así mismo, han sido cortados por venillas rellenas por cloritas II, malaquita y crisocola. Con ligeras impregnaciones de óxidos de hierro y cortadas por venillas de goethita.	23	≤ 20
Arcillas	Agregados terrosos que, junto con sericita microescamosa, han alterado a la matriz de la roca. Posteriormente, han sido intensamente invadidos por agregados microescamosos de cloritas I. Presentan, ligeras impregnaciones de óxidos de hierro.	4	≤ 5
Leucoxeno	Agregados irregulares a terrosos que, junto con óxidos de hierro, han alterado completamente a los moldes de pequeños cristales de posibles ferromagnesianos. Escasamente, se aprecian junto con cloritas I, como alteración de los moldes de fenocristales tabulares. También, se hallan diseminados entre los intersticios de los agregados de sericita, arcillas y cloritas I que han alterado totalmente a la matriz.	1	≤ 200
Cloritas I	Agregados microescamosos que han alterado completamente a los moldes de fenocristales tabulares, en ocasiones, junto con escaso leucoxeno. Así mismo, han invadido fuertemente a la matriz alterada por agregados de sericita y arcillas. Por sus intersticios han ingresado diminutos cristales de piritita y calcopiritita. Posteriormente, han sido cortados por venillas rellenas por cloritas II, malaquita y crisocola. Con ligeras impregnaciones de óxidos de hierro y cortados por venillas de goethita.	55	≤ 100
Piritita	Diminutos cristales anhedral, irregulares, que han ingresado por los intersticios de los agregados microescamosos de cloritas I. Así mismo, se observan como relictos entre los agregados de malaquita que rellenan venillas.	Traza	≤ 5
Calcopiritita	Diminutos cristales anhedral, irregulares, que han ingresado por los intersticios de los agregados microescamosos de cloritas I. Además, se aprecian como relictos entre los intersticios de los agregados de malaquita que rellenan venillas y, en ocasiones, entre los agregados de goethita.	Traza	≤ 8

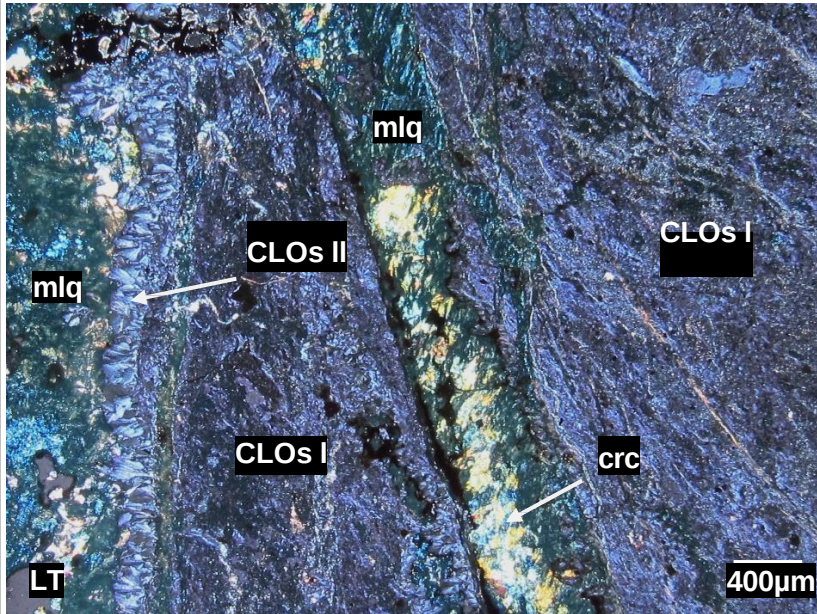
MINERALES SECUNDARIOS			
MINERAL	DESCRIPCIÓN	%	μm
Cloritas II	Agregados escamosos y radiales que han rellenado venillas (apreciándose en los bordes) junto con agregados de malaquita y escasa crisocola. Así mismo, han cortado a los moldes de fenocristales (alterados por cloritas I) y a la matriz alterada por agregados de sericita, arcillas e invadida por cloritas I. Presentan escasas impregnaciones de óxidos de hierro y han sido bordeadas por agregados de goethita.	5	≤ 200
Malaquita	Agregados irregulares y escasamente radiales que, junto con cloritas II y crisocola, han rellenado venillas. Además, han cortado a los moldes de fenocristales (alterados por cloritas I) y a la matriz alterada por agregados de sericita, arcillas e invadida por cloritas I. Escasamente, con relictos de diminutos cristales de pirita y calcopirita entre sus intersticios. Con ligeras impregnaciones de óxidos de hierro.	9	≤ 50
Crisocola	Agregados de cristales anhedrales, irregulares que, junto con cloritas II y malaquita, han rellenado venillas. También, han cortado a los moldes de fenocristales (alterados por cloritas I) y a la matriz alterada por agregados de sericita, arcillas e invadida por cloritas I. Con ligeras impregnaciones de óxidos de hierro.	1	≤ 400
Goethita	Agregados irregulares que se aprecian rellenando finas venillas que han cortado a la matriz alterada por agregados de sericita, arcillas e invadida por cloritas I. Escasamente, se aprecian en bordes de los agregados de cloritas II que rellenan venillas. En ocasiones presentan relictos de diminutos cristales de calcopirita.	Traza	≤ 300
Óxidos de hierro	Agregados terrosos que han impregnado débilmente a los agregados de sericita, arcillas y cloritas I que han alterado a la matriz. Así mismo, han impregnado a los agregados de cloritas I en los moldes de fenocristales tabulares. Además, junto con agregados de leucoxeno, han alterado a los pequeños moldes de posibles ferromagnesianos. También, han impregnado ligeramente a los agregados de cloritas II, malaquita y crisocola que rellenan venillas.	2	≤ 10

TEXTURAS	Porfirítica
----------	-------------

ALTERACIONES		
Tipo	Intensidad	Ensamble de minerales
Cloritización	Intensa	Cloritas I y cloritas II.
Sericitización	Moderada	Sericita.
Argilización	Débil	Arcillas.
Oxidación	Débil	Óxidos de hierro y goethita.

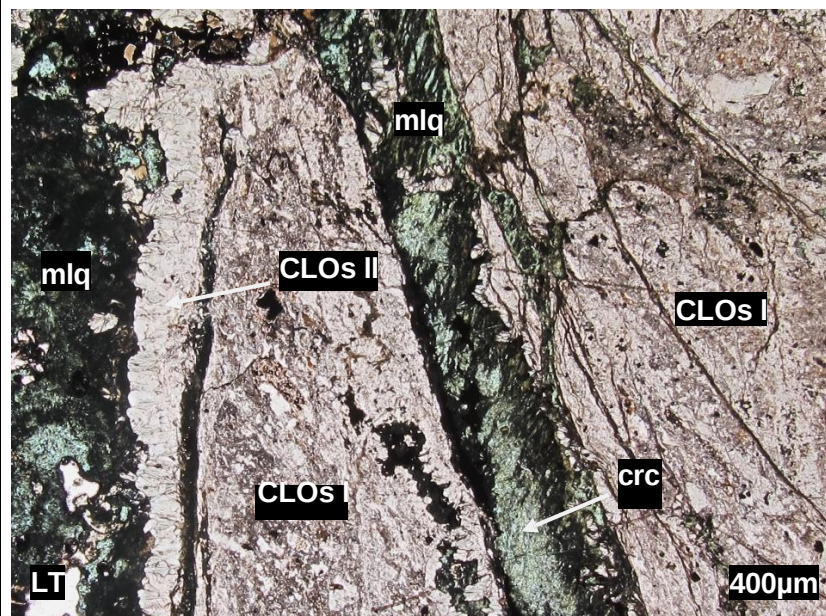
PROBABLE SECUENCIA PARAGENÉTICA
Pirita
Calcopirita
Goethita

FOTOMICROGRAFÍAS

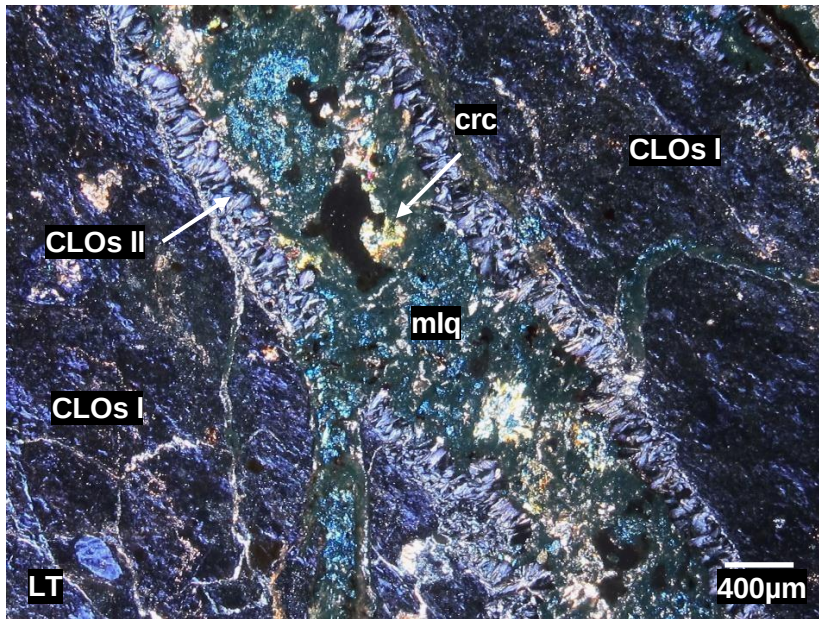


Agregados microescamosos de cloritas I (CLOs I), que han invadido fuertemente a la matriz. Posteriormente, han sido cortados por venillas rellenas por agregados de cloritas II (CLOs II), malaquita (mlq) y crisocola (crc).

Agregados microescamosos de cloritas I (CLOs I), que han invadido fuertemente a la matriz. Posteriormente, han sido cortados por venillas rellenas por agregados de cloritas II (CLOs II), malaquita (mlq) y crisocola (crc).

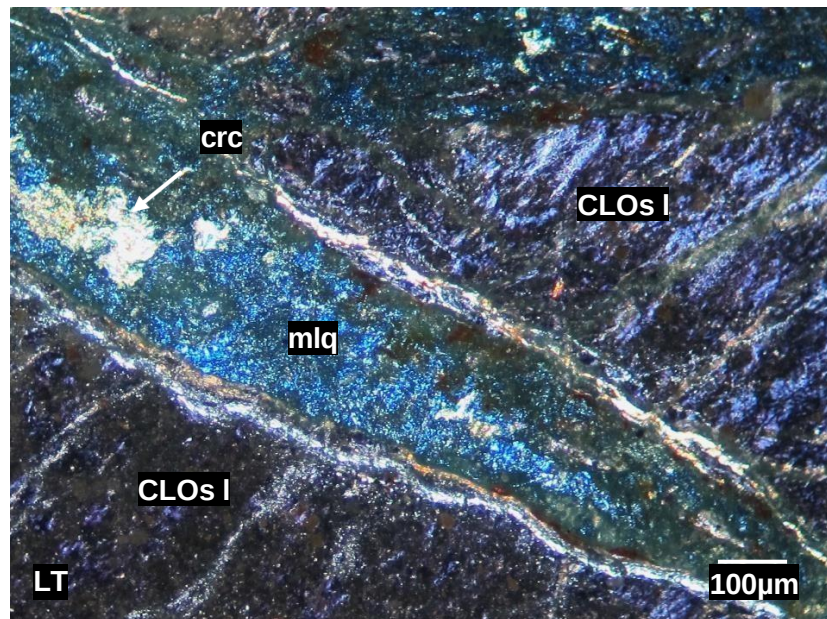


FOTOMICROGRAFÍAS

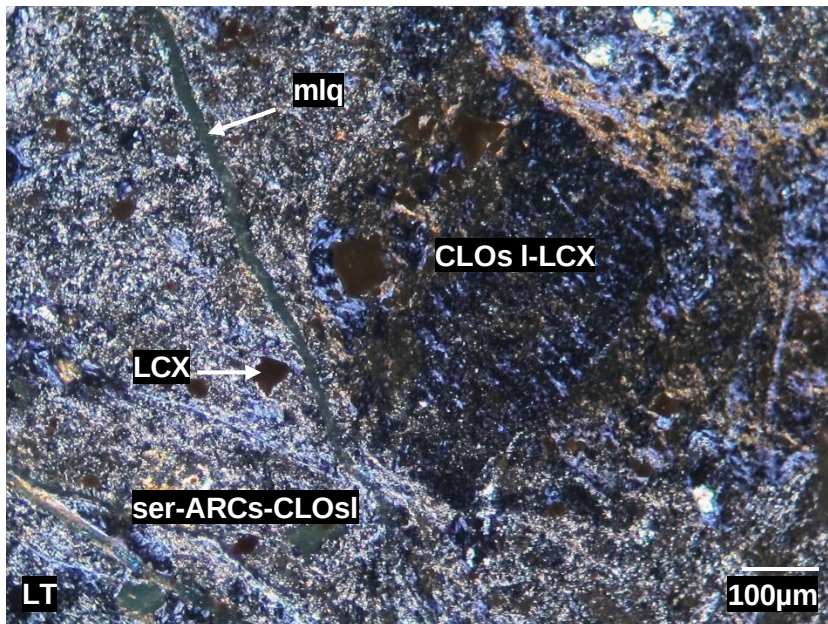


Agregados microescamosos de cloritas I (CLOs I) que han invadido fuertemente a la matriz. Posteriormente, han sido cortados por venillas rellenas por agregados de cloritas II (CLOs II), malaquita (mlq) y crisocola (crc).

Agregados microescamosos de cloritas I (CLOs I) que han invadido fuertemente a la matriz. Posteriormente, han sido cortados por venillas rellenas por agregados de malaquita (mlq) y crisocola (crc).

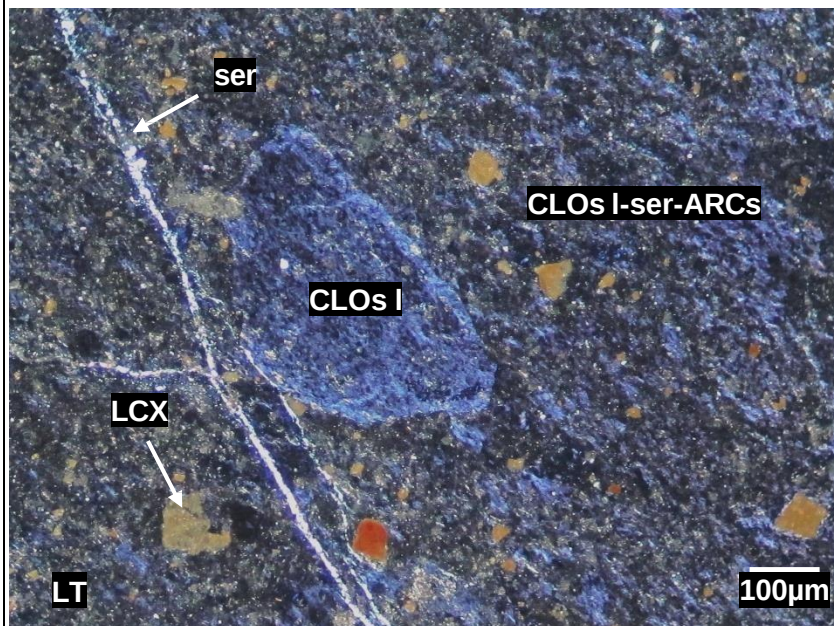


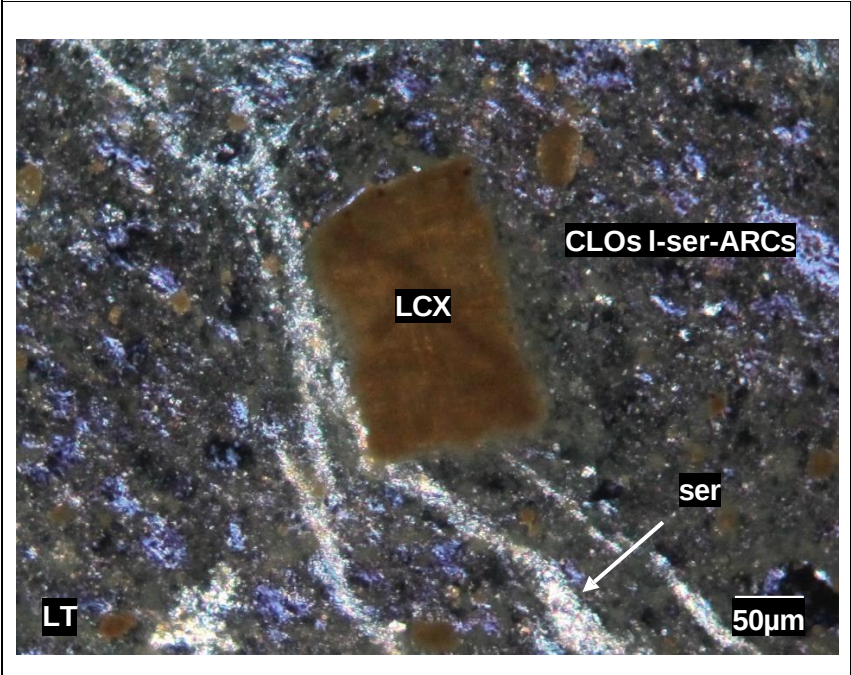
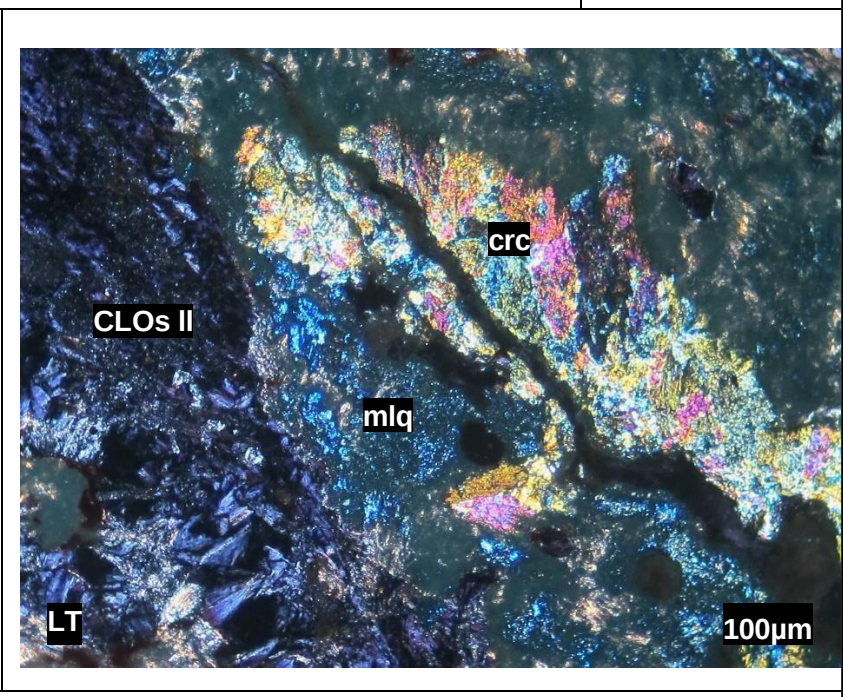
FOTOMICROGRAFIAS



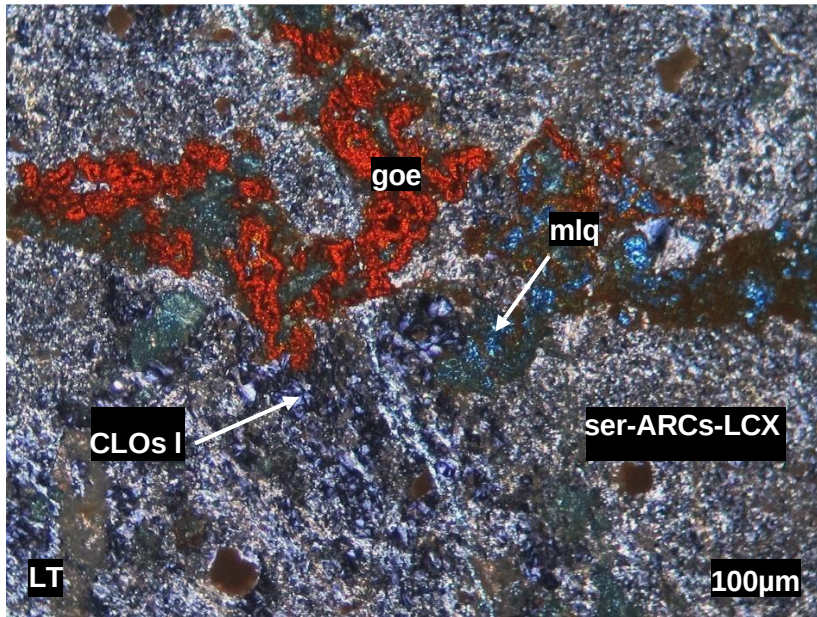
Moldes de fenocristales tabulares que han sido totalmente alterados por agregados de cloritas I con escasos leucoxenos (CLOs I-LCX). En una matriz alterada totalmente por agregados de sericita y arcillas (ser-ARCs), e invadida por agregados de cloritas I, con leucoxeno disperso. Con finas venillas rellenas por agregados de malaquita (mlq).

Moldes de fenocristales tabulares que han sido totalmente alterados por agregados de cloritas I (CLOs I). En una matriz fuertemente invadida por agregados de cloritas I, con relictos de sericita y arcillas (CLOs I-ser-ARCs), y con leucoxeno (LCX) disperso. Con finas venillas rellenas por agregados de sericita (ser).



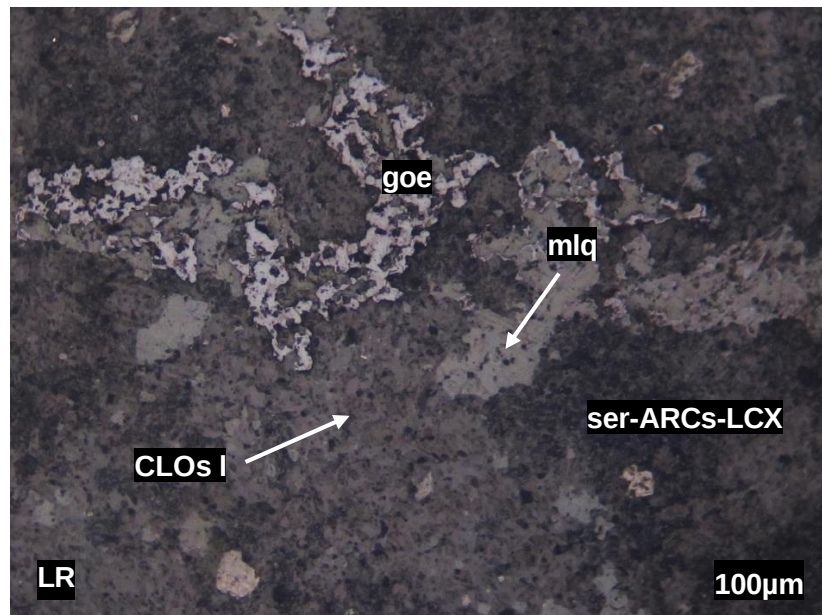
FOTOMICROGRAFÍAS	
	Moldes de posibles ferromagnesianos que han sido totalmente alterados por agregados de leucoxeno (LCX). En una matriz fuertemente invadida por agregados de cloritas I con relictos de sericita y arcillas (CLOs I-ser-ARCs). Con finas venillas rellenas por agregados de sericita (ser).
Venillas rellenas por agregados de cloritas II (CLOs II), con malaquita (mlq) y crisocola (crc).	

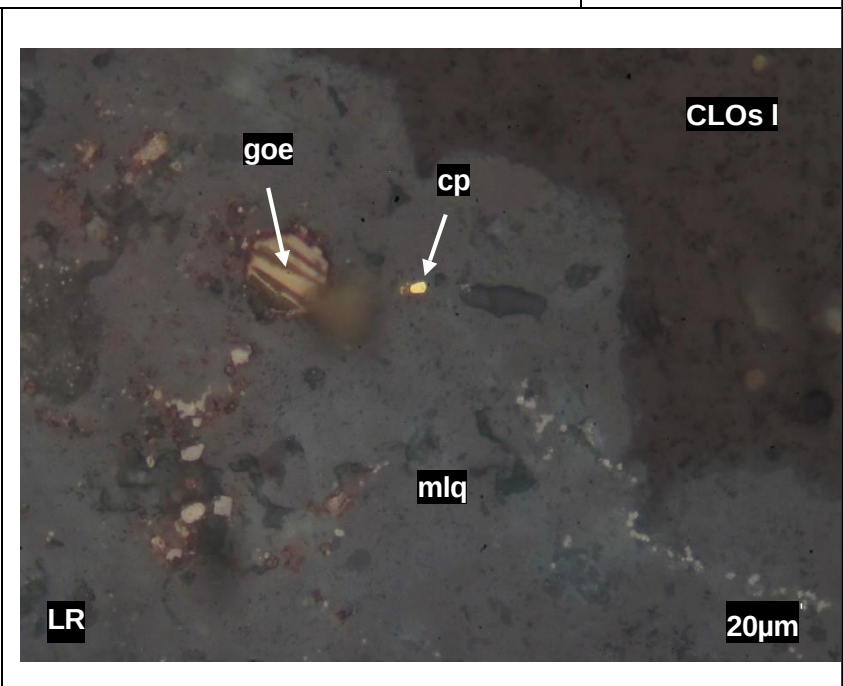
FOTOMICROGRAFIAS



Matriz totalmente alterada por agregados de sericita y arcillas (ser-ARCs), con diseminaciones de leucoxeno (LCX) e invadida por agregados de cloritas I (CLOs I). Con finas venillas rellenas por agregados de malaquita (mlq) y posteriormente por goethita (goe).

Matriz totalmente alterada por agregados de sericita y arcillas (ser-ARCs), con diseminaciones de leucoxeno (LCX) e invadida por agregados de cloritas I (CLOs I). Con finas venillas rellenas por agregados de malaquita (mlq) y posteriormente por goethita (goe).



FOTOMICROGRAFIAS	
	Agregados de cloritas I que han invadido a los agregados de sericita y arcillas (CLOs I-ser-ARCs). Por sus intersticios han ingresado diminutos cristales de pirita (py)
Agregados microescamosos de cloritas I (CLOs I) que han sido cortados por venillas rellenas por agregados de malaquita (mlq), en sus intersticios se aprecian diminutos cristales de calcopirita (cp) y agregados de goethita (goe).	

Muestra TOS-176

ESTUDIO PETROMINERAGRÁFICO	
CODIGO MUESTRA	TOS-176
CLASIFICACIÓN DE LA ROCA	BRECHA VOLCÁNICA
DESCRIPCIÓN MACROSCÓPICA	
Brecha volcánica de posible composición andesítica, de textura fragmental, moderadamente silicificado, débilmente alterado por cloritas y fuertemente oxidado con contenido de goethita y hematita.	

DESCRIPCIÓN MICROSCÓPICA



La muestra corresponde a una roca volcánica con textura fragmental. Se aprecian fragmentos de roca volcánica y cristales de cuarzo I. La matriz de posible material vítreo ha sido totalmente alterada por agregados de sílice y arcillas. Por sectores ha sido invadida por agregados escamosos de cloritas I. Así mismo, se aprecian cavidades y fracturas rellenas por agregados de pequeños cristales de cuarzo II junto a agregados microescamosos de cloritas II. Por zonas, ha sido cortada y ligeramente invadida por agregados de malaquita y crisocola. Finalmente, ha sido intensamente invadida por agregados irregulares de goethita, terrosos de óxidos de hierro y escasa hematita.

FRAGMENTOS DE ROCAS

DESCRIPCIÓN	%	μm
De roca volcánica con textura fragmental. Presenta moldes de fragmentos de cristales de posibles feldespatos que han sido totalmente alterados por cloritas y arcillas, con disseminaciones de hematita y goethita. En una matriz de posible vidrio parcialmente desvitrificado a microlitos de plagioclasas y alterado por agregados de óxidos de hierro, sílice y arcillas. Los moldes de fragmentos de cristales se aprecian ligeramente deformados y mostrando una orientación preferente. Por sectores han sido invadidos por agregados escamosos de cloritas I.	12	≥ 10000

MINERALES PRIMARIOS

MINERAL	DESCRIPCIÓN	%	μm
Cuarzo I	Cristales anhedrales, irregulares, de bordes corroídos, que se encuentran dispersos en la matriz de la toba (de posible vidrio alterado por sílice y arcillas). Además, se encuentran como relictos englobados por los agregados de goethita y óxidos de hierro terrosos que han invadido fuertemente a la matriz.	Traza	≤ 230

MATRIZ			
De posible material vítreo que ha sido completamente alterado por agregados criptocristalinos de sílice y terrosos de arcillas. Por sectores ha sido invadida por agregados escamosos de cloritas I. Así mismo, entre sus intersticios se aprecian cavidades que han sido rellenadas por agregados de cuarzo II y cloritas II. Escasamente, con malaquita y crisocola que han ingresado como relleno de fracturas, cavidades, y por zonas invadiéndola ligeramente. Posteriormente, ha sido intensamente invadida por agregados irregulares de goethita y agregados terrosos de óxidos de hierro.			

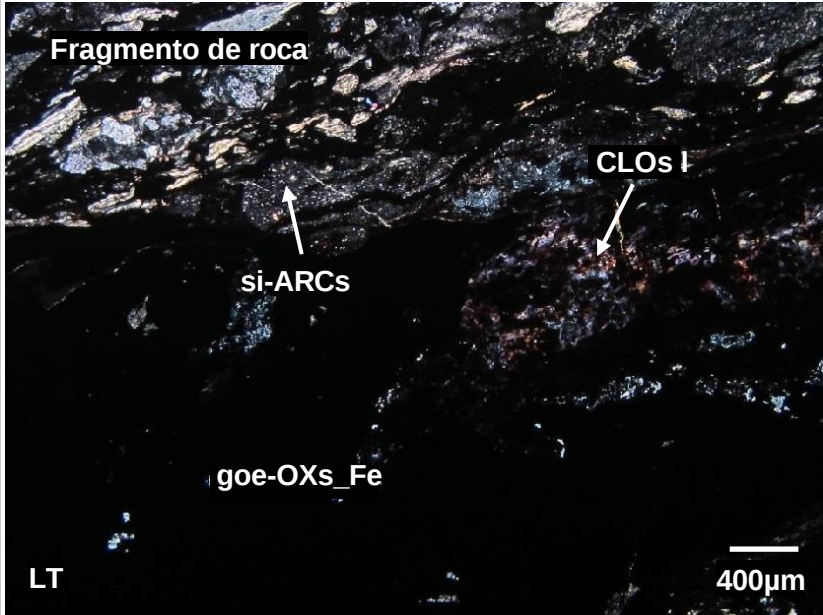
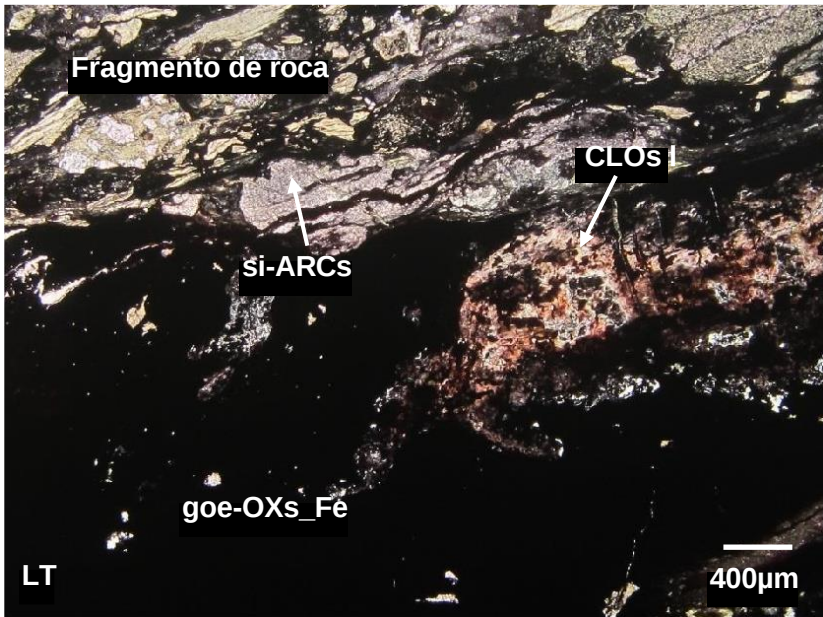
MINERALES SECUNDARIOS			
MINERAL	DESCRIPCIÓN	%	µm
Sílice	Agregados criptocristalinos, que, junto con arcillas terrosas, han alterado completamente al posible material vítreo de la matriz de la toba. Por zonas, ha sido invadida por agregados escamosos de cloritas I. Escasamente, ha sido cortada por agregados de malaquita y crisocola. Posteriormente, ha sido fuertemente invadida por agregados irregulares de goethita y terrosos de óxidos de hierro.	23	≤ 5
Arcillas	Agregados terrosos, que, junto con la sílice, han alterado totalmente al posible material vítreo de la matriz de la toba. Por sectores, han sido invadidas por agregados escamosos de cloritas I. Luego, ha sido invadida por agregados irregulares de goethita y óxidos de hierro terrosos.	5	≤ 5
Cloritas I	Agregados escamosos que han invadido algunos sectores de la matriz de la toba (alterada por sílice y arcillas). Así mismo, han invadido ligeramente a los fragmentos de roca. Por zonas, han sido cortadas por agregados de cuarzo II, malaquita y crisocola. Finalmente, han sido invadidas e impregnadas por agregados irregulares de goethita y terrosos de óxidos de hierro.	5	≤ 120
Cuarzo II	Agregados de pequeños cristales anhedrales, irregulares, que se encuentran junto con cloritas II, como relleno de cavidades y fracturas que han cortado a la matriz de la roca (alterada por sílice y arcillas). Por zonas han cortado a los agregados de cloritas I. Finalmente, se aprecian como relictos invadidos y englobados por los agregados de goethita y óxidos de hierro terrosos.	1.5	≤ 40
Cloritas II	Agregados microescamosos que, junto con cuarzo II, han rellenado cavidades y fracturas que han cortado a la matriz de la roca (alterada por sílice y arcillas). Luego, han sido invadidas por agregados de goethita y óxidos de hierro.	0.5	≤ 30

MINERALES SECUNDARIOS			
MINERAL	DESCRIPCIÓN	%	μm
Malaquita	Agregados de cristales anhedrales, irregulares, que, junto con crisocola, han rellenado fracturas y cavidades que han cortado a la matriz de la toba y a los agregados de cloritas I, por zonas invadiéndolas ligeramente. Además, han sido invadidas por los agregados de goethita y óxidos de hierro terrosos.	2	≤ 110
Crisocola	Agregados microfibrosos que, junto con malaquita, han rellenado fracturas y cavidades que han cortado a la matriz de la toba y a los agregados de cloritas I, por zonas invadiéndolas ligeramente. También, han sido invadidas por los agregados de goethita y óxidos de hierro terrosos.	1	≤ 200
Hematita	Pequeños cristales anhedrales, irregulares, que han impregnado a los fragmentos de roca e ingresado por los intersticios de la matriz de la toba (alterada por sílice y arcillas).	Traza	≤ 40
Goethita	Agregados irregulares que han invadido fuertemente a la matriz de la toba (alterada por sílice y arcillas) y a los fragmentos de roca. Así mismo, han invadido a los agregados de cloritas II. Por zonas, presentan relictos de cuarzo I intersticiales. Además, han invadido a los agregados de cuarzo II, cloritas II, malaquita y crisocola.	20	≤ 60
Óxidos de hierro	Agregados terrosos que han invadido fuertemente a la matriz de la toba (alterada por sílice y arcillas) y a los fragmentos de roca. Además, han invadido a los agregados de cloritas II. Por sectores, han englobado a relictos de cuarzo I. Así mismo, han invadido a los agregados de cuarzo II, cloritas II, malaquita y crisocola.	30	≤ 5

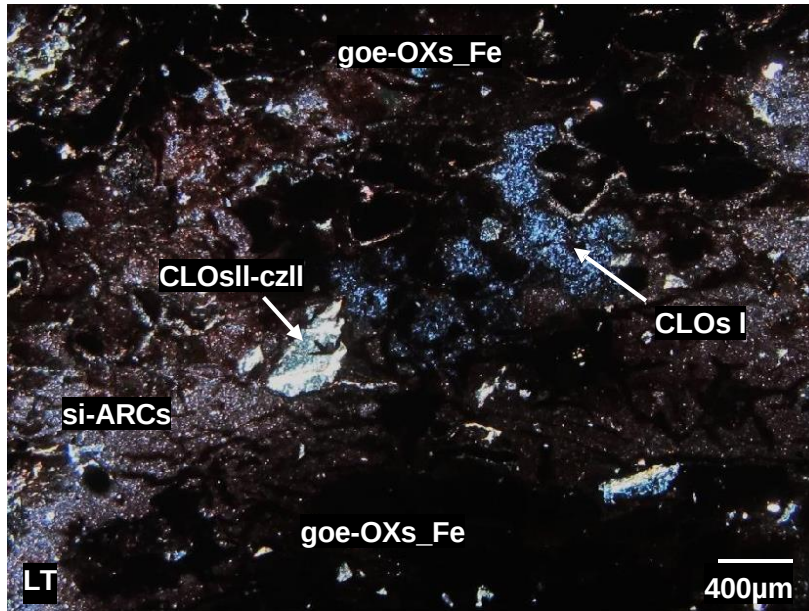
TEXTURAS	Fragmental.
-----------------	-------------

ALTERACIONES		
Tipo	Intensidad	Ensamble de minerales
Oxidación	Intensa	Goethita, óxidos de hierro y hematita.
Silicificación	Moderada	Sílice y cuarzo II.
Cloritización	Débil	Cloritas I y cloritas II.
Argilización	Débil	Arcillas.

POSIBLE SECUENCIA PARAGENETICA
Hematita

FOTOMICROGRAFIAS	
	Fragmento de roca volcánica, en una matriz de posible material vítreo alterado totalmente por agregados de sílice y arcillas (si-ARCs). Por sectores, invadida por agregados escamosos de cloritas I (CLOs I). Posteriormente, ha sido intensamente invadida por agregados irregulares de goethita y terrosos de óxidos de hierro (goe-OXs_Fe). Nicoles cruzados.
Fragmento de roca volcánica, en una matriz de posible material vítreo alterado totalmente por agregados de sílice y arcillas (si-ARCs). Por sectores, invadida por agregados escamosos de cloritas I (CLOs I). Posteriormente, ha sido intensamente invadida por agregados irregulares de goethita y terrosos de óxidos de hierro (goe-OXs_Fe). Nicoles paralelos.	

FOTOMICROGRAFIAS

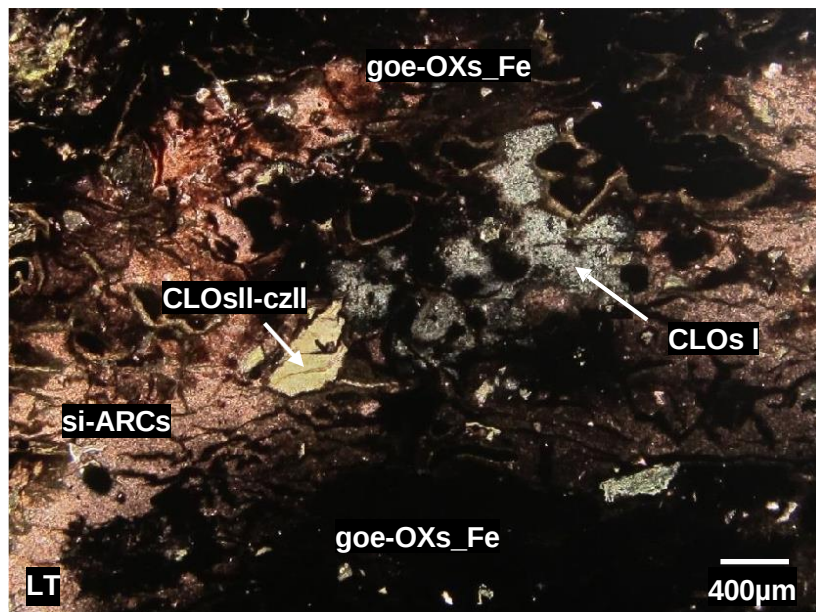


Matriz de la toba de posible material vítreo que ha sido alterada totalmente por agregados de sílice y arcillas (si-ARCs). Por sectores ha sido invadida por agregados escamosos de cloritas I (CLOs I). Con cavidades rellenas por agregados de cloritas II y cuarzo II (CLOsII-czII). Posteriormente, ha sido intensamente invadida por agregados irregulares de goethita y terrosos de óxidos de hierro (goe-OXs_Fe).

Nicoles cruzados.

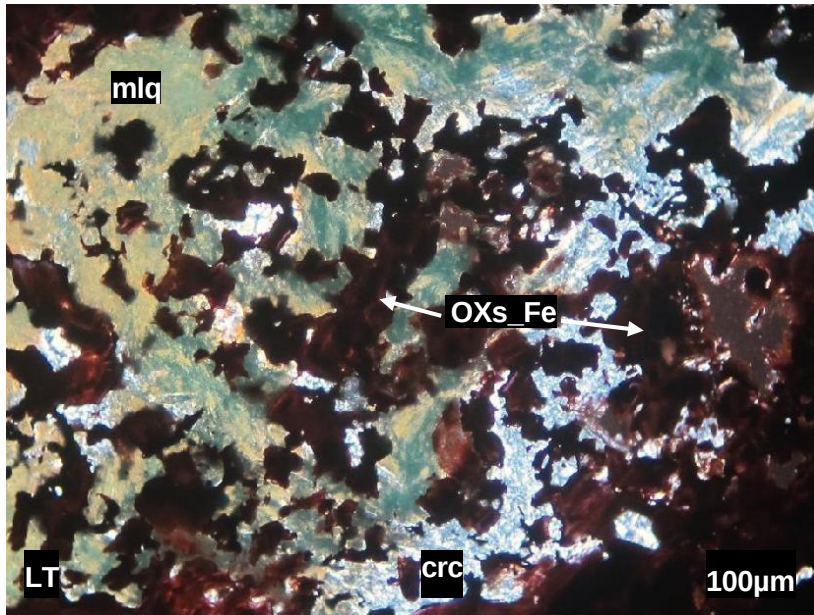
Matriz de la toba de posible material vítreo que ha sido alterada totalmente por agregados de sílice y arcillas (si-ARCs). Por sectores ha sido invadida por agregados escamosos de cloritas I (CLOs I). Con cavidades rellenas por agregados de cloritas II y cuarzo II (CLOsII-czII). Posteriormente, ha sido intensamente invadida por agregados irregulares de goethita y terrosos de óxidos de hierro (goe-OXs_Fe).

Nicoles paralelos.



FOTOMICROGRAFIAS	
	Matriz de posible material vítreo que ha sido totalmente alterado por agregados de sílice y arcillas (si-ARCs). Posteriormente, ha sido invadida intensamente por agregados irregulares de goethita y terrosos de óxidos de hierro (goe-OXs_Fe) con escasos y pequeños cristales de hematita (hm).
Matriz de posible material vítreo que ha sido totalmente alterado por agregados de sílice y arcillas (si-ARCs). Posteriormente, ha sido invadida intensamente por agregados irregulares de goethita y terrosos de óxidos de hierro (goe-OXs_Fe) con escasos y pequeños cristales de hematita (hm).	

FOTOMICROGRAFÍAS

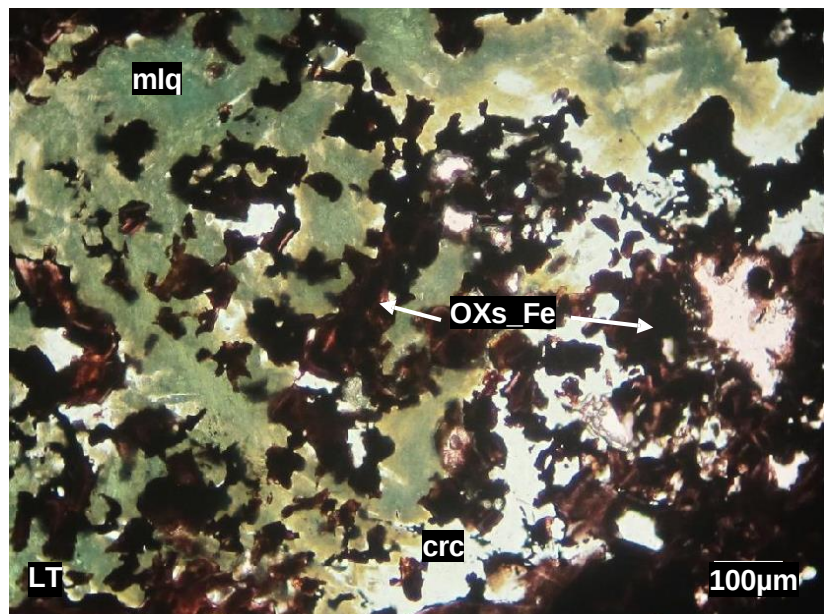


Sector de la roca invadido por agregados de malaquita (mlq) y crisocola (crc). Posteriormente, ha sido invadido por agregados terrosos de óxidos de hierro.

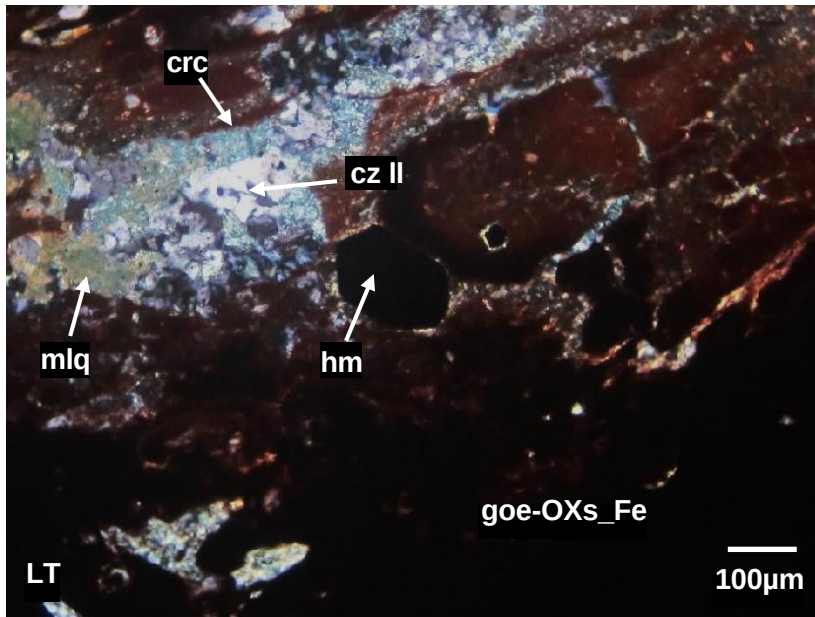
Nicoles cruzados.

Sector de la roca invadido por agregados de malaquita (mlq) y crisocola (crc). Posteriormente, ha sido invadido por agregados terrosos de óxidos de hierro.

Nicoles paralelos.

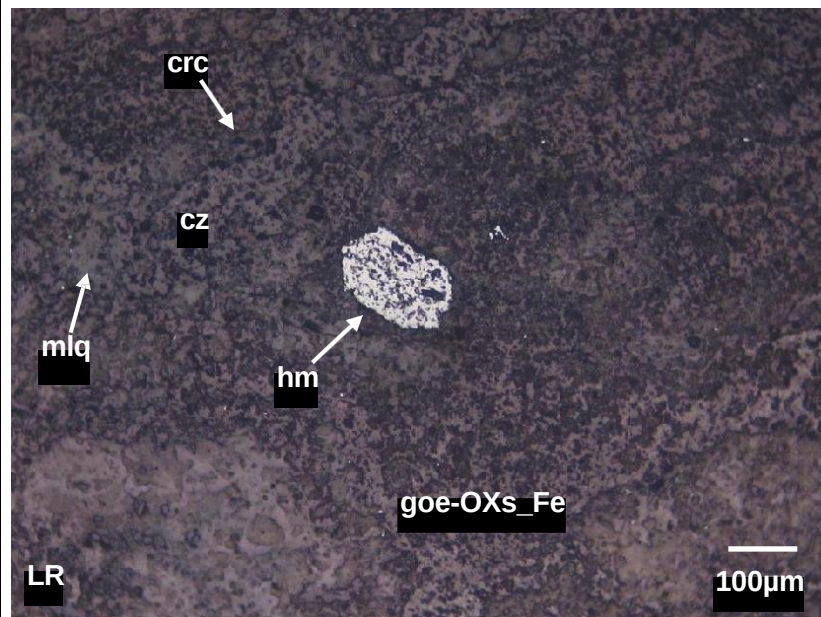


FOTOMICROGRAFIAS

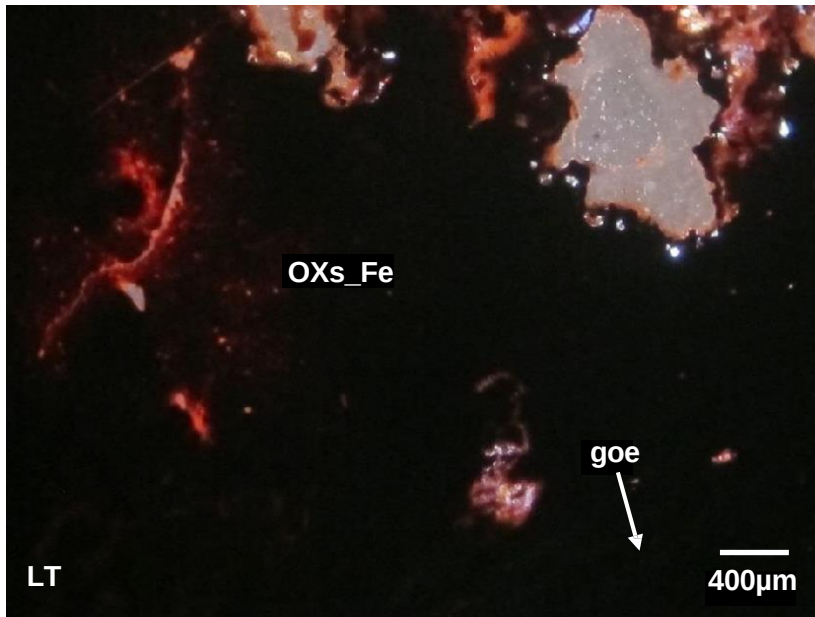


Agregados irregulares de goethita y terrosos de óxidos de hierro (goe-OXs_Fe) que han invadido a los agregados de cuarzo I (cz II), malaquita (mlq) y crisocola (crc). Así mismo, se aprecian pequeños cristales de hematita (hm).

Agregados irregulares de goethita y terrosos de óxidos de hierro (goe-OXs_Fe) que han invadido a los agregados de cuarzo II (cz II), malaquita (mlq) y crisocola (crc). Así mismo, se aprecian pequeños cristales de hematita (hm).

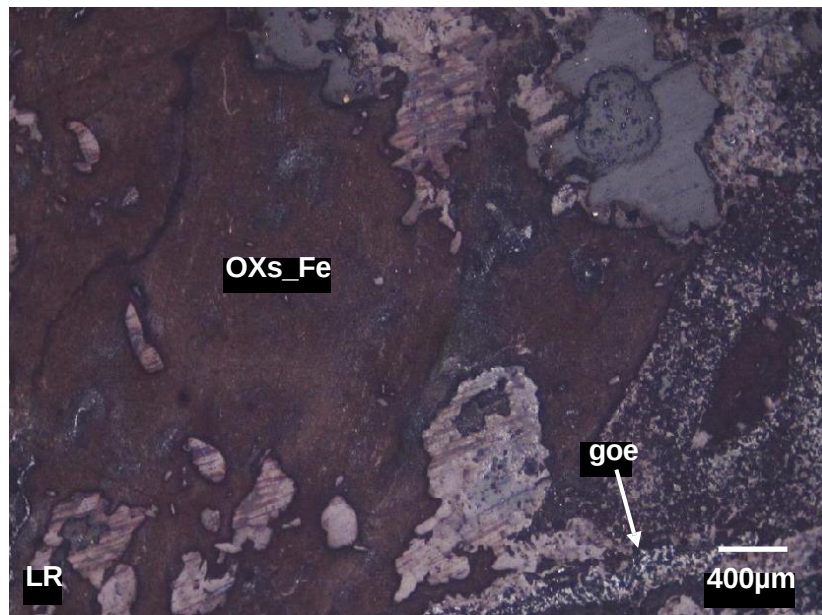


FOTOMICROGRAFIAS



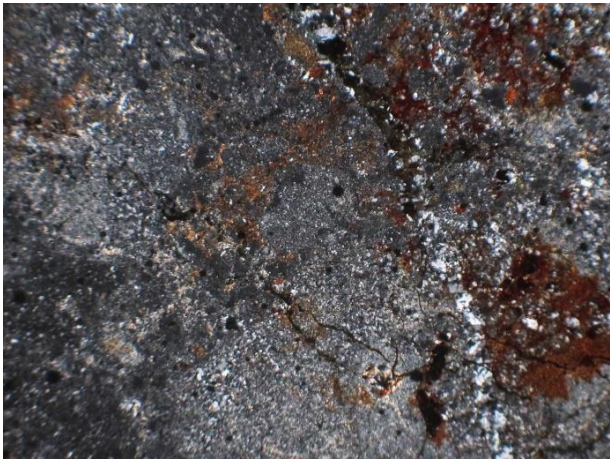
Sector de la roca intensamente invadido por agregados irregulares de goethita (goe) y terrosos de óxidos de hierro (OXs_Fe).

Sector de la roca intensamente invadido por agregados irregulares de goethita (goe) y terrosos de óxidos de hierro (OXs_Fe).



Muestra TOS-920

ESTUDIO PETROMINERAGRÁFICO	
CODIGO MUESTRA	TOS-920
NOMBRE DE LA ROCA	BRECHA HIDROTHERMAL ANDESITICA
DESCRIPCIÓN MACROSCÓPICA	
Andesita, de textura brechoide y obliterada en parte, fuertemente silicificada, débilmente alterada por biotita secundaria y calcita, mineralizado con malaquita y trazas de pirita.	

DESCRIPCIÓN MICROSCÓPICA	
	La muestra es una roca volcánica con textura brechoide. Se aprecian fragmentos de roca volcánica de textura porfírica y escasos fragmentos de roca alterada. La matriz de brecha se encuentra formada por agregados de sílice, que luego han sido invadidos por biotita II alteradas por óxidos de hierro. Así mismo, ha sido invadida y cortada por agregados de cuarzo II con carbonatos, posible malaquita, posible atacamita, goethita, óxidos de titanio y óxidos de hierro entre sus intersticios. La pirita ha sido fuertemente reemplazada por agregados de hematita y goethita; en ocasiones quedando a manera de relictos o moldes. También, los óxidos de hierro han impregnado a los cristales de carbonatos; así como, a los agregados de posible malaquita y atacamita.

FRAGMENTOS DE ROCAS		
DESCRIPCIÓN	%	μm
Fragmentos de roca I, posible roca volcánica de textura porfírica, con formas irregulares y bordes subredondeados. Presenta moldes de fenocristales de posibles ferromagnesianos ($\leq 550 \mu\text{m}$) completamente alterados por agregados microescamosos de sericita ($\leq 10\mu\text{m}$) y pequeños cristales de rutilo ($\leq 80 \mu\text{m}$). En una matriz completamente alterada por agregados de sericita, arcillas y cuarzo secundario, con escasos cristales de apatito ($\leq 200 \mu\text{m}$) dispersos. Además, presenta oquedades y fracturas que han sido rellenadas por cuarzo II, biotita secundaria, goethita y posible malaquita. Por sectores, han sido cortados por agregados de cuarzo II con posible malaquita entre sus intersticios.	44	≤ 4000
Fragmentos de roca II, roca completamente alterada, con formas irregulares y bordes subangulosos. Han sido totalmente alterados por agregados microescamosos de sericita y ocasionalmente, por arcillas. Además, presentan escasas oquedades que han sido rellenadas por cristales de cuarzo II.	3	≤ 1000

FRAGMENTOS DE CRISTALES			
MINERAL	DESCRIPCIÓN	%	μm
Biotita I	No se aprecian fragmentos de cristales primarios.	-	-
Cuarzo I	No se aprecian fragmentos de cristales primarios.	-	-

MATRIZ DE BRECHA			
MINERAL	DESCRIPCIÓN	%	μm
Sílice	Agregados criptocristalinos que han cortado y englobado a los fragmentos de roca volcánica porfírica (principalmente) y a los de roca alterada. Han sido invadidos desde sus intersticios por agregados de biotita II con impregnaciones de óxidos de hierro. Posteriormente, han sido invadidos y cortados por agregados de cuarzo II con cristales de carbonatos y agregados de posible malaquita y posible atacamita entre sus intersticios.	37	≤ 5

MINERALES SECUNDARIOS			
MINERAL	DESCRIPCIÓN	%	μm
Biotita II	Agregados de pequeños cristales subhedrales a anhedrales, de hábito tabular a formas irregulares, que han rellenado oquedades y fracturas en los fragmentos de roca I. También, han ingresado a través de los intersticios de los agregados de sílice que forman la matriz de brecha. Por sectores, han sido invadidos y englobados por agregados de posible malaquita. Además, han sido alterados ligeramente por óxidos de hierro.	3	≤ 30
Cuarzo II	Agregados de cristales anhedrales, irregulares, que han rellenado oquedades en los moldes de fenocristales de posibles ferromagnesianos en los fragmentos de roca I. También, han cortado e invadido a los agregados de sílice que conforman la matriz de brecha. Por sectores, presentan agregados de sericita (posiblemente arrancados de los fragmentos de roca I) y biotita II entre sus intersticios a manera de relictos. Posteriormente, han ingresado a través de sus intersticios cristales de carbonatos, agregados de óxidos de hierro, goethita, posible malaquita y atacamita.	5	≤ 480

MINERALES SECUNDARIOS			
MINERAL	DESCRIPCIÓN	%	µm
Óxidos de titanio	Cristales anhedrales, irregulares, que se hallan diseminados entre los agregados de sílice que forman la matriz de brecha. También, han ingresado por los intersticios de los agregados de cristales de cuarzo II.	Traza	≤ 60
Pirita	Cristales subhedrales a anhedrales, de hábito cúbico a formas irregulares, que ocurren diseminados entre los agregados de sílice y en intersticios de los agregados de cuarzo II. Han sido fuertemente reemplazados por agregados de hematita y goethita, quedando a manera de relictos y en ocasiones a manera de moldes.	Traza	≤ 120
Carbonatos	Cristales anhedrales, irregulares, que han ingresado a través de los intersticios de los agregados de cuarzo II. También, han rellenado pequeñas cavidades y fracturas entre los agregados de sílice que conforman la matriz de brecha. Presentan impregnaciones de óxidos de hierro en bordes y fracturas. Por sectores, han sido invadidos por agregados de posible malaquita.	1	≤ 1100
Posible malaquita	Agregados de pequeños cristales anhedrales, irregulares, que han invadido y englobado a los agregados de biotita II. También, han ingresado por los intersticios de los agregados de cuarzo II presentes en fracturas y cavidades entre los agregados de sílice (que forman la matriz de brecha). Por sectores, han invadido a los cristales de carbonatos desde sus bordes. Además, rellenan fracturas que han cortado a fragmentos de roca I; en ocasiones acompañados óxidos de hierro.	2	≤ 20
Posible atacamita	Agregados anhedrales, irregulares, que han ingresado por los intersticios de los agregados de cuarzo II. Por sectores, junto a posible malaquita, han rellenado fracturas en la matriz de brecha. Además, han sido impregnados desde sus bordes por agregados de goethita y óxidos de hierro.	Traza	≤ 50
Hematita	Cristales anhedrales, irregulares que, junto a los agregados de goethita, han reemplazado fuertemente a los cristales de pirita; en ocasiones dejándolos a manera de relictos.	Traza	≤ 80
Goethita	Agregados irregulares que han ingresado a través de los intersticios de los agregados de cuarzo II. También, junto a hematita, han reemplazado fuertemente a los cristales de pirita. Así mismo, acompañados de óxidos de hierro, han impregnado desde sus bordes y fracturas a los cristales de carbonatos y agregados de posible atacamita.	2	≤ 10

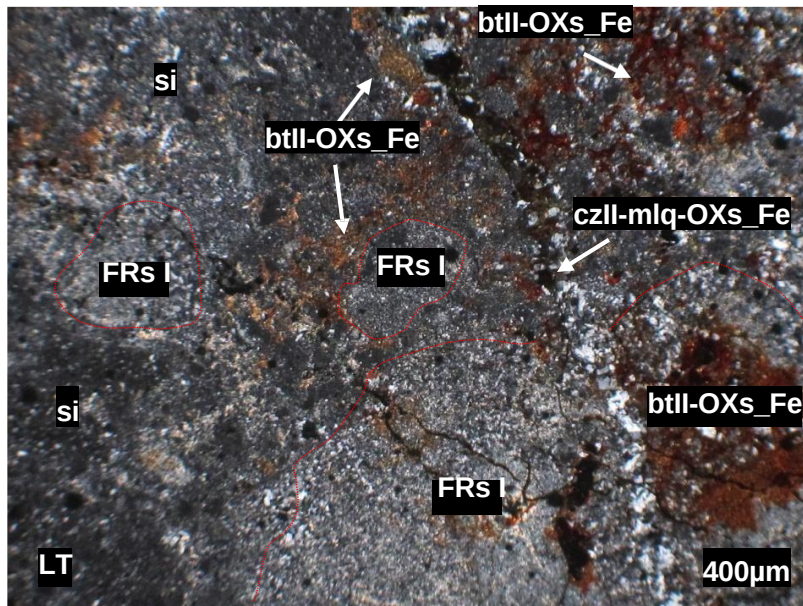
MINERALES SECUNDARIOS			
MINERAL	DESCRIPCIÓN	%	μm
Óxidos de hierro	Agregados irregulares que han alterado a los agregados de biotita II e impregnado a los cristales de carbonatos, malaquita y posible atacamita. También, han ingresado a través de los intersticios de los agregados de cuarzo II. Además, junto con goethita han reemplazado fuertemente a los cristales de pirita, dejándolos a manera de moldes.	3	≤ 5

TEXTURAS	Brechoide.
-----------------	------------

ALTERACIONES		
Tipo	Intensidad	Ensamble de minerales
Silicificación	Moderada	Sílice.
Oxidación	Débil	Óxidos de hierro, goethita y óxidos de titanio.
Biotitización	Débil	Biotita II.
Carbonatación	Muy Débil	Carbonatos.

PROBABLE SECUENCIA PARAGENÉTICA
Pirita
Hematita
Goethita

FOTOMICROGRAFÍAS

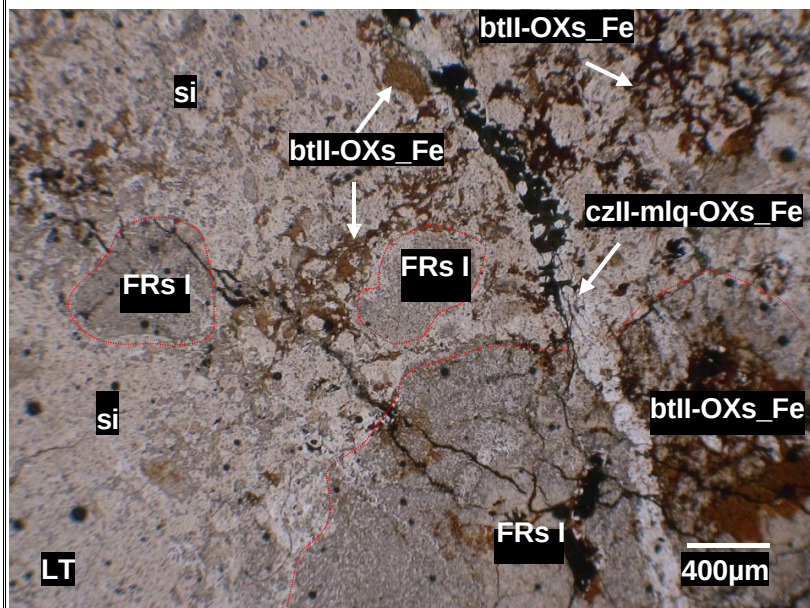


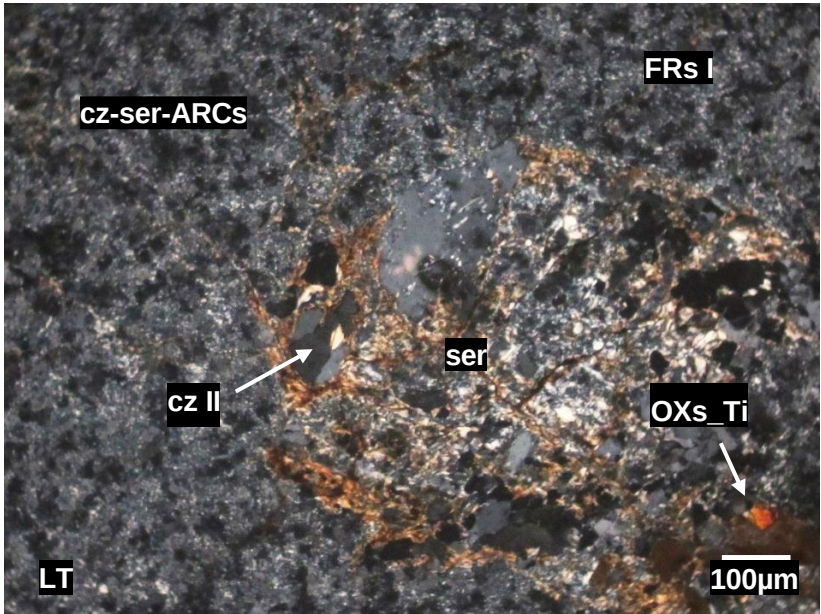
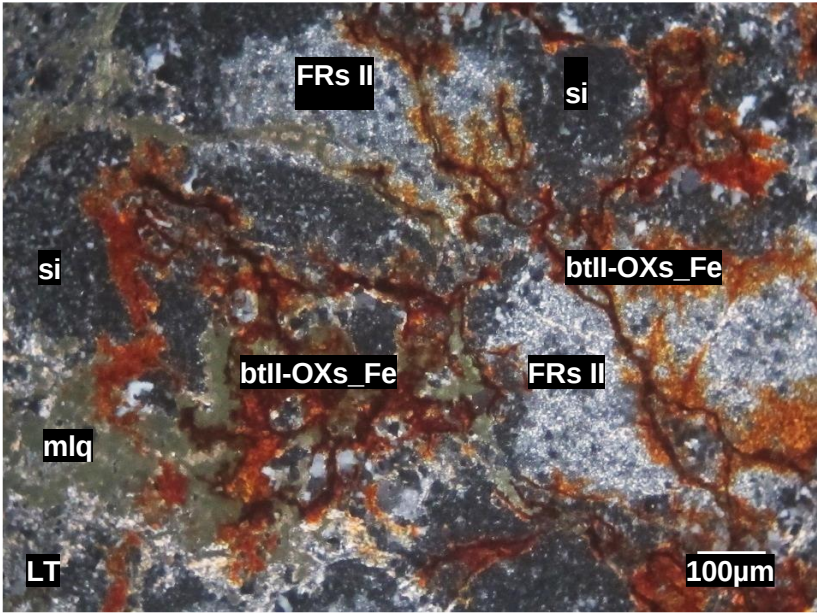
Fragmentos de roca volcánica de textura porfirítica (FRs I), han sido cortados por agregados de sílice (si) que forman la matriz de la brecha. Agregados de biotita II alterados por óxidos de hierro (btII-OXs_Fe) han invadido a los fragmentos de roca y a la matriz de brecha. Además, han sido cortados por fracturas rellenas por agregados de cuarzo II con malaquita y óxidos de hierro (czII-mlq-OXs_Fe).

Nicoles cruzados.

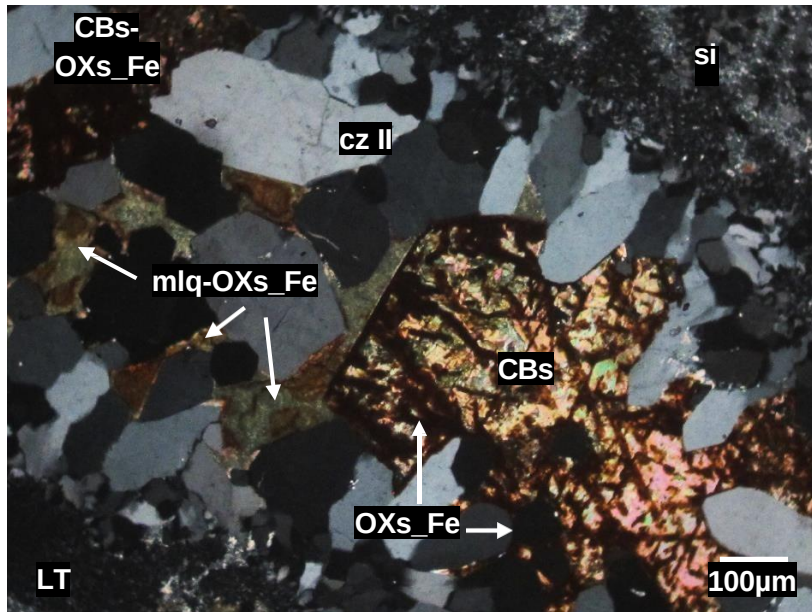
Fragmentos de roca volcánica de textura porfirítica (FRs I), han sido cortados por agregados de sílice (si) que forman la matriz de la brecha. Agregados de biotita II alterados por óxidos de hierro (btII-OXs_Fe) han invadido a los fragmentos de roca y a la matriz de brecha. Además, han sido cortados por fracturas rellenas por agregados de cuarzo II con malaquita y óxidos de hierro (czII-mlq-OXs_Fe).

Nicoles paralelos.



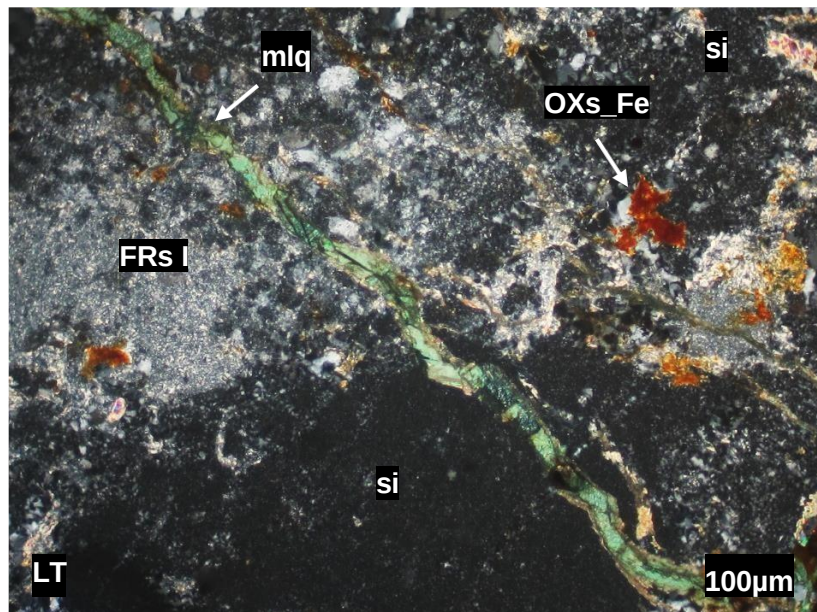
FOTOMICROGRAFIAS		
		Fragmento de roca volcánica de textura porfírica (FRs I), presenta moldes de posibles ferromagnesianos completamente alterados por agregados de sericita (ser) y óxidos de titanio (OXs_Ti), con cuarzo II (cz II) en cavidades; en una matriz totalmente alterada por agregados de cuarzo, sericita y arcillas (cz-ser-ARCs).
Fragments of rock intensely altered (FRs II) that have been cut and engulfed by the aggregates of silica (si) that form the matrix of the breccia. Additionally, aggregates of biotite II altered to iron oxides (btII-OXs_Fe) have invaded the fragments of rock and the breccia matrix. By zones, it has been invaded by aggregates of malachite (mlq).		

FOTOMICROGRAFIAS

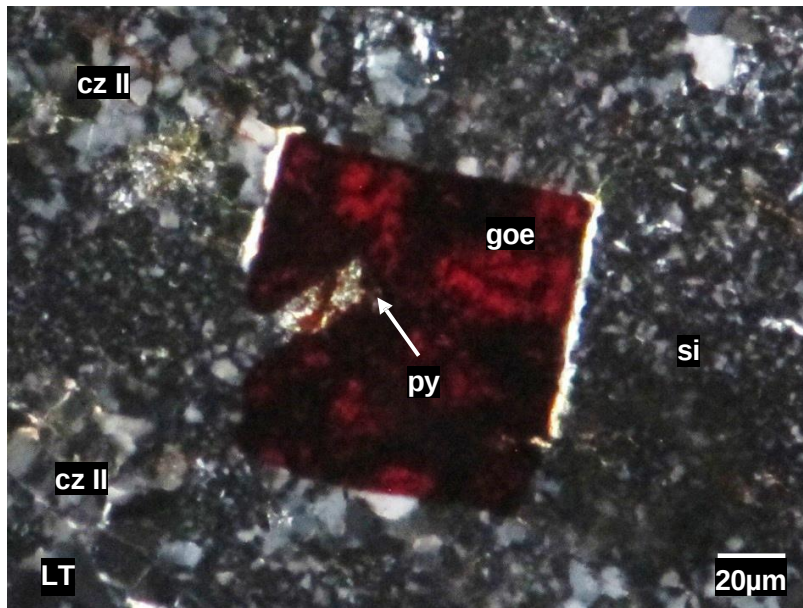


Cristales de carbonatos (CBs) y agregados de malaquita (mlq) con impregnaciones de óxidos de hierro (OXs_Fe), que han ingresado por los intersticios de los agregados de cristales de cuarzo II (cz II). Se encuentran como relleno de cavidades y fracturas que han cortado a los agregados de sílice (si) que forman la matriz de la brecha.

Fragmento de roca volcánica de textura porfírica (FRs I) que ha sido cortado e invadido por los agregados de sílice (si) que forman la matriz de la brecha. Posteriormente, han sido cortados por finas fracturas rellenas por malaquita (mlq). Además, óxidos de hierro (OXs_Fe) han impregnado a la matriz de la brecha.

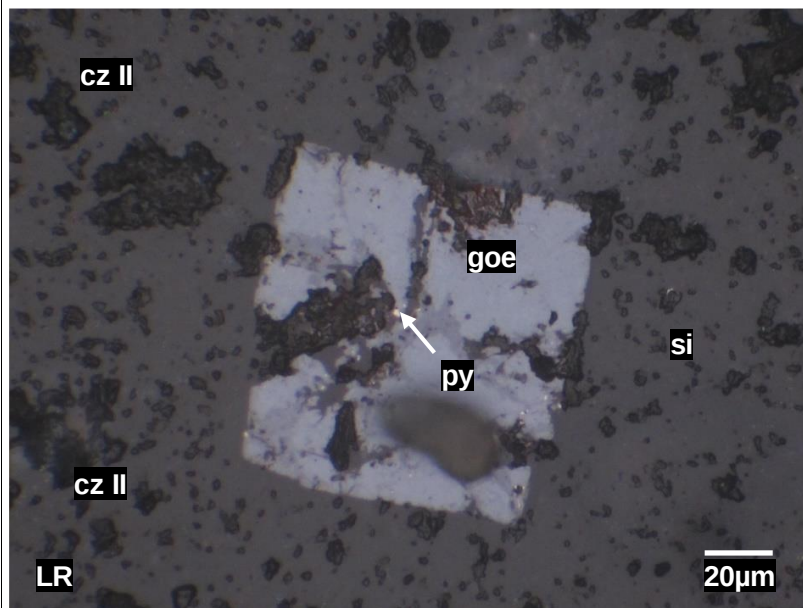


FOTOMICROGRAFÍAS

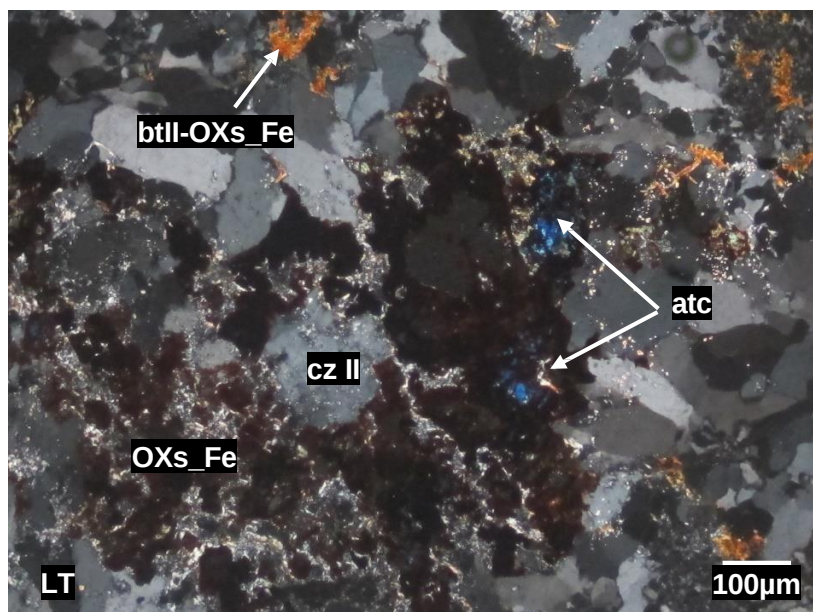


Goethita (goe) en molde de hábito cúbico, con relictos de diminutos cristales de pirita (py). Se encuentra entre los agregados de sílice (si) que forman la matriz de la brecha. Además, agregados de cuarzo II (cz II) han rellenado cavidades.

Goethita (goe) en molde de hábito cúbico, con relictos de diminutos cristales de pirita (py). Se encuentra entre los agregados de sílice (si) que forman la matriz de la brecha. Además, agregados de cuarzo II (cz II) han rellenado cavidades.

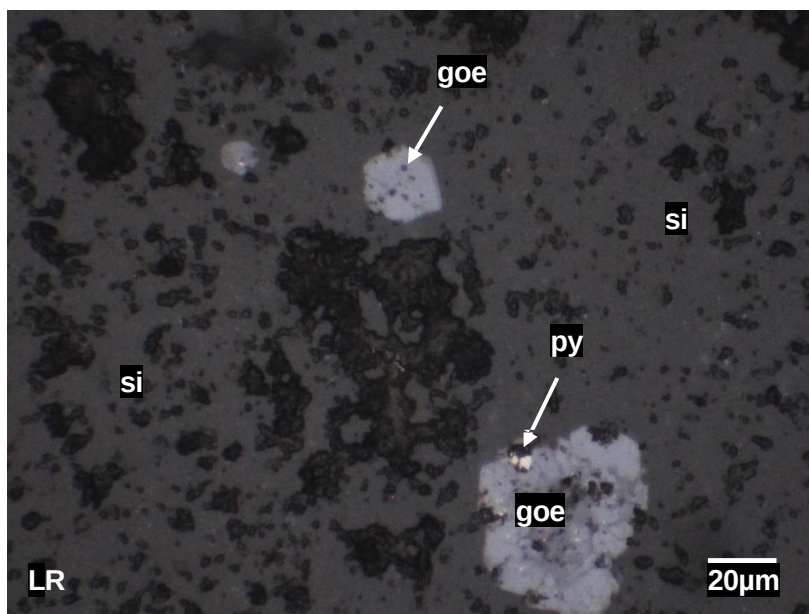


FOTOMICROGRAFIAS



Agregados de cuarzo II (cz II) con relictos de biotita II alterada por óxidos de hierro (btII-OXs_Fe). Además, por sus intersticios han ingresado agregados de posible atacamita (atc) y óxidos de hierro (OXs_Fe) terrosos.

Agregados de goethita (goe) en moldes de hábito cúbico, con relictos de diminutos cristales de pirita (py). Se aprecian dispersos entre los agregados de sílice (si) que forman la matriz de la brecha.



Anexo 2: Base de datos para el análisis multivariante

Base de datos parte 1

Muestra	Au_ppm	Ag_ppm	Cu_ppm	Mo_ppm	Zn_ppm	Pb_ppm	Bi_ppm	Ni_ppm	Co_ppm	Mn_ppm	Fe_ppm	As_ppm	U_ppm	Tb_ppm	Sr_ppm	Cd_ppm	Sb_ppm	V_ppm	Zr_ppm	P_ppm	Cr_ppm	Mg_ppm	
1	0.005	157	6560	12.85	45	82.8	0.18	0.6	2.9	1720	14000	90.4	2.2	3.6	26.1	0.87	4.97	30	73000	170	15	1500	
2	0.043	4.16	6270	4.08	35	15.9	0.41	1.2	3.4	737	15900	65.3	2.4	6.85	148.5	1.56	2.87	40	34100	550	13	2000	
3	0.0025	1.89	11150	1.93	10	86.6	0.04	2.2	32	32	1630	54300	103.5	2.5	3.4	1605	0.22	15.55	181	101500	460	15	2000
4	0.009	0.01	2630	11.9	4	4.2	0.35	2.9	0.7	406	13400	5.1	0.8	1.31	99.3	0.09	4.34	8	7500	40	345	300	
5	0.00025	0.05	767	3.2	35	132	0.08	3.3	8.1	877	42700	22.3	1.1	3.31	637	0.22	12.5	105	72000	300	33	5000	
6	0.048	1.69	12350	1.23	95	5.9	10.85	17.2	43.5	914	39500	9.2	2.4	2.34	98.4	0.1	3.36	275	4200	750	22	17300	
7	0.017	1.66	16300	12.85	19	6.6	0.5	1.4	6.7	209	34600	12.7	2.7	8.51	25.2	0.07	2.54	50	8300	770	14	1600	
8	0.21	54.8	54700	0.77	320	4.4	4.1	25	144	2070	105000	5.3	1.5	1.22	38.7	0.01	0.34	236	1200	100	17	34000	
9	0.309	100	101000	6.3	276	3.7	7.46	28.8	197.5	1500	111000	8.9	5.7	0.89	93.3	0.03	0.53	258	3900	930	11	25700	
10	0.0025	3.26	5860	0.32	92	17.4	0.03	1.7	25.1	1385	59100	3.5	0.7	1.95	275	0.05	0.27	265	72700	630	19	17600	
11	0.142	3.16	23600	0.39	148	3	0.79	3.14	24.1	1720	47200	10.2	1.5	1.79	242	0.07	0.85	137	29500	690	20	20000	
12	0.016	3.32	35500	7.12	48	14.9	2.24	10.5	12.9	270	7700	33.4	1.8	1.64	1130	0.19	20.8	479	5700	800	17	7000	
13	0.104	1.62	27600	5.83	166	4.5	3.25	10.6	21.8	1525	64800	92.9	1.8	2.04	95.7	0.82	4.86	200	29300	160	18	8300	
14	0.02	1.23	12750	4.27	40	33.3	1.38	1.3	41	435	27900	25.9	4.1	8.4	22	0.14	4.33	63	8600	600	1	2000	
15	0.014	5.16	27700	1.41	19	10.6	0.21	1.6	4.8	23	30700	12.1	4	7.95	38.3	0.15	1.2	68	5200	300	13	2000	
16	0.008	3.06	26100	13.15	36	9.3	0.23	1.3	2.3	562	33000	5.9	3.1	7.5	15.3	0.22	2.38	98	7200	630	7	1700	
17	0.089	3.61	37700	1.74	464	23	6.6	0.75	1.5	39	1305	47100	14.1	5.3	6.46	28.4	0.21	2.76	59	36300	480	8	1800
18	0.029	2.14	11450	7.44	17	7.9	0.22	0.9	1	3920	23700	9.1	3.9	5.04	7.1	0.54	1.24	36	99000	420	1	1200	
19	0.013	1.04	8960	4.22	32	5.6	0.3	1.4	1	1155	27200	12.5	2.5	5.77	33.3	0.15	2.22	91	34000	630	7	2100	
20	0.044	7.73	21800	9.43	22	29.5	0.66	1.4	3.3	337	15500	28.4	2.1	5.55	20.3	0.36	6.33	30	12400	450	19	1200	
21	0.031	3.55	18500	4.86	58	14.9	0.7	1.8	8.3	724	33100	26.7	3.5	8.4	41.2	0.22	4.58	53	20800	700	30	2400	
22	0.093	12.55	16900	9.41	39	12	1.16	1.3	5.4	588	29100	12.5	2.5	6.43	36.3	0.18	3.98	70	20800	670	7	2600	
23	0.011	0.62	20100	1.71	63	5	0.23	1.4	7	326	40700	103	6.1	9.01	56	0.05	1.46	77	3100	440	5	4700	
24	0.054	24	61200	18.95	40	12.1	1.46	1.3	69	4820	29600	13.2	12.8	0.97	145.5	0.32	2.15	39	196000	100	1	3000	
25	0.013	2.61	7600	7.6	75	6.1	0.57	1.3	72	1030	79600	46	2.3	6.41	127.5	0.08	1.04	55	36100	630	1	4000	
26	0.012	0.35	3615	0.23	80	7.5	0.76	13.6	38.9	4990	736	53800	4.7	2.1	7.15	36	0.40	1.18	26	6400	630	10	7700
27	0.0025	1.84	3680	0.57	150	7	0.26	3.4	18.2	1455	45500	5.8	0.9	3.1	134	0.06	0.67	107	50100	1450	5	8500	
28	0.006	1.76	7110	0.36	125	13.8	0.09	4.6	16	924	60700	4.6	1.8	4.26	102	0.04	1.38	162	22200	750	15	9800	
29	0.016	1.47	14050	4.99	114	14.5	0.32	4.5	16.3	802	65700	6.8	1.8	4.18	242	0.01	1.67	138	14300	830	7	8000	
30	0.025	1.56	7240	0.36	176	5.4	0.08	4.4	23.2	1775	53400	23.2	5.8	2.87	120.5	0.16	0.46	105	48000	780	5	11400	
31	0.032	1.02	4370	0.79	90	11.2	0.14	2.4	59	670	46900	5.7	2.1	6.66	36.7	0.06	1.72	64	21100	630	6	7400	
32	0.012	29.3	16750	0.62	123	10.7	0.37	3.3	11.7	678	53400	7.9	2.4	7.43	99.2	0.01	1.44	74	16200	720	4	8600	
33	0.008	2.09	3810	0.54	101	4	1.82	3.9	23.5	596	51000	2.5	1.6	4.71	44.5	0.01	2.22	95	4100	780	7	8400	
34	0.174	41.4	68200	0.56	270	7.9	2.34	23.6	11.1	1610	65400	19.5	2.7	1.05	64.7	0.07	0.63	103	8000	1050	17	24000	
35	0.13	18.96	25200	0.97	179	10.4	0.81	10.2	36.2	1355	65400	5.3	4.2	3.49	109.5	0.13	0.65	208	19700	880	15	16200	
36	0.011	20.1	13950	3.54	180	4.9	0.47	8.4	38.9	1355	70500	5.3	1.8	4.08	114.5	0.01	1.4	191	3500	600	18	18900	
37	0.075	12.45	25400	0.92	258	4.6	0.64	12.8	46.6	1805	92000	4.3	2.9	4.62	67	0.01	0.47	258	14100	590	17	20500	
38	0.017	0.9	13900	6.48	19	8.1	0.98	1.5	3.1	1255	17700	62.7	8.8	5.5	53.5	0.13	1.15	77	62000	780	5	13000	
39	0.0025	0.34	1810	1.67	65	4.7	0.26	1.8	30	1100	34900	4.4	2.4	9.19	40.2	0.09	1.76	67	35900	930	10	4500	
40	0.008	1.7	3030	1.12	136	5.7	0.15	2.6	12.3	970	39800	3.4	2.1	7.23	27.1	0.04	0.51	96	17400	720	17	9300	
41	0.0025	0.39	2760	0.26	30	40.4	0.06	1	7.1	1890	70400	1.6	0.8	1.84	500	0.09	3.75	252	114000	950	26	4400	
42	0.356	2.54	3900	1.59	48	15	0.1	3.5	7.5	1250	47100	3.4	2.1	1.80	389	0.13	1.5	197	89100	750	23	5000	
43	0.033	6.52	4620	2.31	19	27.8	0.09	3.8	2.6	1330	54300	5.3	1.2	1.74	800	0.26	1.28	220	107500	570	32	1500	
44	0.023	3.35	4300	1.45	68	19.8	0.34	1.8	8.3	982	30100	5.9	3.4	9.1	71.7	0.13	1.28	62	18900	580	1	3300	
45	0.015	7.97	8900	1.89	140	14.8	1.09	1.8	15.5	1315	33600	1.9	2	4.19	12.8	47	12000	470	47	20000	450	5	11400
46	0.014	3.35	8760	0.23	154	25.7	0.82	1.5	12.4	3090	33500	9.6	4.3	9.28	274	0.28	3.45	55	20100	470	3	7900	
47	0.0025	1.43	5160	0.17	189	22.8	0.69	1.7	14.5	3170	34200	4.6	3	10.6	262	0.17	2.13	64	12800	430	3	8000	
48	0.025	3.9	7370	1.08	141	24.9	0.68	3.8	20.2	2650	46500	10.6	11.2	7.1	239	0.56	1.64	93	19900	5500	1	7200	
49	0.008	3.81	22400	0.87	21	8.7	0.62	1.2	3.5	69	32600	46.1	3.5	6.8	16.5	0.16	0.13	60	1700	630	11	600	
50	0.013	0.98	4590	5.35	18	5.4	1.4	1.5	4.5	2110	26600	4.1	3.9	5.19	39	0.11	1.19	39	82900	450	18	3300	
51	0.006	3.81	20200	0.72	42	5.3	0.06	1.7	5.9	535	29600	2.9	2.6	7.13	23.7	0.06	2.26	44	5000	550	8	2500	
52	0.011	0.43	19500	0.92	19	22.5	4.13	2.1	4.4	609	29500	2.9	10.9	2.4	35.8	0.18	8.29	44	31910	190	66	1400	
53	0.129	60.1	32000	1.69	43	1.9	0.67	1.2	1.7	108	32900	5.9	1.7	4.38	5.8	0.17	0.66	66	2400	1050	42	800	
54	0.005	1.76	16950	12.25	21	7.7	1.26	1	2.8	208	26000	15.5	2.7	5.96	16.6	0.05	5.72	66	2600	600	14	1400	
55	0.055	9.8	12850	1.11	122	5.5	0.59	3.2	17.2	994	39900	4.5	0.9	4.59	165.5	0.09	1	93	9200	620	13	17600	
56	0.035	1.87	21000	12.85	25	26.4	1.71	1.3	3.8	222	29600	18.7	3.7	6.13	175	0.07	3.25	18.5	2200	570	10	2200	
57	0.071	1.35	43100	1.09	30	5.9	0.18	1.4	4.1	185	34400	15.1	2.8	5.86	66	0.16	0.86	66	5300	180	15	2100	
58	0.079	5.51	13500	1.09	33	25	8.7	0.31	1.4	4.3	628	21500	9.1	2.5	4.65	19.5	0.13	3.13	35	31000	380	17	1800
59	0.031	3.23	96200	12.95	26	16.3	0.14	1.6	3.9	551	52200	218	8.6	4.38	51.7	0.29	5.35	202	12400	430	17	1800	
60	0.038	4.3	19800	7.95	24	7.6	2.53	2.9	1.9	1010	22200	20.9	2.6	2.51	16.5	0.16	0.24	71	71	600	10	1000	
61	0.036	1.75																					

Base de datos parte 2

Ba_ppm	Ti_ppm	Al_ppm	Na_ppm	K_ppm	W_ppm	Tl_ppm	S_ppm	Se_ppm	Te_ppm	Ge_ppm	Hf_ppm	Rb_ppm	Sr_ppm	Zr_ppm	ln_ppm	Re_ppm	Be_ppm	Li_ppm	Ga_ppm	Cs_ppm	REE* ppm	
226	1210	24700	1760	8600	2.5	0.03	100	0.5	0.015	0.16	1.7	33.3	0.5	0.11	54.2	0.055	0.001	0.37	88	0.19	62.4	
580	2700	58400	35400	7600	2.6	0.17	100	0.5	0.015	0.2	3.4	24	0.7	0.24	383	0.032	0.001	0.94	7.9	11.7	101.2	
20	3230	64500	2000	300	0.4	0.01	50	0.5	0.025	0.1	2.2	1.2	0.8	0.16	62	0.036	0.001	0.32	14.3	19.36	0.32	75.3
4630	190	3600	100	1200	0.8	0.03	1300	0.5	0.025	0.025	0.5	4.7	0.5	0.025	14.4	0.005	0.001	0.23	22.2	1.1	0.84	20.83
30	2030	52000	7700	400	0.7	0.01	50	0.5	0.025	0.09	2	1.6	1.4	0.14	80.5	0.043	0.001	0.64	15.1	25.1	24.1	66.6
370	4150	81600	9800	17000	0.3	1.24	300	2	8.33	0.07	1	56.9	2.7	0.09	35.5	0.158	0.007	0.48	33.4	14.65	9.33	64.4
590	2920	65700	7000	25200	2.9	0.83	100	1	0.12	0.14	3.8	96.6	39	0.28	131.5	0.136	0.005	0.86	10.6	10.6	5.77	102
590	4650	82100	2200	11400	0.8	0.46	300	4	0.36	0.14	1.4	13.2	0.9	0.17	48.8	0.059	0.001	0.61	59.1	20.6	1.32	38.26
720	3040	74900	3000	3800	1.6	0.13	500	1	0.025	0.14	0.7	39.5	1.4	0.07	25.2	0.043	0.001	1.22	59.6	22.2	0.81	148.1
60	3760	79500	24000	700	0.3	0.01	100	0.5	0.025	0.1	1.2	1.8	0.6	0.07	39.6	0.042	0.001	0.71	28	17.85	0.9	67.85
40	4410	85800	47400	300	3.7	0.01	100	0.5	0.12	0.06	1.4	0.3	1.2	0.09	49.9	0.041	0.001	0.5	43.1	17.75	0.63	64.5
620	4900	98300	7100	27000	2.2	2.14	400	38	2.16	0.17	1	86.2	1.1	0.12	96	0.115	0.011	1.02	17.7	18.95	18.36	68.45
660	3980	89200	3800	23400	2	1.08	100	3	1.65	0.08	0.9	67.1	2.4	0.1	29.9	0.453	0.001	0.78	21.8	17.25	4.85	71.4
470	2380	54400	1100	22100	2.3	0.8	100	0.5	0.22	0.09	3.2	113.5	0.7	0.22	118	0.123	0.001	0.67	7.9	11.3	3.33	103.5
450	2350	48700	800	19500	2.3	0.67	500	1	0.13	0.09	3.2	102.5	1.2	0.22	109	0.029	0.001	0.64	8.7	10.9	3.88	91.4
870	2290	61700	900	27300	2.1	0.91	100	1	0.09	0.07	3.3	120.5	0.9	0.22	129	0.267	0.001	0.85	5.2	11.8	4.32	87.8
590	2020	52100	2700	22200	4	0.76	300	1	0.13	0.13	2.7	101	10.5	0.19	96	0.373	0.004	0.74	5.7	10.3	4.68	113.7
2080	1520	38700	3000	15300	1.7	0.61	700	1	0.08	0.12	2.2	74.4	1.1	0.15	74.3	0.317	0.003	0.53	5.9	6.6	2.72	123.8
800	3120	62300	1500	36400	2.1	1.24	100	0.5	0.05	0.08	3.8	138	1	0.29	136.5	0.096	0.006	1.3	10.6	1.7	5.31	71.1
500	1960	37200	3200	14400	1.1	0.42	100	0.5	0.025	0.05	2.8	62.5	0.9	0.17	83	0.019	0.003	0.72	12.2	8.16	2.23	64.6
760	2800	64100	13200	22300	2.2	0.65	400	0.5	0.025	0.08	4	94.3	1.2	0.26	118	0.04	0.005	0.93	9	10.6	5.36	90.3
780	2610	61700	7700	24400	1.6	0.69	100	1	0.025	0.07	2.8	109.5	1.2	0.22	92.3	0.076	0.004	1.04	4.7	11.75	5.89	77.8
790	2400	70700	3300	26100	1.5	0.88	100	1	0.025	0.1	3.8	135.5	0.6	0.23	116.5	0.148	0.001	0.69	12.7	14.55	4.57	100.2
120	170	12900	1000	2600	0.5	0.1	3300	5	0.63	0.12	0.5	13.3	0.4	0.025	16.6	0.427	0.004	0.59	9.5	2.96	1.42	128.8
420	3180	70400	27200	14000	1	0.32	100	0.5	0.025	0.14	0.3	48.3	1.4	0.29	144	0.083	0.002	0.98	18	13.6	2.44	153
760	4650	97600	2100	37300	6.5	1.22	50	0.5	0.27	0.11	1.5	172.5	2.9	0.39	55.3	0.079	0.001	1.31	16.1	22.5	12.95	101.4
470	3710	84200	38600	11600	1.2	0.28	100	0.5	0.025	0.1	2	30.2	1	0.18	64.1	0.052	0.001	0.8	22.7	16.45	2.45	76.9
480	3540	84900	17800	21900	1.2	0.46	300	0.5	0.025	0.15	2.4	93.7	2.1	0.25	61.6	0.064	0.001	0.86	21.8	16.65	2.52	93.7
510	4030	90500	38500	13100	1.3	0.32	100	0.5	0.025	0.19	1.6	56	2	0.18	48.8	0.056	0.001	1.05	20.4	15.25	2.63	92.6
350	3690	80500	32400	9000	1.2	0.21	100	0.5	0.025	0.15	1.7	26	1.7	0.15	63.4	0.059	0.001	0.72	33	15.45	1.33	62.85
740	3230	79300	17800	19300	1.9	0.42	100	0.5	0.025	0.17	4.1	72.9	1	0.25	140.3	0.049	0.001	1.1	11.4	13.25	4.64	99.1
980	3080	84900	16800	21900	1.2	0.46	300	0.5	0.025	0.15	4	73.5	1.2	0.26	149.5	0.066	0.001	1.17	16.8	17.55	5.07	102.3
620	3780	91500	7900	31200	2.7	0.88	50	0.5	0.025	0.14	2	133	0.5	0.21	74.7	0.063	0.001	1.52	15	21.2	12.15	76.9
750	5200	95700	2900	19300	1.3	0.63	100	0.5	0.11	0.13	0.9	33.1	1.2	0.21	31	0.064	0.001	1.01	73.3	23.7	4.64	66.45
820	3210	78000	6200	8800	0.4	0.26	300	0.5	0.23	0.13	2.3	34.9	0.9	0.14	80.9	0.057	0.002	0.7	62.9	15.15	2.48	83.1
170	3680	79400	17200	26000	0.6	0.06	400	2	0.05	0.025	0.15	2.7	1.9	0.15	90.9	0.037	0.005	0.63	22.9	12.8	2.78	92.9
90	4360	80700	2900	14300	2.9	0.44	100	0.5	0.025	0.13	3	12	1.3	0.16	103.5	0.045	0.001	0.59	1.75	17.2	1.2	83.2
680	2780	57000	1700	25800	1.3	0.47	100	0.5	0.025	0.18	3.8	66.6	1.3	0.25	135	0.059	0.001	1.24	4.3	14.2	2.04	69.2
500	3480	76500	9000	30500	1.8	0.77	100	0.5	0.025	0.2	4.1	125.5	1.8	0.32	140.5	0.052	0.001	1.15	9.4	15.3	5.3	98.2
420	3420	72400	9600	32200	0.8	0.28	100	0.5	0.025	0.22	4.7	4.7	1.5	0.31	16.7	0.04	0.002	1.18	27.7	15.5	2.88	111.8
40	4510	85800	2600	400	1	0.01	100	0.5	0.025	0.14	1.2	1	0.9	0.1	30.5	0.063	0.001	0.53	4.1	20.7	0.3	80.9
140	4270	61500	1700	3200	0.7	0.19	300	0.5	0.11	0.11	0.9	21	0.8	0.1	21.5	0.067	0.001	0.38	9.3	13.15	1.58	71.2
90	3250	74800	1100	1000	0.2	0.01	400	0.5	0.025	0.09	1	34	0.7	0.07	29.9	0.035	0.001	0.41	3.4	16.65	0.42	60.2
820	2850	62000	17800	21900	1.1	0.6	100	2	0.05	0.17	3.6	89.1	0.7	0.21	116	0.057	0.001	1.13	14.3	15.2	2.78	92.9
430	3010	68100	13300	7200	0.4	0.2	100	1	0.025	0.17	3.6	28.7	1.4	0.26	120	0.034	0.001	1.29	32.3	12.3	2.67	102.9
890	2610	74900	3600	20400	0.7	0.74	100	1	0.76	0.16	3.2	96.8	3	0.28	95.3	0.15	0.001	1.34	22.2	15.8	3.58	108.1
1170	2510	77900	2400	21100	0.8	0.79	100	1	0.1	0.16	4	97.7	2.9	0.31	121	0.138	0.001	1.9	24.4	18.65	4.03	112.1
820	2710	72400	9600	32200	0.3	0.7	100	1	0.025	0.18	3	94.2	1.6	0.22	134	0.04	0.002	1.34	26.2	16.65	4.77	109.2
810	2030	47500	1300	21700	1.1	0.57	100	2	0.025	0.12	2.5	86.3	0.8	0.17	85.2	0.1	0.003	0.87	8.4	7.99	2.99	66.6
4930	1590	44100	4000	16000	1.6	0.28	1300	1	0.025	0.12	1.9	49.3	0.8	0.16	67.3	0.064	0.001	0.78	8.4	8.99	1.97	78.9
1010	2690	58000	17000	26000	1.8	0.83	300	0.5	0.025	0.32	11.8	27.5	1.3	0.32	116.7	0.067	0.001	1.34	21.6	12.25	3.18	101.6
1050	760	25700	900	10300	1.8	0.29	300	1	0.11	0.1	1.2	41.2	30.8	0.08	33.4	1.065	0.001	0.94	98	5.34	2.63	38.65
860	2310	59800	1000	25900	1.2	0.72	300	1	0.025	0.12	3.2	107	1	0.19	110	0.05	0.001	1.14	7.1	11.95	3.22	75.3
330	2250	55500	700	24500	1.4	0.64	100	1	0.025	0.14	2.7	96.7	0.8	0.19	98.2	0.05	0.003	0.91	4.4	10.7	3.62	75.3
300	3320	63400	17000	26000	0.4	0.16	400	0.5	0.025	0.16	2.7	149	0.5	0.19	149.5	0.045	0.001	0.99	44.9	16.6	3.11	89.7
1040	2420	61400	1000	29000	1.2	0.77	100	1	0.08	0.16	2.7	117	0.6	0.2	102	0.07	0.004	1.15	3.6	10.15	3.53	72.7
710	1900	54800	700	24800	1.1	0.69	100	2	0.06	0.16	2.6	101	0.6	0.17	91.3	0.184	0.001	1.36	5.8	10.3	3.06	66.8
460	1760	45700	700	19600	1.4	0.51	100	0.5	0.025	0.15	2.1	73.5	0.4	0.16	73.8	0.037	0.001	0.8	6.7	7.42	3	69.8
3000	1590	45300	1100	7600	0.6	0.06	1400	0.5	0.025	0.15	1.9	77.6	1.7	0.15	149	0.037	0.001	1.4				

Anexo 3: Matriz de Pearson del proyecto Tosantos

Matriz de Pearson parte 1

	Ln(Au)	Ln(Ag)	Ln(Cu)	Ln(Mo)	Ln(Zn)	Ln(Pb)	Ln(Bi)	Ln(Ni)	Ln(Co)	Ln(Mn)	Ln(Fe)	Ln(As)	Ln(U)	Ln(Sr)	Ln(Cd)	Ln(Sb)
Ln(Au)	1.0															
Ln(Ag)	0.5	1.0														
Ln(Cu)	0.6	0.6	1.0													
Ln(Mo)	0.2	0.1	0.4	1.0												
Ln(Zn)	0.1	0.1	-0.1	-0.7	1.0											
Ln(Pb)	-0.1	0.0	-0.2	0.1	-0.1	1.0										
Ln(Bi)	0.4	0.1	0.4	0.2	0.2	-0.2	1.0									
Ln(Ni)	0.1	0.0	-0.2	-0.5	0.7	0.0	0.1	1.0								
Ln(Co)	0.2	0.1	-0.1	-0.5	0.9	0.0	0.3	0.8	1.0							
Ln(Mn)	0.0	-0.1	-0.2	-0.4	0.6	0.1	0.1	0.5	0.6	1.0						
Ln(Fe)	0.2	0.1	0.2	-0.3	0.6	0.1	0.2	0.6	0.7	0.5	1.0					
Ln(As)	0.1	-0.1	0.2	0.6	-0.3	0.4	0.2	-0.1	-0.1	-0.1	0.1	1.0				
Ln(U)	0.4	0.2	0.6	0.5	-0.2	0.5	0.5	-0.3	-0.1	-0.1	0.2	0.4	1.0			
Ln(Sr)	-0.4	-0.2	-0.5	-0.5	0.3	0.3	-0.2	0.4	0.2	0.5	0.3	-0.2	-0.5	1.0		
Ln(Cd)	0.2	0.0	0.1	0.3	-0.2	0.4	0.0	-0.3	-0.3	0.2	-0.2	0.3	0.2	0.0	1.0	
Ln(Sb)	-0.1	-0.1	0.1	0.5	-0.4	0.2	0.2	-0.3	-0.3	-0.3	-0.2	0.6	0.3	-0.2	0.3	1.0
Ln(Ca)	-0.3	-0.3	-0.5	-0.2	0.0	0.2	-0.3	0.1	-0.1	0.6	0.0	0.0	-0.3	0.6	0.3	-0.1
Ln(P)	-0.1	0.0	-0.2	-0.5	0.4	0.0	0.0	0.3	0.4	0.2	0.3	-0.2	-0.1	0.3	-0.2	-0.3
Ln(Cr)	0.0	0.0	-0.2	0.2	-0.3	0.1	-0.3	0.1	-0.2	-0.2	-0.2	0.1	-0.3	0.1	0.0	0.1
Ln(Mg)	0.0	0.0	-0.2	-0.7	0.9	0.0	0.1	0.7	0.8	0.5	0.6	-0.3	-0.4	0.5	-0.3	-0.5
Ln(Ba)	0.2	0.1	0.4	0.3	-0.2	-0.2	0.3	-0.4	-0.3	-0.3	-0.2	0.0	0.4	-0.5	0.0	0.2
Ln(Na)	-0.3	-0.1	-0.4	-0.6	0.5	0.1	-0.1	0.3	0.3	0.2	0.2	-0.3	-0.5	0.6	-0.2	-0.3
Ln(K)	0.1	0.1	0.4	0.2	-0.1	-0.3	0.3	-0.4	-0.2	-0.4	-0.3	0.0	0.4	-0.6	0.0	0.2
Ln(W)	0.1	0.1	0.3	0.1	0.0	-0.1	0.2	-0.1	0.0	-0.2	0.0	0.1	0.3	-0.5	-0.1	0.2
Ln(Tl)	0.2	0.1	0.4	0.2	-0.1	-0.2	0.4	-0.4	-0.1	-0.4	-0.2	0.0	0.4	-0.6	0.0	0.3
Ln(Ge)	0.2	0.1	0.3	-0.1	0.4	0.0	0.4	0.2	0.5	0.3	0.5	0.1	0.3	-0.1	-0.1	-0.1
Ln(Rb)	0.0	0.1	0.3	0.2	-0.2	-0.2	0.2	-0.5	-0.3	-0.4	-0.4	0.0	0.4	-0.6	0.0	0.3
Ln(Sn)	-0.1	-0.1	-0.1	-0.3	0.3	0.0	0.2	0.1	0.2	0.1	0.2	-0.2	0.0	0.1	-0.1	0.1
Ln(In)	0.1	-0.1	0.4	0.2	-0.1	0.0	0.3	-0.1	0.0	0.0	0.3	0.3	0.5	-0.1	0.1	0.3
Ln(Li)	0.0	0.0	-0.2	-0.5	0.8	-0.1	0.2	0.8	0.8	0.5	0.5	-0.1	-0.3	0.4	-0.2	-0.3
Ln(Cs)	0.0	0.1	0.2	0.1	-0.1	-0.2	0.2	-0.2	-0.1	-0.4	-0.1	0.1	0.3	-0.4	-0.1	0.3

■ Muy fuerte correlación
■ Fuerte correlación
■ Moderada correlación
■ Débil correlación
■ Muy débil correlación

Nota: Matriz de Pearson del logaritmo natural de los elementos analizados en las muestras de rocas del proyecto Tosantos. Fuente: Elaboración propia.

Matriz de Pearson parte 2

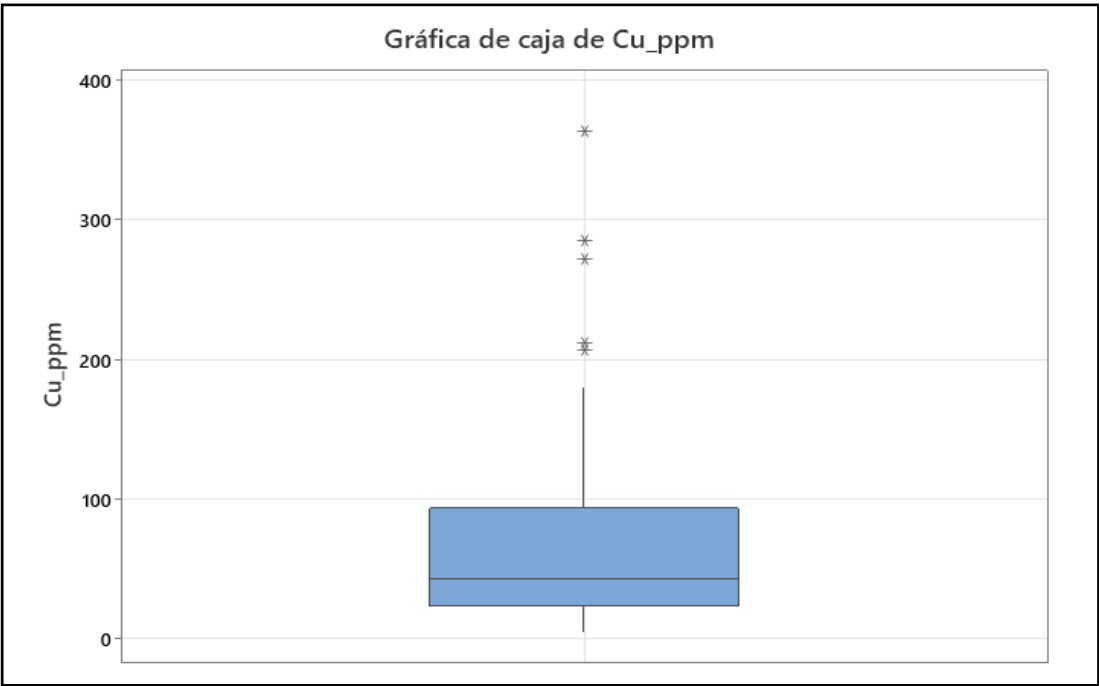
	Ln(Ca)	Ln(P)	Ln(Cr)	Ln(Mg)	Ln(Ba)	Ln(Na)	Ln(K)	Ln(W)	Ln(Tl)	Ln(Ge)	Ln(Rb)	Ln(Sn)	Ln(In)	Ln(Li)	Ln(Cs)
Ln(Au)															
Ln(Ag)															
Ln(Cu)															
Ln(Mo)															
Ln(Zn)															
Ln(Pb)															
Ln(Bi)															
Ln(Ni)															
Ln(Co)															
Ln(Mn)															
Ln(Fe)															
Ln(As)															
Ln(U)															
Ln(Sr)															
Ln(Cd)															
Ln(Sb)															
Ln(Ca)	1.0														
Ln(P)	0.1	1.0													
Ln(Cr)	0.1	-0.2	1.0												
Ln(Mg)	0.2	0.5	-0.2	1.0											
Ln(Ba)	-0.5	-0.2	-0.2	-0.4	1.0										
Ln(Na)	0.3	0.5	-0.2	0.6	-0.4	1.0									
Ln(K)	-0.6	0.0	-0.4	-0.3	0.8	-0.2	1.0								
Ln(W)	-0.4	0.1	-0.2	-0.2	0.4	-0.2	0.5	1.0							
Ln(Tl)	-0.6	0.0	-0.4	-0.3	0.8	-0.2	1.0	0.5	1.0						
Ln(Ge)	-0.3	0.2	-0.4	0.2	0.2	0.0	0.2	0.3	0.2	1.0					
Ln(Rb)	-0.5	-0.1	-0.3	-0.4	0.8	-0.2	1.0	0.5	0.9	0.1	1.0				
Ln(Sn)	-0.1	0.2	-0.1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3	0.2	0.3	0.2	1.0			
Ln(In)	0.0	-0.1	-0.2	-0.1	0.2	-0.2	0.3	0.2	0.3	0.2	0.2	0.3	1.0		
Ln(Li)	0.1	0.3	0.0	0.8	-0.3	0.4	-0.4	-0.2	-0.3	0.2	-0.4	0.2	-0.2	1.0	
Ln(Cs)	-0.5	0.0	-0.3	-0.2	0.6	-0.2	0.8	0.4	0.8	0.1	0.8	0.3	0.4	-0.2	1.0

■ Muy fuerte correlación
■ Fuerte correlación
■ Moderada correlación
■ Débil correlación
■ Muy débil correlación

Nota: Matriz de Pearson del logaritmo natural de los elementos analizados en las muestras de rocas del proyecto Tosantos. Fuente: Elaboración propia.

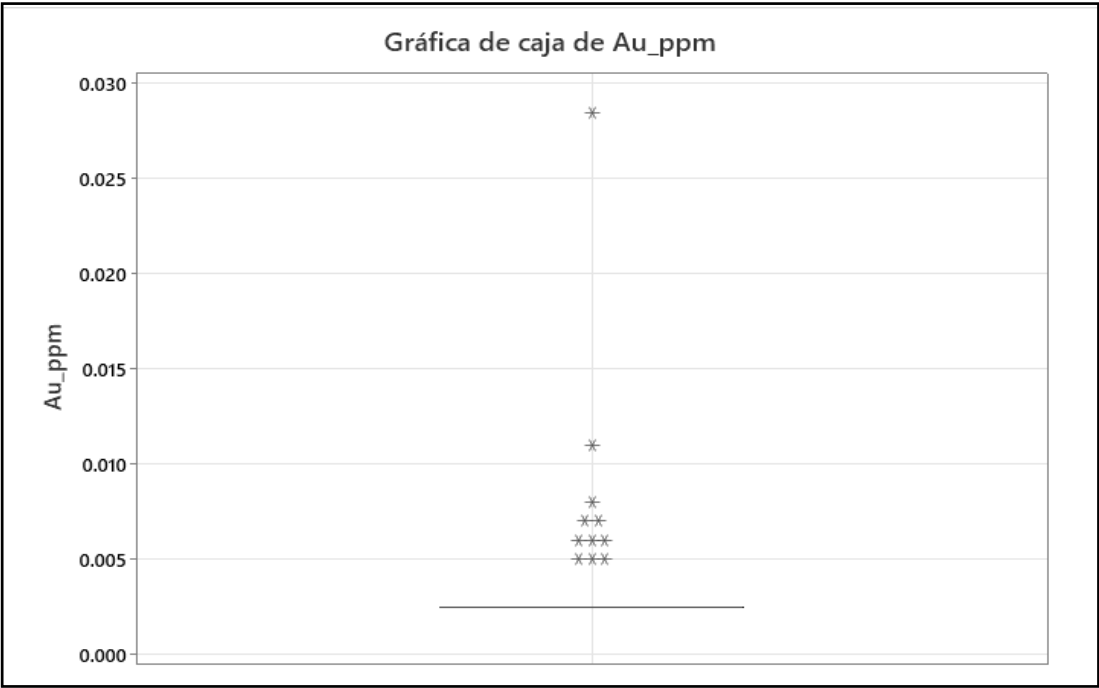
Anexo 4: Boxplot de los elementos asociados al proyecto Tosantos

Boxplot del cobre



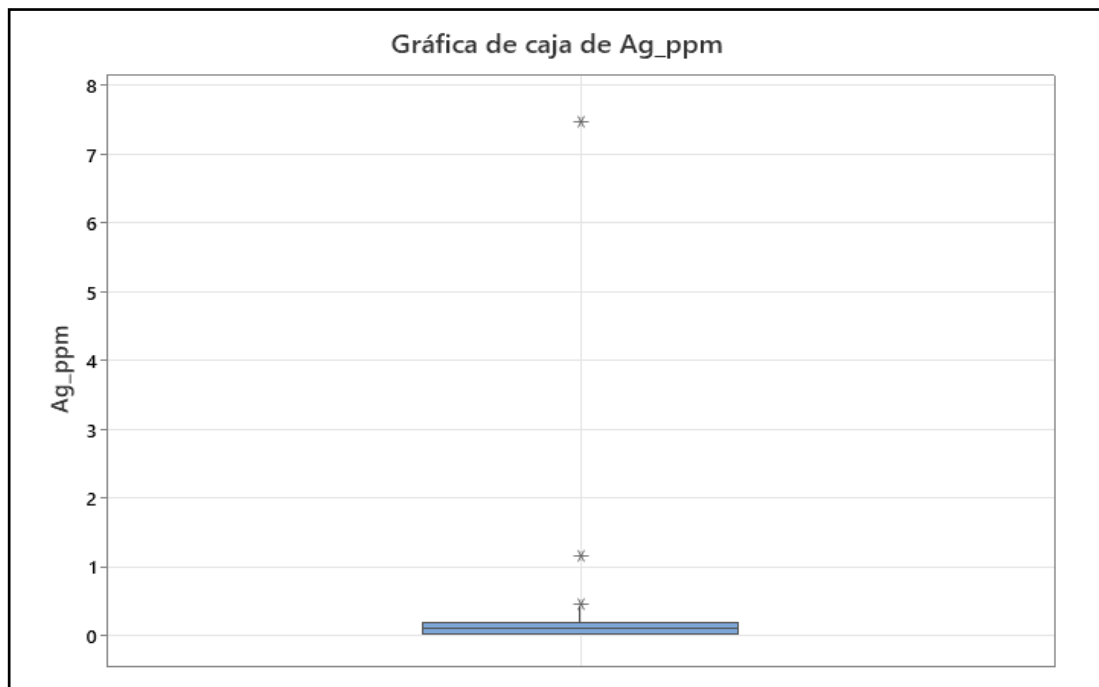
Fuente: Elaboración propia.

Boxplot del oro



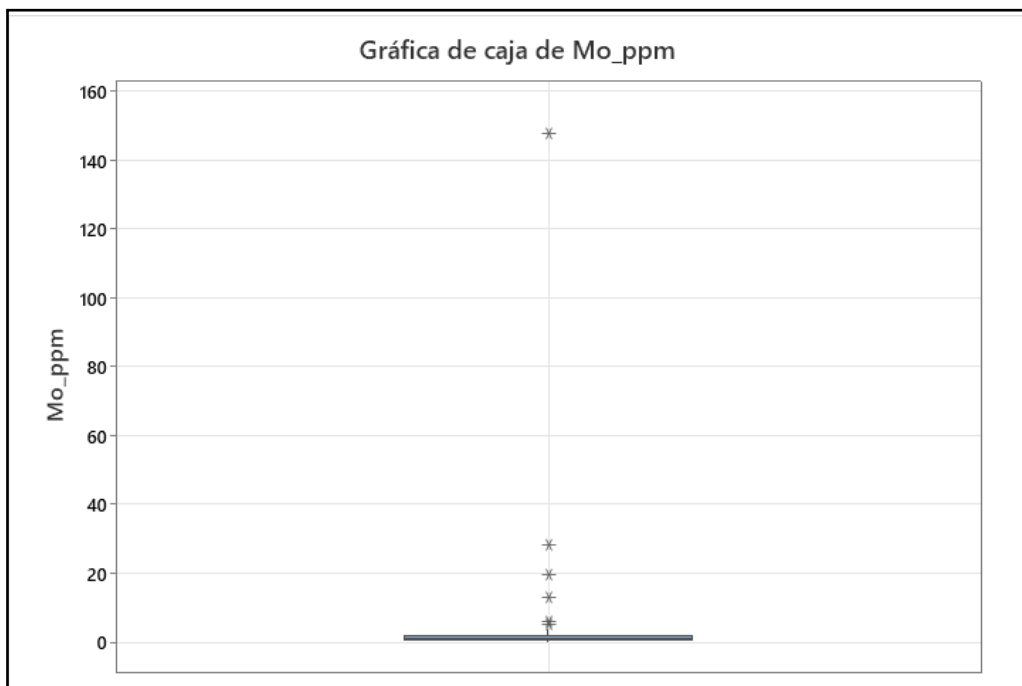
Fuente: Elaboración propia.

Boxplot de la plata



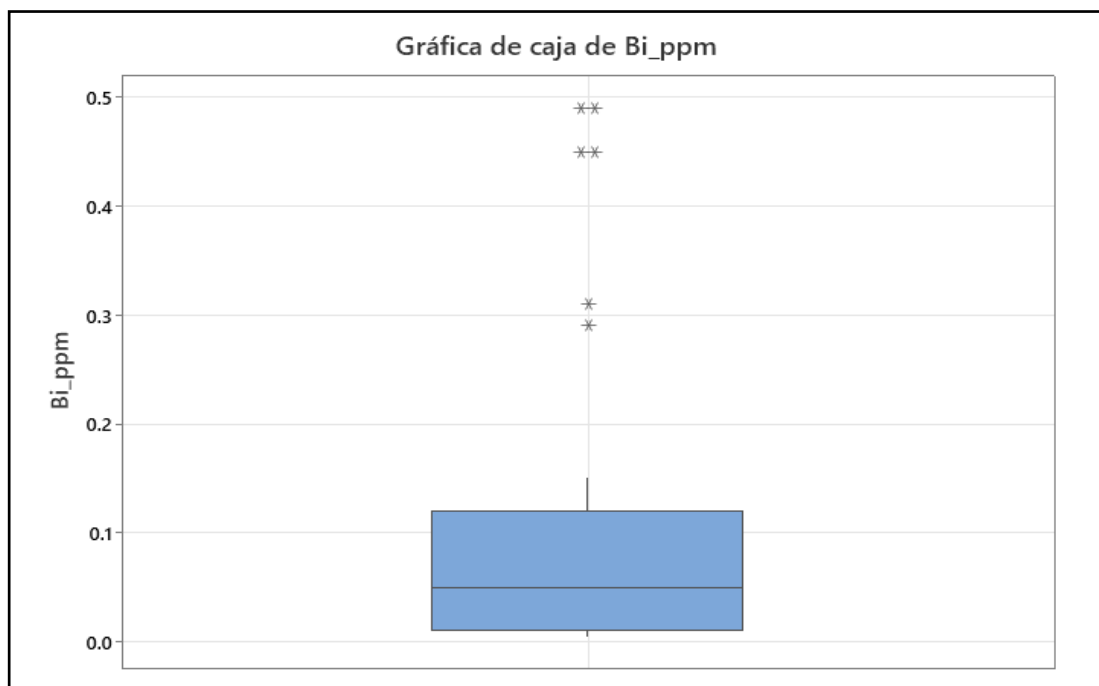
Fuente: Elaboración propia.

Boxplot del molibdeno



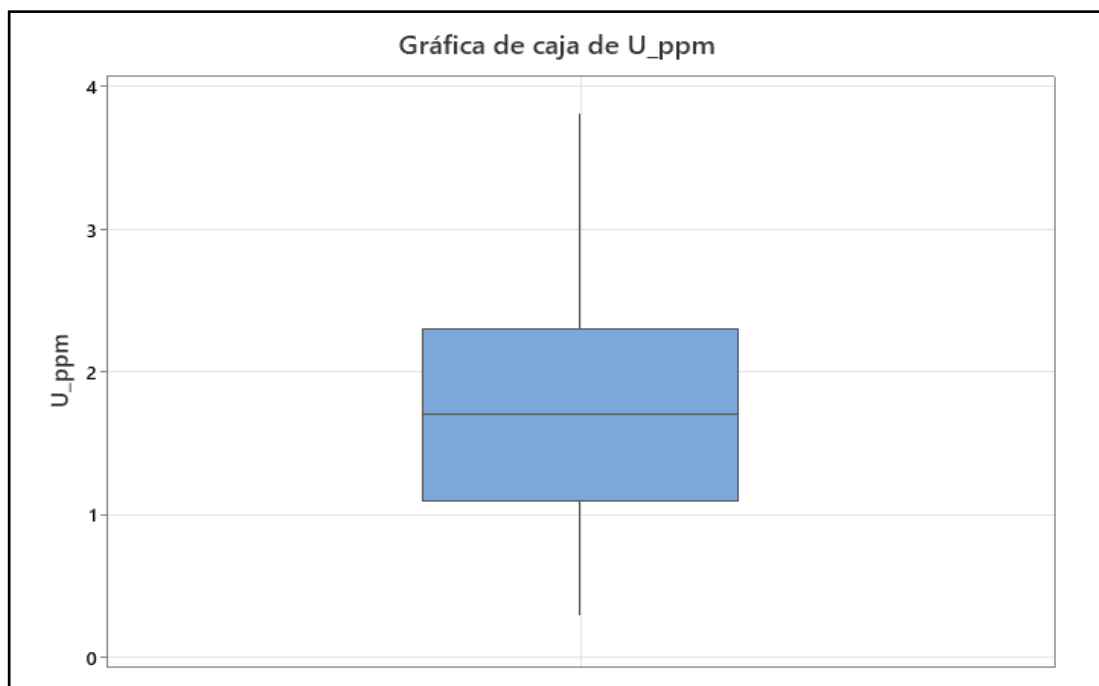
Fuente: Elaboración propia.

Boxplot del bismuto



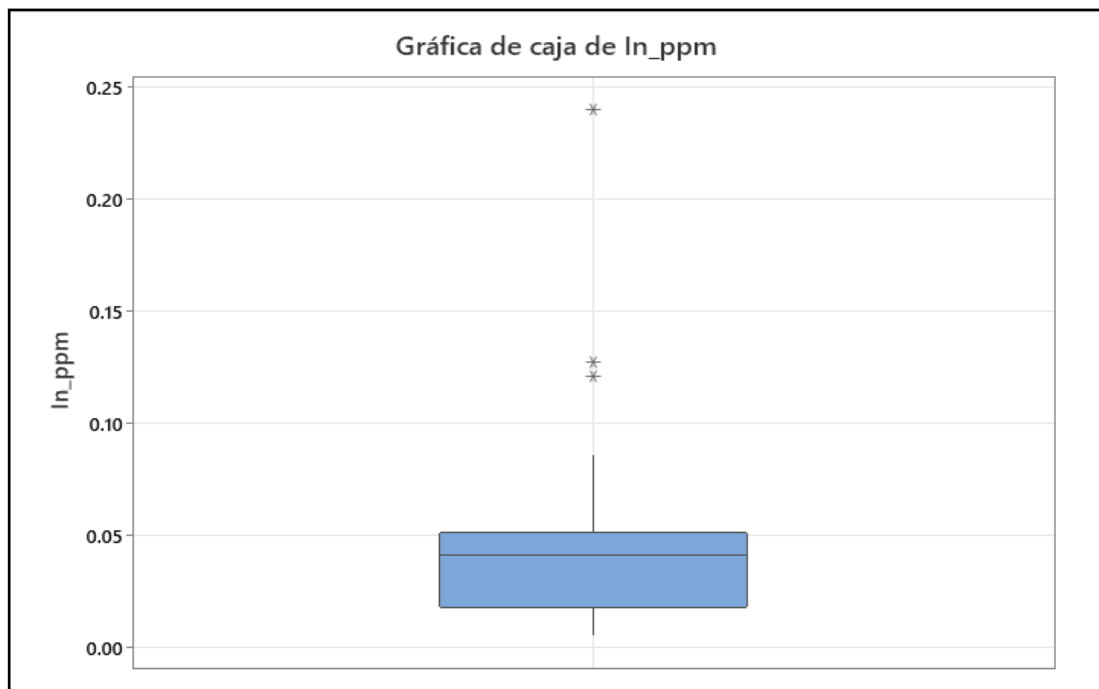
Fuente: Elaboración propia.

Boxplot del uranio



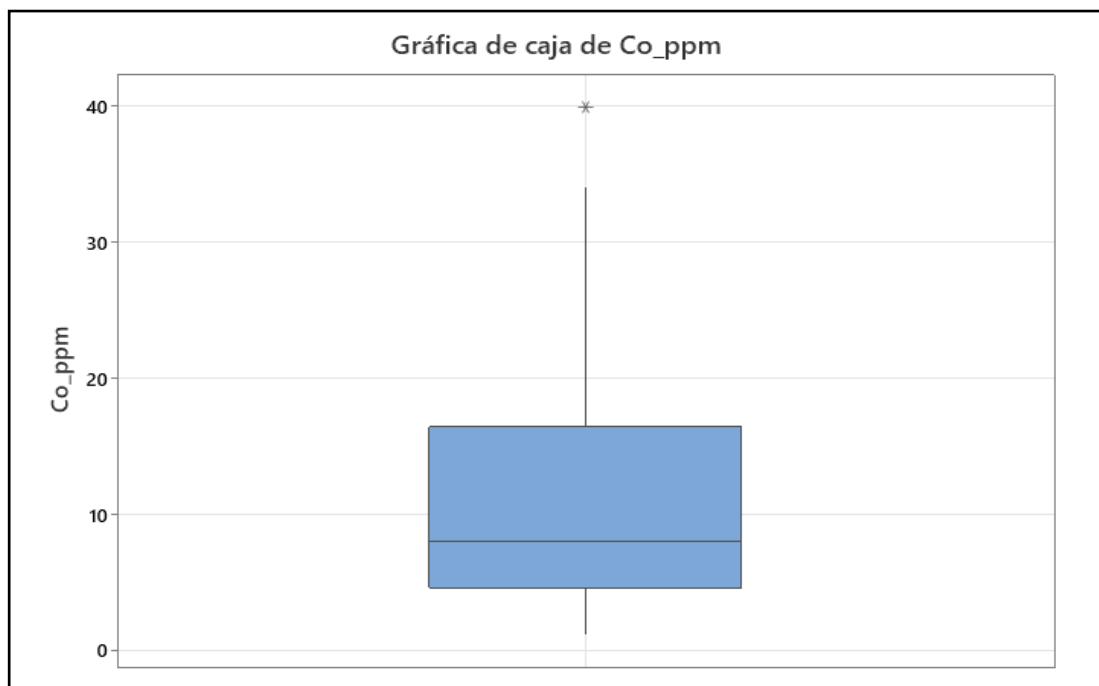
Fuente: Elaboración propia.

Boxplot del indio



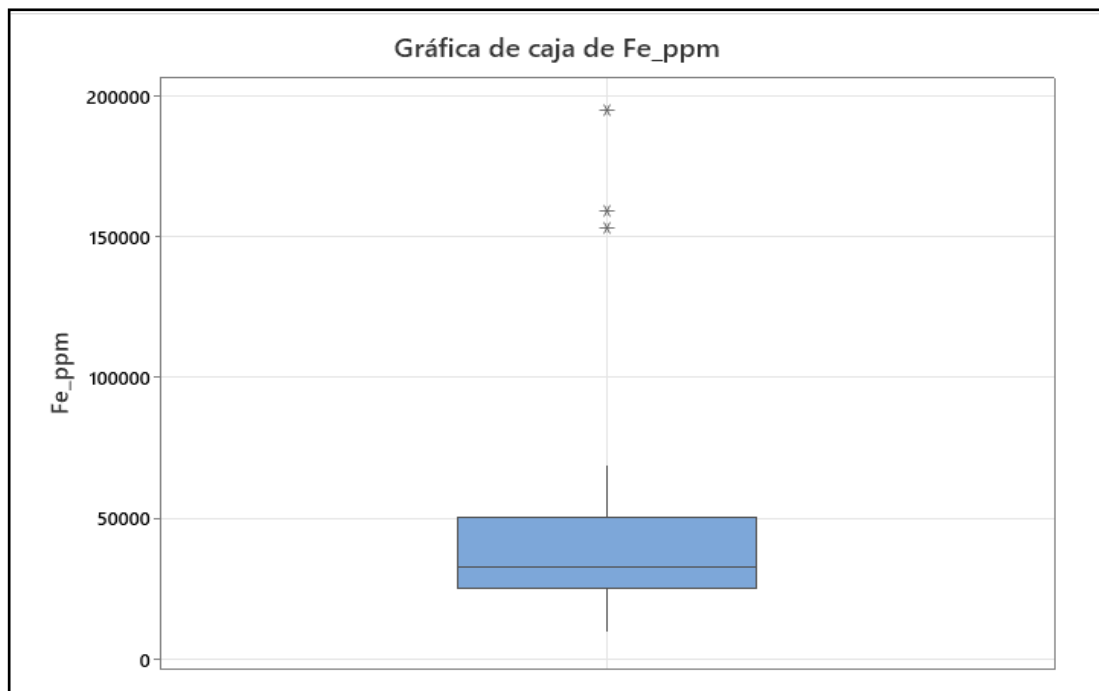
Fuente: Elaboración propia.

Boxplot del cobalto



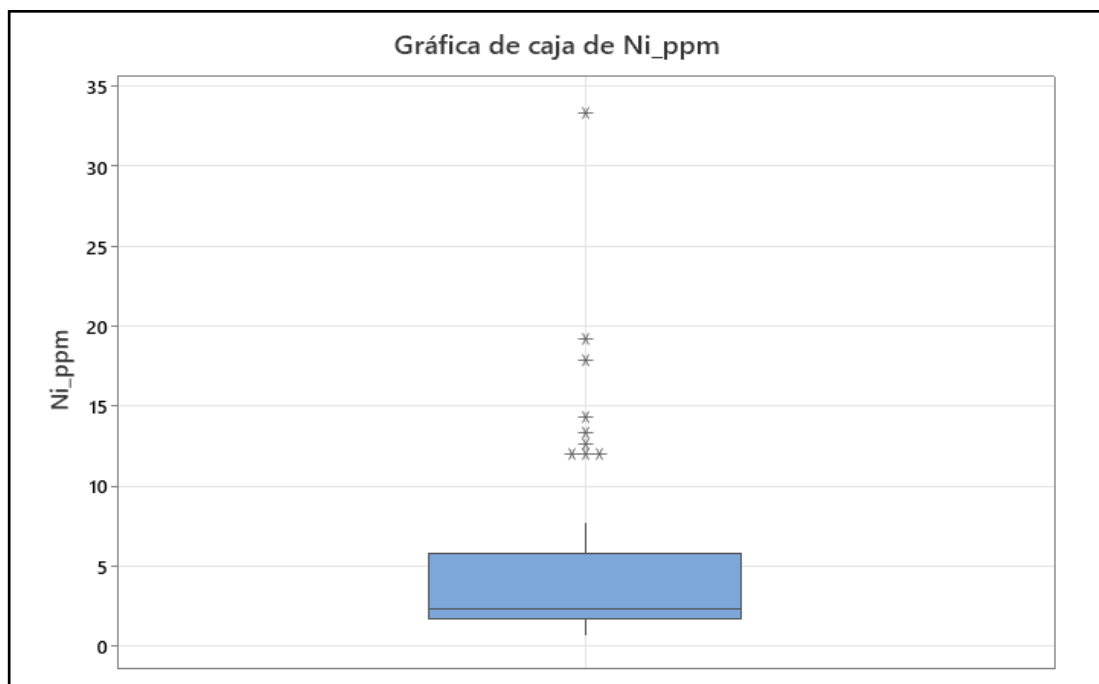
Fuente: Elaboración propia.

Boxplot del hierro



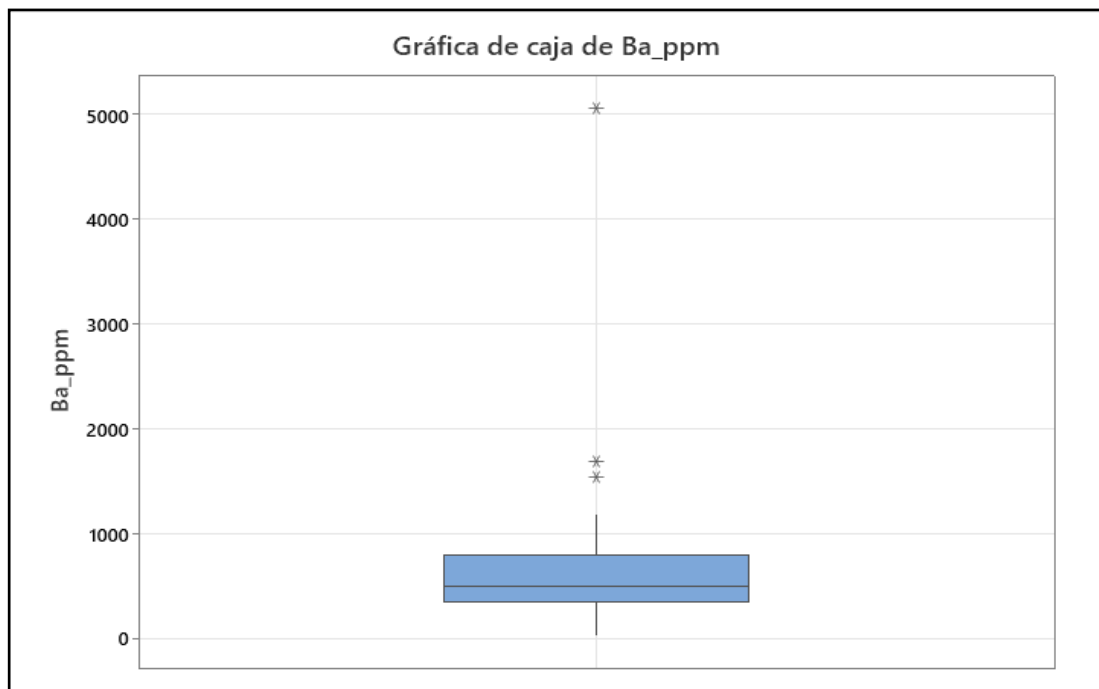
Fuente: Elaboración propia.

Boxplot del níquel



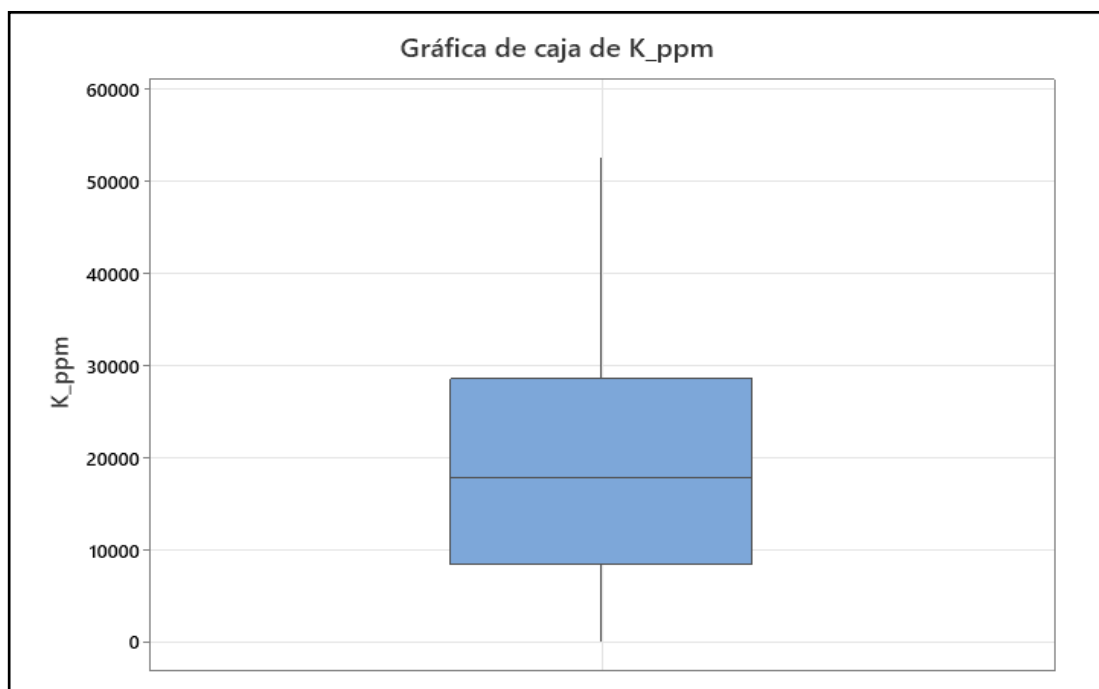
Fuente: Elaboración propia.

Boxplot del bario



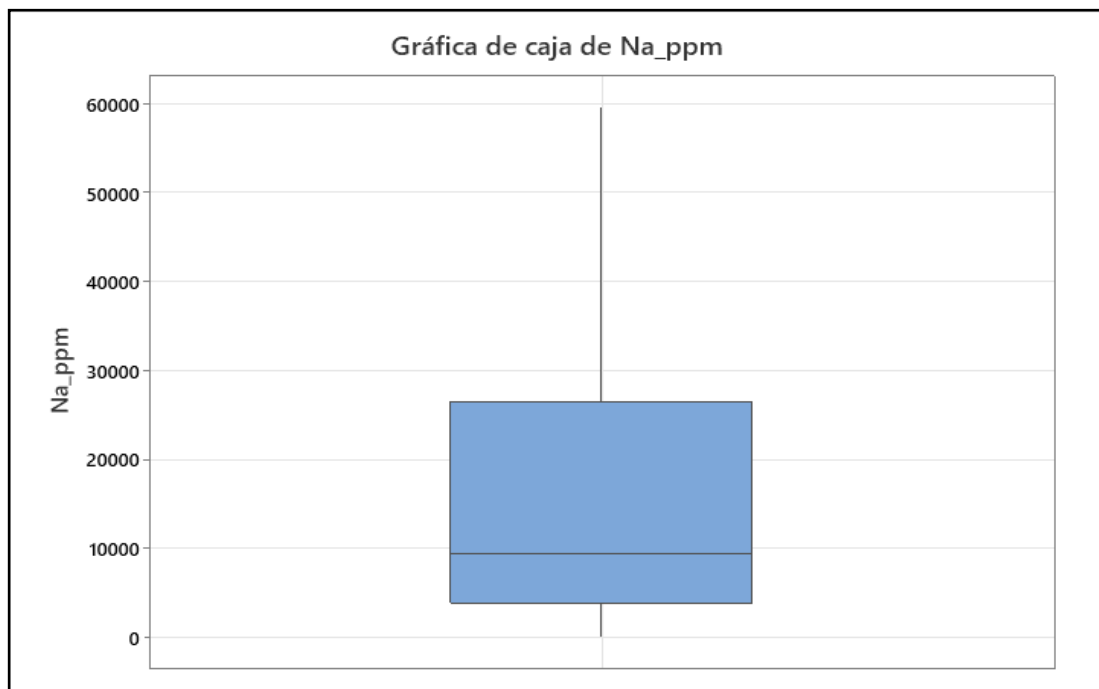
Fuente: Elaboración propia.

Boxplot del potasio



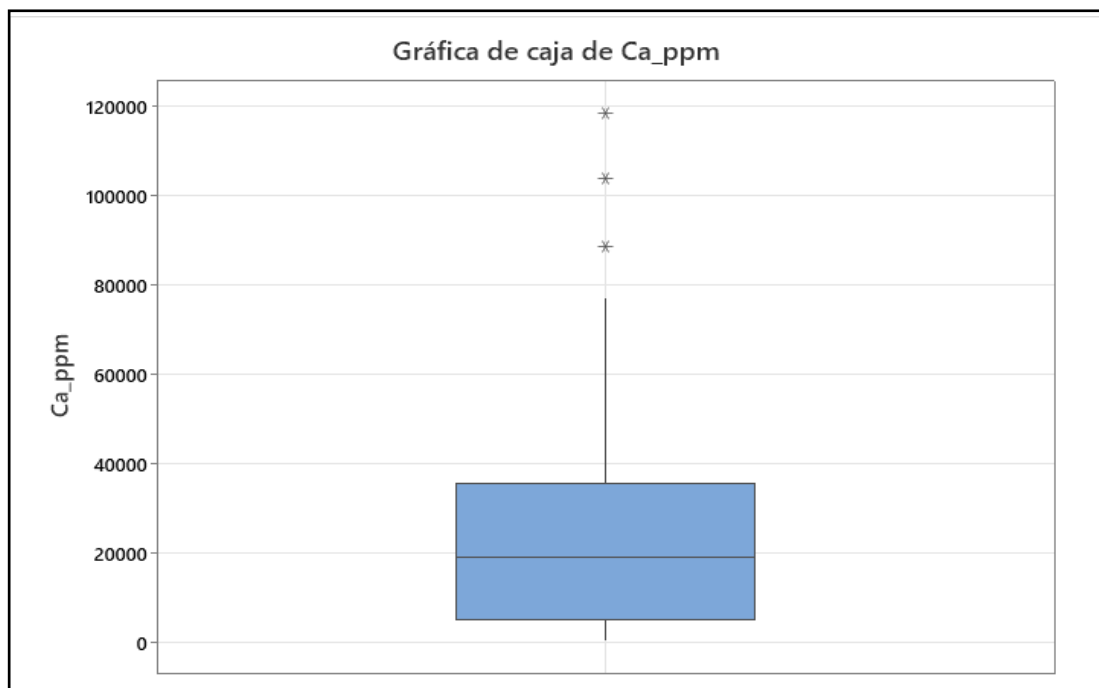
Fuente: Elaboración propia.

Boxplot del sodio



Fuente: Elaboración propia.

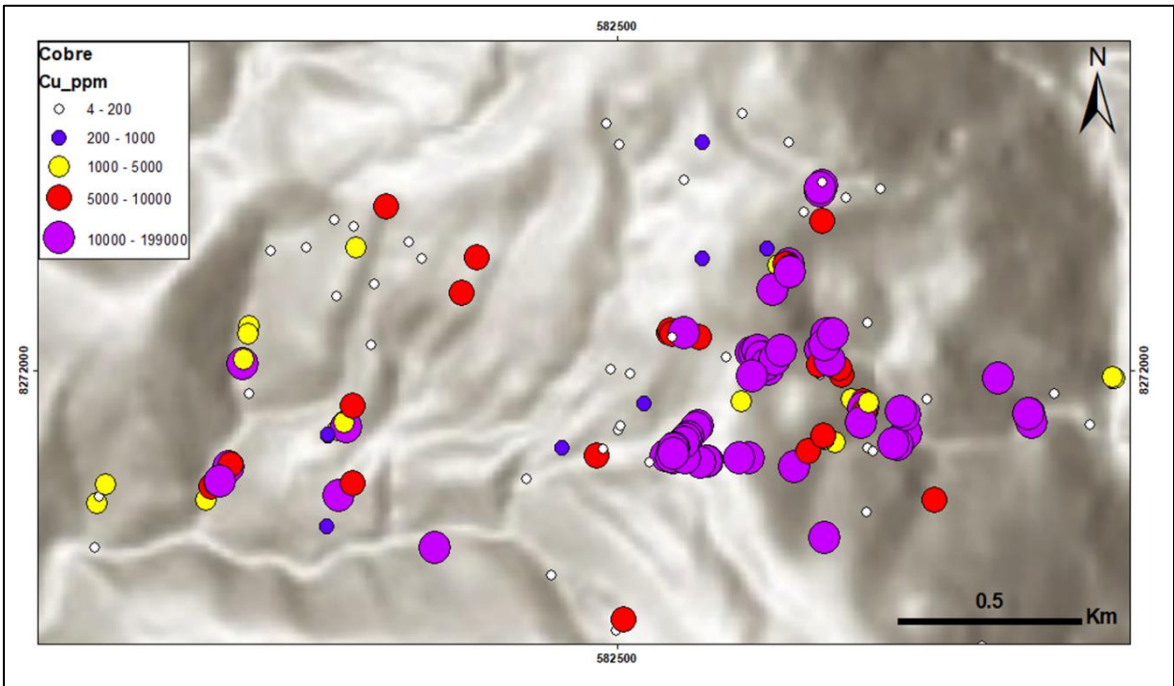
Boxplot del calcio



Fuente: Elaboración propia.

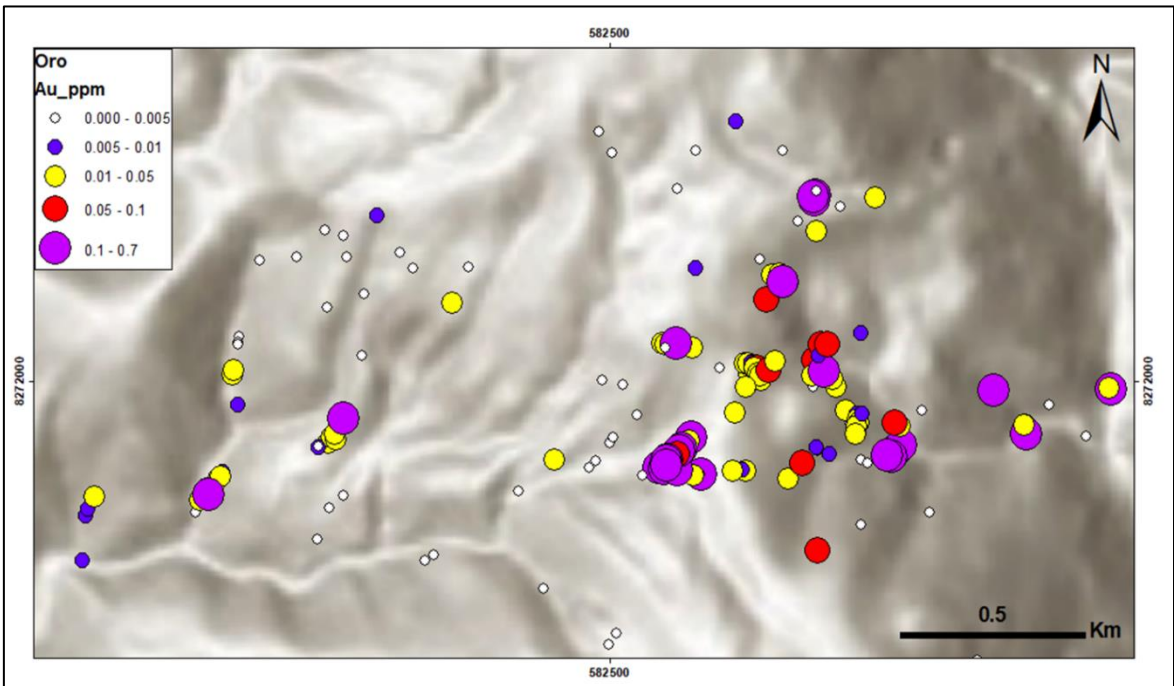
Anexo 5: Mapas de dispersión de los elementos asociados al proyecto Tosantos.

Mapa de dispersión del cobre



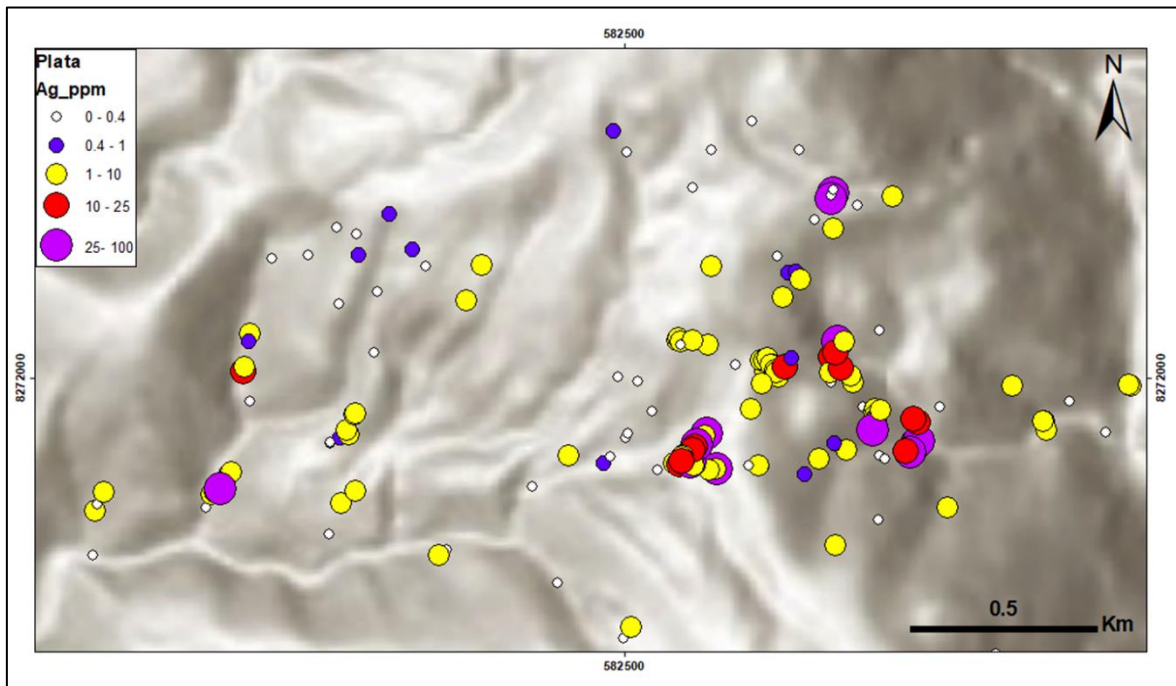
Fuente: Elaboración propia.

Mapa de dispersión del oro



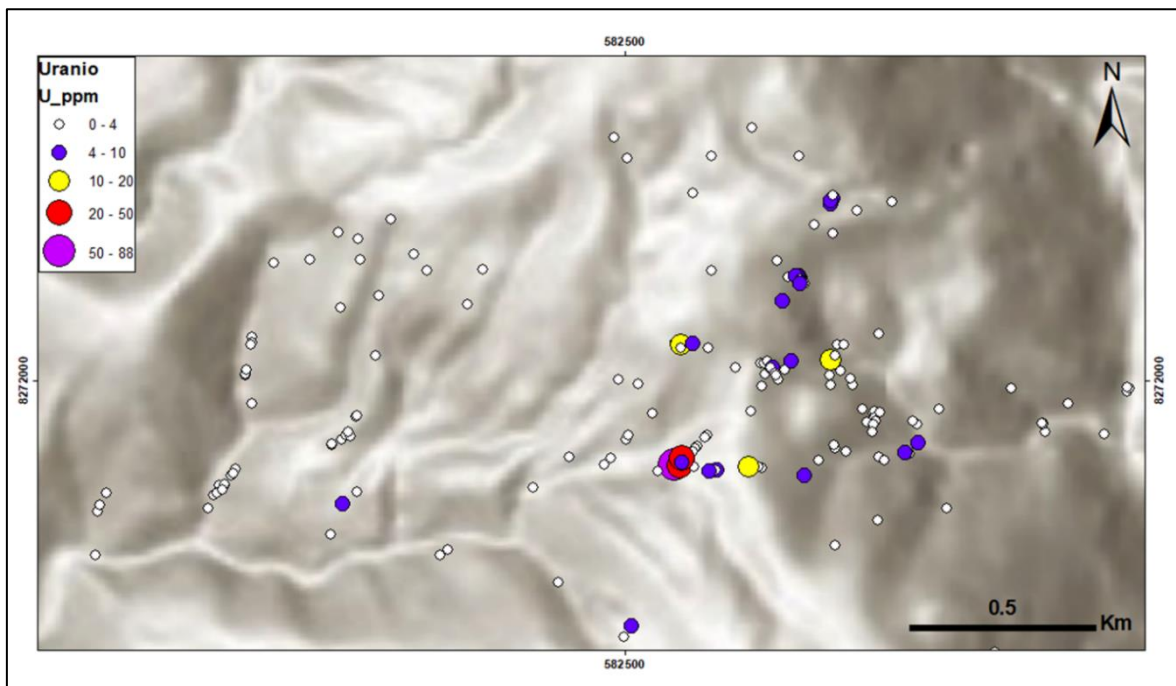
Fuente: Elaboración propia.

Mapa de dispersión de la plata



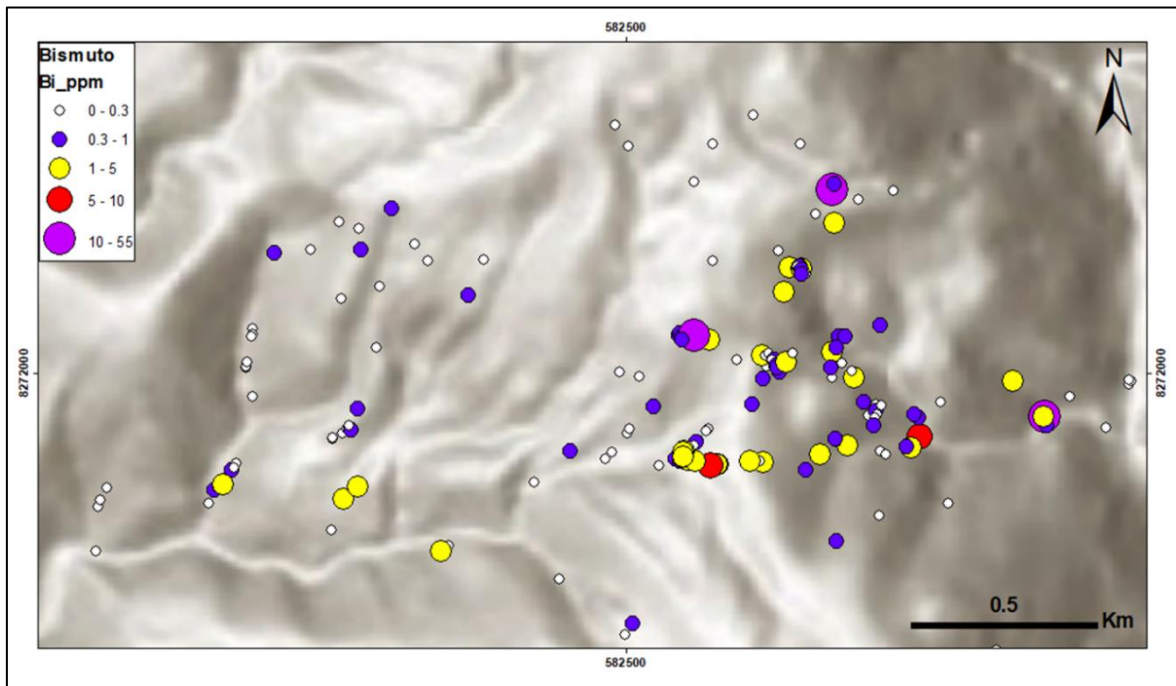
Fuente: Elaboración propia.

Mapa de dispersión del uranio



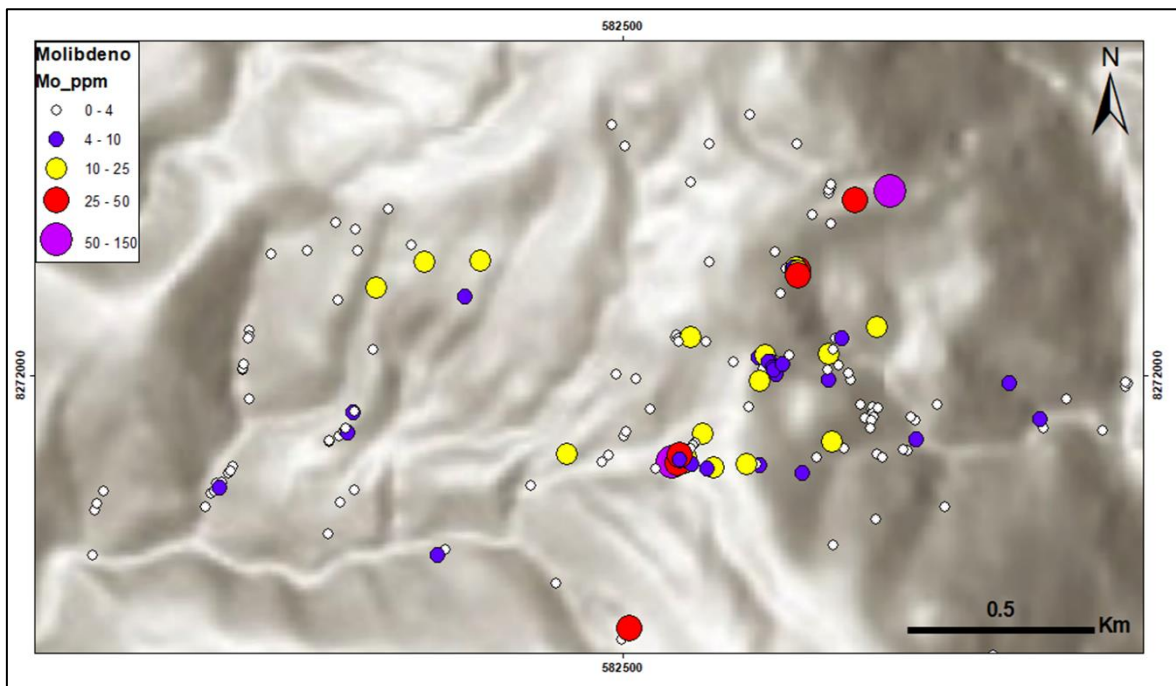
Fuente: Elaboración propia.

Mapa de dispersión del bismuto



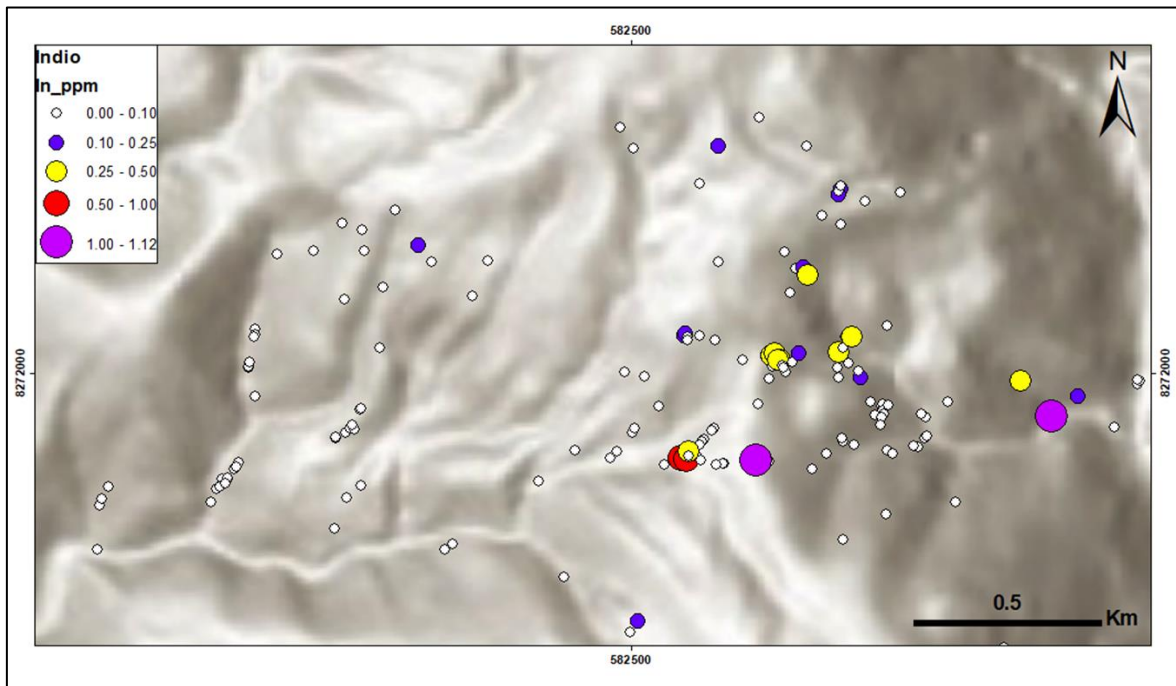
Fuente: Elaboración propia.

Mapa de dispersión del molibdeno



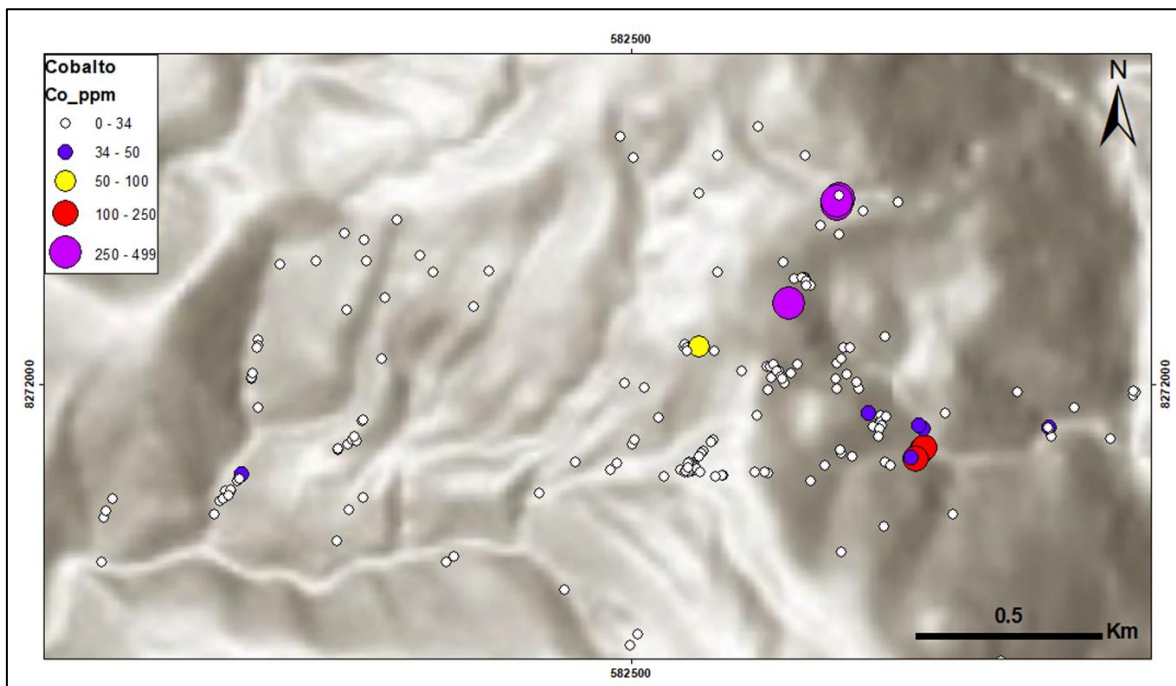
Fuente: Elaboración propia.

Mapa de dispersión del indio



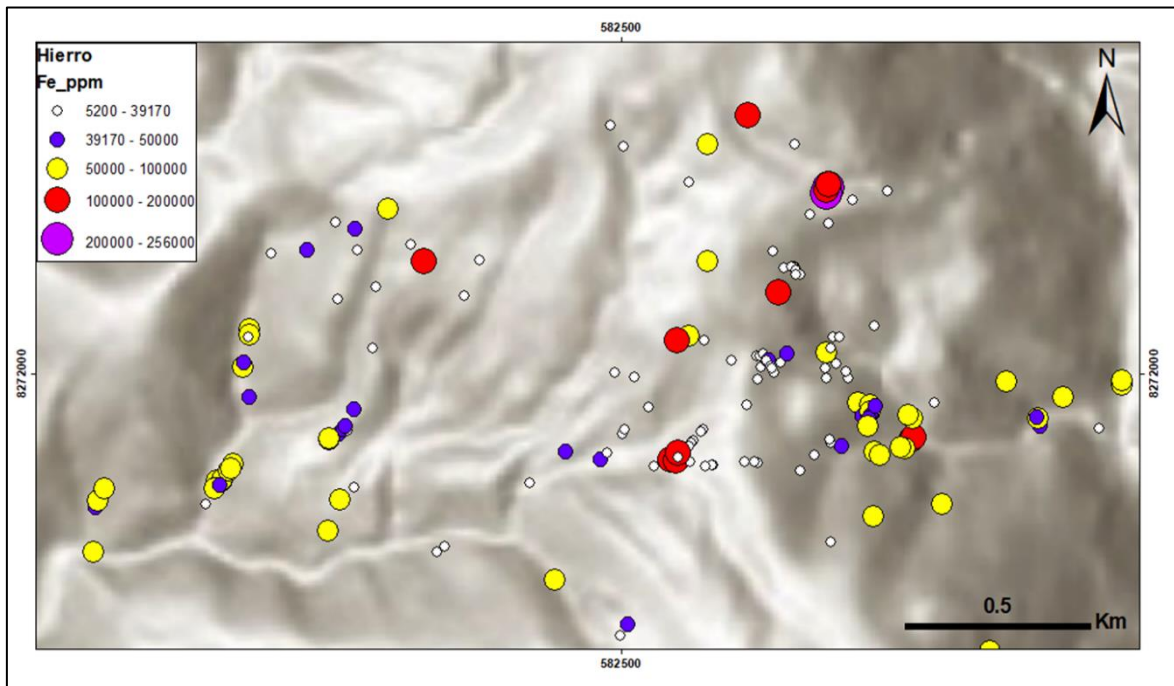
Fuente: Elaboración propia.

Mapa de dispersión del cobalto



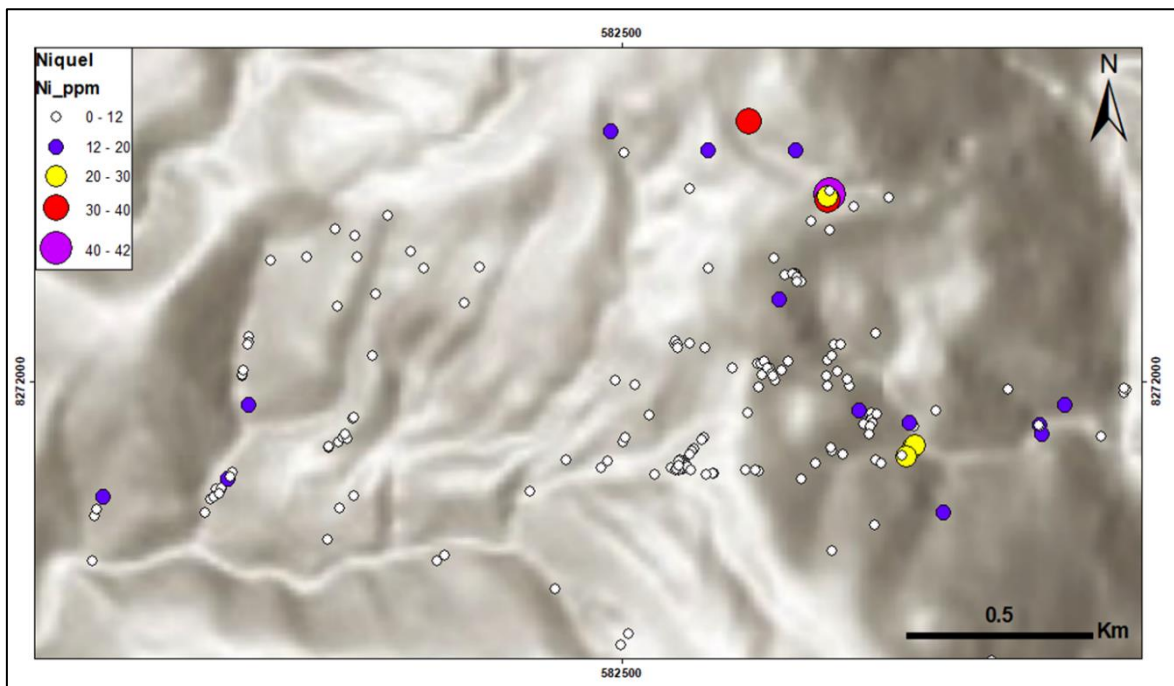
Fuente: Elaboración propia.

Mapa de dispersión del hierro



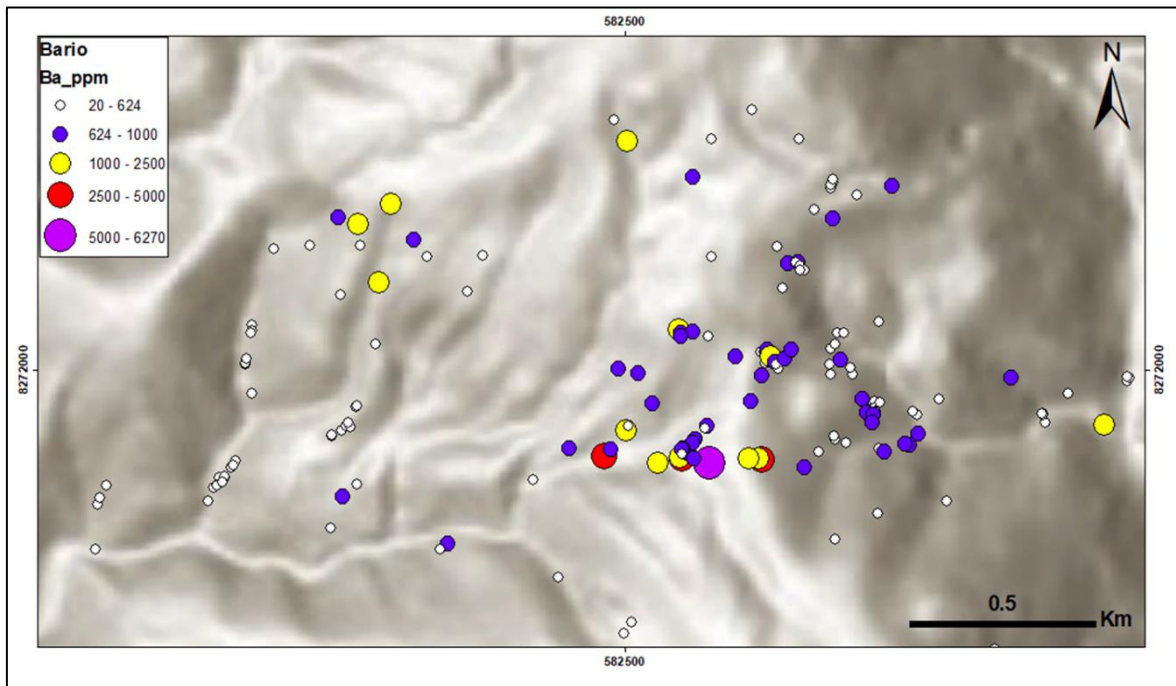
Fuente: Elaboración propia.

Mapa de dispersión del níquel



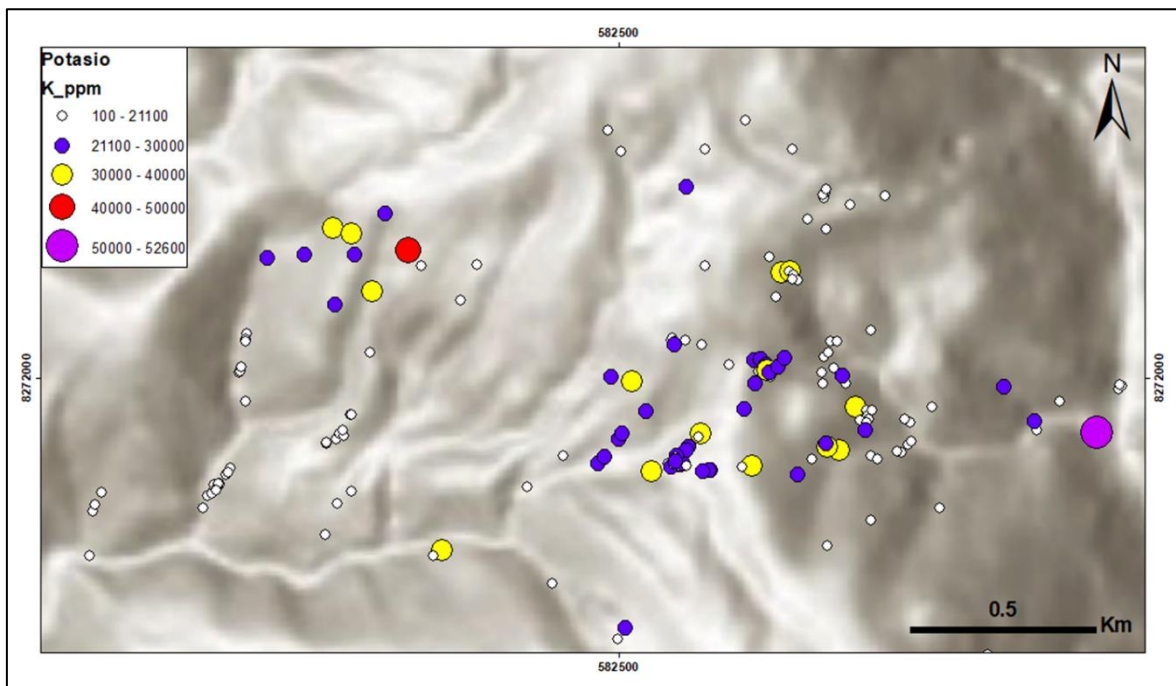
Fuente: Elaboración propia.

Mapa de dispersión del bario



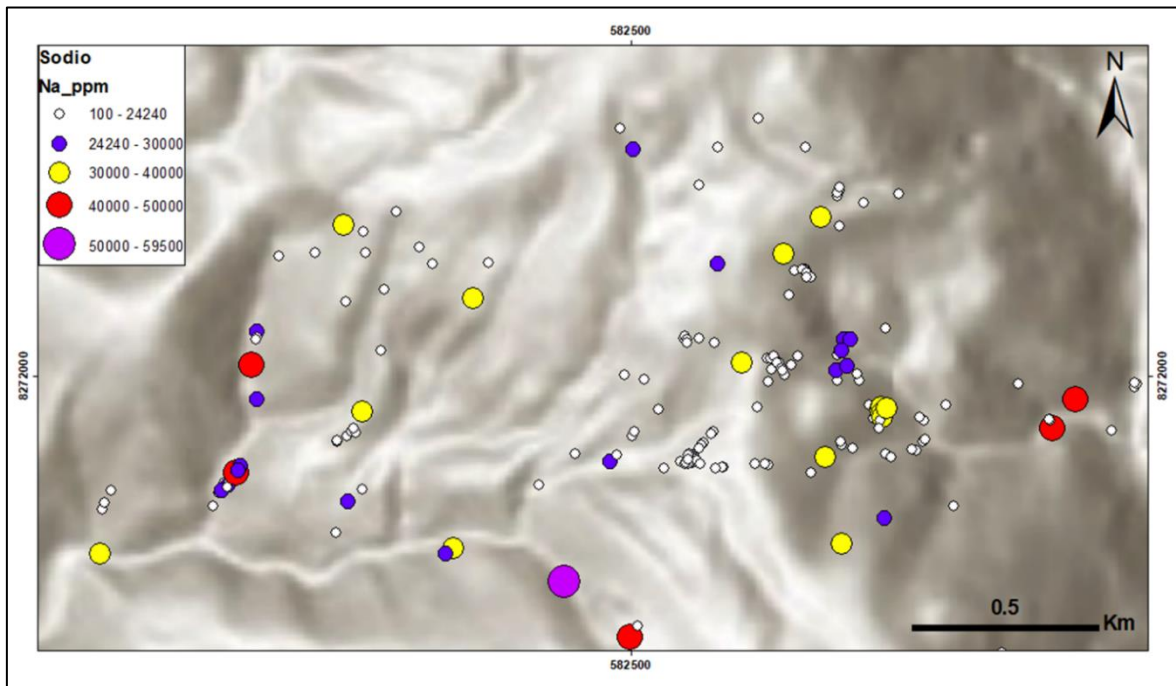
Fuente: Elaboración propia.

Mapa de dispersión del potasio



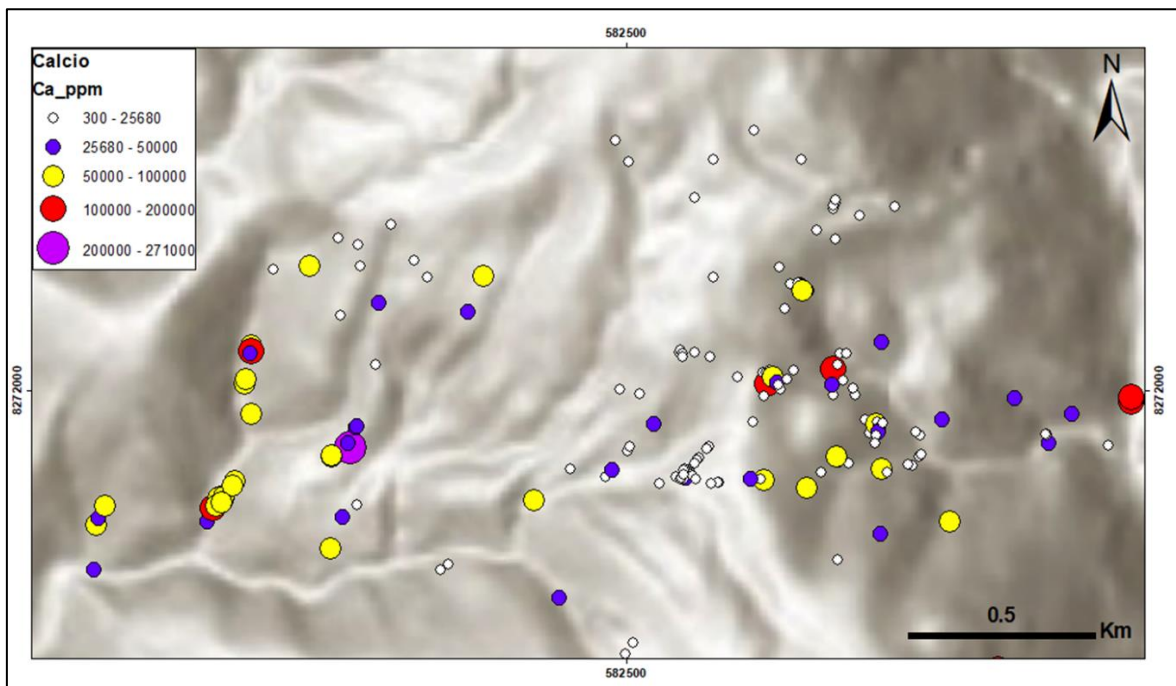
Fuente: Elaboración propia.

Mapa de dispersión del sodio



Fuente: Elaboración propia.

Mapa de dispersión del calcio



Fuente: Elaboración propia.