

Nuevas oportunidades de yacimientos minerales a partir del análisis integral de geoestadística, geoquímica y sensores remotos en cinturones metalogénicos del cenozoico: caso de estudio Cajamarca - La Libertad, Perú

Diego Alejandro Grajales Amado, Liliana Andrea Rodríguez Corredor

Director:

Julián David De Bedout Ordóñez

Geólogo candidato a MSc. Eng

Codirector:

BSc. Luis Miguel Romero Rincón

Geólogo

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físicoquímicas

Escuela de Geología

Bucaramanga, Santander

2021

Dedicatoria

Cuando comencé a avanzar en mi proyecto de vida, encontré algo muy valioso y fue el apoyo de muchas personas, pero en especial el de mis padres y mi hermano de forma incondicional, es por eso que a ellos les dedico la culminación de esta etapa.

A mi madre que siempre da hasta la última pizca de amor con el fin de que yo de cada paso que doy sea exitoso, al igual que mi padre para que cada uno de estos sea más grande que el anterior.

A mi hermano que nunca ha dudado en ofrecerme lo que está a su disposición para que no me detuviera.

A toda mi familia por los aportes dados en diversos aspectos de forma incondicional y desinteresada.

Finalmente, a aquellas personas que puedo llamar como mis amigos y que me han aportado en mi crecimiento para lograr mis objetivos.

Diego Alejandro Grajales Amado.

Dedicatoria

A mis padres por todo su esfuerzo en mi proceso educativo desde mi niñez hasta la actualidad, por el soporte económico brindado en cada una de las etapas, por la paciencia y la compañía en las madrugadas de estudio, por su amor incondicional.

A mis hermanos por el apoyo académico y emocional, por estar siempre al pendiente de cada cosa que necesitaba, por escuchar mis aventuras de campo, por alegrarse con mis victorias y tomarlas como suyas.

A ti mi Ale, por ser esa chispa de energía, por acompañarme desde el inicio de este camino emprendido, por sacar el tiempo para escucharme e intentar comprender las cosas de mi carrera, por creer en mis capacidades y recordármelas cada vez que lo veías necesario, por todo el amor y el cariño sincero.

A mi familia materna y paterna por acogerme como su hija en su momento, por su atención y preocupación constante por mi bienestar, por las tardes de almuerzo y el compartir en unión las alegrías.

Liliana Andrea Rodríguez Corredor.

Agradecimientos

“El todo es más que la suma de todas sus partes”

Aristóteles

Nuestro más sincero agradecimiento a la Universidad Industrial de Santander por todo el conocimiento y las oportunidades brindadas durante nuestra estadía en ella. A los docentes que hicieron parte en todo nuestro proceso de aprendizaje y nos transmitieron su amor por este camino de vida. A nuestro director Julián David De Bedout Ordóñez y codirector Luis Miguel Romero Rincón por el apoyo y el ánimo brindado en el proceso de elaboración del presente trabajo de investigación y finalmente a cada uno de nuestros compañeros por su acompañamiento y apoyo en cada etapa de la carrera.

Tabla De Contenido

Introducción.....	15
1. Objetivos.....	16
1.1. Objetivo General.....	16
1.2. Objetivos específicos	16
2. Marco teórico.....	17
2.1. Zona de estudio.....	17
2.2. Configuración Tectónica.....	18
2.3. Estratigrafía.....	20
2.4. Yacimientos Minerales	22
2.4.1. Depósitos de tipo epitermal	22
2.4.1.1. Epitermales de baja sulfuración.....	23
2.4.1.2. Epitermales de intermedia sulfuración.....	23
2.4.1.3. Epitermales de alta sulfuración.....	24
2.4.2. Depósitos de tipo pórfido.....	25
2.4.2.1. Zonas de alteración-mineralización	27
2.5. Geoestadística	34
2.5.1. Correlación de Pearson	34
2.5.1.1. Matriz de Correlación.....	35
2.5.2. Análisis Factorial	36
2.5.2.1. Analisis de Componentes Principales (PCA).....	37
2.5.3. Análisis Cluster.....	39

2.5.3.1. Métodos Jerárquicos	41
2.5.3.2. Métodos No Jerárquicos	42
2.6. Geoquímica	42
2.6.1. Clasificación de los elementos.....	43
2.6.2. Distribución de elementos en las rocas.....	45
2.6.2.1. Elementos mayores	45
2.6.2.2. Elementos menores	46
2.6.2.3. Elementos traza.....	46
2.6.3. Clasificación de las rocas ígneas en base al contenido de sílice (SiO₂).....	46
2.6.4. Clasificación de las rocas ígneas según la IUGS	48
2.6.5. Series magmáticas.....	51
2.6.6. Prospección geoquímica	52
2.7. Análisis de Teledetección	53
2.7.1. Influencia de la atmosfera en las longitudes de onda.....	55
2.7.2. Sensor ASTER	56
2.7.2.1. Subsistema Infrarrojo Visible y Cercano (VNIR).....	58
2.7.2.2. Subsistema Infrarrojo de Onda Corta (SWIR).....	58
2.7.2.3. Subsistema Infrarrojo Termal (TIR)	59
2.7.3. Nivel de data	60
2.7.3.1. Nivel 1A.....	61
2.7.3.2. Nivel 1B.....	61
2.7.4. Procesamiento de imágenes satelitales ASTER.....	61

2.7.4.1. Corrección Geométrica	62
2.7.4.2. Corrección Radiométrica	62
2.7.4.3. Corrección Atmosférica	63
2.7.4.4. Combinación de bandas	63
2.7.4.5. Cociente de bandas	63
2.7.4.6. Espectroscopia	64
3. Metodología.....	69
4. Resultados.....	71
4.1. Geoestadística y Geoquímica.....	71
4.2. Teledetección	99
5. Análisis, interpretación e integración de resultados	107
6. Conclusiones.....	119
7. Recomendaciones.....	121
Referencias.....	122

Listado De Figuras

Figura 1 Mapa de localización del área de estudio, entre los departamentos de Cajamarca y La Libertad.	17
Figura 2 Control estructural del NW de Perú.	19
Figura 3 Columna crono-litoestratigráfica de la zona de estudio.	21
Figura 4 Diagrama de correlación entre temperatura y fugacidad de azufre para los estados de sulfuración relativos de fluidos hidrotermales.	25
Figura 5 Configuración tectónica de depósitos de pórfidos de Cu y epitermales.	27
Figura 6 Patrón de zonificación de alteración-mineralización generalizada para los depósitos de pórfido de Cu.	28
Figura 7 Sección esquemática del modelo de yacimientos tipo pórfido, epitermales de alta y baja sulfuración.	32
Figura 8 Esquema de la composición mineralógica de las alteraciones hidrotermales.	33
Figura 9 Clasificación geoquímica de los elementos según goldschmidt.	44
Figura 10 Clasificación de las rocas ígneas según el contenido de sílice.	47
Figura 11 Clasificación de rocas ultramáficas.	48
Figura 12 Clasificación QAPF.	49
Figura 13 Clasificación química de las rocas volcánicas mediante el TAS.	50
Figura 14 Series subalcalina y alcalina sobre el diagrama TAS.	51
Figura 15 Espectro electromagnético.	54
Figura 16 Ventanas atmosféricas en el espectro electromagnético para las imágenes Aster.	56
Figura 17 Bandas operativas del instrumento Aster.	57
Figura 18 Características espectrales de minerales en los subsistemas de VNIR y SWIR del sensor ASTER.	59
Figura 19 Características espectrales de minerales en el subsistema de TIR del ASTER.	60
Figura 20 Interacciones básicas entre la energía electromagnética y la superficie terrestre	64
Figura 21 Componentes de una firma espectral.	66
Figura 22 Firmas espectrales de minerales identificadores de alteraciones hidrotermales.	67
Figura 23 Firmas espectrales de minerales identificadores de alteraciones hidrotermales (2).	68
Figura 24 Proceso metodológico de análisis del área de estudio.	70

Figura 25 <i>Gráfico de intervalos del 95% de confianza de la media de todos los elementos.</i>	72
Figura 26: <i>Resumen de geoestadística descriptiva aplicada a los elementos traza seleccionados, clasificados y transformados post-normalización</i>	74
Figura 27 <i>Dendograma evaluando similaridad por método de enlace completo de elementos traza</i>	75
Figura 28 <i>Matriz de correlación de coeficientes de correlación de Pearson.</i>	76
Figura 29 <i>Diagrama de cajas y bigotes de los elementos traza</i>	77
Figura 30 <i>Histogramas de los elementos traza seleccionados. Los elementos se encuentran dispuestos según la clasificación realizada en el dendograma.</i>	78
Figura 31 <i>Histograma de elementos traza normalizados por logaritmo natural. Los elementos se encuentran dispuestos según la clasificación realizada en el dendograma.</i>	79
Figura 32 <i>Valor de umbrales y sus colores para mapas geoquímicos de distribución de elementos.....</i>	81
Figura 33 <i>Mapas de distribución geoquímica de elementos traza As, Sb, Pb, Ag.</i>	82
Figura 34 <i>Mapas de distribución geoquímica de elementos traza Bi, Tl, Mo, Cu.</i>	83
Figura 35 <i>Mapas de distribución geoquímica de elementos traza Zn, Cd, Sn, Au.</i>	84
Figura 36 <i>Mapas de distribución geoquímica de elementos traza Th, U, Ni, Be</i>	85
Figura 37 <i>Mapas de distribución geoquímica de elementos traza Sr, V, Sc, Ga.</i>	86
Figura 38 <i>Mapas de distribución geoquímica de elementos traza Hf, Zr, Y, Lu.</i>	87
Figura 39 <i>Mapas de distribución geoquímica de elementos traza Ce, La, C, Mn.</i>	88
Figura 40 <i>Mapas de distribución geoquímica de elementos traza Li, Ba, Cs, Rb.</i>	89
Figura 41 <i>Diagrama de componentes principales</i>	90
Figura 42 <i>Componentes principales convertidos mediante la transformación logarítmica centrada (clr)</i>	91
Figura 43 <i>Componentes principales convertidos mediante la transformación logarítmica centrada (clr) (2).....</i>	92
Figura 44 <i>Curva de % de varianza explicada acumulada Vs Componentes principales</i>	93
Figura 45 <i>Relación entre los 15 PCA seleccionados y los elementos con información más representativa.</i>	94
Figura 46 <i>Asociaciones de elementos de los 15 PC.....</i>	95

Figura 47 <i>Ejemplo de proceso de mapeo de cuartiles con las asociaciones mineralógicas relacionadas a la plata</i>	97
Figura 48 <i>Mapa de cuartiles de Cluster 1.1, Oro, Plata</i>	98
Figura 49 <i>Metodología a seguir para el análisis de sensores remotos</i>	99
Figura 50 <i>Características generales de imágenes satelitales ASTER</i>	100
Figura 51 <i>Imágenes ASTER utilizadas</i>	101
Figura 52 <i>Alteraciones minerales y ensambles mineralógicos</i>	103
Figura 53 <i>Sistemas minerales asociados a diferentes tipos yacimientos minerales</i>	104
Figura 54 <i>Ejemplo de metodología a seguir</i>	104
Figura 55 <i>Delimitación de zonas de yacimientos minerales mediante el análisis de firmas espectrales</i>	106
Figura 56 <i>Comparación de zonas de interés mineral del cuartil del clúster 1.1 y las anomalías halladas con teledetección</i>	107
Figura 57 <i>Mapa geológico con 6 zonas de anomalías (cuadros magenta) producto de la integración de resultados de los análisis de geoquímica, geoestadística y sensores remotos</i> ..	108
Figura 58 <i>Cocientes de bandas de alteración argílica avanzada, alteración argílica a filica, y óxidos e Hidróxidos de hierro</i>	109
Figura 59 <i>Índices del SWIR OH1a, OH1b y ALÍ</i>	109
Figura 60 <i>Mapa de la anomalía 1</i>	110
Figura 61 <i>Mapa de la anomalía 2</i>	112
Figura 62 <i>Mapa de la anomalía 3</i>	114
Figura 63 <i>Mapa de la anomalía 4</i>	115
Figura 64 <i>Mapa de la anomalía 5</i>	117
Figura 65 <i>Mapa de la anomalía 6</i>	118

Lista de abreviaturas

AF: Análisis Factorial.

AFC: Análisis factorial confirmatorio.

AFE: Análisis factorial exploratorio.

ASTER: Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer.

FM: Formación.

GRP: Grupo

HSE: High Sulfidation Epithermal.

IUGS: Unión Internacional de Ciencias Geológicas.

LN: Logaritmo natural.

LSF: Low Sulfidation Epithermal.

METI: Ministerio de Economía, comercio e industria.

NASA: National Aeronautics and Space Administration.

NDVI: Normalized Difference Vegetation Index.

NDWI: Normalized Difference Water Index.

NDSI: Normalized Difference Snow Index.

PCA: Principal Component Analysis.

PC: Principal Component

PPM: Partes por millón.

SWIR: Short Wave Infrared.

TIR: Thermal Infrared.

USGC: Servicio geológico de los Estados Unidos.

VNIR: Visible and Near Infrared.

Resumen

Título: Nuevas oportunidades de yacimientos minerales a partir del análisis integral de geoestadística, geoquímica y sensores remotos en cinturones metalogénicos del cenozoico: caso de estudio Cajamarca - La Libertad, Perú *

Autores: Diego Alejandro Grajales Amado** y Liliana Andrea Rodríguez Corredor**

Palabras Clave: Pórfidos, Epitermales, Prospección, Anomalías, Elementos Traza, Aster.

Descripción: En respuesta a las adversidades económicas producto del Covid-19 es necesario aumentar las oportunidades de adquisición de recursos, en este caso recursos minerales. Perú, al estar ubicado en la zona de subducción de la cordillera de los Andes, tiene una posición estratégica para la formación de yacimientos minerales, por lo tanto, con esta se puede solventar las dificultades en la situación económica mediante la explotación de estos.

En la franja metalogénica XXI se encuentra un área de interés entre los departamentos de Cajamarca y La Libertad la cual es estudiada en el presente documento a través del análisis integral de geoestadística y geoquímica mediante las bases de datos de sedimentos activos proporcionadas por el instituto geológico, minero y metalúrgico del Perú (INGEMMET) y sensores remotos aplicados a imágenes ASTER tipo LIB obtenidas del servicio geológico de los Estados Unidos (USGS). Como resultado final se obtienen seis zonas con potencial de sistemas minerales, las cuales finalmente se estudiaron a detalle de manera individual mediante alteraciones hidrotermales, índices del SWIR, y análisis del comportamiento estructural y geológico.

Las técnicas aplicadas son diversas, tales como control de calidad, geoestadística descriptiva, geoestadística inferencial, transformaciones y regresiones de distribuciones, análisis de índices atípicos, análisis de firmas espectrales, cruce de bandas en imágenes satelitales e interpretación de geología y lineamientos.

*Proyecto de grado en modalidad de trabajo de investigación.

**Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de *Geología*. Director: Julián David De Bedout Ordóñez. Codirector: Luis Miguel Romero Rincón

Abstract

Title: New opportunities for Ore deposits from the geostatistics, geochemistry and remote sensing integral analysis on Cenozoic Metallogenic Belt. Cajamarca – La Libertad study case, Perú*.

Authors: Diego Alejandro Grajales Amado** y Liliana Andrea Rodríguez Corredor**

Keywords: Porphyry, Epithermal, Prospecting, Anomalies, Trace Elements, Aster,

Description: In response to the economic adversities resulting from Covid-19, it is necessary to increase opportunities for acquiring resources, so in this case mineral resources. Peru, being located in the subduction zone of the Andes mountain belt, has a strategic position for the formation of ore deposits, therefore can solve the difficulties of economic situation with exploitation of mineral resources.

In the metallogenic belt XXI there is an area of interest between the departments of Cajamarca and La Libertad which is studied in this document through the integral analysis of geostatistics and geochemistry using stream sediment databases provided by the Geological, Mining and Metallurgical Institute of Peru (INGEMMET) and remote sensing applied to ASTER LIB type images obtained from the United States Geological Survey (USGS). As a final result, six zones with potential mineral systems are found, were finally studied in detail individually by means of hydrothermal alterations, SWIR indices, and analysis of structural and geological behaviour.

The techniques applied are diverse, such as quality control, descriptive geostatistics, inferential geostatistics, distribution transformations and regressions, outlier analysis, spectral signature analysis, cross-banding of Aster satellite images and lineament interpretation.

*Degree project, research work.

**Industrial University of Santander. Physicochemical Engineering Faculty. Geology School. Thesis Director: Julián David De Bedout Ordóñez. Codirector: Luis Miguel Romero Rincón.

Introducción

La crisis económica a nivel mundial producto del Covid-19 pone al mercado de los metales en la mira para el proceso de reactivación, la industria minero-energética ha demostrado a lo largo de los años ser un eje fundamental en el sector socioeconómico, es aquí donde entra la necesidad de establecer zonas de potencial de depósitos minerales y con ello dar pie a nuevas oportunidades.

Perú debido a su localización en la zona de subducción en la cordillera de los Andes, es uno de los países con mayor riqueza mineral en Sur América. Su economía tiene como base la industria minera de polimetálicos. Los proyectos de explotación de minerales como oro, plata, cobre, zinc, plomo, entre otros, lo han llevado a la cima en el mercado mundial de este sector. La explotación ha traído gran cantidad de información geológica y por ende mayor conocimiento científico del país. Se han establecido 23 franjas metalogénicas en base a los sistemas de fallas y épocas de mineralizaciones, esta clasificación también se realiza tomando como referencia los tonelajes que se producen en las minas activas en el país.

El identificar y delimitar una zona con riqueza mineral es un buen elemento pues entre más seguro se esté del área que se va a explotar la localización de recursos económicos de interés será mejor y en paso a esto se define si el proyecto es óptimo o no para su realización.

Con este proyecto se delimita mediante la recolección y análisis de datos geoquímicos e imágenes satelitales, zonas de concentración mineral de parte de la zona NW de la franja metalogénica XXI del Perú y finalmente se establece el potencial de yacimientos minerales.

1. Objetivos

1.1. Objetivo General

Encontrar nuevas oportunidades de yacimientos minerales a partir del análisis integral de geoestadística, geoquímica y sensores remotos en cinturones metalogénicos del cenozoico entre las regiones de Cajamarca y La Libertad, Perú.

1.2. Objetivos específicos

Reconocer mediante imágenes satelitales las alteraciones hidrotermales que permitan identificar posibles yacimientos minerales de interés.

Interpretar los datos de sedimentos activos y la química de las rocas que proporciona el INGEMET para identificar y delimitar las zonas de interés.

Detallar lineamientos y demás características fotogeológicas que permitan distinguir la formación de los diferentes tipos de depósitos minerales.

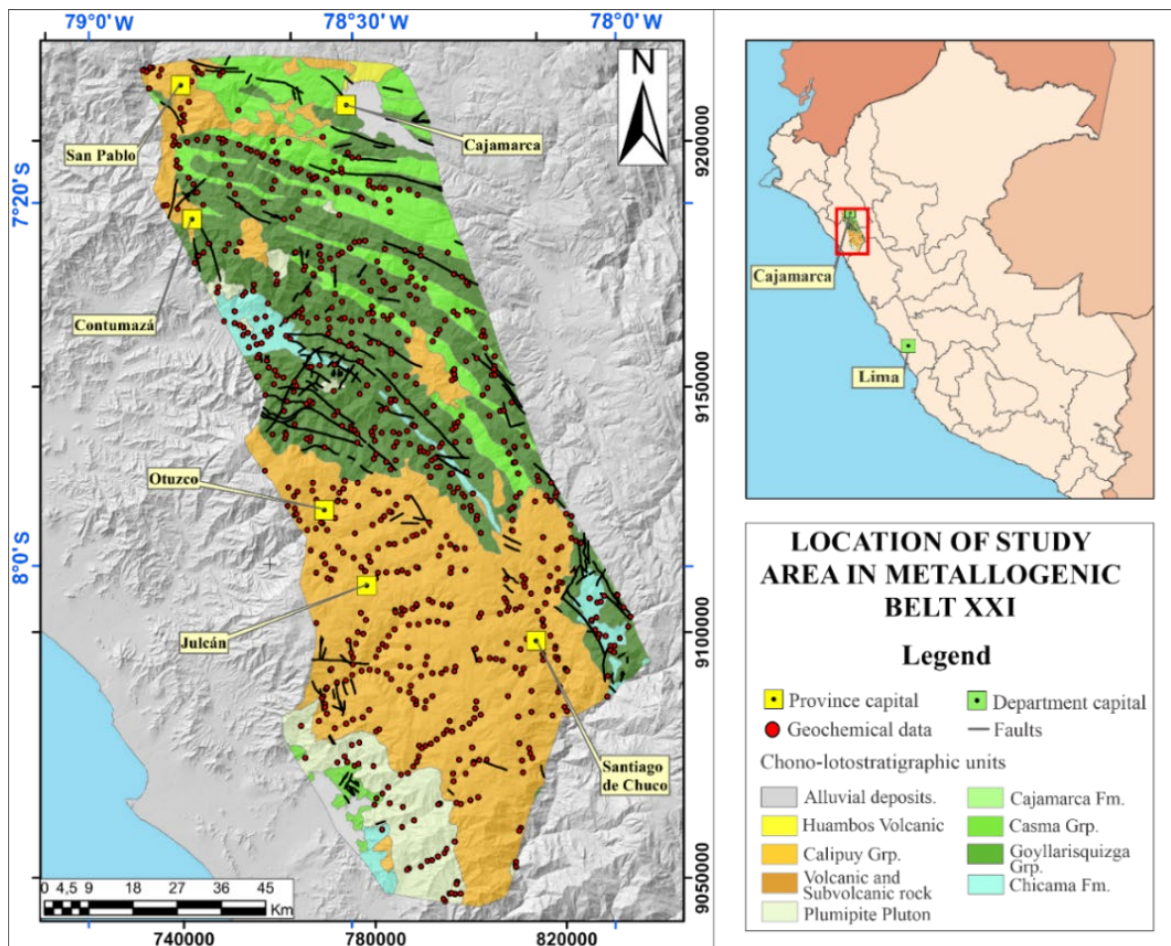
2. Marco teórico

2.1. Zona de estudio

El área de análisis se encuentra ubicada sobre la Cordillera occidental de los Andes, al Noroeste del Perú, en los departamentos de Cajamarca y La Libertad dentro de la franja metalogénica XXI (Fig. 1).

Figura 1

Mapa de localización del área de estudio, entre los departamentos de Cajamarca y La Libertad.



Nota. Se presenta la geología general escala 1:1000000 y la masa de datos geoquímicos disponibles para el análisis.

La zona presenta un dominio volcano-sedimentario y estructuralmente está controlada al norte por un sistema de fallas con comportamiento NO-SE, que al sur varía en sentido ONO – ESE (**Fig. 1**), los cambios de direcciones están asociados a la deflexión de Cajamarca (Navarro, 2007; Bazán, 2017; Bazan & Lagos, 2018) y la deflexión de Conchucos (Navarro, 2007; Pizarro, 2016).

2.2. Configuración Tectónica

Perú es característico por su alta actividad tectónica, debido a la interacción entre las placas Nazca y Sudamericana sumado al factor continental. El país se ha dividido estructuralmente en 10 geobloques que reflejan el fracturamiento profundo en superficie. (Torres *et al.*, 1996 en Pizarro, 2016).

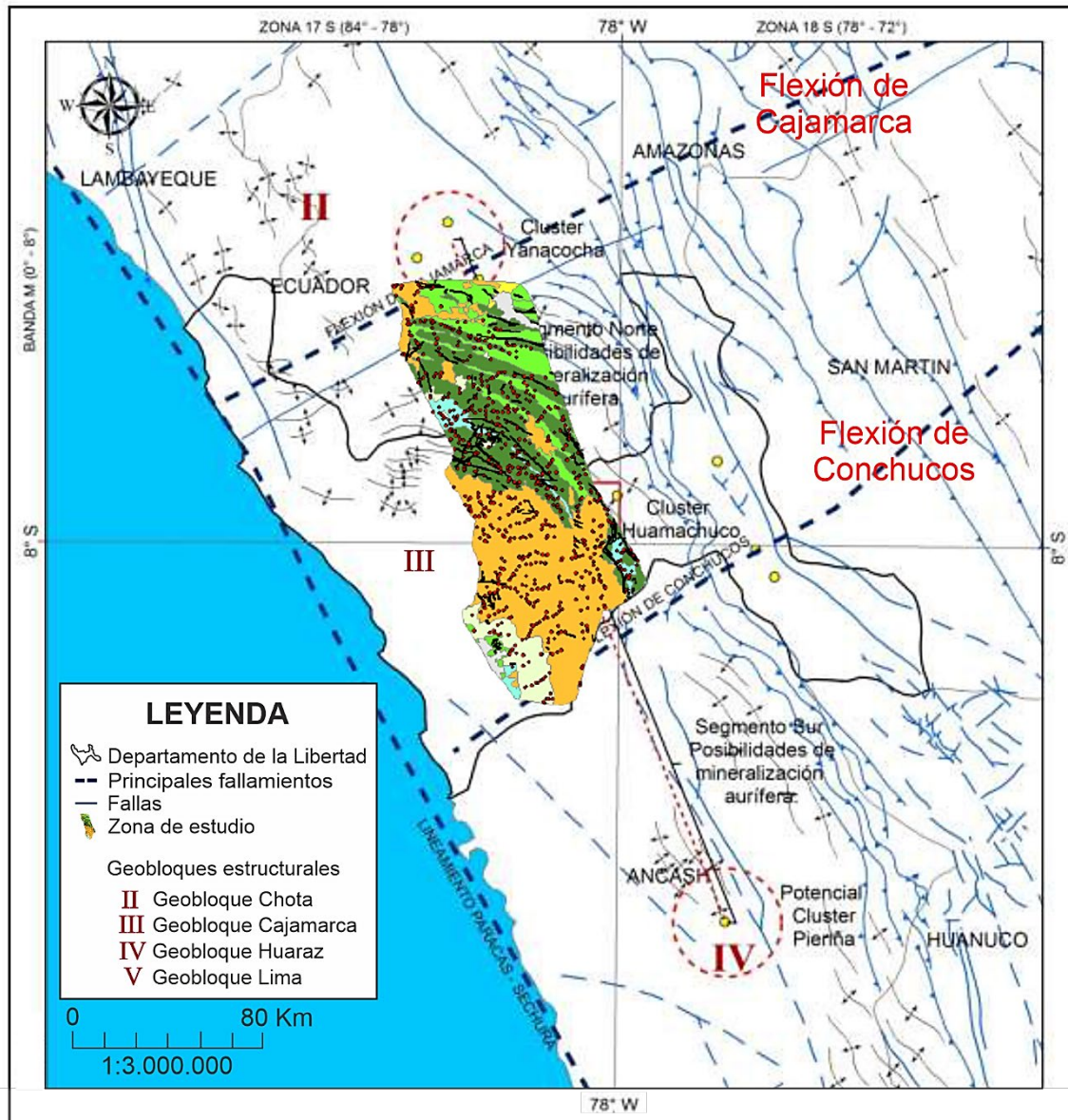
El área de estudio pertenece al geobloque III (**Fig. 2**) el cual es limitado por las flexiones de Cajamarca y Conchucos trayendo consigo intensos plegamientos y fallamientos que se ven observados en la parte central, en donde las rocas sedimentarias presentan un control estructural en sentido NO-SE. (Pizarro, 2016)

La presencia de estas dos estructuras le da gran importancia a la zona, pues al involucrarse con el vulcanismo se llega a una acumulación y depositación de minerales, ya que los fluidos hidrotermales aprovechan el fracturamiento para ascender y formar diferentes tipos de yacimientos minerales. (Bazán, 2017; Sucapuca, 2019)

La flexión de Cajamarca se formó durante el ciclo orogénico andino (Bazán, 2017; Bazan & Lagos, 2018). Es una estructura tectónica en el punto donde las estructuras de la cordillera occidental se caracterizan por cambiar de dirección NNO a ONO-ESE (**Fig. 2**).

Figura 2

Control estructural del NW de Perú.



Nota. Se observa que el área de estudio representada por el polígono amarillo está siendo afectada al norte por la flexión de Cajamarca y en menos proporción al Sur por la flexión de Conchucos. Tomado y modificado de Pizarro, 2016.

Esta estructura presenta mayor impacto en la zona, como resultado de su comportamiento cinemático se presentan clusters de depósitos minerales en su mayoría pórfidos (Cu – Au) y epitermales (Au, Ag) tanto a la parte del departamento de Cajamarca como al Sur en La Libertad los cuales están relacionados al magmatismo-vulcanismo evidenciado en los sedimentos del Grupo Calipuy. (Navarro, 2007; Bazán, 2017)

2.3. Estratigrafía

En la zona afloran rocas sedimentarias de origen marino del Jurásico Tardío hasta el Cretácico Tardío pertenecientes a la cuenca de Cajamarca. Sobre ellas se encuentran una gran cantidad de cuerpos volcánicos y subvolcánicos provenientes del proceso de magmatismo ocurrido en el Cenozoico. (Rivera, 2007; Díaz *et al.*, 2015; Díaz *et al.*, 2017; Bernuy *et al.*, 2018)

Hacia el norte se presentan las rocas volcánicas de Huambos y cuerpos volcanosedimentarios del Grupo Calipuy, estos últimos también están hacia el sur y son los que mayor área representan en la zona. Hacia la zona sur, en el departamento de la Libertad hay presencia de rocas volcanosedimentarias pertenecientes al grupo Casma. En la **Figura 3** se muestra la columna crono-litoestratigráfica del área de estudio con sus respectivas descripciones litológicas. (Reyes, 1980; Díaz *et al.*, 2015; Díaz *et al.*, 2017; Bernuy *et al.*, 2018)

Figura 3

Columna crono-litoestratigráfica de la zona de estudio.

Eón	Era	Período	Epoca	Unidad estratigráfica	Espesor (m)	Descripción litológica			
Fanerozoico (FZ)	Cenozoico (CZ)	Cuaternario	Holoceno	Depósitos			Depósitos aluviales recientes, glaciares, glacial-fluvial, lacustrinos.		
			Pleistoceno						
		Neógeno (N)	Plioceno N2	Volcánico Huambos	300		Tobas andesíticas y traquíticas.		
			Mioceno N1						
		Paleógeno (E)		Oligoceno E3	Grupo Calipuy	2000-2900		Rocas volcano-sedimentarias. Derrames andesíticos, tobas, areniscas tobáceas, areniscas, lutitas y conglomerados.	
				Eoceno E2					
	Paleoceno E1								
	Mesozoico (MZ)	Cretácico (K)	Superior/Tardío K2	Plutón Plumipite Fm. Cajamarca	600-700		Granodiorita, tonalita y Diorita. Calizas gris azuladas, macizas, con intercalaciones de lutitas y margas.		
			Inferior/Temprano K1	Grupo Casma	2800-3100			Volcánicos andesíticos intercalados con grauvacas, lutitas y materiales piroclásticos.	
		Jurásico (J)		Superior/Tardío J3	Fm. Chicama	900		Cuarcitas y areniscas y rojizas intercaladas con lutitas grises. Lutitas grises y calizas margosas con niveles de carbón a la base.	
									Lutitas negras, laminares con intercalaciones de areniscas y horizontes arcillosos

Nota. Realizada por los autores en base a Reyes, 1980; Díaz et al., 2015; Díaz et al., 2017; Bernuy et al., 2018.

2.4. Yacimientos Minerales

Según (Navarro, 2007; Rivera, 2007; Pizarro, 2016) los tipos de depósitos minerales representativos en la zona de estudio son pórfidos, epitermales de alta, intermedia y baja sulfuración, y se encuentran en los cuerpos rocosos subvolcánicos, volcánicos y volcano-sedimentarios.

2.4.1. Depósitos de tipo epitermal

Lindgren (1922, 1933) definió y caracterizó este tipo de depósitos en base a la mineralogía de menas y las particularidades texturales. Así mismo incluyó una gran variedad de yacimientos minerales de metales preciosos, metales base, entre otros, formados fluidos acuosos influenciados por emanaciones ígneas de temperaturas bajas (50° - 200 °C) en condiciones de presiones moderadas (<100 bars). También estimó en base a reconstrucciones geológicas que la profundidad máxima de formación es de aproximadamente 1000 metros. (Heald *et al.*, 1987; White & Hedenquist, 1995; Hedenquist *et al.*, 2000).

Los depósitos epitermales se asocian a ambientes volcánicos relacionados a arcos de islas (así como continentales) y en menor proporción a los rifts tras-arco (White & Hedenquist, 1990). Se determinaron tres miembros finales del estado de sulfuración: baja, intermedia y alta sulfuración. Al inicio se realizó a partir del estado de oxidación de los sulfuros, pero debido a la dificultad que traía consigo definir un prospecto mineralizado se propuso usarlos para definir al estado de sulfuración de los ensambles de los sulfuros. (Hedenquist *et al.*, 2000; Einaudi *et al.*, 2003; Sillitoe y Hedenquist, 2003).

2.4.1.1. Epitermales de baja sulfuración. Su formación se da en lugares distantes a la fuente del calor magmático, se presentan cercanos a la superficie, con profundidades entre 1-2 km y temperaturas entre 150-300 °C. Los metales asociados dependen de las características de los fluidos, es decir, si los fluidos tienen muy baja salinidad, pH neutro y son ricos en gas se puede llevar a cabo la formación de depósitos de Au (Ag, Pb-Zn), por otro lado si los fluidos presentan una salinidad moderada los metales asociados son Ag-Pb-Zn(Au) (Hedenquist & Lowenstern, 1994). Un indicador importante de estos yacimientos minerales es la presencia de Adularia (Giggembach, 2003). Las rocas volcánicas relacionadas van del basalto hasta la traquita y presenta una abundancia de sulfuros típicamente <1 a 2 % vol. (hasta 20 % vol. encajado en basaltos) en magmas subalcalinos y en alcalino del 2 a 10 % vol. (Sillitoe & Hedenquist, 2003; Camprubí & Talbinson, 2006).

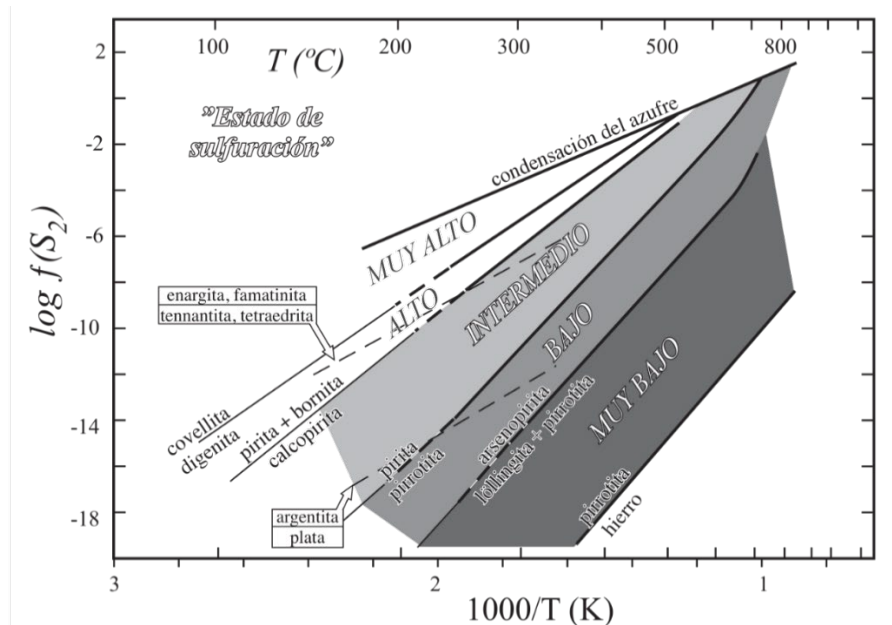
2.4.1.2. Epitermales de intermedia sulfuración. Pertenece al conjunto de los epitermales alcalinos junto a los de baja sulfuración, incluso según Sillitoe (1977) estructuralmente posee varias características de estos últimos, aunque geoquímicamente los fluidos mineralizantes y las asociaciones minerales metálicas son más afines a los epitermales de alta sulfuración (Einaudi et al., 2003; Sillitoe & Hedenquist, 2003; Camprubí & Talbinson, 2006). Los principales metales asociados a este tipo de depósito son Au-Ag, Zn, Pb, Cu, como metales menores se encuentran Mo, As, Sb. (Sillitoe & Hedenquist, 2003; Camprubí & Talbinson, 2006). Las rocas volcánicas relacionadas van desde la andesita a riodacita, localmente riolita y presenta una abundancia de 5 a >20 % vol. (Sillitoe & Hedenquist, 2003; Camprubí & Talbinson, 2006).

2.4.1.3. Epitermales de alta sulfuración. Se localizan encima de la intrusión. Presentan profundidades y temperaturas entre 1-5 km y 400-600°C respectivamente. Los fluidos se caracterizan por ser salinos a moderadamente salinos. El Fe, Cu, Sn, W, Mo, Au, Ag, Pb-Zn son los metales relacionados a este tipo depósito mineral. (Hedenquist & Lowenstern, 1994). La alunita es su principal mineral indicador. (Giggembach, 2003). Las rocas volcánicas relacionadas van desde la andesita a riolacita en magmas oxidados y riolacita en magmas reducidos, presenta una abundancia de 10 a 90 % vol. (Sillitoe & Hedenquist, 2003; Camprubí & Talbinson, 2006).

Los límites entre condiciones de sulfuración (**Fig. 4**) están determinados por los campos de estabilidad de diversas especies de sulfuros (Einaudi *et al.*, 2003)

Figura 4

Diagrama de correlación entre temperatura y fugacidad de azufre para los estados de sulfuración relativos de fluidos hidrotermales.



Nota. Fluidos hidrotermales en el ámbito de depósitos metalíferos en pórfidos y epitermales, definidos según los campos de estabilidad de minerales clave. Adaptado de Einaudi et al. (2003). Las reacciones de sulfuración fueron tomadas de Barton y Skinner (1979). Tomado y modificado de Camprubí & Talbison, 2006.

2.4.2. Depósitos de tipo pórfido

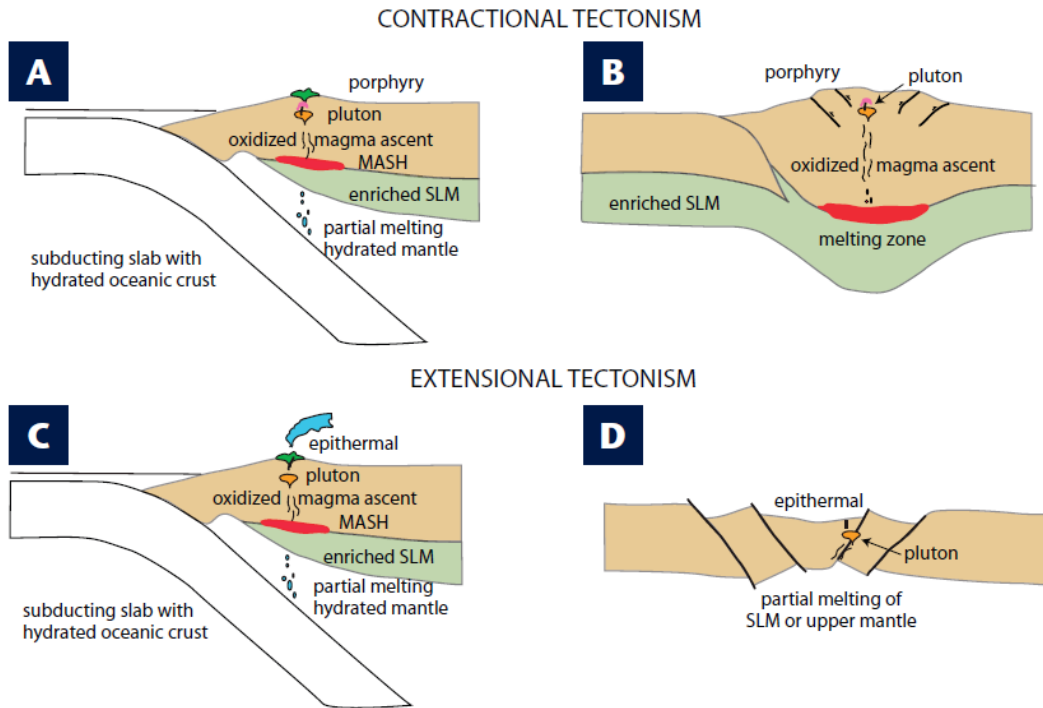
Estos depósitos son favorecidos por intrusiones que se encuentran a una profundidad de 2-5 km y presentan una temperatura entre 600-300°C. Sus fluidos se caracterizan por ser hipersalinos y vapores inmiscibles. Los metales asociados a este tipo de depósito son: Cu±Mo±Au, Mo, W o Sn. (Hedenquist & Lowenstern, 1994)

Según (Sillitoe, 2010) los sistemas de pórfido cuprífero corresponden a grandes volúmenes de rocas alteradas hidrotermalmente centradas en los stocks de pórfido cuprífero que pueden contener skarn, reemplazo de carbonato, alojamiento en los sedimentos y mineralización epitermal de alta a intermedia sulfuración en metales base y preciosos. Se generan principalmente en entornos de arco magmático (incluyendo trasarco) sometidos a regímenes de tensión a escala regional, yendo desde moderadamente extensos hasta contractivos, y pasando por un deslizamiento oblicuo (Tosdal & Richards, 2001; Sillitoe, 2010).

La mayor parte de depósitos con Au de pórfidos de Cu y epitermales están asociados al emplazamiento de cámaras magmáticas producto de un proceso de subducción de una placa oceánica bajo una placa continental, aunque distintos subconjuntos de complejos magmáticos con mineralización relacionada a pórfidos se forman en orógenos colisionales tiempo después de que la subducción haya finalizado (**Fig. 5**). (Seedorff *et al.*, 2005; Richards 2009; Tosdal *et al.*, 2009).

Figura 5

Configuración tectónica de depósitos de pórfidos de Cu y epitermales.

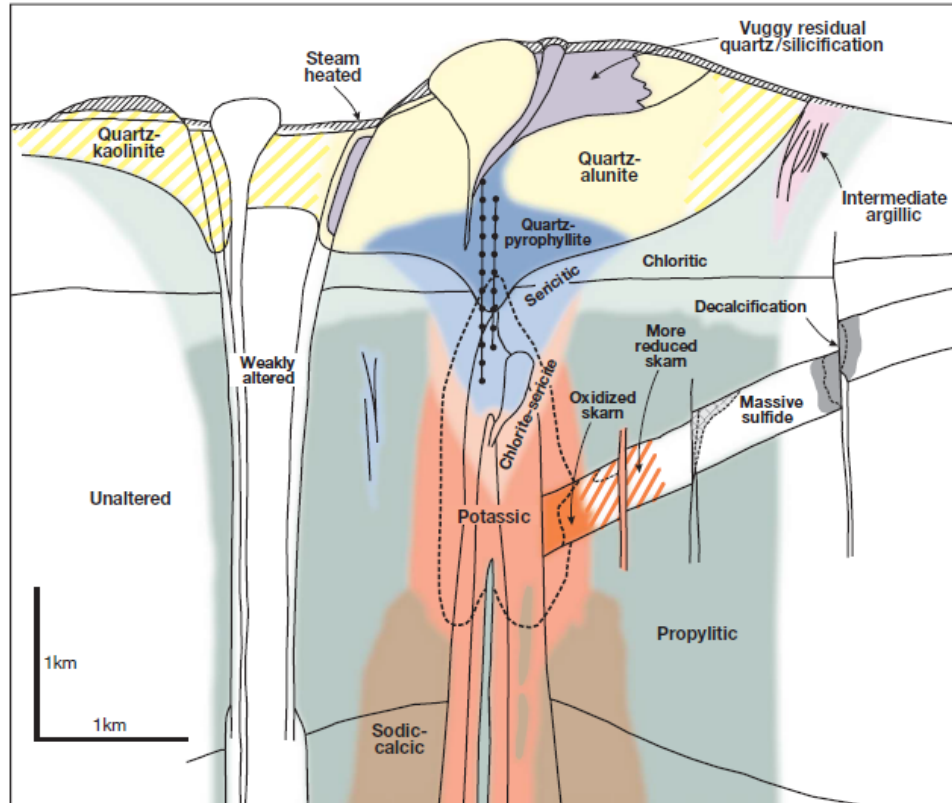


Nota. Los depósitos de pórfido de Cu-Au se forman en procesos compresivos, es decir durante la colisión (A) o poco después de la colisión (B). Por otro lado, los depósitos epitermales están asociados a la extensión en el margen de la placa convergente (C) o (D) en una zona de fractura. **MASH:** zona de fusión y asimilación de la corteza, almacenamiento de magma y homogeneización. **MST:** manto sublitosférico. Tomado y modificado de Tosdal *et al.*, 2009.

2.4.2.1. Zonas de alteración-mineralización. Los sistemas de pórfidos cuprífero presentan zonas de alteración-mineralización localizadas centralmente desde lo más profundo hacia arriba de la siguiente manera: Sódica-cálcica, Potásica, Propilítica, Clorita-sericita, Sericítica y Argílica avanzada (**Fig. 6**) cada una con una serie de características que las hacen diferenciables. (Sillitoe, 2010)

Figura 6

Patrón de zonificación de alteración-mineralización generalizada para los depósitos de pórfido de Cu.



Nota. localizadas centralmente desde lo más profundo hacia arriba de la siguiente manera: Sódica-cálcica, Potásica, Propilítica, Clorita-sericita, Sericítica y Argílica avanzada. Tomada y modificado de Sillitoe, 2010.

2.4.2.1.1. Sódica-cálcica. Se encuentran en la parte más profunda, incluso en algunos casos se localizan debajo de los depósitos de los pórfidos. La Albita/Oligoclasa, Actinolita y Magnetita son sus minerales clave o principales y como secundarios están la Epidota, Diopsido y el Granate (Sillitoe, 2010).

El anfíbol y la magnetita ocurren típicamente como venillas separadas o juntas, las venillas de Cuarzo-Magnetita \pm anfíboles son también componentes prominentes de este tipo de alteración (Sillitoe, 2000). Esta alteración es pobre en sulfuro y metal (excepto por Fe como magnetita) pero puede alojar mineralización en depósitos de pórfido de cobre ricos en oro, donde la alteración potásica está subordinada y por ende actúa como principal huésped para la mineralización de cobre y oro (Sillitoe, 2000, 2010).

2.4.2.1.2. Potásica. Se localizan en las zonas centrales de los pórfidos. Sus minerales principales son la Biotita y el feldespato potásico. Como secundarios se pueden presentar la Actinolita, Epidota, Sericita, Andalusita, Albita, Magnetita, Turmalina y Carbonatos. Como principales ensamblajes de sulfuros se presenta pirita-calcopirita, calcopirita \pm bornita, bornita \pm dignita \pm calcosina. (Sillitoe, 2010).

2.4.2.1.3. Propilítica. Ubicadas en las partes marginales de los sistemas, por debajo de las litocapas. Coexisten los minerales de Clorita, Epidota, Albita y Carbonatos, los minerales más secundarios son la Actinolita, Hematita y Magnetita. Pirita (\pm esfalerita o galena) son los principales ensamblajes de sulfuros. (Sillitoe 2000, 2010). La pirita domina el contenido de sulfuro de la alteración variando de 3 a 20%, aparece en vetas y diseminada. Cantidades menores de calcopirita, tetraedrita, esfalerita y galena están localmente concentradas en fallas o fracturas como venas de cuarzo-carbonatos. (Sillitoe, 2000).

2.4.2.1.4. Clorita-sericita. Localizadas en las partes superiores de las zonas de núcleo de pórfido, comunes particularmente en los yacimientos ricos en oro. La característica principal es la transformación parcial a completa de minerales máficos a clorita, de plagioclasa a sericita y/o illita y de magnetita a hematita, sumado a la deposición de pirita y calcopirita sus principales ensambles de sulfuros. (Sillitoe, 2010)

2.4.2.1.5. Sericítica. Se presentan en las partes superiores de los depósitos de pórfido. Comúnmente sobreimprime y destruye las alteraciones potásicas y de clorita-sericita. Está caracterizada por asociaciones blancas a grises de cuarzo-sericita-pirita mostrando parcial a casi total destrucción de la textura de la roca. Sus minerales más importantes son el cuarzo y la Sericita, como secundarios o accesorios están los Carbonatos, Turmalina, Especularita y Pirofilita. Los ensambles de sulfuros más comunes son: Pirita ± calcopirita (pirita-enargita ± tenantita, pirita-bornita ± calcosina, pirita-esfarelita). (Sillitoe, 2000; 2010).

2.4.2.1.6. Argílica avanzada. Ubicadas sobre los depósitos de pórfido de cobre, constituye comúnmente litocapas. Sus minerales principales son Cuarzo (Parcialmente residual, vuggy) Alunita, Pirofilita, Dickita y Caolinita. Minerales como Diasporo, Andalusita, Especularita, Zunyita, Corindón, Dumortierita y Topacio aparecen como secundarios o accesorios. Como principales ensambles de sulfuros están la Pirita-enargita, pirita-calcosina y pirita-covellina (Sillitoe, 2010). Cuando los ambientes epitermales de alta sulfuración y porfídicos son extremos, la alteración puede sobreimprimir la alteración potásica, destruyendo a los silicatos y sulfuros preexistentes, y preservando las zonas de cuarzo. (Sillitoe, 1999, 2000).

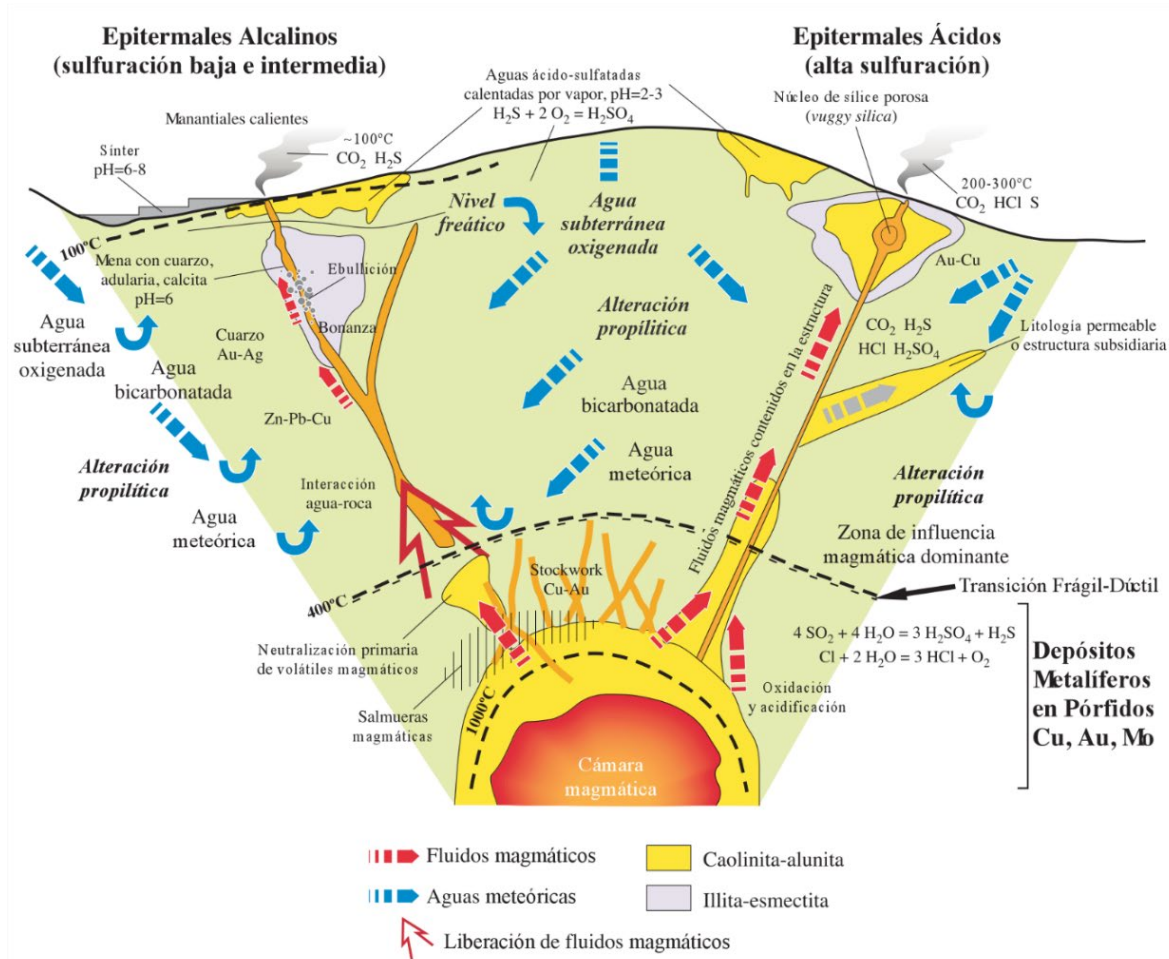
Existe un modelo (**Fig. 7**) que muestra la coexistencia de los yacimientos de tipo pórfido, y epitermales de baja y alta sulfuración asociado a la evolución geoquímica de los fluidos hidrotermales con su alteración resultante y la mineralización producto de la reacción entre estos y la roca. (Hedenquist y Lowenstern, 1994; Sillitoe, 1995a; Hedenquist *et al.*, 2000; Camprubí & Talbinson, 2006)

No necesariamente los depósitos de pórfidos de Cu están cubiertos por un depósito de alta sulfuración, o un depósito de baja sulfuración, esto está asociado a procesos de mineralización de los pórfidos, todo depende de los procesos de formación del yacimiento. (Hedenquist & Lowenstern, 1994).

Corbett & Leach (1998) proponen un esquema en donde se relaciona la composición mineralógica de las alteraciones con los depósitos minerales epitermales, mesotermiales y porfídicos en base al pH de las soluciones mineralizantes (**Fig. 8**). (Camprubí & Talbinson, 2006)

Figura 7

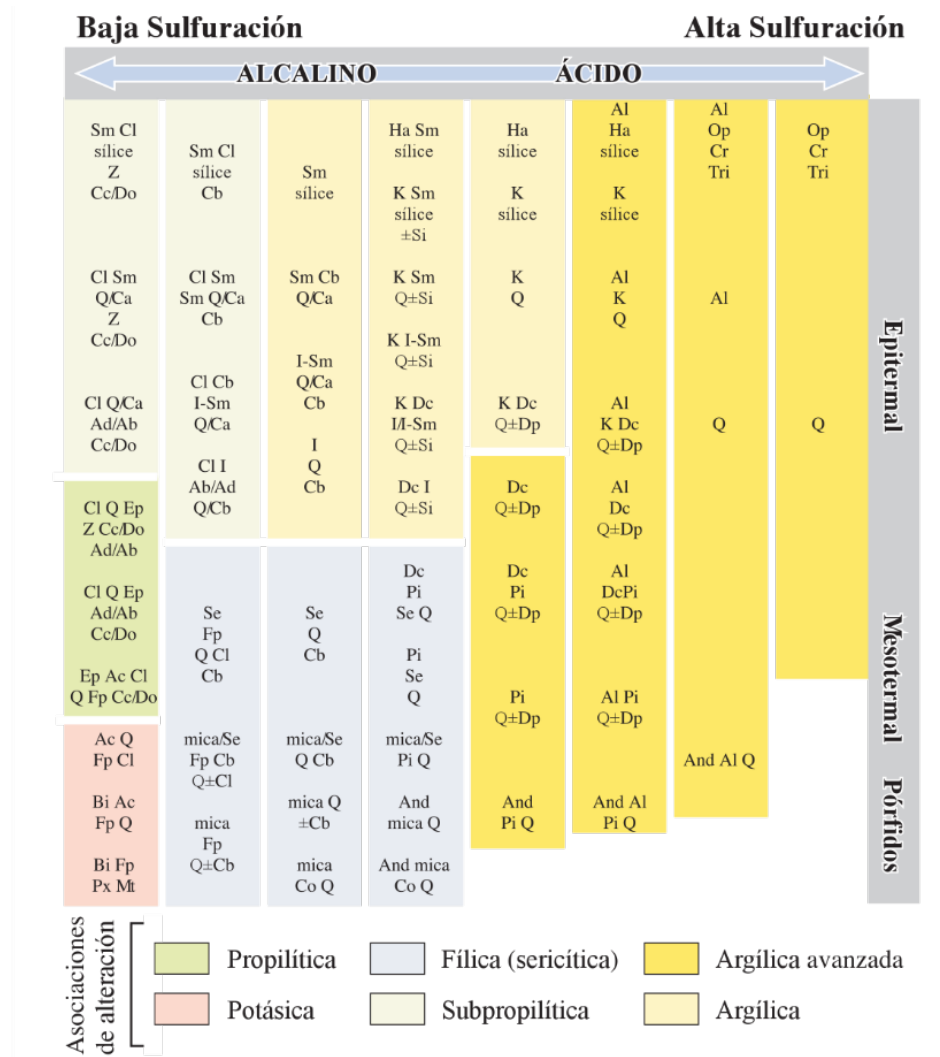
Sección esquemática del modelo de yacimientos tipo pórfido, epitermales de alta y baja sulfuración.



Nota. Se observa la estructura, procesos, tipos de alteración, volátiles liberados, temperaturas, pH, tipos de fluidos y reacciones involucradas en la formación de los depósitos y su relación con las rocas magmáticas como fuente de calor, fluidos y componentes químicos, desde una cámara magmática en proceso de enfriamiento, la formación de depósitos metálicos relacionados a pórfidos (cupríferos, auríferos, o molibdeníferos), hasta el ambiente epitermal (modificado de Sillitoe, 1995a; en base a los datos de Hedequist y Lowenstern, 1994; Gammons y Williams-Jones, 1997; Corbett y Leach, 1998. Tomado y modificado de Camprubí & Talbinson, 2006.

Figura 8

Esquema de la composición mineralógica de las alteraciones hidrotermales.



Nota. asociadas a la formación de depósitos minerales epitermales, mesotermes y porfídicos, según el pH de las soluciones mineralizantes. Abreviaciones: Ab: albita, Ac: actinolita, Ad: adularia, Al: alunita, And: andalucita, Bi: biotita, Ca: calcedonia, Cb: carbonatos, Cc: calcita, Cl:clorita, Co: corindón, Cr: cristobalita, Dc: dickita, Di: diápora, Do: dolomita, Ep: epidota, Fp: feldspatos potásicos, Ha: halloysita, I: illita, K: caolinita, Mt: magnetita, Op: ópalo, Pi: pirofilita, Px: clinopiroxenos, Q: cuarzo, Se: sericita, Si: siderita, Sm: esmectita, Tri: tridimita, Z: zeolitas. Tomado y modificado de Camprubí & Talbinson, 2006.

2.5. Geoestadística

La geoestadística es una disciplina de la estadística espacial que busca adaptarse a la variabilidad de los datos geológicos, el término fue implementado en la década de los 60 por Georges Matheron reconocido como el padre de la geoestadística. Se caracteriza por agrupar diversas técnicas que modelan las relaciones y el comportamiento de las variables de interés, que se encuentren correlacionadas, generalmente en función del espacio y/o del tiempo, con el objeto de generar muestras sintéticas o de evaluar el estudio de una población. (Díaz, 2002).

2.5.1. Correlación de Pearson

En la estadística multivariada se pueden cotejar las variables entre sí, uno de los posibles escenarios resultantes es que no tengan conexión alguna las antes mencionadas o, por el contrario, que se encuentre una relación que se logre describir matemáticamente, este puede ser el caso de la correlación de Pearson (Restrepo & Gonzáles, 2007).

El coeficiente es representado por la letra “**r**” y varía entre $[-1,1]$, la naturaleza de la correlación de Pearson es de tipo paramétrica y describe únicamente la relación lineal entre dos variables, el símbolo negativo no indica que no tenga relación lineal si no que es inversa, a diferencia del “**0**” donde este valor si indica que no hay correlación lineal alguna y el valor “**1**” indicando una total correlación lineal. (Dagnino, 2014)

Para obtener una adecuada correlación es necesario expresar las muestras a través de una distribución normal, lo que incluye un gráfico de distribución de probabilidad, ratificando la hipótesis de normalidad, acompañado de un gráfico de puntos de las muestras, mejorando así la interpretación de este coeficiente (Looney & Gullledge, 1985).

2.5.1.1. Matriz de Correlación. La matriz de correlación es una herramienta importante en el análisis factorial y otras técnicas de análisis, la cual permite estudiar múltiples entradas al mismo tiempo de una forma sencilla, rescatando las relaciones entre si e información relevante incluso entre variables similares (De la fuente, 2011b), es un arreglo ordenado cuadrado (que se compone de igual número de filas que de columnas, ya que contiene las mismas variables en sus ejes), simétrico en diagonal compuesto esencialmente por valores de correlación de Pearson para este caso, sin embargo, también existen otras medidas de correlación como la varianza y covarianza, aunque la interpretación de estas es más compleja (Hair *et al*, 1999).

Existen diferentes formas de analizar la matriz de correlación y diversos elementos para tener en cuenta; De forma simplificada se establecen dos ramas de interpretación, la primera enfocada en la descripción, la segunda enfocada en la caracterización matemática y extracción de propiedades (Morales, 2013).

La interpretación descriptiva se basa únicamente en la visualización de los valores mostrados en la matriz de correlación, siendo el observador el encargado de obtener la información que la matriz puede contener, su fin es simplemente extraer de forma visual la conexión que existe entre las variables y encontrar posibles dependencias. (Hair *et al*, 1999; Morales, 2013).

Es por esto que el análisis es sencillo y se usa como método complementario, ya que su punto fuerte es la facilidad para ser aplicado y su punto débil corresponde al hecho que cuanto mayor sea el tamaño de la matriz más compleja será la observación y correcta vinculación de las varias de interés (Hair *et al*, 1999; Morales, 2013).

La segunda forma de interpretación es un sistema más potente estadísticamente hablando, incluida en el análisis factorial, el cual se basa en determinar la dependencia de una variable en factores comunes con otras variables y de factores únicos, donde se van planteado una serie de ecuaciones que responden a estos factores y al número de variables usadas, por lo que su determinación se encamina a la solución de estas ecuaciones y al final la interacción entre las variables (Rapisarda *et al.*, 2007; De la Fuente, Análisis Factorial, 2011b; Morales, 2013), como punto fuerte, la interpretación enfocada en la caracterización matemática y extracción de propiedades puede manejar grandes volúmenes de información y de mayor complejidad que su contraparte, aunque su desarrollo sea bastante mas complejo y más factible a cometer errores procedimentales(Hair *et al.*, 1999; Dominguez, 2014).

2.5.2. Análisis Factorial

El análisis factorial (AF) es una técnica multivariada que permite sintetizar información para encontrar grupos de variables altamente relacionadas entre sí en un grupo más grande de variables, y que este grupo pueda representar de forma generalizada el comportamiento de las variables en su interior (De la Fuente, 2011b; Morales, 2013).

Esto se puede realizar al plantear que las primeras variables están constituidas o determinadas por otras variables, estas últimas reciben el nombre de factores, siendo el número de factores menor que de variables originales para tener una serie de resultados finitos (Ferrando & Anguiano, 2010). Para su desarrollo se puede utilizar diferentes propiedades como la varianza, la covarianza o coeficientes de correlación (Ferrando & Anguiano, 2010; López & Fachelli, 2015).

Existe dos clasificaciones del análisis factorial siendo Análisis Factorial Exploratorio (AFE) y Análisis Factorial Confirmatorio (AFC). La primera busca hallar la estructura interna de las variables a través de la determinación de los factores que a su vez se relacionan con otra serie de variables en el grupo original, por lo que es necesario ignorar cualquier conocimiento acerca de cómo se relacionan las variables en pocas palabras sin ningún juicio a priori (Méndez & Rondón, 2012), en contraparte se encuentra el análisis factorial confirmatorio el cual parte de una estructura que teóricamente refleja la estructura interna de las variables, por lo que sirve para comprobar que los factores asignados y la estructura suministrada es acorde o es escalable (Morales, 2013), adicionalmente es más complejo que el AFE pero brinda mejor información, debido a las condiciones para ser aplicado se puede simplificar de AFE y AFC a No Restrictivo y Restrictivo respectivamente (Lloret, Ferreres, Hernández, & Tomás, 2014).

2.5.2.1. Análisis de Componentes Principales (PCA). Es una técnica perteneciente al análisis factorial que se enfoca en reducir la dimensionalidad, de forma más clara agrupar variables de tal manera que la pérdida de información sea muy reducida o se mantenga clara la tendencia de las variables originales. El PCA no busca determinar un modelo factorial, por lo que por diversos autores no es considerado propiamente como un método de análisis factorial (Pérez & Medrano, 2010).

Luego de aplicar el análisis de componentes principales se pueden generar un nuevo grupo de variables, se denominan Componentes Principales, las cuales se basa únicamente en el uso de la varianza total (la cual se compone de la varianza común, la no común y la de error) a diferencias de otros métodos de análisis factorial exploratorio como el Análisis de Ejes Principales, en general, el PCA es más fácil de interpretar y puede fácil de desarrollar que otros métodos, resaltando que solo describe relaciones lineales entre variables iniciales y factores (Kahn, 2006; Lopez, Fernández, & Lozada, 2008; Ferrando & Anguiano, 2010; Pérez & Medrano, 2010).

Una de las ventajas sobre este metodo es su facilidad para realizar una interpretacion de los resultados, la cual se puede realizar de diversas formas, partiendo de las nuevas dimensiones halladas, esto se puede llevar acabo a partir de la caracterización numericas de los factores encontrados o de los gráficos que se quierean desarrollar, los más comunes son: gráfico de ejes principales y el diagrama circular de correlación (Thio & Comas, 2016).

En el caso particular del diagrama de correlacion, las variables se grafican como vectores en un diagrama polar partiendo del origen de coordenadas, este procesos se realiza con todas las variables de interes, los ejes en este grafico sera los componentes principales extraidos del analisis, las variables mas cercanas a la intersección de los ejes tienen la menor correlacion con aquellos factores, los mas alejados son los que son mejor representados por los factores y por tanto la reduccion dimensional es mas eficiente, preservando la mayor información (López & Fachelli, 2015).

Adicionalmente, se puede extraer 3 situaciones particulares apartir del angulo generado entre dos variables y el origen, cuando el angulo entre variables sea muy reducido, cercano a 0° significa que tienen una alta correlacion lineal positiva, la siguiente se presenta cuando el angulo es grande proximo a 180° , significando que las variables tienen una alta correlacion lineal negativa, finalmente cuando el angulos de las variables es proximo a 90° se encuentra que o existe correlacion lineal entre esas variables en ese arreglo de componentes principales (Ferreo, Palacio, & Campanella, 2002; López & Fachelli, 2015).

Basándonos en la explicación previa es importante definir cual es la intención del intérprete al analizar este grafico, buscar las variables que se relacionan y generar asociaciones o buscar las variables que muestran el comportamiento de los individuos. (Gonzáles *et al*, 1994; Hair *et al*, 1999)

Por otra parte el grafico de ejes de componentes pricipales es de gran utilidad para interpretar asociaciones de varaibles o de individuos e incluso generar clusters de forma visual (De la Fuente, 2011b).

2.5.3. Análisis Cluster

Es una técnica multivariada con fin descriptivo que permite relacionar y clasifica diversos elementos o variables generando grupos o clases, de la forma más homogénea posible y con la mayor diferenciación de sus propiedades, gracias a que se basa en criterios geométricos (De la Fuente, 2011a).

Esto se hace sin ningún criterio previo de una estructura de los datos, por lo que las diversas posibilidades de agrupaciones son muy altas, lo que conlleva que para realizar el análisis de forma más efectiva se necesita un procedimiento metódico y claramente establecido (Gallardo, 2000). Al anterior proceso se le denomina algoritmo de agrupamiento y este varía en función del tipo de agrupamiento que se desea realizar de los cuales la más amplia clasificación son los métodos Jerárquicos y los No Jerárquicos, donde un cluster es una asociación de elementos variables o individuos que se puede generar desde un criterio geométrico, sin intervención o por selección del observador (Everitt *et al.*, 2011)

La distancia y la similaridad miden lo mismo de forma inversa, esta medida se realiza para saber cuál es la elección más idónea para formar un cluster, una de estas distancias utilizadas es la distancia Euclidiana, sin embargo, esta no es la única utilizada, pero si la más común y la selección de este tipo de distancia se hace con el conocimiento previo de los datos que se están analizando (Landau & Chis Ster, 2010).

2.5.3.1. Métodos Jerárquicos. Estos se clasifican principalmente en aglomerativos y en disociativos, donde en los primeros se parte de todos los elementos y se van generando cluster que cada vez son más grandes hasta llegar a tener una sola clase que agrupa a todos los constituyentes iniciales, por otro lado, los disociativos inician en un solo cluster y se vea dividiendo de tal forma que se llegue a el número total de muestras, la cantidad de grupos está determinada por la expresión $n - 1$, donde, n corresponde a el número de elementos iniciales, por lo que el algoritmo de agrupamiento termina cuando llega a la máxima cantidad de clases. (Gallardo, 2000; De la Fuente, 2011a)

Cuando solo existe un grupo o cuando se encuentra con un hito estadístico donde se determine que no se puede continuar con el algoritmo dada la irregularidad de los constituyentes (Gallardo, 2000). Este tipo de métodos son los que permiten expresar los resultados en forma de dendogramas, aunque existen otros diagramas que se pueden realizar como diagramas aditivos de árbol (De la Fuente, 2011; Everitt *et al.*, 2011).

De forma general los métodos más conocidos son: vecino más próximo, vecino más lejano, promedio entre grupos, método de centroide, método de la mediana y método Ward. El ultimo es un proceso donde se evalúa de forma previa todos los elementos y se van conformado clusters de tal forma que el aumento de la distancia entre ambos sea la menor, hasta que no se puedan generar más clases, con ello se generan clusters más homogéneos. La medición de salida puede ser representada como distancia o similaridad (De la Fuente, 2011; Gallardo, 2000).

2.5.3.2. Métodos No Jerárquicos. Para los métodos No Jerárquicos teniendo un agregado de datos se selecciona por parte del observador el número de clases que en los que se van a agrupar los datos, de tal forma que sean homogéneos y que no tengan una relación de orden con los demás o sencillamente independientes, “También conocidos como métodos partitivos o de optimización” (Gallardo, 2000).

Su uso es preferencial para la clasificación de individuos, en vez de variables (De la Fuente, 2011a). Los métodos No Jerárquicos se pueden clasificar en 4, los cuales son los de reasignación, búsqueda de densidad, directos y reductivos (Gallardo, 2000).

2.6. Geoquímica

“La geoquímica es la investigación científica de los elementos químicos, es decir, los átomos de la corteza terrestre y, siempre que sea posible, de todo el planeta. Esto implica estudiar la historia de los elementos, su distribución y migración en el espacio y el tiempo, así como sus interacciones genéticas en nuestro planeta”. (Vernadsky, 1930 en Müller, 2014)

Según Goldschmid (1958) esta rama de la geología tiene gran importancia pues las industrias que manejan el mundo como lo son la minería, la metalúrgica, la agricultura y demás tienen como base de desarrollo sus fundamentos. (Gordon *et al.*, 2012)

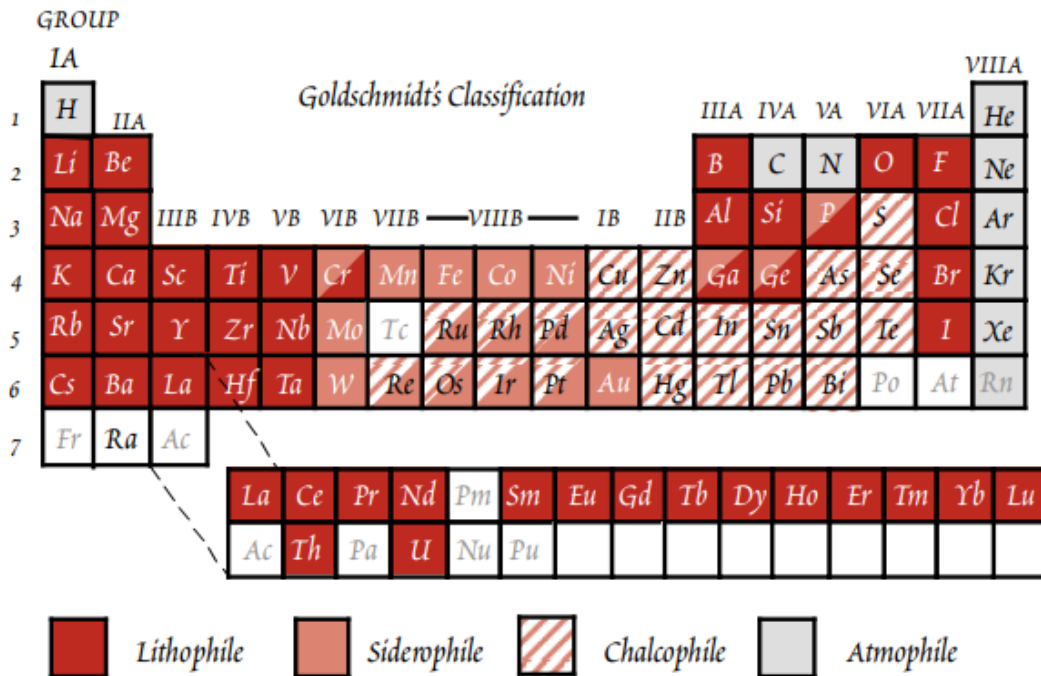
2.6.1. Clasificación de los elementos

La siguiente clasificación geoquímica de los elementos (**Fig. 9**) se realiza en base a la afinidad con las fases que dieron lugar a la formación de la tierra: líquido metálico, líquido sulfuroso, líquido silicatado y fase gaseosa (Beskow, 1924; Goldschmidt 1930; Goldschmidt 1937; White, 2013; Ptitsyn 20180):

Siderófilos: son elementos afines a los líquidos metálicos, presentan un alto potencial de ionización, es decir, no se combinan con facilidad con otros elementos, de modo que generalmente ocurren en estado nativo. Tienen poca afinidad con el oxígeno y el azufre, pues principalmente están concentrados en el núcleo terrestre. (Beskow, 1924; Goldschmidt 1930; Goldschmidt 1937; White, 2013; Ptitsyn 20180).

Figura 9

Clasificación geoquímica de los elementos según goldschmidt.



Nota. Clasificación geoquímica de los elementos en siderófilos, calcófilos, litófilos y atmófilos. Tomado y modificado de White, 2013.

Calcófilos: son elementos que presentan afinidad con los líquidos sulfurosos, su potencial de ionización es más alto que el de los siderófilos y su comportamiento también es diferente respecto a estos, pues tienen la capacidad de polarizar el átomo de azufre favoreciendo las uniones de tipo covalente. Se concentran en el manto de la tierra. (Beskow, 1924; Goldschmidt 1930; Goldschmidt 1937; White, 2013; Ptitsyn 20180).

Litófilos: son elementos afines a los líquidos silicatados, su potencial de ionización es bajo por lo que fácilmente se combinan con otros elementos, principalmente con el oxígeno. Se distribuyen por toda la corteza terrestre, siendo los mayores componentes de esta. (Beskow, 1924; Goldschmidt 1930; Goldschmidt 1937; White, 2013; Ptitsyn 20180).

Atmófilos: son elementos volátiles (gases inertes o nobles y líquidos) que conforman la atmosfera. Se presentan en estado libre, es decir, no están combinados. (Beskow, 1924; Goldschmidt 1930; Goldschmidt 1937; White, 2013; Ptitsyn 20180).

2.6.2. Distribución de elementos en las rocas

Desde el punto petrográfico en geoquímica los elementos se clasifican en tres grupos en función de su abundancia expresada como porcentaje del peso del óxido (Philpotts & Ague, 2009; Toselli, 2009):

2.6.2.1. Elementos mayores. Están presentes en altas concentraciones y controlan la cristalización de los minerales petrogenéticos en las rocas a partir de fundidos. También juegan un papel esencial en la determinación y dominio de propiedades como densidad, viscosidad, permeabilidad, etc, en las rocas y en los magmas. (Toselli, 2009) Estas propiedades son críticas para determinar si se formará un magma, o si tendrá propiedades que le permitan ascender en la tierra (Philpotts & Ague, 2009). Presentan concentraciones mayores al 1% peso. El oxígeno y el silicio son los elementos dominantes, presentando abundancias relativas de 60.8 y 21,2 % respectivamente, junto al aluminio, hierro, calcio, magnesio, sodio y potasio constituyen el 99% de la corteza continental (Poldevaart, 1995; Ronnov y Yaroshevsky, 1976 en Toselli, 2009).

2.6.2.2. Elementos menores. Generalmente sustituyen a los elementos principales, se encuentran en concentraciones bajas, suelen formar minerales accesorios en una roca, como el apatito y el circón, pero en algunos casos presentan valores altos formando minerales independientes llamados minerales accesorios. Usualmente sus concentraciones están entre 0.1-1% peso. (Philpotts & Ague, 2009; Toselli, 2009).

2.6.2.3. Elementos traza. Se caracterizan porque sustituyen a elementos mayores y menores en las estructuras minerales. Se utilizan para determinar el origen y los procesos magmáticos, es decir, para conocer la evolución de los magmas. Tienen concentraciones menores de 0.1% peso y se expresa en parte por millón, por su poca distribución. (Philpotts & Ague, 2009; Toselli, 2009). Los elementos menores y los traza pueden impartir firmas químicas características a las rocas que ayudan a distinguir o correlacionar los tipos de rocas, mientras que los elementos mayores son los importantes en la clasificación de estas. (Philpotts & Ague, 2009)

2.6.3. Clasificación de las rocas ígneas en base al contenido de sílice (SiO_2)

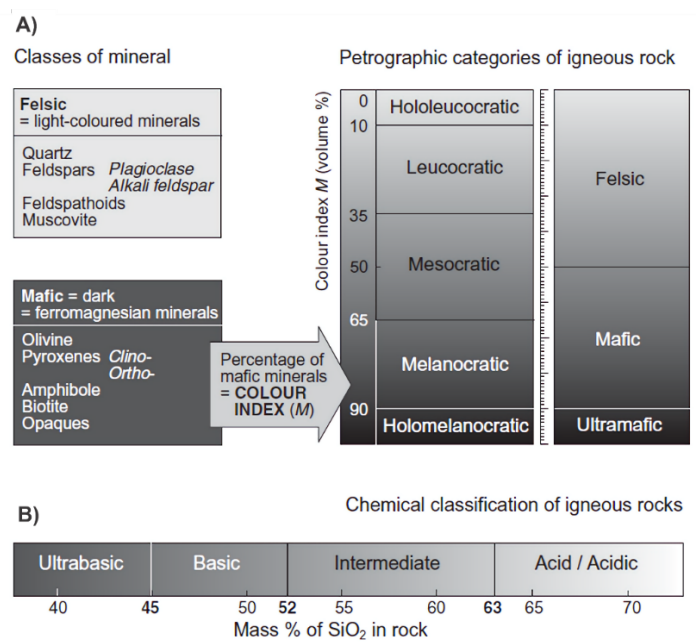
Teniendo como precedente que el oxígeno y el silicio son los dos elementos más abundantes en la corteza, esto los convierte en un referente importante en la clasificación de las rocas ígneas. Un factor fundamental es su relación con los demás elementos mayores, por ejemplo, rocas con bajas concentraciones de sílice presentan altas cantidades de hierro, magnesio y calcio, por otro lado, rocas con altas concentraciones de sílice están enriquecidas en sodio y potasio. (Philpotts & Ague, 2009; Jerram & Petford, 2011; Middlemost, 2013).

De esta manera las rocas se clasifican según el contenido de sílice en: Félsicas, Máficas y Ultramáficas en donde las félsicas presentan más de 70% de SiO_2 y las ultramáficas menos del 45%. (Philpotts & Ague, 2009; Jerram & Petford, 2011; Gil, 2010).

Esta clasificación también se puede hacer con el índice de color del mineral (**Fig. 10A**), siendo las félsicas las más claras o leucocráticas y las ultramáficas las más oscuras o melanocráticas (Philpotts & Ague, 2009; Gil, 2010). Otro tipo de clasificación que se basa en el contenido de sílice es la composición química ácida frente a la básica (**Fig. 10B**), donde la ácida se relaciona con el mayor contenido de sílice (Philpotts & Ague, 2009; Gil, 2010).

Figura 10

Clasificación de las rocas ígneas según el contenido de sílice.



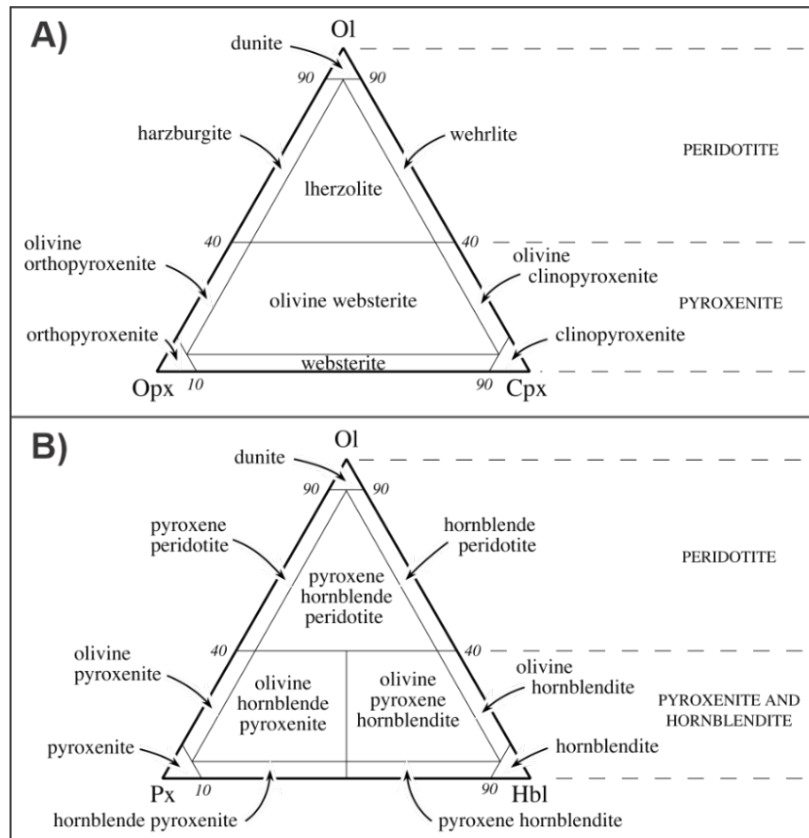
Nota. **A)** Según el índice de color, siendo las félsicas las más claras y ricas en sílice y según **B)** Composición química, donde las ácidas se relacionan con las de mayor porcentaje de sílice. Tomado y modificado de Gil, 2010.

2.6.4. Clasificación de las rocas ígneas según la IUGS

La Unión Internacional de Ciencias Geológicas (IUGS) propone los siguientes diagramas al momento de clasificar una roca ígnea (Le Bas & Streckeisen, 1991; Le Maitre *et al.*, 2002; Frost & Frost, 2014): En rocas ultramáficas (con un contenido de cristales oscuros o melanocráticos mayor al 90%) se usa el diagrama de la **Figura 11**.

Figura 11

Clasificación de rocas ultramáficas.

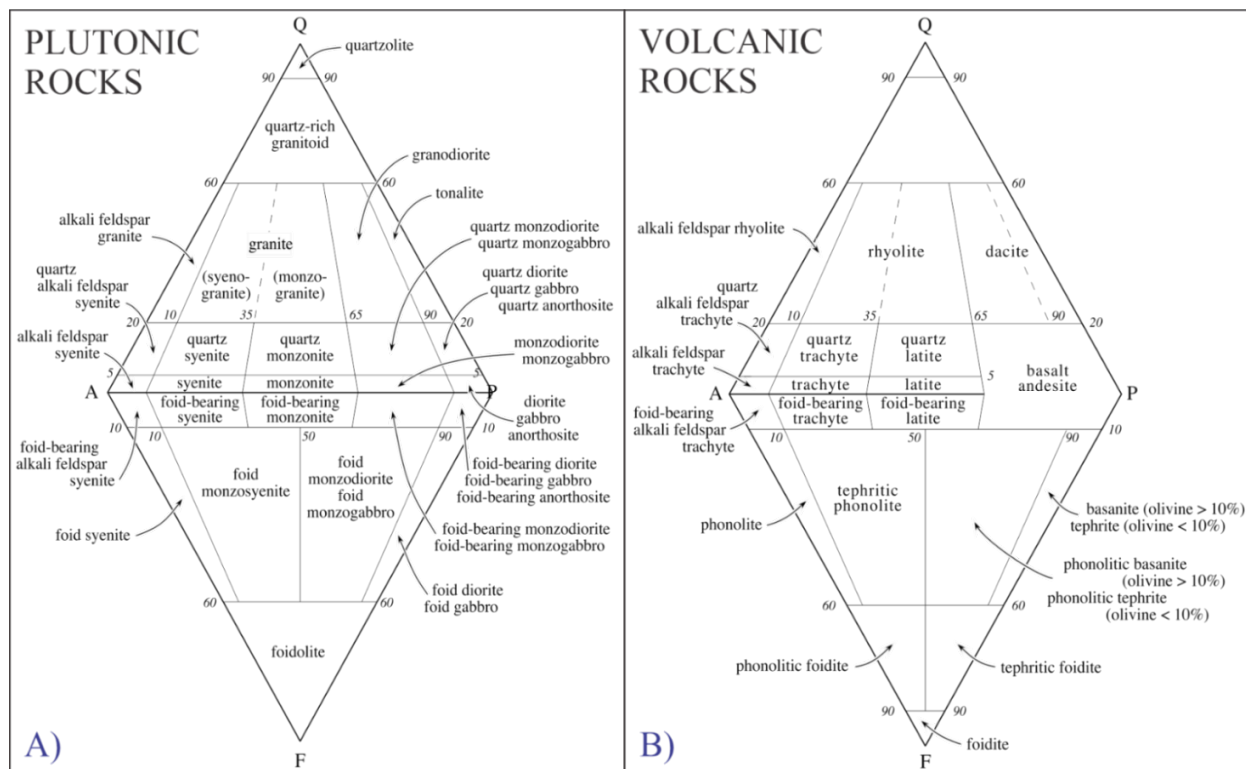


Nota. Basada en las proporciones de **A)** Ol (olivino), Opx (ortopiroxeno), Cpx (clinopiroxeno) y **B)** Ol (olivino), Opx (ortopiroxeno) y Hbl (hornblenda). Basados en Streckeisen, 1973. Tomado y modificado de Le Maitre et al., 2002.

En rocas ígneas plutónicas (formadas por enfriamiento lento y con textura de grano relativamente grueso > 3 mm es decir, los cristales pueden verse a simple vista (Le Maitre et al., 2002) con un porcentaje de máficos menor al 90% se utiliza la **Figura 12A**.

En rocas ígneas volcánicas (asociadas al vulcanismo y con textura de grano relativamente fino en la que la mayoría de los cristales no pueden verse a simple vista (Le Maitre *et al.*, 2002) con un porcentaje de máficos menor al 90% se utiliza la **Figura 12B**.

Figura 12
Clasificación QAPF

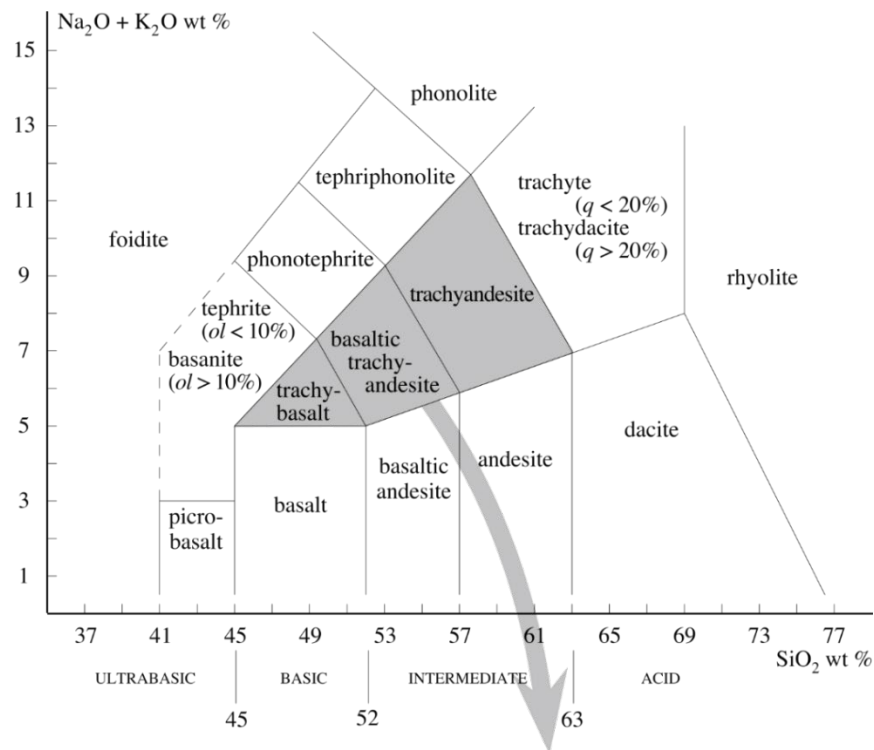


Nota. **A)** Rocas plutónicas, basado en Streckeisen, 1976, y **B)** Rocas volcánicas, basado en Streckeisen, 1978. Las esquinas en el sobre triángulo son: Q = cuarzo, A = feldespato alcalino, P = plagioclasa F = feldespatoide. Este diagrama no debe utilizarse para rocas en las que el contenido de minerales máficos superior al 90%. Tomado y modificado de Le Bas & Streckeisen, 1991; Le Maitre et al., 2002.

Si la roca es volcánica y no se puede determinar su modo mineral debido a la presencia de vidrio o a la naturaleza de grano fino de la roca, se debe utilizar la clasificación TAS (Total Álcali - Sílice) (Fig. 13).

Figura 13

Clasificación química de las rocas volcánicas mediante el TAS



Further subdivisions of shaded fields	trachybasalt	basaltic trachyandesite	trachyandesite
$\text{Na}_2\text{O} - 2.0 \geq \text{K}_2\text{O}$	hawaiite	mugearite	benmoreite
$\text{Na}_2\text{O} - 2.0 < \text{K}_2\text{O}$	potassic trachybasalt	shoshonite	latite

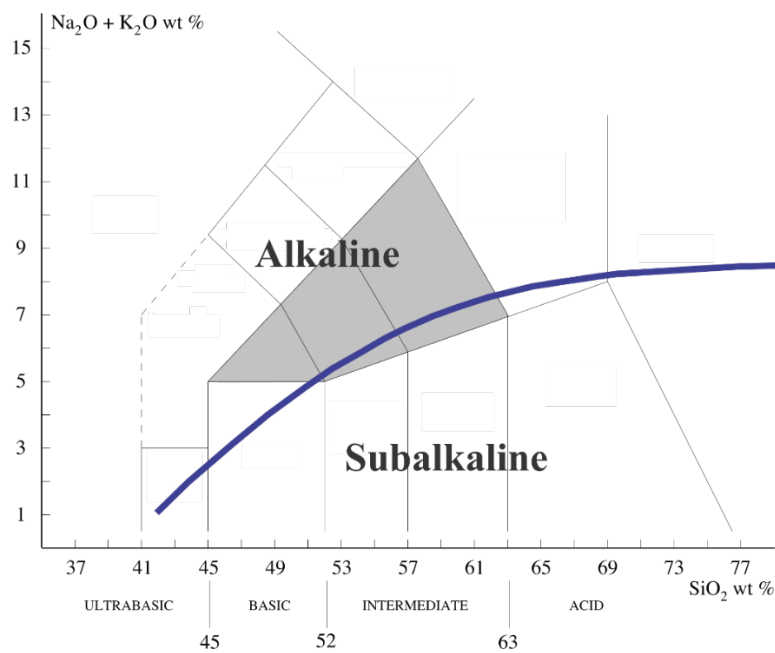
Nota. Según Le Bas et al., 1986. Donde, Ol = olivino normativo, q = (100 * cuarzo normativo / suma de minerales félsicos). Las rocas que caen en las zonas sombreadas pueden subdividirse como se indica en la tabla señalada por la flecha. La línea entre el campo de la foidita y el campo de la tefrita de basanita está punteada para indicar que deben utilizarse otros criterios para separar estos tipos. Tomado y modificado de Le Maitre et al., 2002.

2.6.5. Series magmáticas

La geoquímica de las rocas proporciona una serie de calificativos que permite subdividir los tipos de rocas que abarcan magmas de diversas fuentes. De esta manera los basaltos se han clasificado en dos subgrupos: Alcalinos y subalcalinos (**Fig. 14**) (Le Maitre *et al.*, 2002; Gil, 2010; Middlemost, 2013; Frost & Frost, 2014). Teniendo como base la composición del magma, expresada en su asociación mineral y en sus rasgos geoquímicos particulares, tanto en elementos mayores y traza como a nivel isotópico (Lago *et al.*, 2015).

Figura 14

Series subalcalina y alcalina sobre el diagrama TAS



Nota. Muestra la división entre las series subalcalina y alcalina de las rocas volcánicas, basado en Miyashiro (1978).

Tomado y modificado de Le Maitre *et al.*, 2002.

2.6.6. Prospección geoquímica

La prospección geoquímica es una herramienta utilizada en la industria minera, su objetivo final es la localización y el estudio en el espacio y tiempo, de las anomalías geoquímicas que indican la presencia de minerales de interés económico. (Villadeval, 2008; Haldar, 2018; Macheyekei et al., 2020).

Se realiza mediante mediciones sistemáticas de uno o más parámetros químicos, generalmente en elementos traza. Las muestras se recogen de rocas, escombros, suelos, perfiles de meteorización, incluyendo sedimentos de gossan, arroyos o lagos, aguas subterráneas, vapor, vegetación y seres vivos. (Govett, 1983; Haldar, 2018)

En el sector minero que es el de interés en el presente proyecto, el propósito de la prospección geoquímica es descubrir campos de mineralización. Principalmente tiene dos enfoques: 1) La búsqueda de diferentes metales de un yacimiento ya conocido, tomando como base las extensiones y repeticiones de nuevos cuerpos mineralizados, para lo cual se hace una cartografía a escala detallada y 2) el descubrimiento de nuevos depósitos en distritos mineros previamente investigados con un tamaño considerable, para ellos se hace una cartografía a pequeña escala. (Ginzburg, 1960; Marjoribanks, 2010)

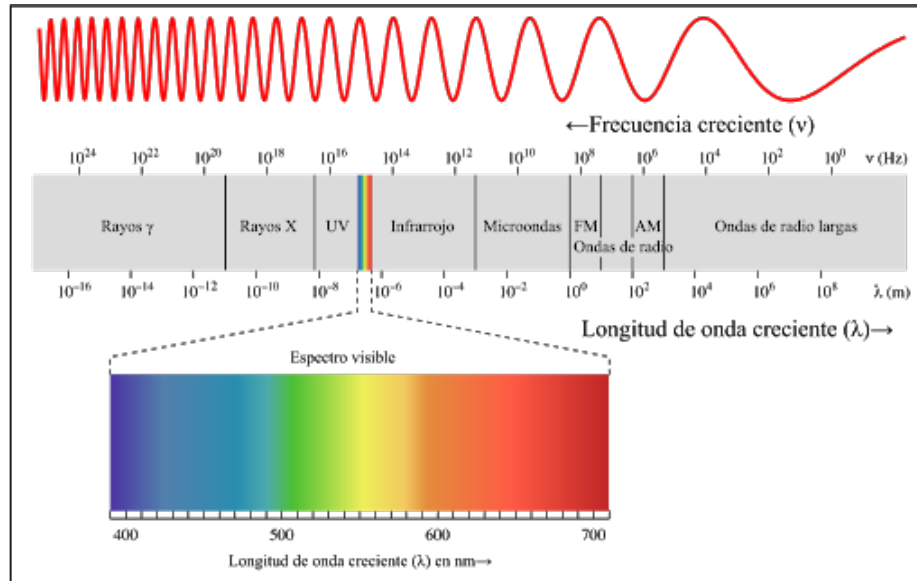
Según Hawkes (1957) Las anomalías podrían estar generadas por la presencia de cuerpos ígneos en profundidad, procesos metamórficos o procesos superficiales tales como agentes de la alteración, erosión o transporte superficial; Boyle (1979) complementa el concepto de anomalía concluyendo que la manifestación de estas se da mediante aureolas primarias o secundarias en las rocas, suelos, red de drenajes, etc. (Villadeval, 2008)

Las aureolas se originan como resultado de un proceso de dispersión, cuando es primaria, se enfoca en la distribución de los elementos en la roca no meteorizada, y está asociada a procesos magmáticos y alteraciones hidrotermales en la roca caja de las mineralizaciones; cuando por otro lado es secundaria, se refiere a la dispersión supergénica de los elementos que estaban concentrados en las aureolas primarias producto de factores geológicos, topográficos, biológicos y climáticos. (Villadeval *et al.*, 1995; Haldar, 2018; Macheyekei *et al.*, 2020)

2.7. Análisis de Teledetección

La teledetección es la ciencia que consiste en adquirir, procesar e interpretar imágenes y datos relacionados, adquiridos desde aviones y satélites, que registran la interacción entre la materia y la energía electromagnética (Sabins, 1997; 1999), permite analizar un objeto de estudio sin que exista un contacto entre este y el observador, lo que conlleva que se puedan realizar mediciones de ciertas propiedades en función de las propiedades del medio que separa al objeto y al sensor permitiendo acceder a un nivel considerable de información en menor tiempo debido al objetivo que se busca abarcar o por la reducida accesibilidad (Alonso, 2006)

Normalmente las mediciones se realizan en función de la radiación electromagnética, pues es la información mejor conducida en el aire, para la teledetección. Por lo tanto, el conocimiento del espectro electromagnético (**Fig. 15**) es necesario para comprender a mayor profundidad los fenómenos que puedan ocurrir. (Chuvieco, 1995).

Figura 15*Espectro electromagnético*

Nota. Muestra la organización de las bandas en función de las longitudes de onda o las frecuencias. Tomado y adaptado de Philip Ronan, 2008.

El espectro electromagnético focaliza cualquier tipo de energía en función de su longitud o frecuencia en una serie de bandas. Las bandas espectrales frecuentemente utilizadas son (Chuvieco, 1995; Rowan *et al.*, 2003):

2.7.1.1.1. Espectro visible (400 a 700 nm). Es la única radiación electromagnética que puede percibir el ojo humano, coincidiendo con las longitudes de onda en donde es máxima la radiación solar. Suelen distinguirse tres bandas elementales: azul (400 a 500 nm), verde (500 a 600 nm) y rojo (600 a 700 nm).

Infrarrojo cercano (700 a 1300 nm): También denominado infrarrojo reflejado y fotográfico, puesto que puede detectarse a partir de films dotados de emulsiones espaciales. Resulta de especial importancia por su capacidad para discriminar masas vegetales y concentraciones de humedad.

Infrarrojo medio (1300 a 8000 nm): Allí se mezclan los procesos de reflexión de la luz solar y de emisión de la superficie terrestre.

Infrarrojo lejano o térmico (8000 a 14000 nm): Comprende la porción emisiva del espectro, donde se detecta el calor proveniente de la cubierta terrestre.

Microondas (a partir de 1 mm): De gran interés por ser un tipo de energía que atraviesa la cubierta nubosa.

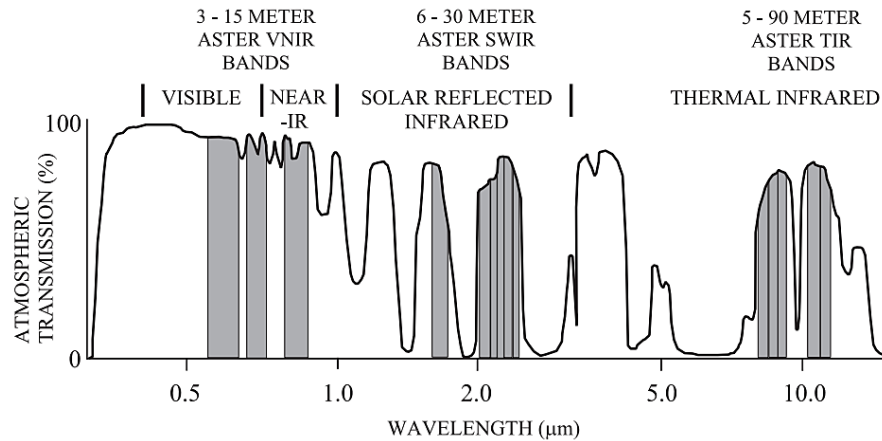
2.7.2. Influencia de la atmosfera en las longitudes de onda

La atmósfera está compuesta principalmente de oxígeno atómico (O₂), anhídrido carbónico, ozono (O₃) y nitrógeno, estos gases alteran la interacción entre el flujo energético y el sensor dejando como resultado la absorción atmosférica, consecuencia de ello, se tienen las ventanas atmosféricas las cuales son idóneas para realizar los análisis espectrales. (Sabins, 1997; Rodríguez, 2008; Clark & Lee, 2010)

Las principales ventanas atmosféricas son en el espectro visible e infrarrojo y varias en el infrarrojo medio, microondas en donde la atmósfera es prácticamente transparente (**Fig. 16**) (Sabins, 1997; Rowan *et al.*, 2003; Mamani, 2017).

Figura 16

Ventanas atmosféricas en el espectro electromagnético para las imágenes Aster



Nota. Ubicación de las ventanas atmosféricas (máximos de transmisión) en el espectro electromagnético para las imágenes Aster. Tomado y modificado de Rowan et al., 2003.

2.7.3. Sensor ASTER

ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) es un trabajo conjunto de la estadounidense NASA (National Aeronautics and Space Administration) y la japonesa METI (Ministerio de Economía, comercio e industria). Es un proyecto de alta resolución y es capaz de capturar información en 14 bandas, por 3 diferentes subsistemas, VNIR (Visible and Near Infrared), SWIR (Short Wave Infrared) y TIR (Thermal Infrared) cada uno con características representativas (**Fig. 17**). Las imágenes tienen un área de 60 kilómetros cuadrados y son captadas a una altura de 705 km. (NASA, 2004; Rodríguez, 2008; Caiza 2018)

El sensor ASTER está soportado en el satélite Terra lanzado en orbital el 18 diciembre de 1999 perteneciente a la misión internacional EOS (Earth Observing System), realizada por Japón, Estados Unidos y Canadá (NASA).

Terra está formado por 5 instrumentos diferentes, como los son el ASTER, CERES, MISR, MODIS, MOPPIT. Este satélite se encuentra a 705 kilómetros de altitud en órbita sincrónica con el sol a 98.5 grados del ecuador (NASA).

Figura 17

Bandas operativas del instrumento Aster.

Sensor	Banda	Rango del EM (μm)	Resolución (m)	Densidad de píxel (bits)
VNIR	1	0.520 – 0.600	15	8
	2	0.630 – 0.690		
	3	0.780 – 0.860		
SWIR	4	1.600 – 1.700	30	8
	5	2.145 – 2.185		
	6	2.185 – 2.225		
	7	2.235 – 2.285		
	8	2.295 – 2.365		
	9	2.360.2.430		
	10	8.125 – 8.475		
TIR	11	8.475 – 8.825	90	12
	12	8.925 – 9.275		
	13	10.250 – 10.950		
	14	10.950 – 11.650		

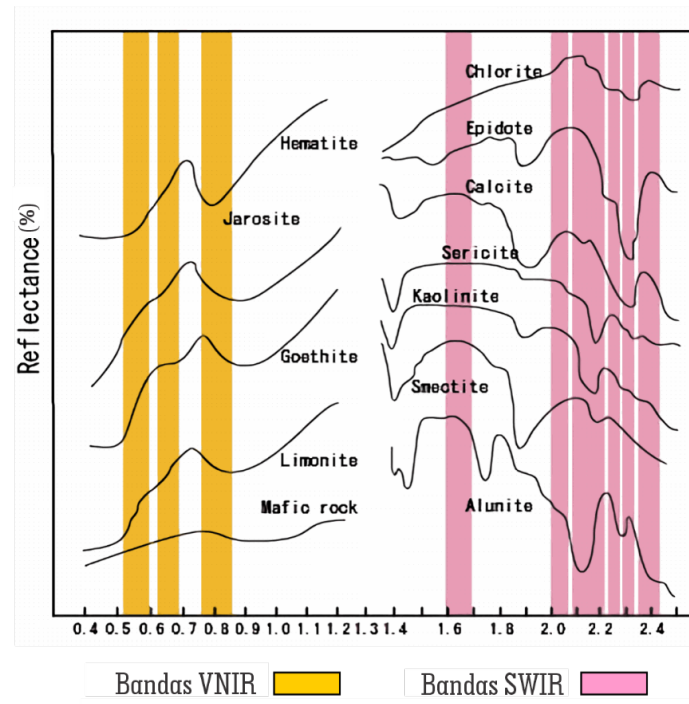
Nota. Tomado de (Abrams et al., 2002).

2.7.3.1. Subsistema Infrarrojo Visible y Cercano (VNIR). El subsistema VNIR es usado en el reconocimiento de zonas con vegetación y zonas de óxidos (Yamaguchi *et al.*, 1998) ya que percibe las vibraciones de los metales de transición, en especial hierro y algunas tierras raras (**Fig. 18**) (Rodríguez, 2008; Caiza 2018). Está constituido por tres bandas que captan las imágenes de manera vertical llamada también vista Nadir (3N), además de eso posee un telescopio adicional con el que se obtiene la vista de atrás (3B) o vista Backward, con estas bandas se construye el par estereoscópico lo que permite también realizar análisis topográficos. (Yamaguchi *et al.*, 1998; Rodríguez, 2008; Caiza, 2018).

2.7.3.2. Subsistema Infrarrojo de Onda Corta (SWIR). El subsistema SWIR tiene como fin el mapeo de suelos y minerales capta vibraciones moleculares de hidratos e hidróxidos de aluminio, hierro, magnesio y carbonatos (**Fig. 18**) (Yamaguchi *et al.*, 1998; Rodríguez, 2008; Caiza, 2018). Sus seis bandas sirven para diferenciar filosilicatos y carbonatos (Yamaguchi *et al.*, 1998), estas bandas también pueden asociarse a las longitudes de onda de absorción de minerales típicos de alteración argílica avanzada, argílica a filica y propilítica, a través de sus picos de absorción característicos 2.165 μm , 2.209 μm y 2.360 μm respectivamente (Rodríguez, 2008; Feizi & Mansouri, 2014; Caiza, 2018).

Figura 18

Características espectrales de minerales en los subsistemas de VNIR y SWIR del sensor ASTER.



Nota. Tomado de Rodríguez, 2008.

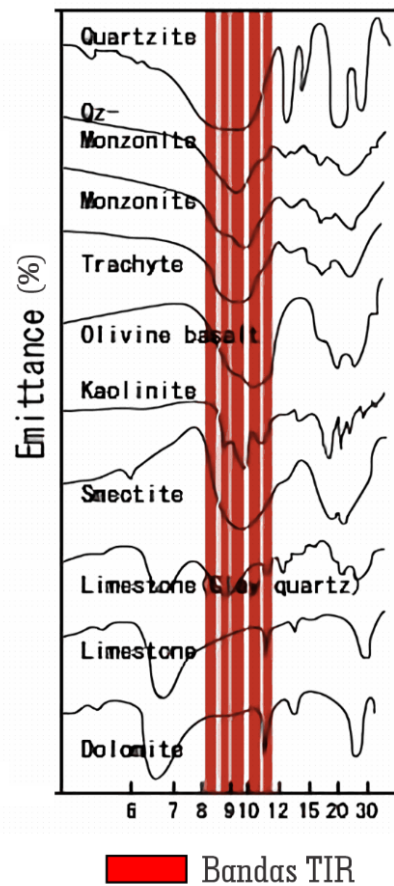
2.7.3.3. Subsistema Infrarrojo Termal (TIR). El subsistema TIR capta los principales minerales formadores de las rocas, es decir, los silicatos (**Fig. 19**) (Yamaguchi *et al.*, 1998; Rodríguez, 2008; Caiza, 2018). Su importancia también resalta en el monitoreo de temperaturas y gases a partir de imágenes nocturnas para evitar la componente de reflexión de la luz solar (Van der Meer & De Jong, 2001; Rodríguez, 2008; Caiza, 2018).

2.7.4. Nivel de data

Los datos producidos por el sensor ASTER, según su procesamiento se dividen en dos niveles: Nivel 1A (L1A) y Nivel 1B (L1B), donde la L proviene de la palabra nivel en inglés, es decir level. (Abrams *et al.*, 2002; ERSDAC, 2003)

Figura 19

Características espectrales de minerales en el subsistema de TIR del ASTER.



Nota. Tomado de Rodríguez, 2008.

2.7.4.1. Nivel 1A. Son datos crudos reconstruidos y no procesados a resolución completa. Contiene los datos de los coeficientes radiométricos, geométricos, las tablas de corrección del paralaje del SWIR, y también datos auxiliares como la fecha y hora de la captura de la imagen y del procesamiento de la misma, pero no están aplicados a la imagen. Es comúnmente utilizado para realizar modelos de elevación digital. (Fujisada, 1998; Abrams *et al.*, 2002; ERSDAC, 2003)

2.7.4.2. Nivel 1B. Los datos de este nivel se generan aplicando los coeficientes radiométricos y geométricos a la imagen del Nivel 1A. La imagen se proyecta en un mapa girado (orientado a la trayectoria) a resoluciones completas del instrumento. (Fujisada, 1998; Abrams *et al.*, 2002; ERSDAC, 2003). La generación de datos de este nivel incluye el registro de los datos SWIR y TIR a los datos VNIR. Y conjuntamente, para el SWIR se corrigen los errores de paralaje debidos a las localizaciones espaciales de todas sus bandas. (Abrams *et al.*, 2002)

2.7.5. Procesamiento de imágenes satelitales ASTER

Existen varias técnicas y métodos que se han desarrollado para definir las características de la superficie terrestre mediante imágenes captadas por sensores remotos. El procesamiento de imágenes es la etapa en donde se hacen las correcciones necesarias en base al tipo de imagen que se tiene. (Fujisada, 1998; Abrams *et al.*, 2002; Rodríguez, 2008; Caiza, 2018)

2.7.5.1. Corrección Geométrica. Como se mencionó antes, esta corrección se realiza en las imágenes satelitales del Nivel 1A, consiste en el ajuste de las propiedades geométricas de la imagen para definir la escala, rotación, y corrección de otras distorsiones espaciales, de tal manera que esté de acuerdo con un determinado sistema de coordenadas por lo cual se asigna una coordenada (x,y) a cada pixel de la imagen y adicionalmente, la corrección de altura sobre el nivel del mar. (Fujisada, 1998; Pérez & Muñoz, 2006; Schowengerdt, 2007; Rodríguez, 2008; Caiza, 2018).

También se proyectan los datos a un plano de referencia predeterminado como Datum, en coordenadas UTM o Geográficas. (Fujisada, 1998; Pérez & Muñoz, 2006; Schowengerdt, 2007; Rodríguez, 2008; Caiza, 2018)

2.7.5.2. Corrección Radiométrica. Con este proceso se busca remover el efecto de los diferentes ángulos de incidencia de la energía solar y de la distancia Tierra-Sol, que se producen como consecuencia de las diferencias de tiempo de adquisición de las imágenes. Así mismo, pretende corregir la neblina y/o el enmascaramiento de nubes encontradas en la imagen (Schowengerdt, 2007; Cabrera *et al.*, 2011). Algunos de estos efectos se deben a la dispersión producida por las moléculas de los gases y a la presencia de partículas del mismo tamaño que las longitudes de onda (aerosoles), pero suelen ser esporádicos y presentarse únicamente en días poco nublados (Schowengerdt, 2007; Mamani, 2017).

2.7.5.3. Corrección Atmosférica. Esta corrección pretende obtener como resultado final una imagen en valores de reflectancia que mejora la separabilidad espectral de los objetos presentes en la imagen corregida comparada con la imagen original (Cabrera *et al.*, 2011). Consiste en corregir la radiación que cualquier superficie refleja, sobre la radiación que incide sobre la misma, obteniendo así la reflectancia relativa de una imagen satelital, la cual sirve para visualizar los picos de absorción de cada una de las bandas (Schowengerdt, 2007; Rodríguez, 2008; Caiza, 2018).

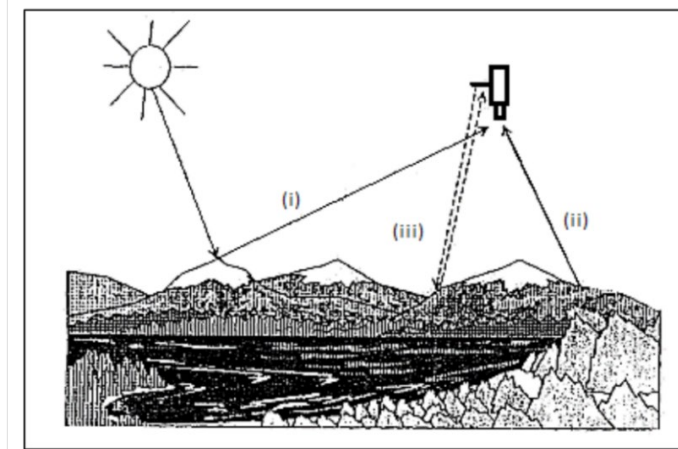
2.7.5.4. Combinación de bandas. Las imágenes en color se forman a partir de composiciones del triplete de niveles de gris correspondientes a las bandas con los colores primarios de la pantalla (RGB): rojo, verde y azul de una imagen multiespectral (Schowengerdt, 2007). En las imágenes Aster comúnmente se realizan combinaciones de bandas en los subsistemas VNIR y SWIR para reconocer diferentes características geológicas tales como: Alteraciones hidrotermales, litología, zonas de vegetación, agua, nieve, entre otros aspectos. (Ninomiya, 2004; Rowan *et al.*, 2003; Feizi & Mansouri, 2014; Abrams & Yamaguchi, 2019)

2.7.5.5. Cociente de bandas. El cociente de bandas es un método común para procesar imágenes de teledetección, se utiliza para resaltar ciertas características o materiales que no pueden verse en las bandas en bruto (Inzana *et al.* 2003; Lillesand *et al.*, 2015). Se aplica comúnmente para discriminar zonas de alteración hidrotermal en el SWIR, ya que en esta parte de la región espectral presentan picos de absorción y de reflectancia característicos (Yamaguchi, 1987). Esta técnica permite mapear el potencial/la abundancia de un elemento/mineral específico basándose en las características de absorción de los respectivos minerales. Las imágenes se realizan simplemente dividiendo los valores de DN (Número Digital) de cada píxel en una banda por los valores de DN de otra banda (Drury, 1993; Arivazhagan & Anbazhagan, 2017).

2.7.5.6. Espectroscopia. La espectroscopia es el estudio de la luz en función de la longitud de onda que ha sido emitida, reflejada o dispersada desde un sólido, líquido o gas (**Fig. 20**) (Clark & Roush, 1984).

Figura 20

Interacciones básicas entre la energía electromagnética y la superficie terrestre

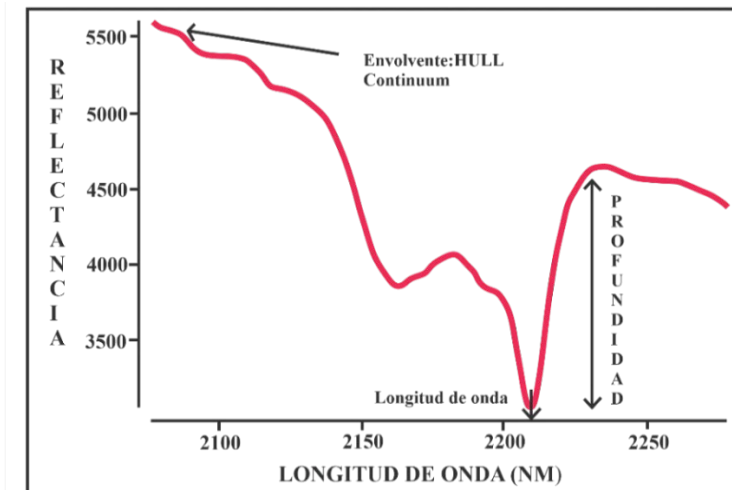


Nota. Interacciones básicas entre la energía electromagnética y la superficie terrestre. Tomado y adaptado de Chivueco 1995.

Para la identificación de minerales, se usa la técnica de espectroscopia de reflectancia basada en la emisión de radiación electromagnética en la región del espectro infrarrojo cercano (Hunt & Salisbury, 1970; Adams, 1974; Clark, 1999). Este método ha sido ampliamente utilizado en la búsqueda de yacimientos minerales (Goetz *et al.*, 1985; Kruse, 1988; Kruse *et al.*, 1993; Sabins 1997, 1999; Pérez *et al.*, 2010; Beiranvand & Hashim, 2012).

2.7.5.6.1. Firma Espectral. Una firma espectral se genera a partir de una selección de datos espectrales de minerales, en la cual se resume la información intrínseca disponible en los espectros, convirtiéndose así en una referencia inmediata para la interpretación de las características visibles y del infrarrojo cercano, es la forma en la que una determinada cobertura terrestre responde en distintas longitudes de onda (Hunt, 1977; Litvak & Godeas, 2003; Pérez *et al.*, 2010). Cada material tiene una firma representativa que lo caracteriza y diferencia de otros, es decir, su “huella dactilar”, y todo esto depende de sus propiedades y de la manera en que haya sido reflejada la radiación incidente (Hunt, 1977; Pérez *et al.*, 2010; Caiza, 2018).

2.7.5.6.2. Componentes de la firma espectral. La firma espectral consiste en una curva envolvente o continuum (HULL) y de rasgos de absorción que tienen posiciones específicas de longitud de onda (**Fig. 21**). Los rasgos de absorción son mostrados convencionalmente como mínimos respecto al envolvente general de curvas. La intensidad de los rasgos o profundidad es controlada por la intensidad de las vibraciones de energía presentes en las longitudes de onda específicas, que son características de cada mineral individual (Hunt, 1977; Goetz *et al.*, 1982; Mamani, 2017; Caiza, 2018).

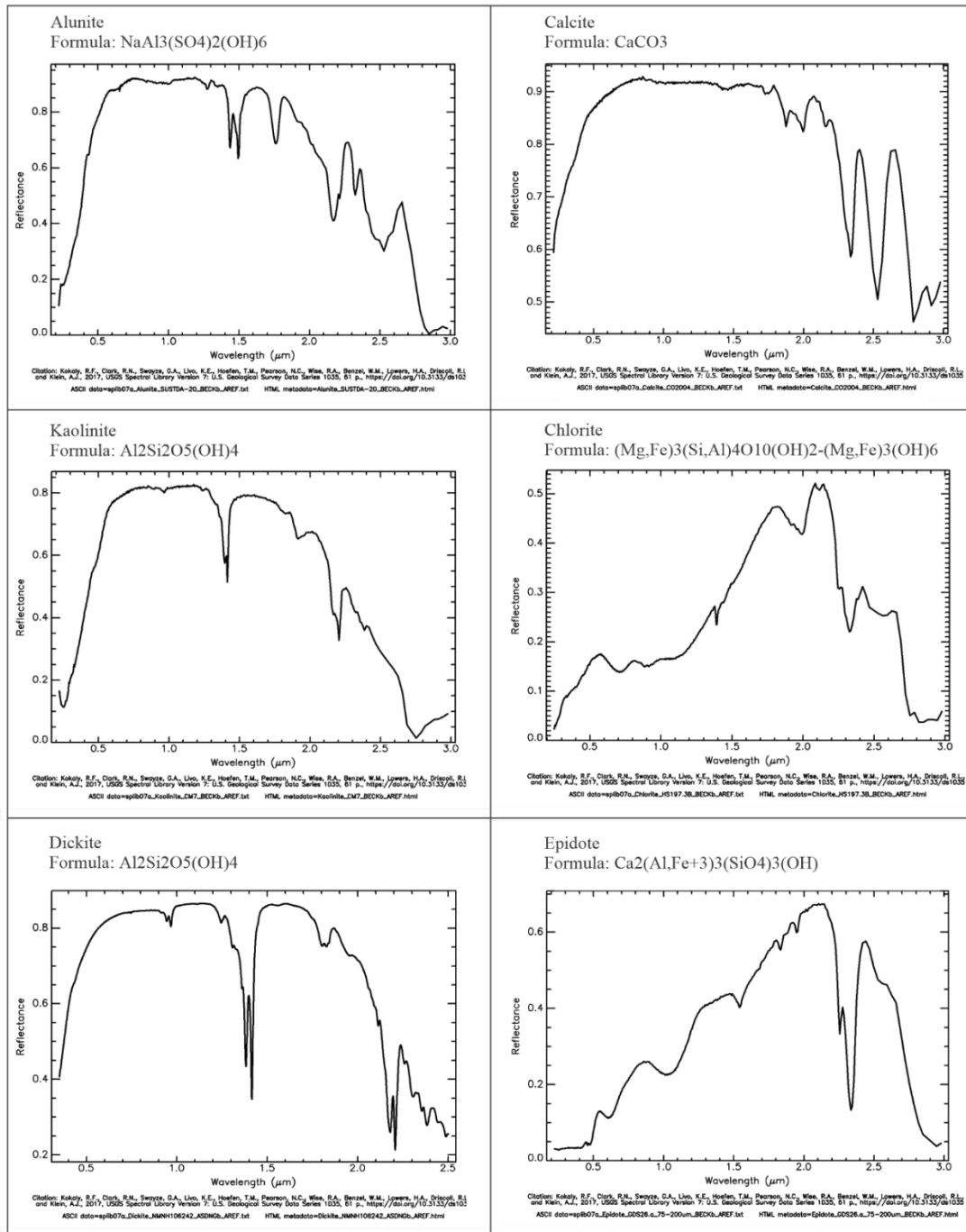
Figura 21*Componentes de una firma espectral*

Nota. Componentes de una firma espectral: envolvente o continuum y rasgos de absorción en base a Hunt, 1977; Goetz et al., 1982. Tomado y modificado de Mamani, 2017.

2.7.5.6.3. Firmas espectrales de minerales (Inventario de la USGS). Los investigadores del Laboratorio de Espectroscopia del USGS han medido la reflectancia espectral de miles de materiales en el laboratorio y los han recopilado en la Biblioteca Espectral del USGS (<http://speclab.cr.usgs.gov/spectral-lib.html>), en el presente documento se presentan las firmas espectrales de los minerales comúnmente utilizados en la identificación de alteraciones hidrotermales (**Fig. 22** y **Fig. 23**).

Figura 22

Firmas espectrales de minerales identificadores de alteraciones hidrotermales

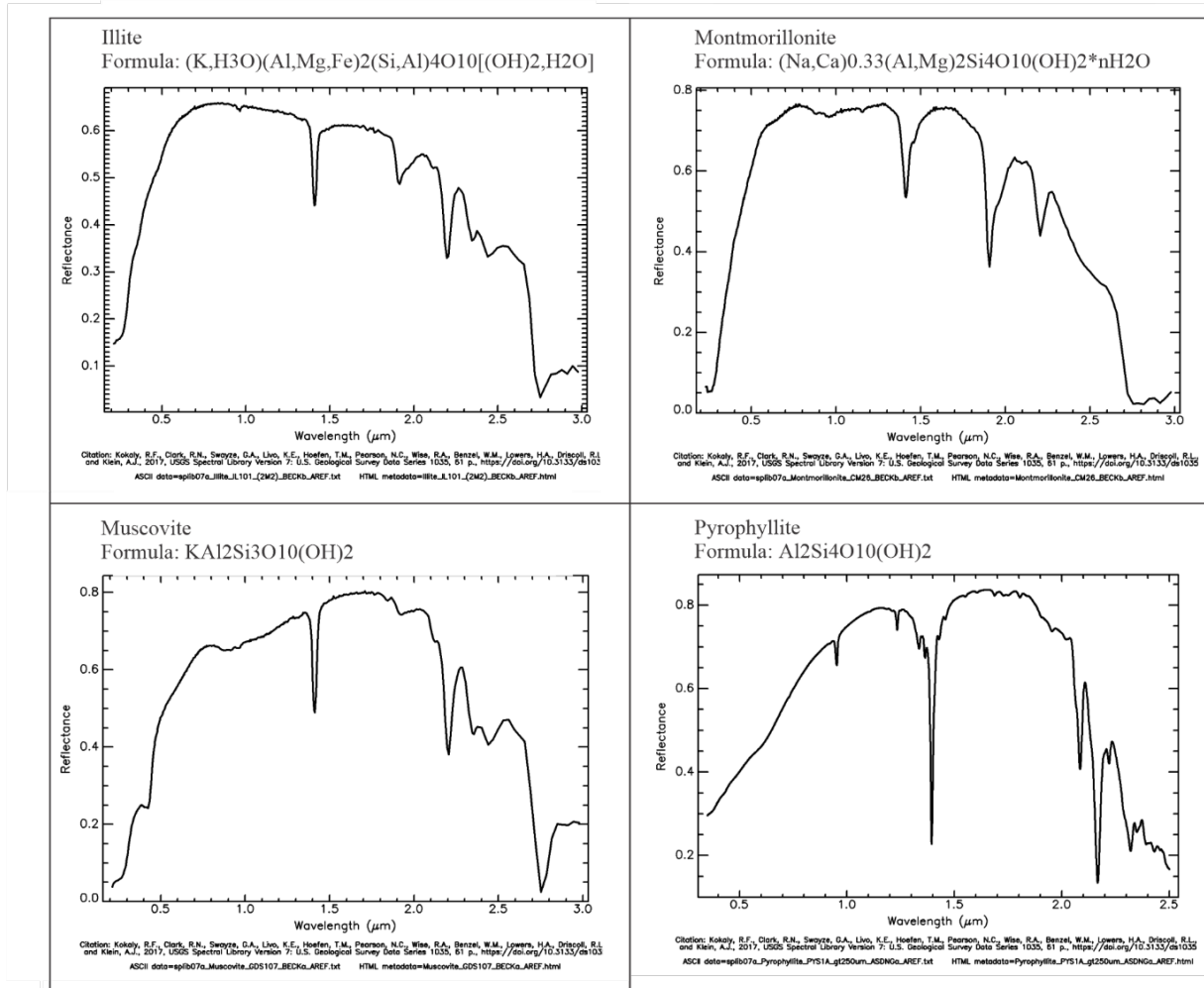


Nota. Minerales identificadores de alteraciones hidrotermales: Alunita, Caolinita, Calcita, Clorita, Dickita y Epidota.

Tomado y modificado de Spectral Library Version 7-USGS.

Figura 23

Firmas espectrales de minerales identificadores de alteraciones hidrotermales (2)



Nota. Minerales identificadores de alteraciones hidrotermales: Illita, Montmorillonita, Moscovita y Pirofilita. Tomado y modificado de (Spectral Library Version 7-USGS)

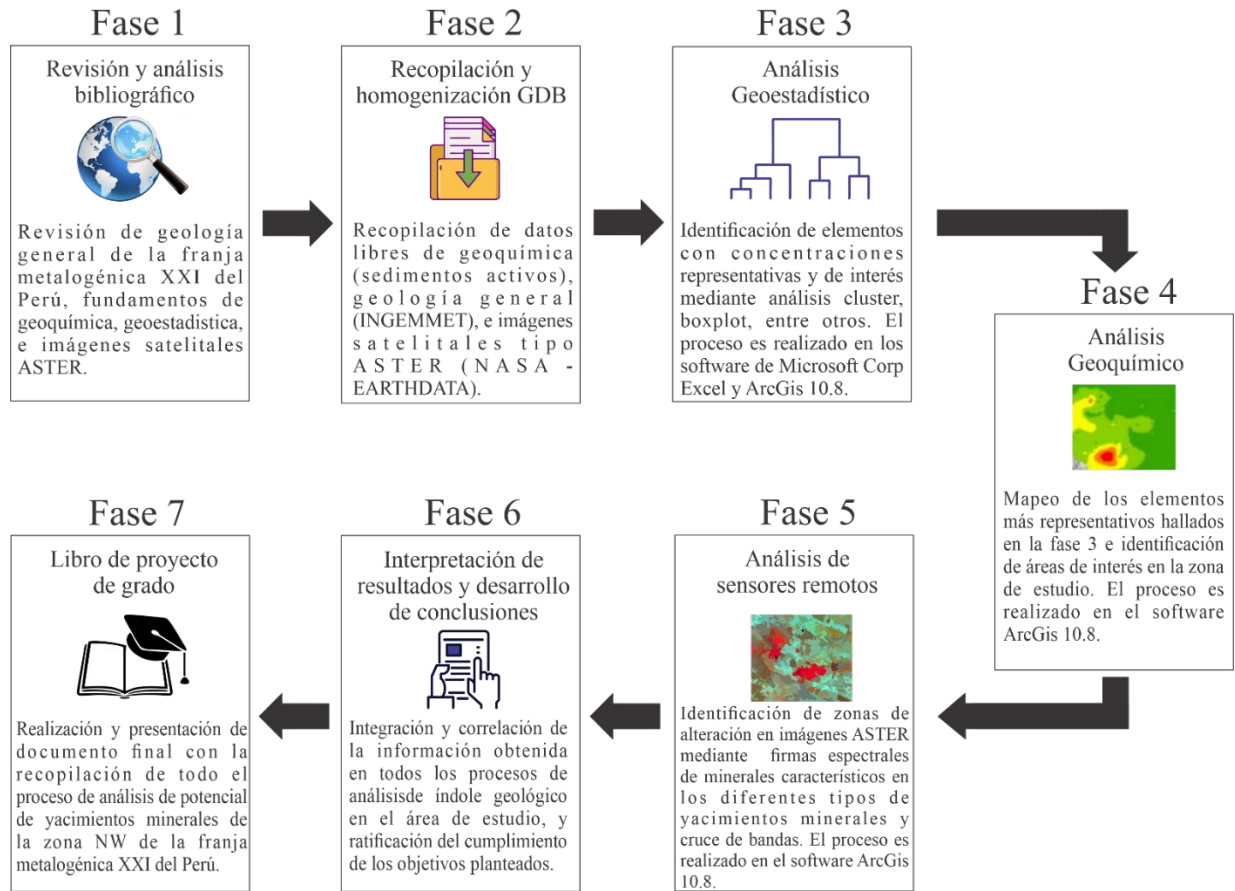
3. Metodología

El proceso metodológico que se lleva a cabo para el cumplimiento de los objetivos planteados se divide en 7 fases (**Fig. 24**).

En resumen, consta de: Revisión y análisis bibliográfico de la geología general, fundamentos de geoquímica, geoestadística y sensores remotos; Descarga de datos libres de geoquímica y obtención de imágenes satelitales ASTER; Análisis geoestadístico, geoquímico y de sensores remotos; Interpretación y desarrollo de resultados y finalmente, realización del documento final con la recopilación de todo el proceso de análisis de potencial de yacimientos mineros en la zona NW de la franja metalogénica XXI del Perú.

Figura 24

Proceso metodológico de análisis del área de estudio.



Nota. El proyecto se divide en 7 fases, que van desde la búsqueda de información bibliográfica, hasta la realización del documento final con la integración de todos los análisis geológicos realizados (geoquímica, geoestadística y sensores remotos).

4. Resultados

En base a los métodos aplicados se generaron una serie de resultados individuales que corresponderán a una sección en específico detalladas a continuación. Las observaciones de cada nivel de resultados serán explicadas en esta misma, el amalgamado de todos los resultados será realizado en el siguiente capítulo.

4.1. Geoestadística y Geoquímica

Para llevar a cabo la caracterización geoestadística de una forma globalizada se realizó un Gráfico de Intervalos (**Fig. 25**), el cumpliendo con su función de establecer la media en un intervalo del 95% de todos los elementos a disposición (Ledesma, 2004).

El grafico de intervalo es usado para encontrar cuales son los elementos que tienen una media considerablemente mayor, para poder catalogar a los elementos que corresponde a elementos traza, estos corresponden a los elementos cuya concentración es menor a 1000 partes por millón (ppm) o 0.1 por ciento (%), por lo que elementos como el Al, Fe, S, Ca, K, Mg, son para análisis más profundos, esto dado a que este proceso llega a dar una idea de los valores que se pueden esperar al tomar una muestra más pequeña y que represente la realidad (Candia & Caiozzi, 2005), por similitud a estos también son descartados el P y el Na.

Los demás elementos se consideran de aquí en adelante como elementos traza, sin embargo, no todos serán objeto de estudios posteriores, pues todavía es necesario filtrarlos. Tomando en cuenta que los datos geoquímicos son de sedimentos activos analizados en laboratorio (Aljovín *et al*, 2017), algunas muestras contienen elemntos que su concentración no es medible por los métodos instrumentales aplicados, bien sea porque su concentración es menor al mínimo valor detectable o el caso contrario que es menos frecuente que su concentración es muy alta.

Figura 25

Gráfico de intervalos del 95% de confianza de la media de todos los elementos.



Nota. Las circunferencias indican el valor de la media en el intervalo seleccionado, la línea vertical indica la confianza en la media alrededor de ese intervalo.

Posteriormente se filtraron los elementos cuyos casos anteriormente descritos fuera inferior al 70% para con esto tener un adecuado control estadístico y que los resultados del presente estudio sean los mas próximos a la realidad, de esta forma su presencia no genere ruido en las tecnicas aplicadas o falsos resultados. Elementos como Hg, B, Se, Te, W, Ge, In, Ta, Ti, Tb e Yb son descartados en esta etapa.

Como se evidencia en la **Figura 26** algunos de los elementos que han aprobado estos requerimientos, presentan estos casos en una menor proporción, para estos elementos se seleccionan las muestras que estan en esta situación y se toma el 50% del valor limite inferior de detección para los casos de menor concentración, en contraste los casos que su concentración sea muy alta y sobre pase el limite superior detecccion se toma este valor mas una unidad. El numero de muestras a las que se le aplicó este proceso esta especificado allí mismo, siendo el restante de las muestras optimas (segunda fila).

De esta forma quedan 34 elementos traza filtrados y con las condicines para que los resultados a partir de estos sean optimos y se garantice que son estadisticamente representativos de las condiciones en la realidad, aquí tambien se ignora el Cr y Nb al generar ruido en el dendograma, resultando en 32 elementos traza. Seguido de esto se agrupan los elementos traza con ayuda de un dendograma realizado con enlace completo como metodo de agrupamiento evaluando la similaridad (**Fig. 27**). los seis cluster estan seleccionados de tal forma que empiezan con una similaridad mayor de 50 para asegurar que los elementos que componen cada cluster tengan un grado alto conexión entre si, en consecuencia los elementos correspondientes a cada cluster sean agrupados en todos los resultados que se generen, cabe resaltar que una alta similaridad en los elementos en el análisis cluster no indica de forma directa una dependencia lineal.

Figura 26:

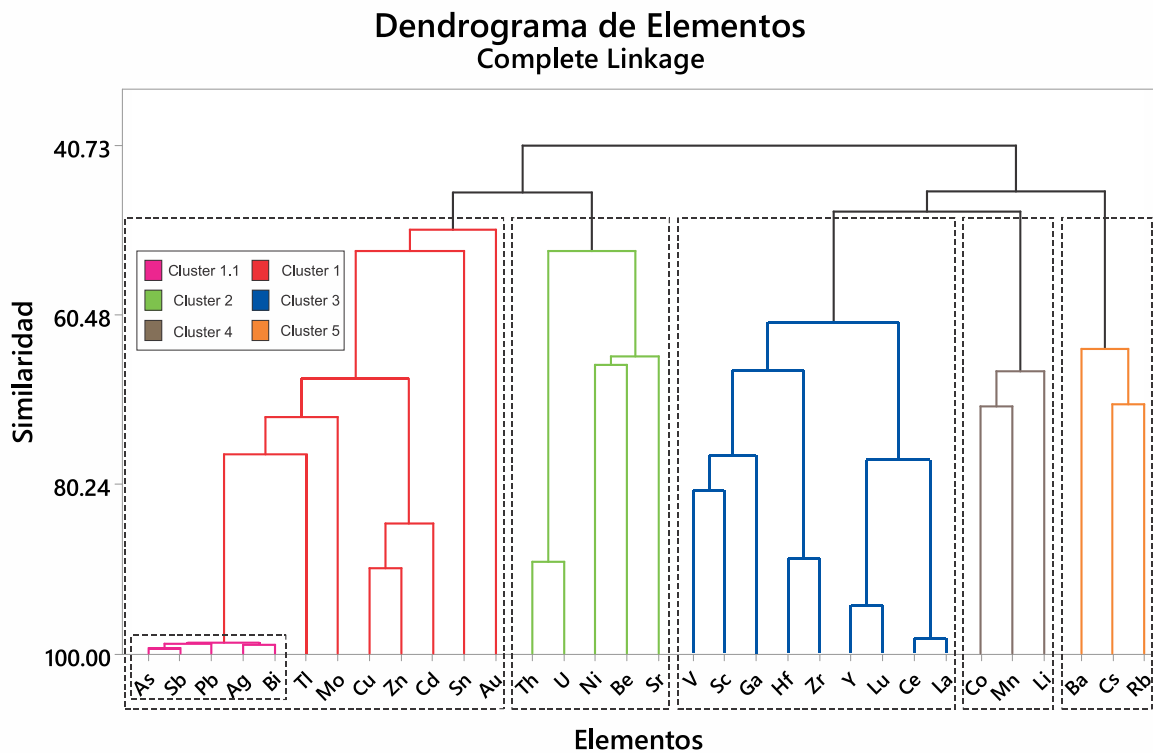
Resumen de geoestadística descriptiva aplicada a los elementos traza seleccionados, clasificados y transformados post-normalización

Elemento	As	Sb	Pb	Ag	Bi	Tl	Mo	Cu	Zn	Cd	Sn	Au	Th	U	Ni	Be
N	745 / 754	705 / 754	753 / 754	591 / 754	529 / 754	680 / 754	754 / 754	753 / 754	754 / 754	754 / 754	732 / 754	596 / 754	754 / 754	743 / 754	753 / 754	741 / 754
N Porcentual	98.81%	93.50%	99.87%	78.38%	70.16%	90.19%	100.00%	99.87%	100.00%	100.00%	97.08%	79.05%	100.00%	98.54%	99.87%	98.28%
Media (X)	11.7791	1.4600	22.8154	0.2350	0.5872	0.1871	1.9169	29.0357	88.8331	0.4138	0.7401	0.0355	2.7129	0.5195	13.2953	0.6302
Desviación Estandar (σ)	3.8403	3.3253	2.1695	3.6924	3.4790	2.0323	2.6072	2.1223	1.9040	2.9793	2.1675	2.5443	1.9705	2.1258	2.0086	1.6478
Varianza (σ ²)	6.1135	4.2265	1.8218	5.5088	4.7323	1.6536	2.5051	1.7616	1.5139	3.2928	1.8192	2.3919	1.5842	1.7660	1.6265	1.2833
Mínimo (P1)	0.11	0.07	2	0.01	0.02	0.02	0.08	3	8.91	0.01	0.05	0.005	0.1	0.03	0.7	0.06
Primer Cuartil(Q1)	5.37	0.68	15.2	0.06	0.18	0.1	1.01	20	64	0.202454447	0.5	0.008	1.8	0.31	8.9	0.46
Mediana (P50)	12	1.24	20.2	0.15	0.32	0.14	1.539967532	26	84.4985207	0.34	0.75	0.011	2.844960457	0.51	14	0.64
Tercer Cuartil (Q3)	23	2.67	29.75	0.324961536	1.23	0.23	3.3	36.5	109	0.747487402	1.032490949	0.019	4.089963205	0.83	21.21	0.9
Percentil Noventa (90)	62.1922	8.3139	53.2800	0.7600	2.1520	0.3900	6.4570	65.4440	167.0943	1.7079	1.5000	0.0440	5.7759	1.2200	29.8790	1.1000
Maximo (P99)	11597.0000	2162.0000	9599.0000	103.8000	232.8200	3.4300	89.3500	1552.0000	1798.0000	39.3300	245.0000	2.8730	47.7000	12.4000	238.7000	2.2100
Rango intercuantil (IQR)	4.2831	3.9265	1.9572	5.4160	6.8333	2.3000	3.2673	1.8250	1.7031	3.6921	2.0650	2.3750	2.2722	2.6774	2.3831	1.9565
Error estandar (ES)	1.0505	1.0463	1.0286	1.0552	1.0557	1.0276	1.0355	1.0278	1.0237	1.0406	1.0290	1.0390	1.0250	1.0281	1.0257	1.0185
X+2σ (Threshold)	173.7167	16.1444	107.3824	3.2038	7.1070	0.7729	13.0304	130.7763	322.0534	3.6724	3.4768	0.2300	10.5337	2.3475	53.6387	1.7111
X+2ES (Threshold)	12.9997	1.5983	24.1403	0.2617	0.6544	0.1976	2.0555	30.6726	93.0990	0.4480	0.7836	0.0384	2.8503	0.5490	13.9886	0.6537

Elemento	Sr	V	Sc	Ga	Hf	Zr	Y	Lu	Ce	La	Co	Mn	Li	Ba	Cs	Rb
N	754 / 754	745 / 754	748 / 754	753 / 754	588 / 754	752 / 754	754 / 754	656 / 754	754 / 754	753 / 754	754 / 754	754 / 754	749 / 754	754 / 754	750 / 754	753 / 754
N Porcentual	100.00%	98.81%	99.20%	99.87%	77.98%	99.73%	100.00%	87.00%	100.00%	99.87%	100.00%	100.00%	99.34%	100.00%	99.47%	99.87%
Media (X)	44.9681	45.0744	4.2581	4.4691	0.1640	2.6487	7.2748	0.1126	16.3401	7.0108	12.0605	693.4658	9.9363	115.7398	2.3319	10.6931
Desviación Estandar (σ)	2.8579	2.2122	1.7004	1.7219	2.0115	2.3175	1.9316	1.7623	2.1161	2.1486	1.6191	1.6844	1.7178	2.0373	2.3121	1.7120
Varianza (σ ²)	3.0122	1.8784	1.3255	1.3436	1.6298	2.0268	1.5426	1.3786	1.7539	1.7949	1.2614	1.3124	1.3401	1.6593	2.0189	1.3352
Mínimo (P1)	2	3.22	0.1	0.2	0.03	0.1	0.16	0.02	0.29	0.2	0.8	76	0.76	7	0.08	0.5
Primer Cuartil(Q1)	22	25	3	3.33	0.06	1.6	5.122454394	0.06	11.41497049	4.9	9.649984477	512.4992692	7.53	71.24869032	1.33	8.35
Mediana (P50)	46.3500	50.0000	4.3000	4.8000	0.0900	2.5000	8.3850	0.0900	19.1997	8.5000	12.4599	745.4998	10.6000	114.0000	2.1849	11.2400
Tercer Cuartil (Q3)	77.6750	91.0000	6.1000	6.5000	0.1600	4.4474	11.2000	0.1200	26.9000	11.9000	15.5875	977.0000	14.1000	192.7495	4.0475	15.0000
Percentil Noventa (90)	194.4959	121.5990	8.0000	7.9780	0.2700	8.1910	13.8699	0.1500	34.7620	15.1000	20.5280	1256.3997	19.0000	295.0000	6.6910	19.3000
Maximo (P99)	815	357	13	30.47	0.8	30.28	40.22	0.3	68.5	41.5	50.5	2833	50	951	57.4	42.1
Rango intercuantil (IQR)	3.5307	3.6400	2.0333	1.9520	2.6667	2.7796	2.1865	2.0000	2.3566	2.4286	1.6153	1.9063	1.8725	2.7053	3.0432	1.7964
Error estandar (ES)	1.0390	1.0295	1.0196	1.0200	1.0292	1.0311	1.0243	1.0224	1.0277	1.0283	1.0177	1.0192	1.0200	1.0263	1.0311	1.0198
X+2σ (Threshold)	367.2794	220.5833	12.3120	13.2513	0.6637	14.2263	27.1436	0.3498	73.1670	32.3657	31.6179	1967.4791	29.3219	480.3879	12.4662	31.3421
X+2ES (Threshold)	48.5423	47.7745	4.4267	4.6497	0.1738	2.8162	7.6322	0.1177	17.2570	7.4127	12.4914	720.3078	10.3371	121.8970	2.4791	11.1204

Figura 27

Dendrograma evaluando similaridad por método de enlace completo de elementos traza

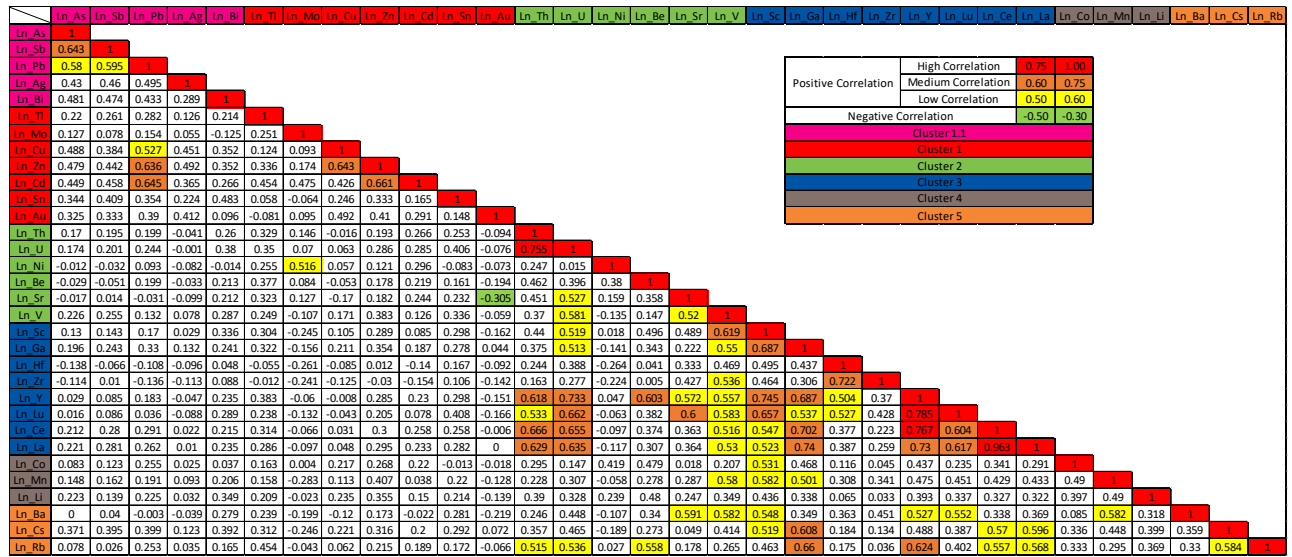


Nota. Se observan seis clusters enmarcados en un recuadro punteado y con los colores correspondiente que los identificarán en todos los resultados.

Como consecuencia de lo anterior es necesario evaluar si existe alguna correlación lineal, por lo tanto se usa la matriz de correlación de coeficiente de Pearson (**Fig. 28**), la cual con un análisis visual se puede determinar cuales elementos tienen mayor dependencia lineal, al sobreponer esto con los resultados del análisis cluster se puede encontrar más fácil cuales son los elementos que están relacionados entre sí, por lo que de esta forma se puede ir reconociendo cuales son los elementos que pueden indicar la presencia de otros cuando estos tienen una menor concentración. Esta matriz de correlación es realizada solo en base del coeficiente de correlación de Pearson.

Figura 28

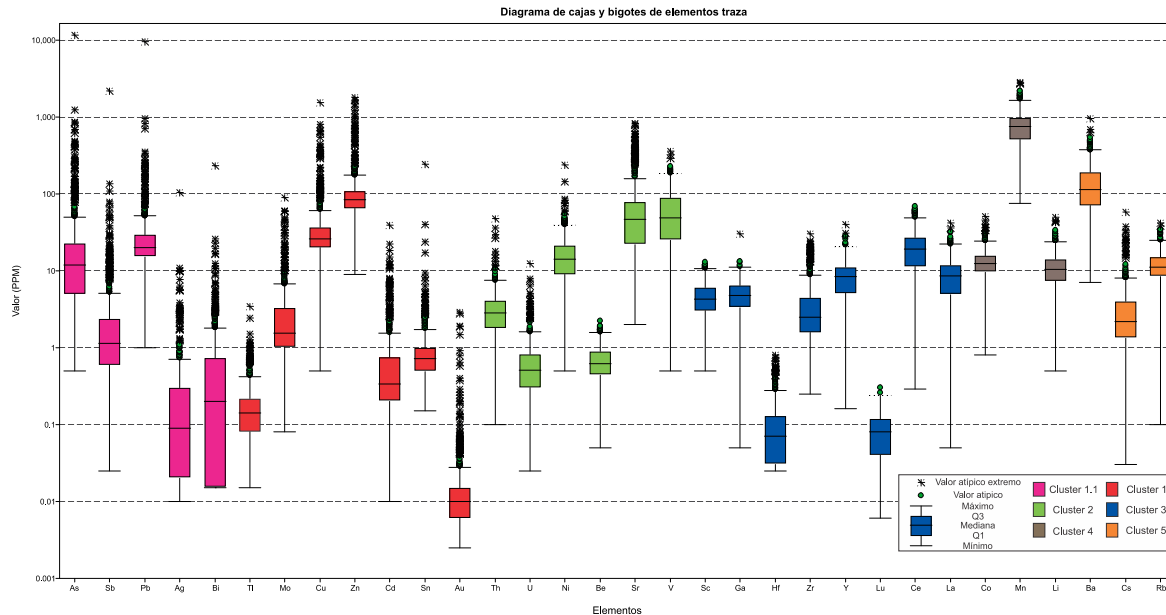
Matriz de correlación de coeficientes de correlación de Pearson.



Nota. Los elementos traza seleccionados se encuentran dispuestos según la clasificación realizada en el dendograma. Luego, el color verde en los valores de correlación de Pearson corresponde a los valores representativos que van desde -0.5 a -0.3, los amarillos los valores de correlación positiva moderada que van desde 0.5 a 0.6, los naranjas los altos que van desde 0.6 a 0.75 y los rojos los más altos que van desde 0.75 a 1.0 en el coeficiente de correlación de Pearson.

Figura 29

Diagrama de cajas y bigotes de los elementos traza



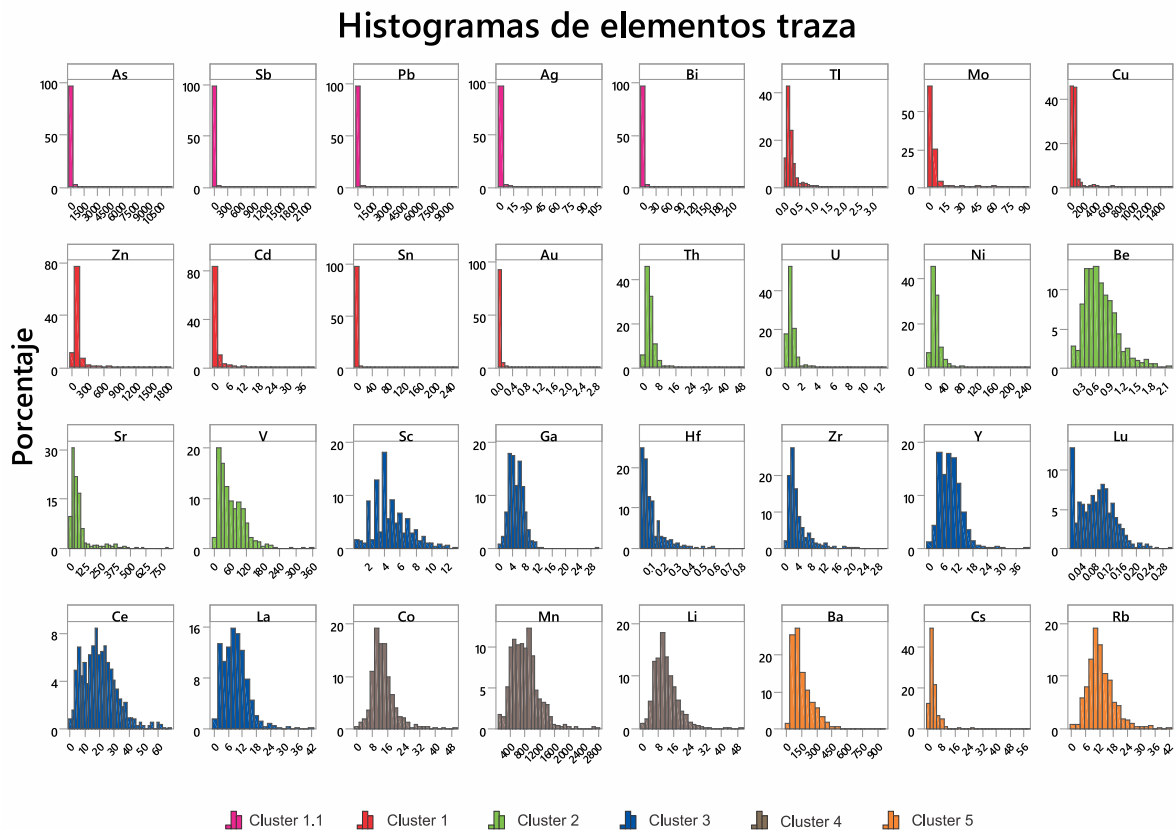
Nota. Los elementos trazan seleccionado se encuentran dispuestos según la clasificación realizada en los clusters. Los diversos elementos que componen las cajas se encuentran detallados en la leyenda en la esquina inferior derecha.

Después de establecer la relación entre algunos elementos se realiza el diagrama de cajas y bigotes (**Fig. 29**) con el fin de conocer acerca de la distribución de características poblaciones de los elementos, como es la media, mínimos, máximos, cuartiles, etc. Todas estas propiedades se encuentran descritas a detalle en la **Figura 26**, adicionalmente allí se plasman otras propiedades que serán usadas de forma posterior y que tienen un importante significado, sin embargo, las propiedades en el diagrama de cajas y bigotes (Boxplot) pueden variar ya que al analizar los histogramas de los elementos traza (**Fig. 30**) se encuentra que la asimetría a la izquierda es demasiada alta.

Lo anterior se debe a que los elementos traza están siguiendo una distribución de tipo lognormal, (Cressie, 1993; Hair *et al*, 1999), siendo necesario realizar una normalización a los elementos traza seleccionados y que de esta formas las propiedades extraídas tenga un sentido estadístico, por lo que las previamnete mencionadas, las cuales se encuentran en la **Figura 26**, corresponden a dicha normalización y posterior regresión, para que estas se encuentren en una escala real y no logarítmica.

Figura 30

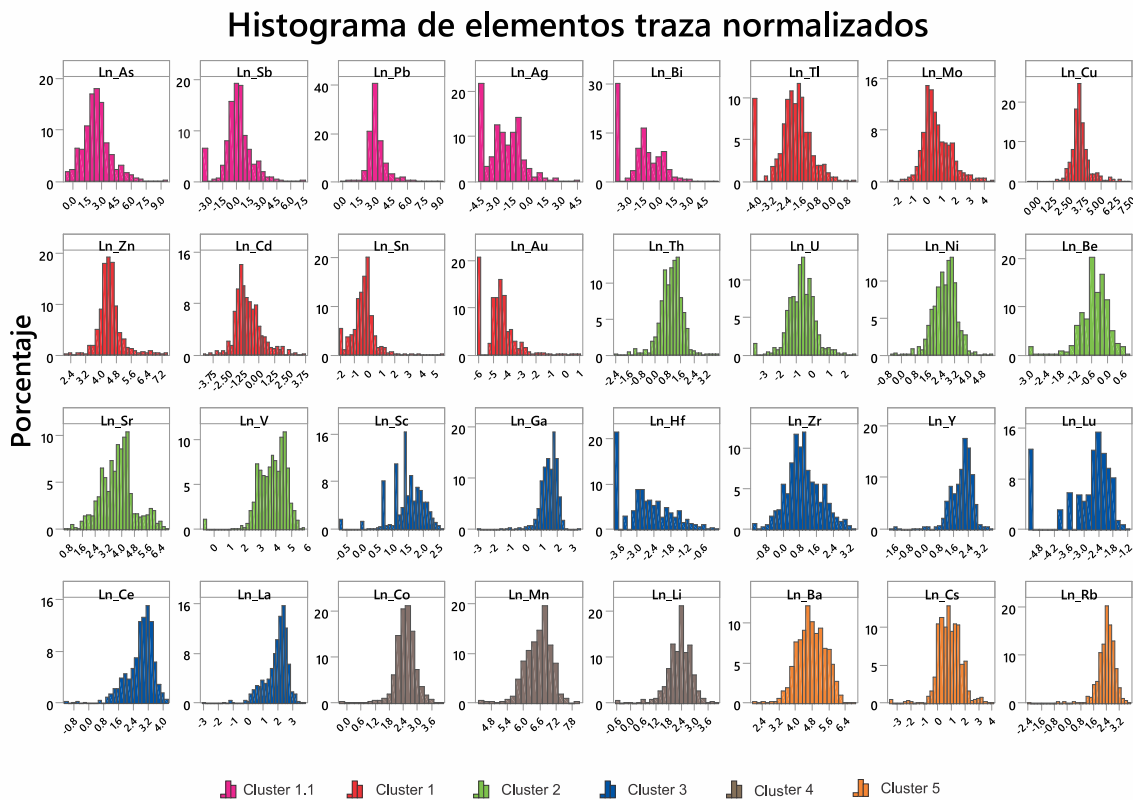
Histogramas de los elementos traza seleccionados. Los elementos se encuentran dispuestos según la clasificación realizada en el dendograma.



Posterior a la normalización se realiza la verificación de las propiedades en la **Figura 26**, es importante aclarar que en la matriz de correlación de coeficiente de Pearson (**Fig. 28**), se encuentra aplicada esta normalización, ya que esto es un requisito fundamental para que el coeficiente de Pearson sea estadísticamente válido. Al evaluar los datos normalizados con ayuda de un histograma como se puede observar en la **Figura 31** se percibe que los elementos han perdido la extrema asimetría en el histograma de elementos traza (**Fig. 30**), por lo que se acepta que la normalización ha sido exitosa y las propiedades que se pueden obtener de allí son válidas y representativas (Hair *et al*, 1999).

Figura 31

Histograma de elementos traza normalizados por logaritmo natural. Los elementos se encuentran dispuestos según la clasificación realizada en el dendrograma.



En algunos elementos posterior a la normalización en el histograma se puede distinguir una barra al inicio del gráfico con un porcentaje y esto se puede catalogar como ruido residual posterior al proceso de corrección por los límites de detección instrumental las muestras, sin embargo, esto no afecta la interpretación y extracción de conclusiones en los resultados. En base a las características extraídas posterior a la normalización ilustradas en el resumen geoestadístico de los elementos traza (**Fig. 26**), se extraen para cada elemento cinco valores importantes que serán usados en los mapas de distribución geoquímica de los elementos traza estos son el valor mínimo y máximo, los cuales acotaran los valores extremos representados en los mapas.

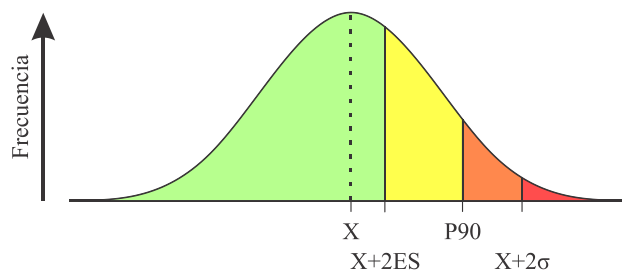
En este punto se requieren otros tres valores adicionales que representan anomalías poblacionales, en respuesta a esto se encuentran los Umbrales (Threshold), estos separan los valores más altos de los valores medios y bajos (García & Moreno, 2006; Correal & Peña, 2008). Considerando lo previamente mencionado, se busca tres propiedades diferentes, por lo que se seleccionan de menos a más restrictivo:

- $X+2ES$ (Threshold)
- P90
- $X+2\sigma$ (Threshold)

Dado el caso en algunos elementos como el Sc, Lu, Ce se encuentra que por la irregularidad estadística de la reemplazar el ultimo umbral por $(Media+1.2*IQR)$, de esta forma los colores en cada mapa de distribución geoquímica de elementos traza corresponde a un valor especial estadísticamente hablando, todo esto se ve representado en la **Figura 32**.

Figura 32

Valor de umbrales y sus colores para mapas geoquímicos de distribución de elementos.



Nota. Los valores de los umbrales corresponden a valores de anomalías estadísticas (García & Moreno, 2006).

De esta forma los colores rojos y naranjas en los mapas corresponden a las anomalías geoestadísticas detalladas en los datos de sedimentos activos, por lo que las zonas de interés geoquímico corresponden a estas zonas. Estos mapas que abarcan desde la **Figura 33** hasta la **Figura 40**, son realizados por medio de un interpolado IDW, debido a su capacidad de no generar muchos errores en la generación de su resultado.

Figura 33

Mapas de distribución geoquímica de elementos traza As, Sb, Pb, Ag.

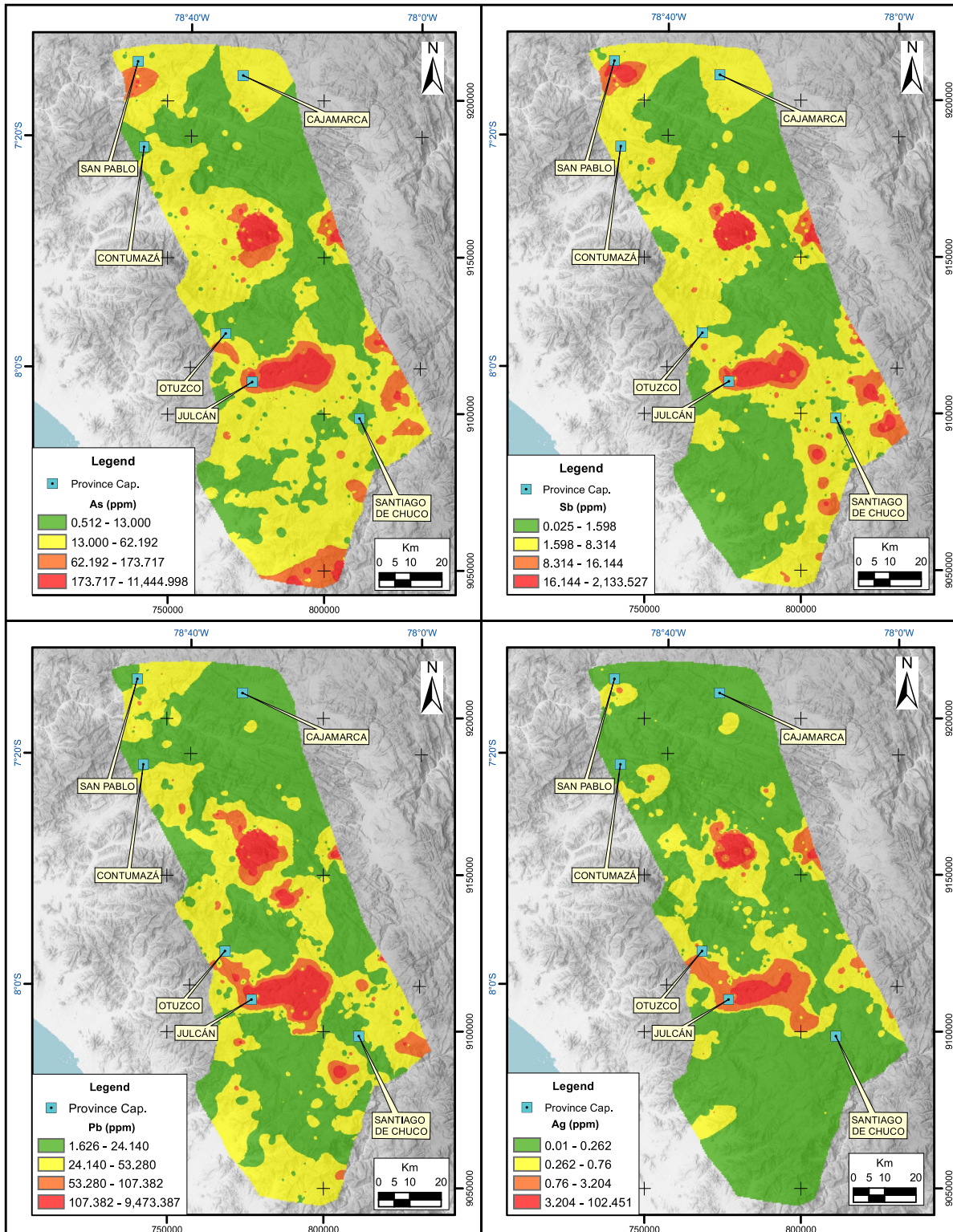


Figura 34

Mapas de distribución geoquímica de elementos traza Bi, Tl, Mo, Cu.

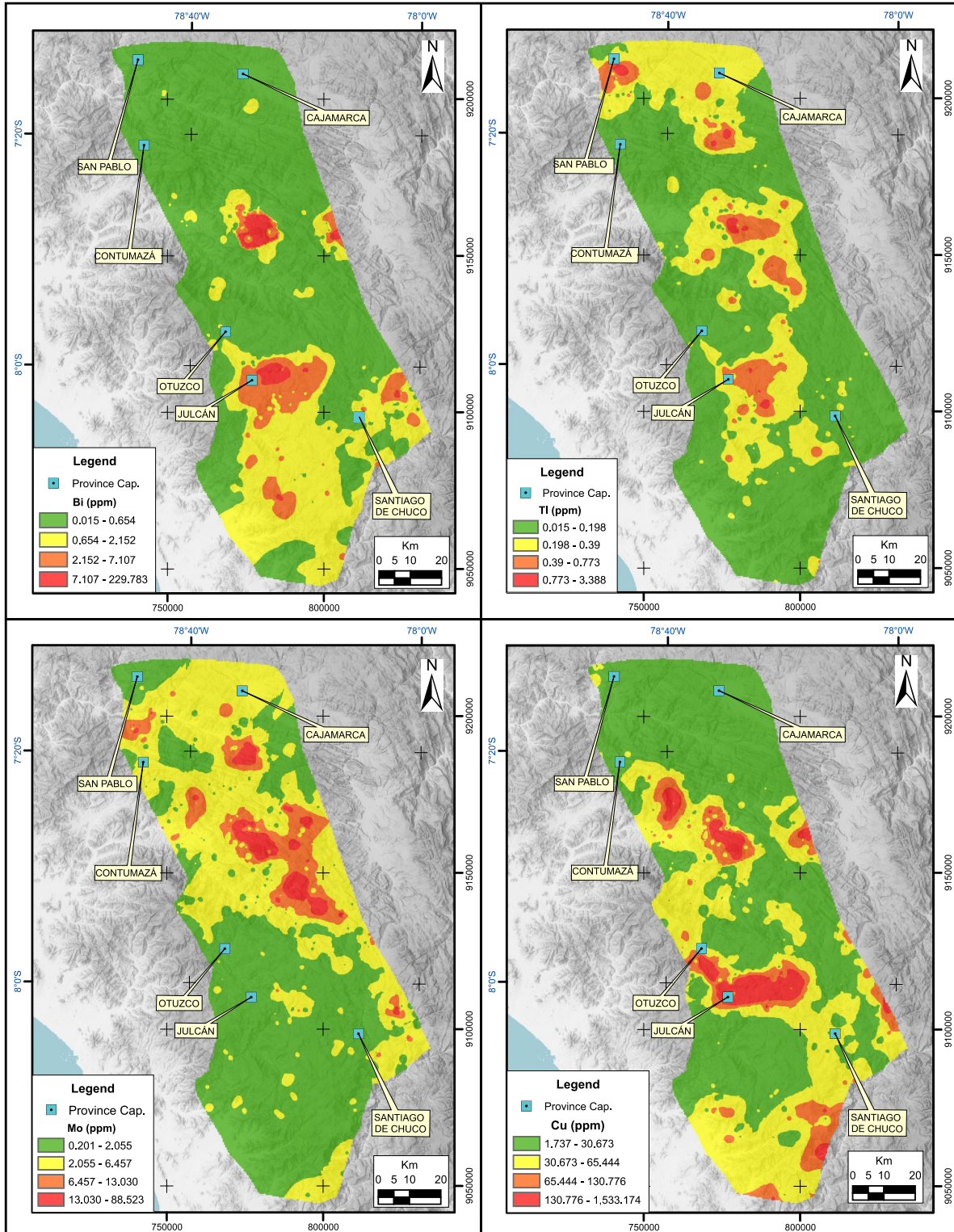


Figura 35

Mapas de distribución geoquímica de elementos traza Zn, Cd, Sn, Au.

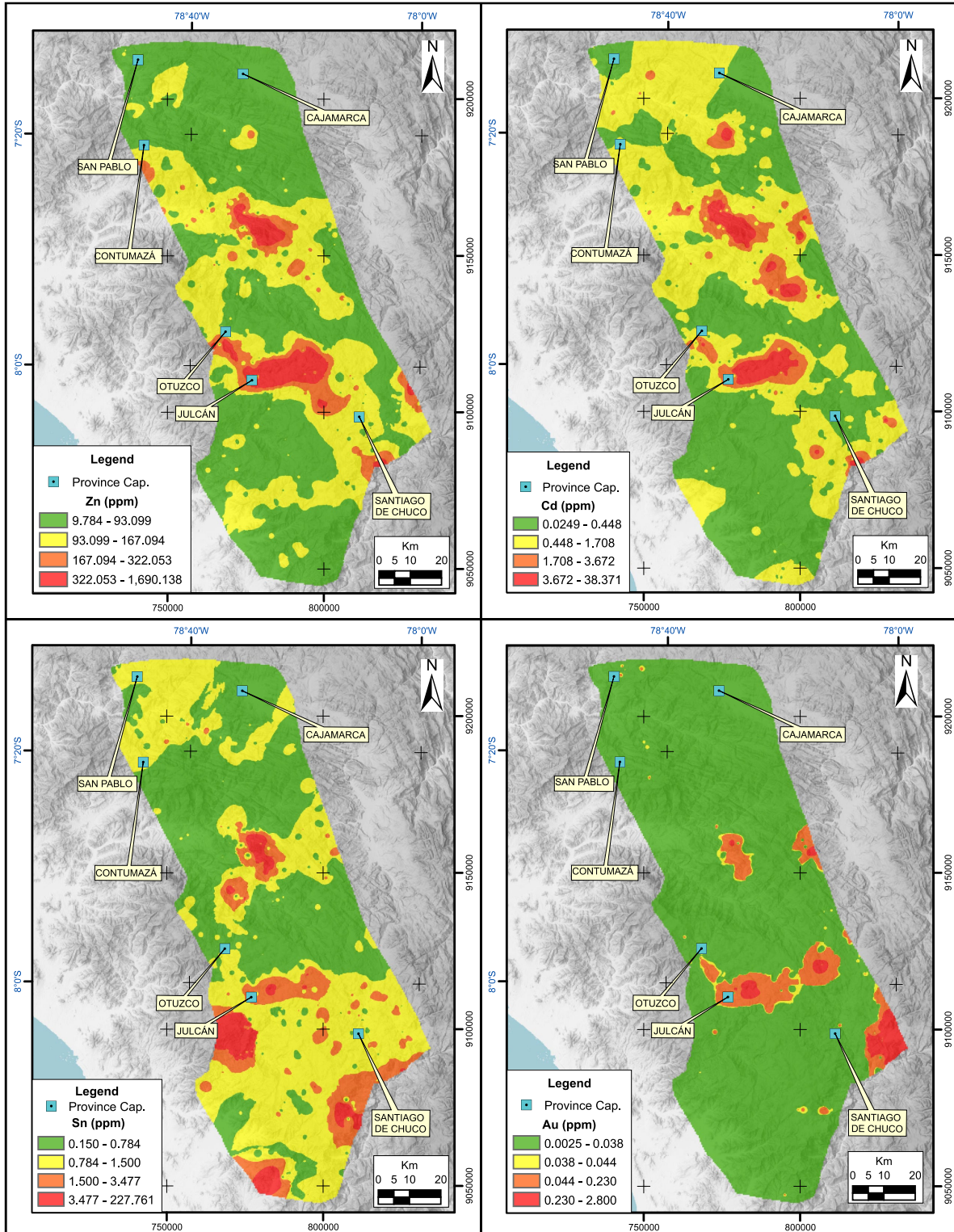


Figura 36

Mapas de distribución geoquímica de elementos traza Th, U, Ni, Be

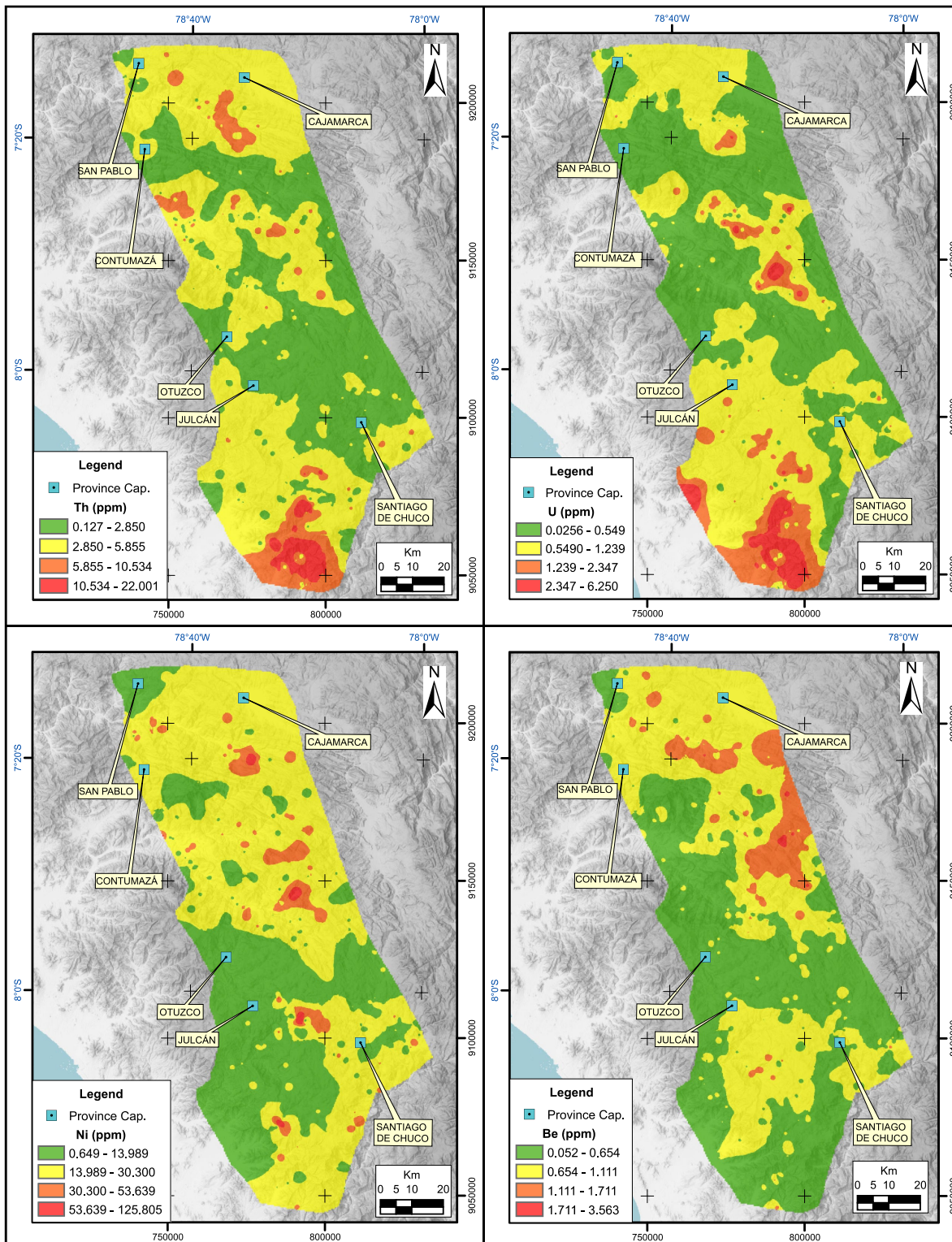


Figura 37

Mapas de distribución geoquímica de elementos traza Sr, V, Sc, Ga.

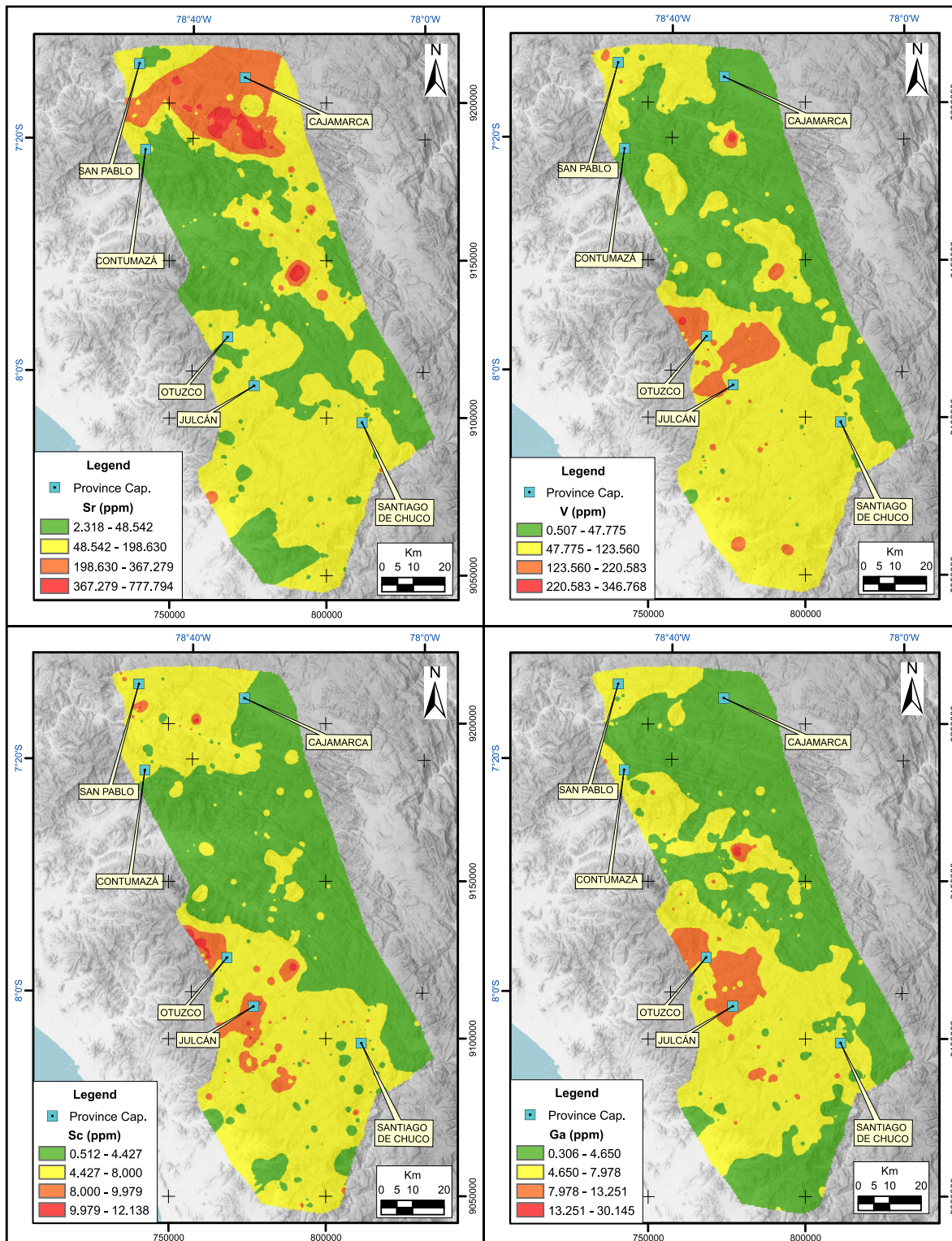


Figura 38

Mapas de distribución geoquímica de elementos traza Hf, Zr, Y, Lu.

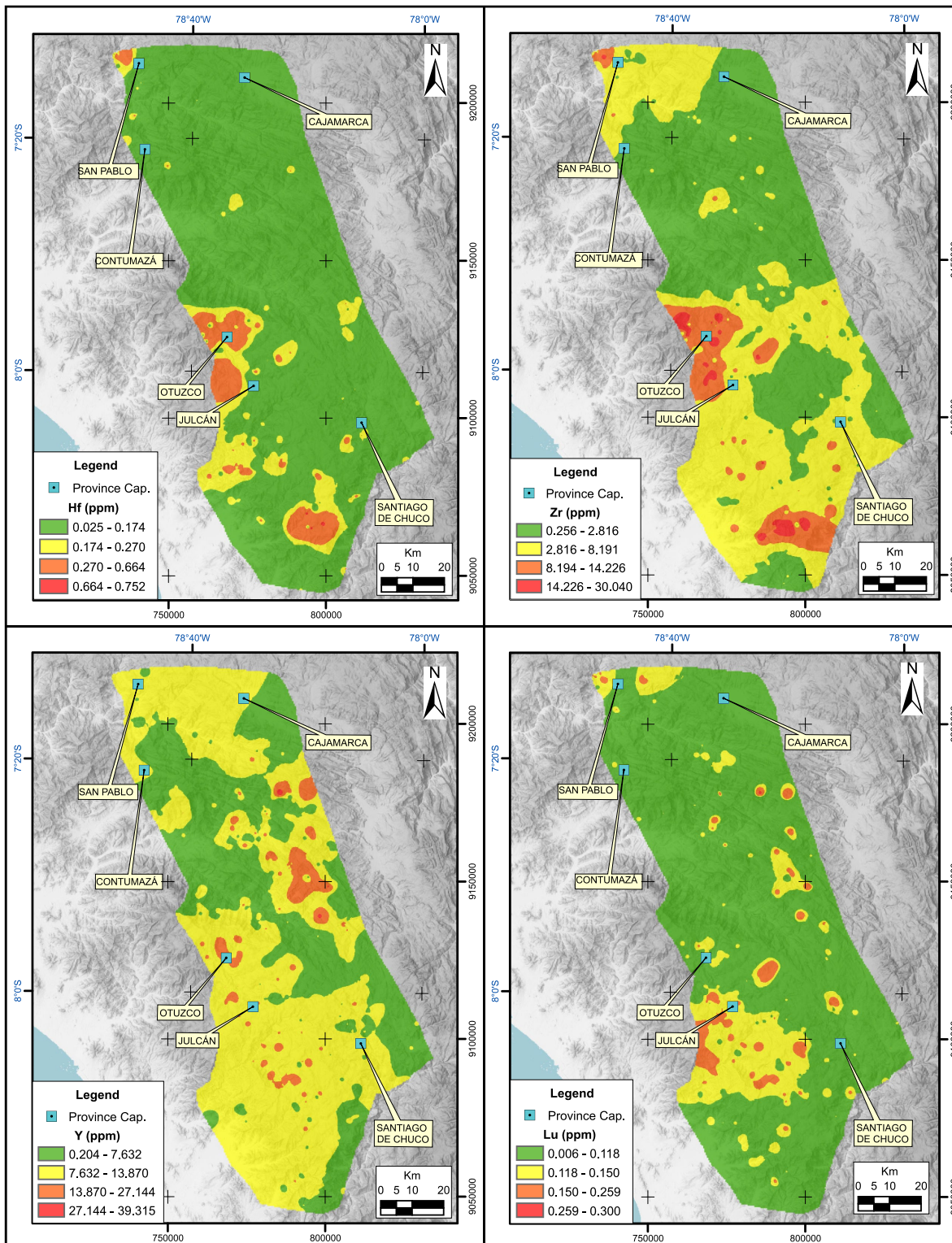


Figura 39

Mapas de distribución geoquímica de elementos traza Ce, La, C, Mn.

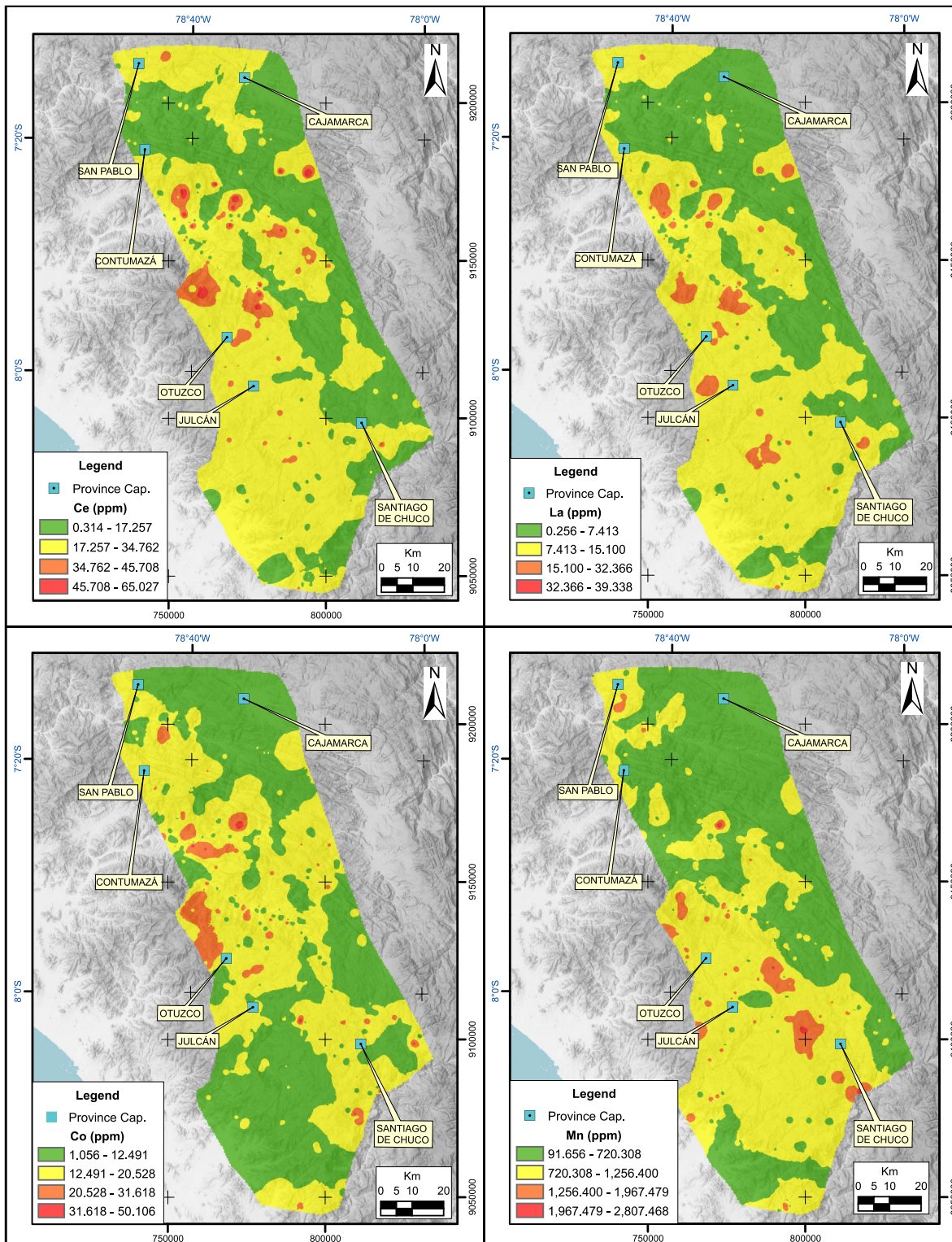
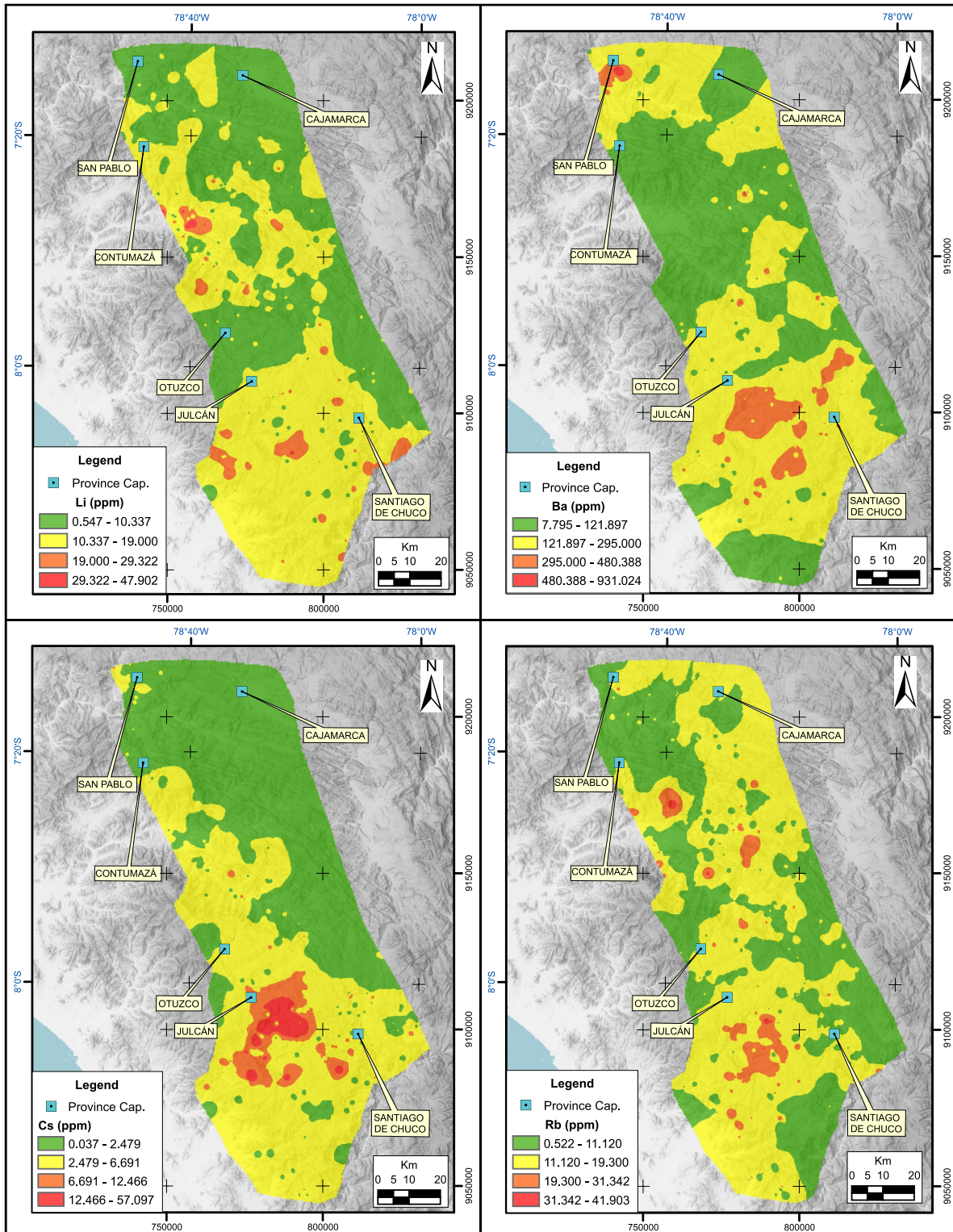


Figura 40

Mapas de distribución geoquímica de elementos traza Li, Ba, Cs, Rb.

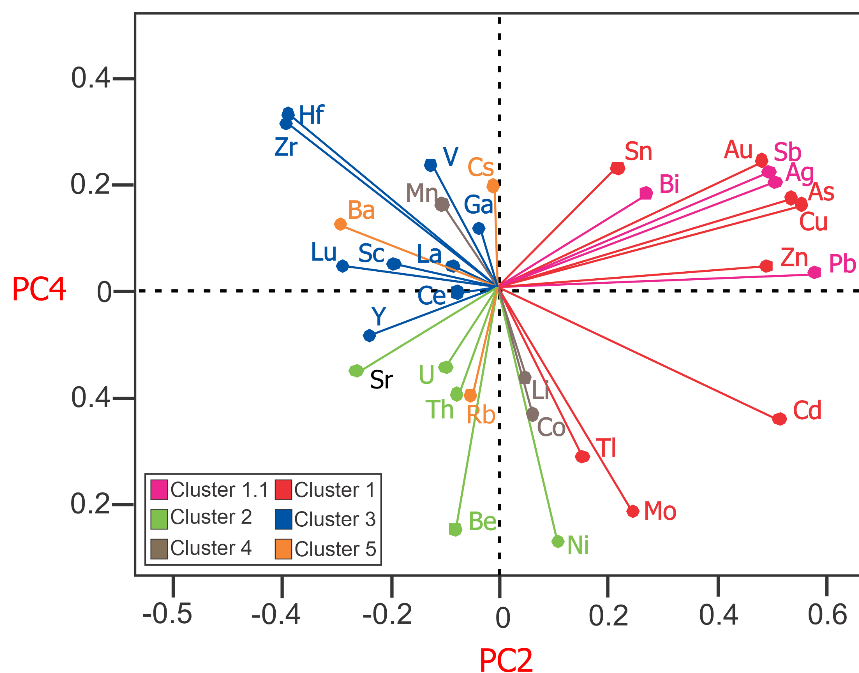


Para finalizar esta sección se hace un análisis de componentes principales, como se mencionó antes, el cual tiene como objetivo primordial correlacionar los elementos. Siguiendo la clasificación de los 32 elementos en los 6 clúster definidos por el dendograma (Fig. 27) se realiza el diagrama circular (Fig. 41).

Para la gráfica se utilizan los datos de los componentes principales 2 y 4 convertidos mediante la transformación logarítmica centrada (clr) (Aitchison, 1982; Pawlowsky-Glahn & Egozcue, 2006), los cuales retienen cerca del 60% de la variación total (Fig. 42 y Fig. 43), obteniendo como resultado una correlación bastante marcada del clúster 1.1 y 1.

Figura 41

Diagrama de componentes principales



Nota. Los colores representan cada clúster definido por el dendograma. Resalta y denota bastante interés la alta correlación que están presentando los elementos del clúster 1 y 1.1.

Figura 42

Componentes principales convertidos mediante la transformación logarítmica centrada (clr)

	clr,As	clr,Au	clr,Mo	clr,Sb	clr,Th	clr,U	clr,V	clr,Co	clr,Cu	clr,Ni	clr,Pb	clr,Zn	clr,Ag	clr,Bi	clr,Cd	clr,Ga	clr,Sn	clr,Tl
PC1	0.3518	0.2138	-0.0143	0.4021	-0.0781	-0.0821	-0.0869	-0.0476	0.1409	-0.0627	0.1626	0.0762	0.4179	0.3454	0.1426	-0.0426	0.0489	-0.0153
PC2	-0.0724	0.2385	0.208	-0.1197	-0.0371	-0.1125	-0.1167	0.1021	0.1102	0.1282	0.0492	0.0505	0.091	-0.5628	0.0407	0.035	-0.0869	0.009
PC3	0.0409	-0.0278	0.4004	0.0107	0.0593	-0.0154	-0.155	-0.0121	-0.0176	0.2519	0.0552	0.0538	0.0956	-0.13	0.3492	-0.126	-0.0323	0.1723
PC4	-0.0872	0.1483	-0.1325	0.0188	-0.1125	-0.0813	0.1528	-0.0716	0.0075	-0.1839	-0.0536	0.0609	0.6372	-0.3666	-0.0537	-0.016	0.0178	-0.178
PC5	0.3015	-0.0723	0.0164	0.5624	0.0502	0.0721	0.1623	-0.0576	-0.1332	-0.1642	0.0119	-0.0362	-0.3334	-0.4862	0.1394	0.0267	-0.0474	0.0869
PC6	-0.1964	-0.3815	-0.1709	-0.0333	0.0862	0.1334	-0.0585	0.004	-0.2047	-0.137	0.0446	-0.0538	0.4213	-0.1148	0.0749	0.1221	-0.1288	0.3572
PC7	0.2009	-0.008	-0.1736	-0.0577	0.0305	-0.1384	-0.0416	0.1898	0.0817	0.1356	0.0422	0.066	-0.0094	-0.2633	-0.1274	0.0269	0.0189	-0.0101
PC8	-0.247	0.5309	-0.0415	-0.0023	0.2176	0.2319	-0.1956	0.0268	-0.0561	-0.057	0.1194	-0.0095	-0.1017	-0.0742	0.0934	0.0696	0.2371	-0.2383
PC9	0.2962	0.2022	-0.0818	-0.5508	-0.0582	0.1291	0.1201	-0.1583	0.1688	-0.2617	0.0409	0.1808	-0.0744	-0.0355	0.3056	0.0059	-0.1499	0.0442
PC10	-0.5807	0.2418	-0.1722	0.2316	-0.205	-0.1439	0.0251	-0.001	0.1065	-0.0134	0.0423	0.1544	-0.1458	0.0857	0.2671	-0.0091	-0.1952	0.3808
PC11	0.224	0.2476	0.1905	-0.1075	0.0643	0.1063	-0.0033	-0.2077	-0.1675	-0.0607	-0.1976	-0.1622	0.0696	0.0408	-0.2758	-0.0322	-0.0097	0.504
PC12	-0.2474	0.1096	0.1771	0.1557	0.1099	0.2092	0.1841	-0.1714	-0.0433	-0.0012	-0.1713	-0.0001	0.0678	-0.0307	-0.3291	-0.079	0.3079	-0.0795
PC13	0.1604	0.149	-0.2506	-0.0081	-0.3271	-0.3184	-0.2212	-0.0581	-0.0603	-0.1245	0.103	-0.0012	-0.1441	-0.0969	-0.1366	0.0354	0.4296	0.2181
PC14	-0.1228	-0.3117	0.3362	-0.1288	-0.1908	0.1234	0.27	-0.0704	0.1421	-0.1102	0.1564	0.1516	-0.0497	-0.0706	0.2139	0.0325	0.4802	0.0498
PC15	0.0132	0.201	-0.0489	-0.0495	0.0944	0.0157	0.3621	0.092	0.1747	0.0799	-0.1673	0.028	-0.0643	-0.0008	-0.1515	0.0843	-0.1077	0.3196
PC16	-0.0187	-0.1925	-0.3831	0.0431	0.1678	0.1553	-0.1277	-0.0955	0.3864	-0.0153	0.0045	0.0528	-0.006	-0.063	-0.042	-0.0121	0.3549	0.1947
PC17	0.1085	-0.0162	-0.2315	-0.0827	-0.0987	0.0419	0.2087	0.174	-0.2979	0.3009	0.0417	0.1127	0.0241	0.0402	0.0625	0.0618	0.1267	-0.0338
PC18	-0.0106	-0.0354	-0.1202	0.0165	0.1841	-0.0033	-0.0053	-0.1955	-0.1796	-0.2436	0.3912	0.0963	-0.0717	0.0563	0.0654	-0.0336	-0.1287	-0.0626
PC19	0.0487	0.0729	-0.3374	-0.0429	0.2368	0.3291	0.1082	-0.0095	-0.1409	0.3143	0.1293	0.0118	0.0144	-0.1113	0.0916	-0.3756	0.0349	0.1062
PC20	-0.0311	0.09	-0.122	-0.0418	-0.0404	-0.0012	0.3959	-0.0464	0.0367	-0.086	0.0878	-0.2013	-0.0101	0.0325	0.0432	0.0404	-0.001	-0.2046
PC21	0.0177	0.062	-0.1238	0.0371	0.0115	-0.1252	0.0848	-0.0603	-0.1106	-0.0655	-0.5732	0.1134	-0.0019	0.0508	0.3278	-0.1272	0.0829	-0.0393
PC22	-0.062	0.0516	0.039	-0.1781	0.1112	-0.3328	0.0698	-0.0771	-0.4429	0.0803	0.0499	0.0435	0.0504	0.0507	0.1185	0.026	0.2982	0.1239
PC23	0.0587	-0.0005	-0.0511	0.0684	-0.0451	0.0064	0.0389	0.1421	-0.1508	0.0524	-0.3222	-0.2192	0.021	0.0066	0.3239	0.2048	0.1305	-0.093
PC24	-0.0122	0.0838	0.0148	0.041	-0.2226	0.0275	0.1645	-0.0916	-0.2745	0.151	0.3542	-0.1374	-0.0008	-0.007	-0.0613	0.1205	-0.0753	0.0027
PC25	0.032	0.007	0.0314	0.0672	-0.1823	0.1131	0.2054	-0.1011	-0.1177	-0.2901	-0.0259	0.2248	-0.0168	-0.0115	-0.0687	-0.1525	-0.06	0.0091
PC26	-0.0053	0.1049	0.1176	-0.0027	0.0016	0.2625	-0.1441	0.1635	-0.2608	-0.2662	0.0045	0.091	-0.029	0.0639	-0.0569	0.2219	-0.0101	0.073
PC27	0.0074	0.0507	0.0356	-0.061	-0.1888	0.1071	-0.119	-0.0771	0.1143	0.0742	0.0855	-0.3316	0.0471	-0.0323	0.0575	0.0852	0.0754	0.1135
PC28	-0.0397	0.0335	0.0941	-0.0222	0.0469	-0.2727	0.286	0.2361	0.0579	-0.0449	0.1599	-0.254	0.0053	0.0576	-0.0702	-0.3058	0.0414	0.1036
PC29	0.0028	-0.0088	-0.0275	0.0526	-0.1637	-0.0445	0.2003	-0.1934	0.0586	0.3479	-0.011	0.3791	-0.0135	-0.0041	-0.1899	0.187	-0.1056	-0.055
PC30	-0.0135	-0.0109	0.0469	-0.0004	0.1915	-0.104	-0.0645	-0.0208	-0.1257	-0.0886	0.0252	0.2954	0.0004	-0.0088	-0.0314	-0.2064	0.0395	-0.0131
PC31	0.0204	-0.0061	-0.0408	0.0018	-0.3312	0.1416	-0.1257	-0.032	-0.0684	0.1736	-0.0313	0.0028	0.0073	0.0044	0.0222	-0.1854	-0.0027	-0.0422
PC32	-0.022	0.0221	-0.0996	-0.0173	0.0169	0.0764	0.1602	0.1706	0.0562	-0.0988	0.0491	-0.3869	0.0178	-0.0118	0.1325	0.0791	0.0001	0.0052

Nota. la columna final (siguiente página) corresponde al porcentaje de varianza explicada acumulada.

Figura 43

Componentes principales convertidos mediante la transformación logarítmica centrada (clr) (2)

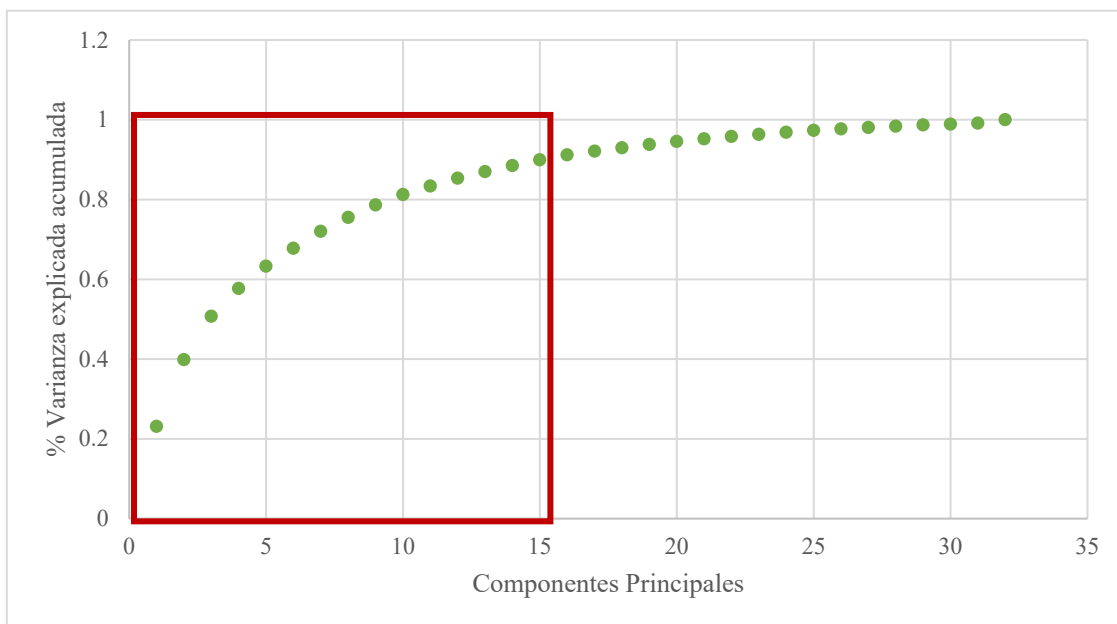
	clr,Cr	clr,Hf	clr,Nb	clr,Y	clr,Zr	clr,REE	clr,Ba	clr,Be	clr,Cs	clr,Li	clr,Mn	clr,Rb	clr,Sc	clr,Sr	%Var Exp
PC1	-0,0403	-0,1639	0,001	-0,1222	-0,1628	-0,0648	-0,1231	-0,09	0,0391	-0,0435	-0,061	-0,0649	-0,0834	-0,2204	0,2312
PC2	0,4564	-0,0083	0,2491	-0,0474	-0,0519	-0,0239	-0,1021	0,0103	-0,0401	-0,0008	0,0115	0,0574	-0,0466	-0,2375	0,3984
PC3	0,0253	-0,2037	-0,231	-0,0274	-0,1613	-0,0916	-0,0655	0,0827	-0,222	-0,017	-0,0983	-0,0446	-0,0748	0,2265	0,5071
PC4	-0,1704	0,1745	-0,1052	-0,0246	0,2131	-0,0582	0,0782	-0,1246	-0,1577	-0,1014	0,0465	-0,1188	0,0148	0,158	0,577
PC5	-0,1193	-0,0061	0,0464	0,0192	0,0253	0,1766	-0,056	-0,1629	0,1311	-0,1088	-0,028	-0,0595	-0,0391	0,0494	0,6328
PC6	-0,0942	-0,105	0,1904	0,1543	-0,2217	0,1884	-0,0086	0,1401	0,2304	-0,0199	-0,0053	0,217	0,0435	-0,0562	0,6775
PC7	-0,1692	-0,1965	-0,6425	-0,0002	-0,131	-0,0198	0,1318	0,1655	0,2037	0,1939	0,1773	0,101	0,1283	-0,1177	0,7201
PC8	-0,2533	0,1658	-0,0792	0,1661	-0,0202	0,2043	-0,0573	0,1213	0,1046	-0,1056	-0,0894	0,1111	0,0285	-0,066	0,7552
PC9	-0,165	-0,1441	0,0668	0,023	-0,2488	0,0716	-0,0375	-0,1099	0,0925	-0,0318	-0,0603	0,0443	-0,0777	0,0673	0,7865
PC10	-0,0178	-0,1186	-0,1671	-0,0269	0,0504	-0,105	0,1093	-0,0403	0,078	-0,0835	0,0191	-0,0335	-0,0082	0,0389	0,8126
PC11	0,0953	0,12	-0,2488	-0,0288	0,2344	-0,0585	0,1989	-0,0459	0,0666	-0,2284	-0,1349	0,1311	-0,0242	0,0302	0,8337
PC12	0,0061	-0,4169	0,0436	-0,0531	-0,4142	0,0558	0,1208	-0,0478	-0,0416	0,1092	-0,0062	0,0241	-0,1604	0,0737	0,8535
PC13	-0,0255	-0,0986	0,3261	-0,0176	-0,0876	-0,1244	0,169	0,1482	-0,0554	0,0201	0,0826	0,0597	0,0334	0,1135	0,8697
PC14	-0,1648	0,1132	-0,0753	-0,0521	0,0778	-0,1767	0,162	-0,0654	0,0182	-0,1066	0,0513	-0,0206	0,0096	-0,1286	0,8852
PC15	-0,2304	-0,022	0,1343	0,0153	-0,0791	0,0434	-0,2398	0,0239	-0,3513	0,0103	-0,0262	-0,1224	0,1451	-0,0615	0,8994
PC16	0,2946	0,1588	-0,2204	0,0483	-0,0532	-0,0005	-0,3566	-0,1294	-0,1457	-0,0719	-0,1978	0,0647	-0,0305	-0,0386	0,9119
PC17	0,2312	-0,0555	-0,0799	0,1757	-0,1565	0,1876	0,1113	0,0272	-0,1822	-0,3998	0,1347	-0,1786	0,0766	0,1113	0,9211
PC18	0,1506	-0,0368	-0,1245	-0,0776	0,0791	0,2097	0,2028	0,0175	-0,4943	0,0004	0,0968	0,1118	-0,1892	-0,0042	0,9297
PC19	-0,0915	-0,0433	0,1971	-0,1877	0,1653	-0,355	0,1224	0,0296	0,0252	0,169	0,1125	-0,082	-0,1327	-0,0873	0,9379
PC20	0,3992	-0,3605	-0,0645	-0,0171	0,1553	-0,1021	-0,0294	0,0336	0,3094	-0,2048	-0,1977	0,1321	0,0485	0,0522	0,9455
PC21	0,2505	0,3164	-0,0621	0,0068	-0,2541	0,092	0,234	-0,0853	0,0664	0,2134	0,0665	-0,0001	-0,0945	-0,0603	0,9519
PC22	-0,0316	-0,0843	-0,0622	-0,1672	0,2329	0,2135	-0,4541	-0,1435	0,1744	0,2024	0,0048	-0,0859	-0,1049	-0,0367	0,9579
PC23	-0,177	-0,1609	0,0054	0,0378	0,1265	-0,1771	-0,0865	0,2251	-0,3574	-0,0765	-0,1799	0,3354	0,0533	-0,1162	0,9633
PC24	0,0273	0,4255	-0,0988	-0,0004	-0,4125	-0,2571	-0,078	-0,0072	0,0026	0,1639	-0,3052	0,0977	0,0659	0,0876	0,9683
PC25	0,1414	-0,0029	-0,0906	0,2731	0,1193	-0,0943	-0,1883	0,518	-0,0484	0,302	-0,0646	-0,1233	-0,0448	-0,2505	0,9732
PC26	0,149	-0,0789	-0,1011	0,06	-0,0735	-0,2542	-0,1389	-0,3105	-0,0943	0,0059	0,4362	0,0595	0,1148	-0,2037	0,9769
PC27	0,0545	-0,1342	-0,0693	0,2076	0,1371	0,3457	0,2441	-0,0223	-0,1337	0,3027	-0,1386	-0,2597	-0,0941	-0,1485	0,9806
PC28	-0,0829	0,1312	-0,0113	0,1378	-0,173	0,1675	-0,0267	-0,0019	-0,0253	-0,2108	0,1479	-0,0645	-0,0687	-0,3423	0,9839
PC29	-0,0918	-0,0276	0,0085	0,07	0,1074	0,1649	-0,0452	-0,2219	-0,0442	0,1428	0,0133	0,3258	-0,1196	-0,0558	0,9868
PC30	0,0234	-0,1287	0,0463	0,143	0,0014	0,0017	0,0814	-0,1191	-0,0499	0,0538	-0,34	-0,2132	0,6533	0,0676	0,9891
PC31	-0,0403	-0,1094	0,0368	0,4401	0,1298	-0,0481	-0,0272	-0,3315	0,0281	-0,0439	0,0094	0,0419	0,0703	-0,1849	0,9912
PC32	0,043	-0,0375	-0,0337	-0,0299	-0,0116	-0,0494	0,0195	-0,3323	-0,0582	0,3955	0,0291	-0,0962	0,1581	0,0984	1

Nota. la columna final corresponde al porcentaje de varianza explicada acumulada.

En base a la tabla extraída de los datos convertidos mediante la transformación logarítmica centrada (**Fig. 43**) siguiendo la metodología de (Valls, 2021) se grafica la curva del porcentaje de varianza explicada acumulada respecto a los componentes principales (**Fig. 44**) para determinar cuáles son los componentes que aportan mayor información en el análisis y la determinación de zonas de interés.

Figura 44

Curva de % de varianza explicada acumulada Vs Componentes principales



Nota. Se observa que los primeros 15 componentes principales (cuadro rojo) son los que presentan la información más representativa para la determinación de zonas de interés, pues los datos no son tan homogéneos. Por tanto, se descartan para el análisis los datos del componente principal 15 en adelante.

Continuando lo expuesto por (Valls, 2021) con los 15 componentes principales seleccionados se procede a realizar un análisis tomando los elementos más representativos en base a la información del dendograma, la matriz de correlación y el diagrama circular de correlación, los cuales son: Ag, Sb, As, Bi, Au, Pb y Cu (Fig. 45).

Figura 45

Relación entre los 15 PCA seleccionados y los elementos con información más representativa.

	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7	PC8	PC9	PC10	PC11	PC12	PC13	PC14	PC15
clr,Ag	0,4179	0,091	0,0956	0,6372	-0,3334	0,4213	-0,0094	-0,1017	-0,0744	-0,1458	0,0696	0,0678	-0,1441	-0,0497	-0,0643
clr,Sb	0,4021	-0,1197	0,0107	0,0188	0,5624	-0,0333	-0,0577	-0,0023	-0,5508	0,2316	-0,1075	0,1557	-0,0081	-0,1288	-0,0495
clr,As	0,3518	-0,0724	0,0409	-0,0872	0,3015	-0,1964	0,2009	-0,247	0,2962	-0,5807	0,224	-0,2474	0,1604	-0,1228	0,0132
clr,Bi	0,3454	-0,5628	-0,13	-0,3666	-0,4862	-0,1148	-0,2633	-0,0742	-0,0355	0,0857	0,0408	-0,0307	-0,0969	-0,0706	-0,0008
clr,Au	0,2138	0,2385	-0,0278	0,1483	-0,0723	-0,3815	-0,008	0,5309	0,2022	0,2418	0,2476	0,1096	0,149	-0,3117	0,201
clr,Pb	0,1626	0,0492	0,0552	-0,0536	0,0119	0,0446	0,0422	0,1194	0,0409	0,0423	-0,1976	-0,1713	0,103	0,1564	-0,1673
clr,Cd	0,1426	0,0407	0,3492	-0,0537	0,1394	0,0749	-0,1274	0,0934	0,3056	0,2671	-0,2758	-0,3291	-0,1366	0,2139	-0,1515
clr,Cu	0,1409	0,1102	-0,0176	0,0075	-0,1332	-0,2047	0,0817	-0,0561	0,1688	0,1065	-0,1675	-0,0433	-0,0603	0,1421	0,1747
clr,Zn	0,0762	0,0505	0,0538	0,0609	-0,0362	-0,0538	0,066	-0,0095	0,1808	0,1544	-0,1622	-0,0001	-0,0012	0,1516	0,028
clr,Sn	0,0489	-0,0869	-0,0323	0,0178	-0,0474	-0,1288	0,0189	0,2371	-0,1499	-0,1952	-0,0097	0,3079	0,4296	0,4802	-0,1077
clr,Cs	0,0391	-0,0401	-0,222	-0,1577	0,1311	0,2304	0,2037	0,1046	0,0925	0,078	0,0666	-0,0416	-0,0554	0,0182	-0,3513
clr,Mo	-0,0143	0,208	0,4004	-0,1325	0,0164	-0,1709	-0,1736	-0,0415	-0,0818	-0,1722	0,1905	0,1771	-0,2506	0,3362	-0,0489
clr,Tl	-0,0153	0,009	0,1723	-0,178	0,0869	0,3572	-0,0101	-0,2383	0,0442	0,3808	0,504	-0,0795	0,2181	0,0498	0,3196
clr,Ga	-0,0426	0,035	-0,126	-0,016	0,0267	0,1221	0,0269	0,0696	0,0059	-0,0091	-0,0322	-0,079	0,0354	0,0325	0,0843
clr,Li	-0,0435	-0,0008	-0,017	-0,1014	-0,1088	-0,0199	0,1939	-0,1056	-0,0318	-0,0835	-0,2284	0,1092	0,0201	-0,1066	0,0103
clr,Co	-0,0476	0,1021	-0,0121	-0,0716	-0,0576	0,004	0,1898	0,0268	-0,1583	-0,001	-0,2077	-0,1714	-0,0581	-0,0704	0,092
clr,Mn	-0,061	0,0115	-0,0983	0,0465	-0,028	-0,0053	0,1773	-0,0894	-0,0603	0,0191	-0,1349	-0,0062	0,0826	0,0513	-0,0262
clr,Ni	-0,0627	0,1282	0,2519	-0,1839	-0,1642	-0,137	0,1356	-0,057	-0,2617	-0,0134	-0,0607	-0,0012	-0,1245	-0,1102	0,0799
clr,REE	-0,0648	-0,0239	-0,0916	-0,0582	0,1766	0,1884	-0,0198	0,2043	0,0716	-0,105	-0,0585	0,0558	-0,1244	-0,1767	0,0434
clr,Rb	-0,0649	0,0574	-0,0446	-0,1188	-0,0595	0,217	0,101	0,1111	0,0443	-0,0335	0,1311	0,0241	0,0597	-0,0206	-0,1224
clr,Th	-0,0781	-0,0371	0,0593	-0,1125	0,0502	0,0862	0,0305	0,2176	-0,0582	-0,205	0,0643	0,1099	-0,3271	-0,1908	0,0944
clr,U	-0,0821	-0,1125	-0,0154	-0,0813	0,0721	0,1334	-0,1384	0,2319	0,1291	-0,1439	0,1063	0,2092	-0,3184	0,1234	0,0157
clr,Sc	-0,0834	-0,0466	-0,0748	0,0148	-0,0391	0,0435	0,1283	0,0285	-0,0777	-0,0082	-0,0242	-0,1604	0,0334	0,0096	0,1451
clr,V	-0,0869	-0,1167	-0,155	0,1528	0,1623	-0,0585	-0,0416	-0,1956	0,1201	0,0251	-0,0033	0,1841	-0,2212	0,27	0,3621
clr,Be	-0,09	0,0103	0,0827	-0,1246	-0,1629	0,1401	0,1655	0,1213	-0,1099	-0,0403	-0,0459	-0,0478	0,1482	-0,0654	0,0239
clr,Y	-0,1222	-0,0474	-0,0274	-0,0246	0,0192	0,1543	-0,0002	0,1661	0,023	-0,0269	-0,0288	-0,0531	-0,0176	-0,0521	0,0153
clr,Ba	-0,1231	-0,1021	-0,0655	0,0782	-0,056	-0,0086	0,1318	-0,0573	-0,0375	0,1093	0,1989	0,1208	0,169	0,162	-0,2398
clr,Zr	-0,1628	-0,0519	-0,1613	0,2131	0,0253	-0,2217	-0,131	-0,0202	-0,2488	0,0504	0,2344	-0,4142	-0,0876	0,0778	-0,0791
clr,Hf	-0,1639	-0,0083	-0,2037	0,1745	-0,0061	-0,105	-0,1965	0,1658	-0,1441	-0,1186	0,12	-0,4169	-0,0986	0,1132	-0,022
clr,Sr	-0,2204	-0,2375	0,2265	0,158	0,0494	-0,0562	-0,1177	-0,066	0,0673	0,0389	0,0302	0,0737	0,1135	-0,1286	-0,0615

Nota. Elementos: Ag, Sb, As, Bi, Au, Pb y Cu (verde). Los PC seleccionados (verde) representan los valores más altos (azules) y bajos (pardo) de los elementos.

Una vez se ubique el elemento a analizar se procede a observar en que componente principal está el valor más alto y más bajo, teniendo ubicado este, se ordenan los valores de mayor a menor y se realiza la asociación de elementos (**Fig. 46**) sumando los elementos con valores más altos y/o representativos y en algunos casos dividiéndolos por el o la suma de los elementos con valores más pequeños (**Fig. 45**) y viceversa.

Figura 46

Asociaciones de elementos de los 15 PC

PC	ASOCIACIÓN
1	Sb+As+Ag+Bi
4	Ag/Bi
5	Sb+As/Ag+Bi
6	Au/Ag+Tl
8	Au/ Tl+As
9	Sb/As+ Cd+Au
10	Au+Cd+Sb+Tl/As
14	Au/Sn+Mo
15	V+Tl+Au

Nota. Asociaciones de elementos en base al análisis de los 15 componentes principales seleccionados de la curva de % de varianza explicada acumulada.

Con las asociaciones establecidas según Valls, 2021 se procede a realizar las respectivas operaciones usando todas las muestras de los elementos, es decir la data inicial corregida con los límites de detección y demás; Sumado a ello se saca el valor de los cuartiles 2 y 3 de cada elemento para el siguiente paso (**Fig. 47**).

Se observa (**Fig. 46**) que desde el PC 1 al 5 las asociaciones tienen como elemento principal la plata y las restantes, es decir, del PC 6 al 15 el oro, por lo que mapeo de cuartiles se enfoca en estos dos elementos. Una vez se apliquen las operaciones se realizan las siguientes ecuaciones para cada muestra:

$$Si X > Cuartil3 \rightarrow 5$$

$$Si X > Cuartil2 y < Cuartil3 \rightarrow 4$$

$$Si X > Cuartil2 y Cuartil3 \rightarrow 3$$

Obteniendo, como resultado final 3 columnas para los valores de plata y 6 para el oro representados en números de 3 a 5. Para terminar el proceso, Valls, 2021 indica hacer una última operación y así obtener una columna correspondiente al porcentaje de seguridad en qué se encontrará dicho elemento (**Fig. 47**), para lo cual se hace lo siguiente:

$$\frac{X1 * 100}{X2}$$

Donde,

X1 es la suma de los 3 valores para el oro o los 6 valores para la plata y,

X2 es el valor máximo que se pueda obtener de la suma de X1, es decir, 15 para la plata y 30 para el oro.

Figura 47

Ejemplo de proceso de mapeo de cuartiles con las asociaciones mineralógicas relacionadas a la plata

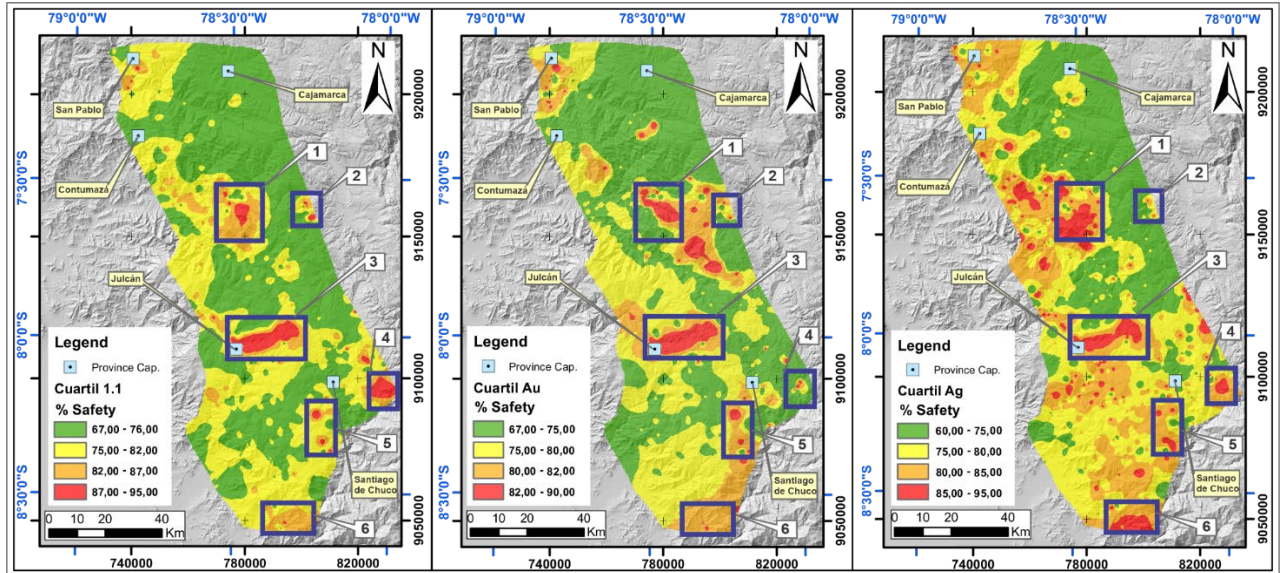
Muestra	PC1 Ag (Sb+As+Ag+Bi)	PC4 Ag (Ag/Bi)	PC5 Ag (Sb+As/Ag+Bi)	PC1 Ag	PC4 Ag	PC5 Ag	Ag Cuartil % Seguridad
15f001	4,42	0,25	13,12	3	3	3	60
15f002	19,22	0,5	30,13	4	3	3	66,6
15f005	17,43	0,29	25	4	3	3	66,6
15f006	8,84	0,19	22,96	3	3	3	66,66
Q3	26,15625	1,43	79,82				
Q2	13,675	0,6	32,06				

Nota. Muestra el proceso a seguir una vez se tienen las asociaciones de elementos hasta el resultado final siendo este el porcentaje de seguridad de encontrar el elemento.

Sumado a ello, se realiza el mismo proceso con los elementos del clúster 1.1. pues resulta siendo el más representativo del área, se definen de igual manera los porcentajes de seguridad y finalmente se procede a realizar la interpolación de este junto al oro y la plata por el método IDW. Correlacionando los mapas generados se establecen 6 zonas de interés mineral, pues resaltan y presentan un porcentaje de seguridad mayor al 82% (**Fig. 48**).

Figura 48

Mapa de cuartiles de Clúster 1.1, Oro, Plata



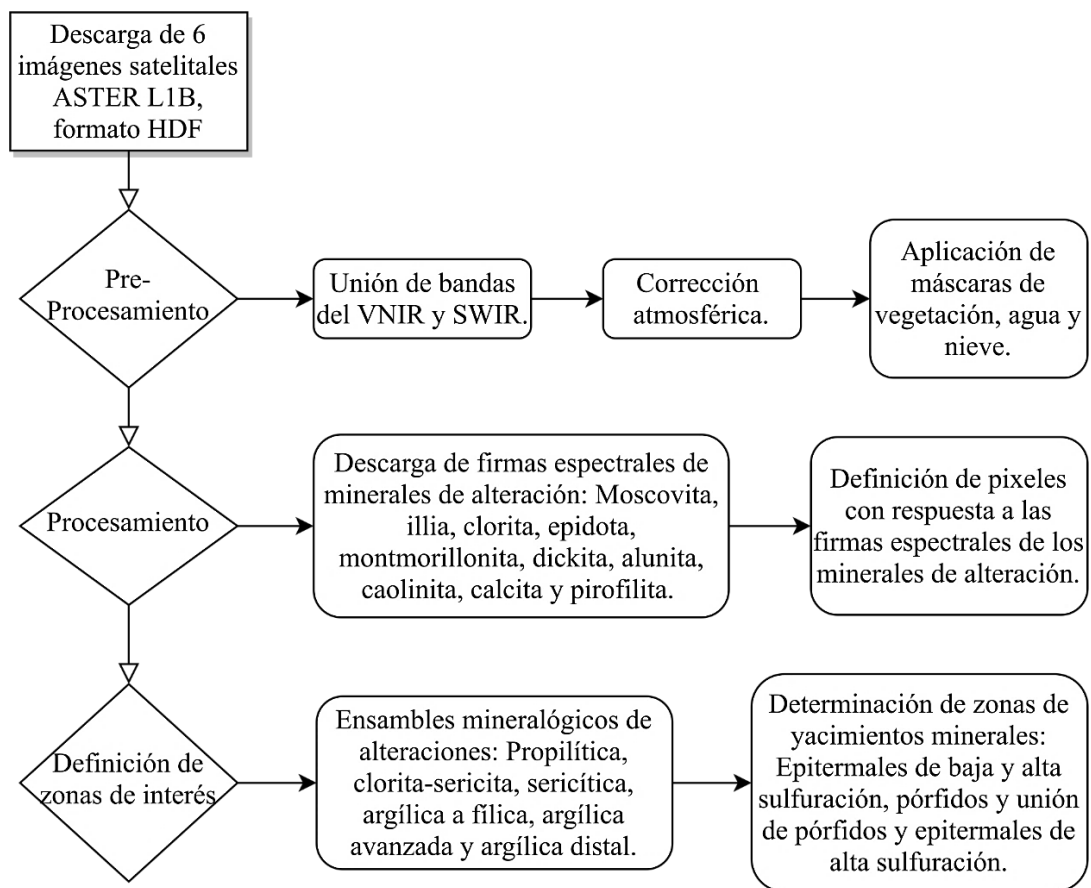
Nota. Mapas de cuartiles de Clúster 1.1, oro y plata respectivamente, basado en la metodología de (Valls, 2021). Se identifican 6 zonas de interés mineral marcadas con el cuadro azul, en donde coinciden las anomalías en los 3 mapas.

4.2. Teledetección

La metodología del análisis de sensores remotos se basa en 4 pasos (**Fig. 49**): Obtención de las imágenes satelitales ASTER del área de estudio, pre-procesamiento, procesamiento y delimitación de áreas de yacimientos minerales.

Figura 49

Metodología a seguir para el análisis de sensores remotos



Nota. Iniciando desde la descarga de las imágenes satelitales ASTER que cubren toda el área de estudio, hasta la determinación de zonas de yacimientos minerales mediante la unión de las alteraciones mineralógicas definidas.

Para el análisis total del presente estudio se utilizan 6 imágenes satelitales ASTER, las cuales se adquieren mediante el acceso al sitio oficial de la NASA <https://earthdata.nasa.gov/>. Las imágenes adquiridas son del 2003 y 2004, dentro de las características de descarga están que pertenecen al satélite TERRA, son del nivel 1B, su formato es HDF, entre otros aspectos (**Fig. 50** y **Fig. 51**).

Figura 50

Características generales de imágenes satelitales ASTER

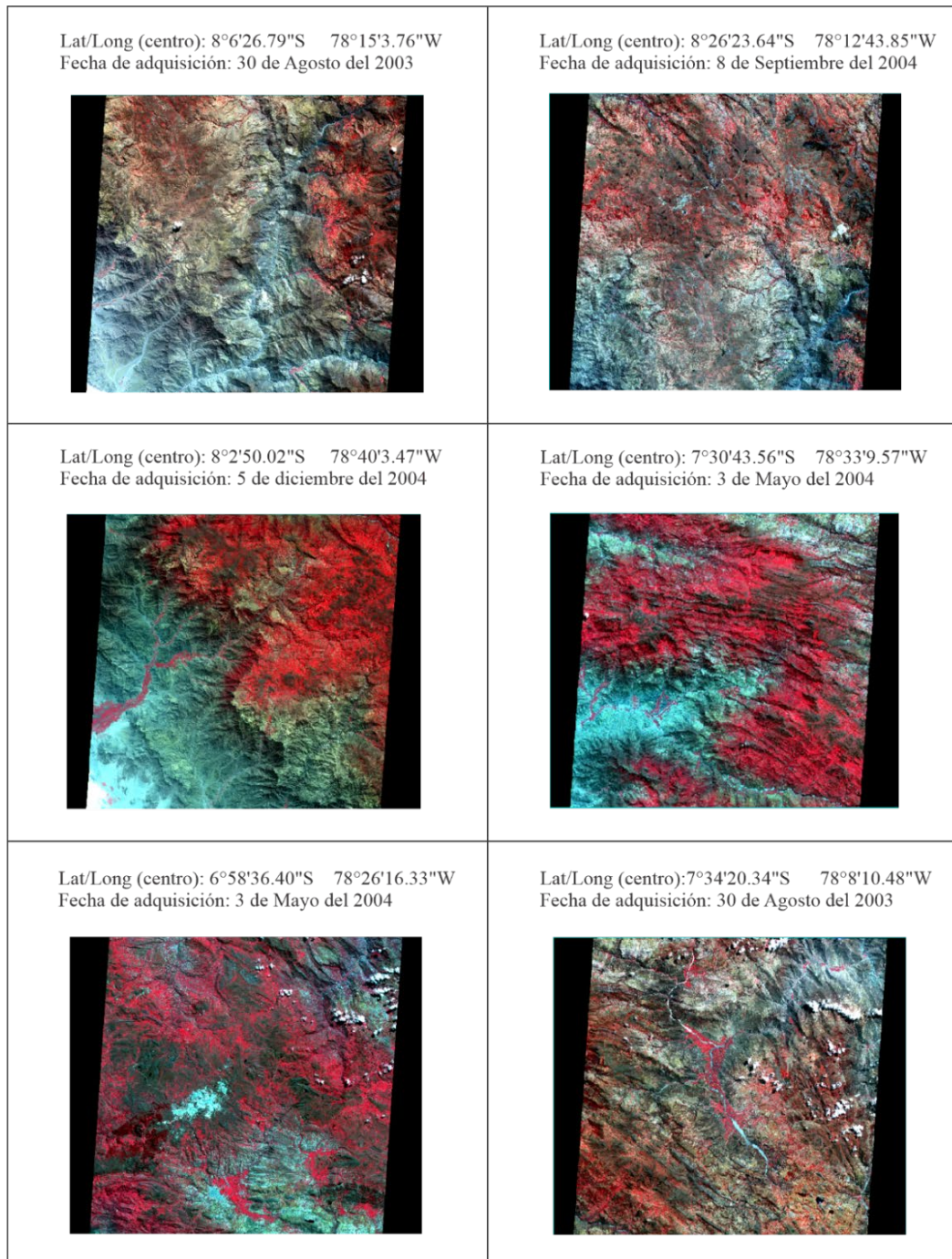
Satélite: Terra Sistema de coordenadas: WGS-84 Proyección estereográfica: UTM, Zona 17 S

Bandas	Longitud de onda (μm)	Resolución Espacial (m)
1	0.556	15
2	0.661	15
3N	0.807	15
4	1.656	30
5	2.167	30
6	2.209	30
7	2.262	30
8	2.336	30
9	2.400	30
10	8.291	90
11	8.634	90
12	9.075	90
13	10.657	90
14	11.318	90

Nota. Características generales de las 6 imágenes satelitales ASTER utilizadas para la terminación de área de interés mineral en la zona de estudio. La información proviene de los metadatos descargados de la plataforma de la NASA.

Figura 51

Imágenes ASTER utilizadas



Nota. Visualización de las 6 imágenes ASTER utilizadas para el análisis del área, junto con los datos de la fecha de adquisición y las coordenadas de su punto central.

La máscara de vegetación se obtiene mediante la determinación del índice NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) el cual se establece mediante la siguiente ecuación (Ninomiya, 2004):

$$NDVI = \frac{Banda\ 3 - Banda\ 2}{Banda\ 3 + Banda\ 2}$$

De igual manera, para la máscara del agua, se determina el índice NDWI (Normalized Difference Water Index) hallado mediante la ecuación (Gao, 1996)

$$NDWI = \frac{Banda\ 3 - Banda\ 5}{Banda\ 3 + Banda\ 5}$$

Finalmente, la máscara de la nieve, se determina hallando el índice NDSI (Normalized Difference Snow Index) hallado mediante la ecuación (Vargas *et al.*, 2009):

$$NDSI = \frac{Banda\ 1 - Banda\ 4}{Banda\ 1 + Banda\ 4}$$

El fin de hallar y unir estos índices es obtener una imagen mucho más limpia, para luego de eso, proceder a realizar el análisis de las firmas espectrales de los minerales de alteración, basados en las firmas descargadas de la biblioteca de USGS mostradas anteriormente.

Una vez se obtienen los pixeles que responden a cada mineral se empiezan a crear zonas de alteración (**Fig. 52**) teniendo como base los siguientes ensambles mineralógicos (Sillitoe 2000; 2010; Caiza, 2018):

Figura 52

Alteraciones minerales y ensambles mineralógicos.

ALTERACIÓN	ENSAMBLE MINERALÓGICO
Propilítica	Clorita, epidota y carbonatos (calcita)
Clorita-Sericita	Clorita, illita
Sericítica	Moscovita
Argílica avanzada (pórfidos y HSE)	Pirofilita y alunita
Alteración argílica avanzada distal	Caolinita y dickita
Alteración argílica avanzada (LSE)	Alunita y caolinita
Alteración argílica a filica (LSE)	Illita, moscovita y montmorillonita

Nota. Alteraciones minerales formadas a partir de diferentes ensambles mineralógicos. En base a Sillitoe 2000; 2010; Caiza, 2018.

Por último, se determinan zonas asociadas a sistemas minerales de diferentes tipos de yacimientos minerales (**Fig. 53**) mediante la unión de alteraciones de la siguiente manera (Sillitoe 2000; 2010; Caiza, 2018):

En base a esto se puede ejemplificar la metodología a seguir como se demuestra en la **Figura 54**, donde se muestra importantes pasos que permitieron llegar a resultados posteriores.

Figura 53

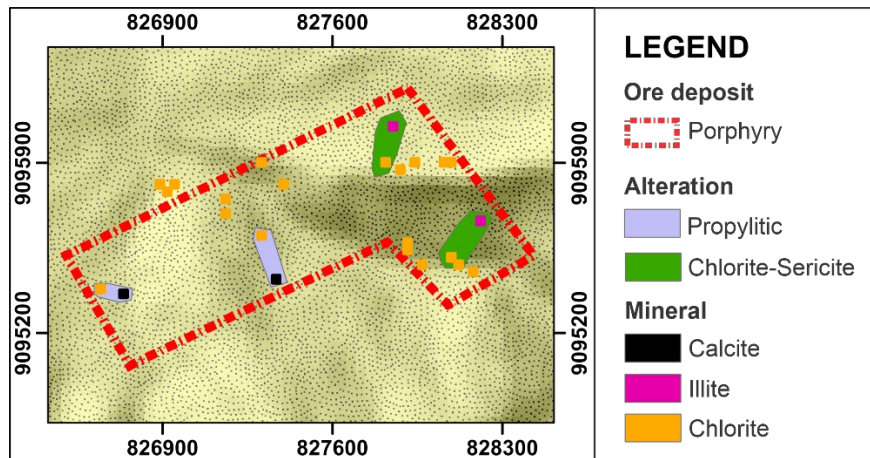
Sistemas minerales asociados a diferentes tipos yacimientos minerales

YACIMIENTO MINERAL	ALTERACIONES
Epitermal de alta sulfuración	Alteración argílica avanzada.
Epitermal de baja sulfuración	Alteración argílica a Fílica y alteración argílica avanzada
Pórfidos	Alteración sericítica, alteración Clorita-Sericita y alteración propilítica.
Pórfidos y Epitermal de alta sulfuración	Alteración argílica avanzada distal y/o proximal y alteración sericítica.

Nota. Sistemas minerales asociados a diferentes tipos yacimientos minerales formados a partir de la unión de las alteraciones establecidas. En base a (Sillitoe 2000; 2010; Caiza, 2018).

Figura 54

Ejemplo de metodología a seguir

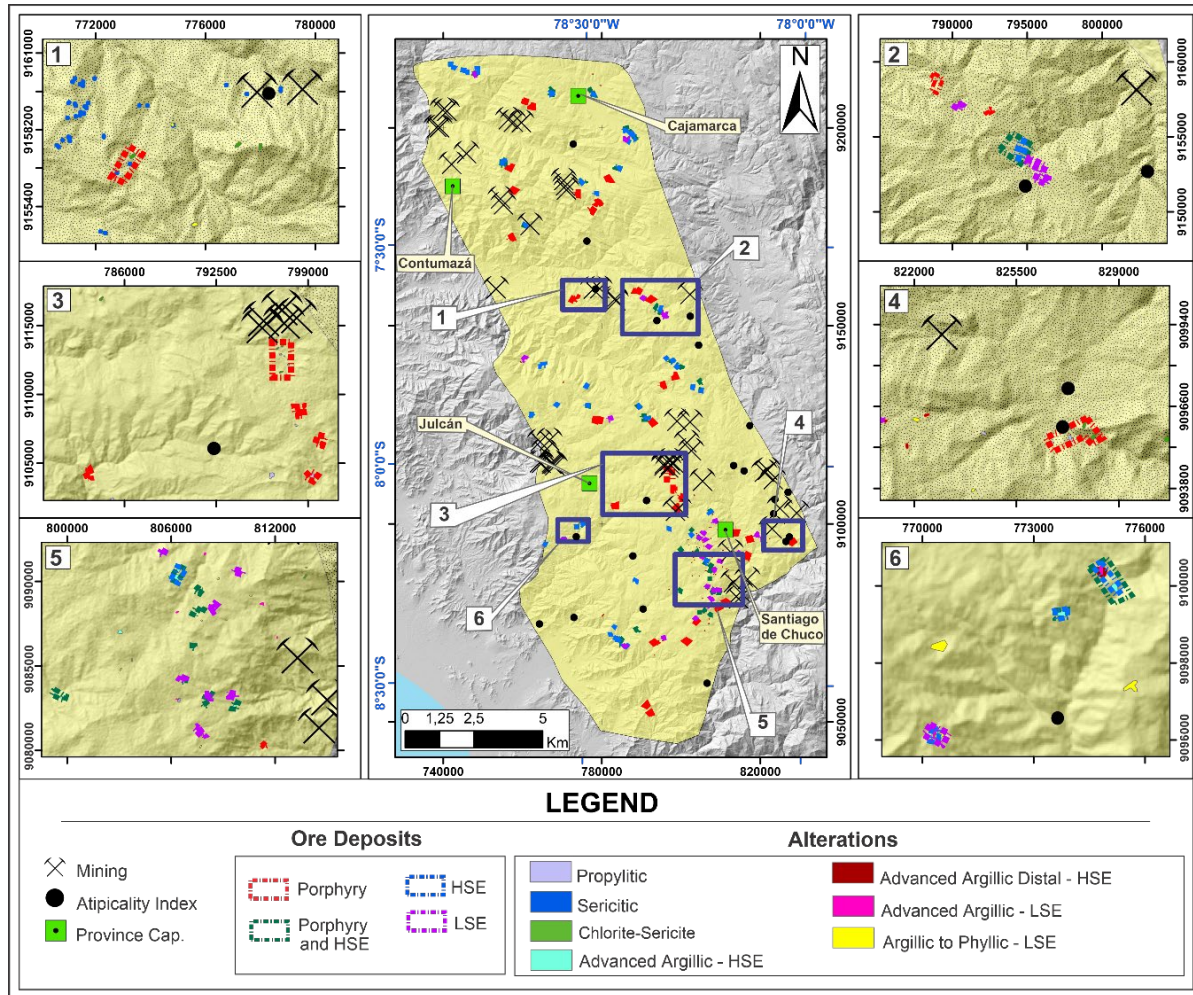


Nota. Los puntos representan la presencia de los minerales, la cercanía de estos da lugar a la creación de las zonas de alteración, finalmente la unión de estas últimas permite la identificación de áreas determinadas de yacimientos minerales.

Para determinar las zonas finales de interés mineral se realiza un análisis de índices atípicos siguiendo la metodología de (Valls, 2020), estableciendo así los lugares con las muestras geoquímicas más representativas. Se definen en total 6 áreas con potencial de sistemas minerales (**Fig. 55**), donde coinciden los yacimientos minerales obtenidos por la metodología de las firmas espectrales y los valores atípicos, adicionalmente, se observa una alta actividad minera a sus alrededores.

Figura 55

Delimitación de zonas de yacimientos minerales mediante el análisis de firmas espectrales



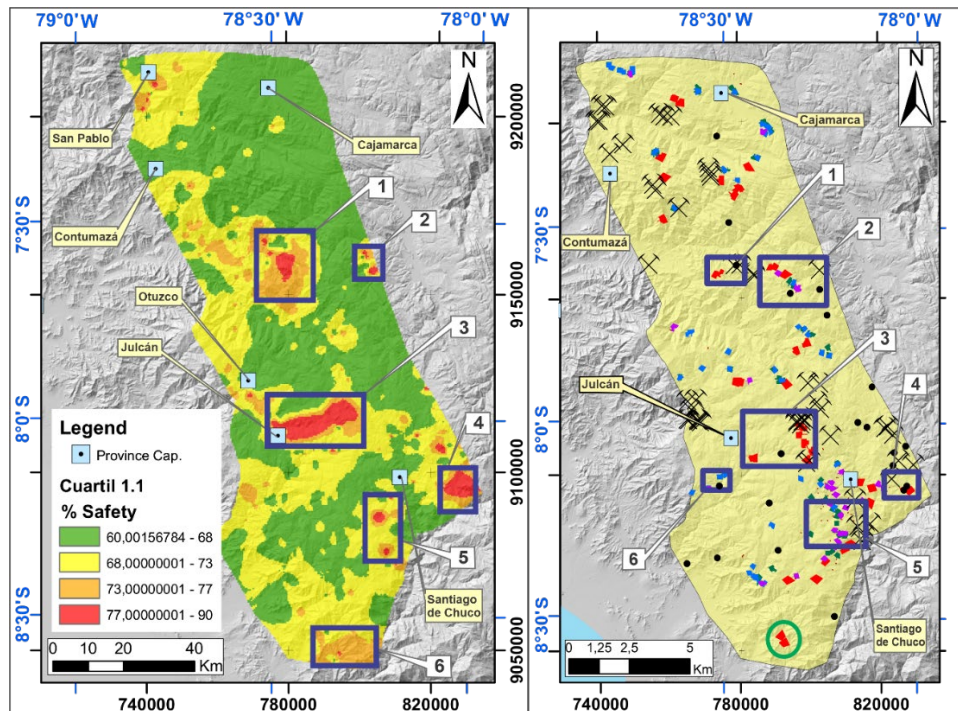
Nota. Proceso realizado en las 7 imágenes ASTER y los índices atípicos obtenidos mediante la metodología de Valls, 2020.

5. Análisis, interpretación e integración de resultados

Como se observa en la sección de resultados se obtienen varias zonas de interés mineral. Para definir los targets de potencial finales se procede a realizar la comparación de las anomalías concluidas por el método de los cuartiles para el clúster 1.1 que resulta siendo el de resultados más interesantes y las áreas de yacimientos minerales determinadas por las firmas espectrales y los índices atípicos (**Fig. 56**). En ambos casos se definen 6 anomalías, concordando las 5 primeras, por lo que se eligen automáticamente para su estudio individual.

Figura 56

Comparación de zonas de interés mineral del cuartil del clúster 1.1 y las anomalías halladas con teledetección

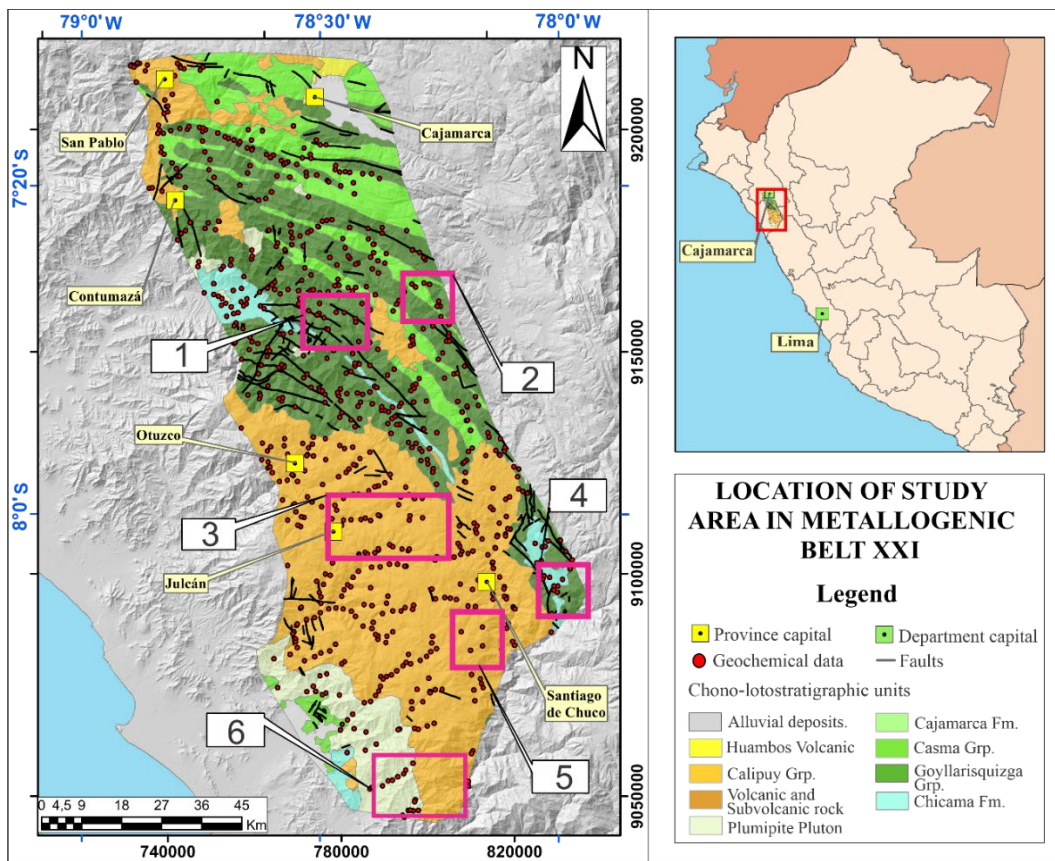


Nota. Se observa como coinciden las anomalías del 1 al 5, la anomalía número 6 difiere en los mapas, por lo cual finalmente se elige la del cuartil 1.1 pues coincide con una zona de pórfidos (círculo verde) y con la distribución geoquímica de As, Cu, Sb y Sn.

La anomalía número 6 del mapa de teledetección se descarta pues no resalta significativamente en el mapa de cuartiles ni en las distribuciones geoquímicas de los elementos, por el contrario, la zona 6 del mapa de cuartiles coincide con dos áreas contiguas de yacimientos de tipo pórfido, adicionalmente con las distribuciones geoquímicas del Sn, Cu, As y Sb, por lo que también se elige como target de potencial mineral. De esta manera se concluyen en total 6 zonas de potencial de sistemas minerales representativas en el área de estudio (Fig. 57).

Figura 57

Mapa geológico con 6 zonas de anomalías (cuadros magenta) producto de la integración de resultados de los análisis de geoquímica, geoestadística y sensores remotos.



El análisis individual de las anomalías establecidas se realiza mediante combinaciones de bandas en las mismas imágenes ASTER LIB, lineamientos y geología a escala 1:100000. Las combinaciones de bandas se realizan por dos métodos: El cociente o ratio de bandas unitarias que muestra respuestas características de alteraciones hidrotermales (**Fig. 58**) y los índices de SWIR (Ninomiya, 2004) los cuales buscan confirmar áreas con presencia de minerales de alteración como montmorillonita, alunita, pirofilita, entre otros mediante la matemática de bandas (**Fig. 59**).

Figura 58

Cocientes de bandas de alteración argílica avanzada, alteración argílica a fílica, y óxidos e Hidróxidos de hierro

Alteración	Ratio de bandas
Argílica Avanzada	4/5
Argílica a Fílica	4/6
Óxidos e Hidróxidos de hierro	2/1

Nota. Cocientes de alteración están basados en Fu *et al.*, 2007; Pérez *et al.*, 2010; Caiza, 2018.

Figura 59

Índices del SWIR OHIa, OHIb y ALI

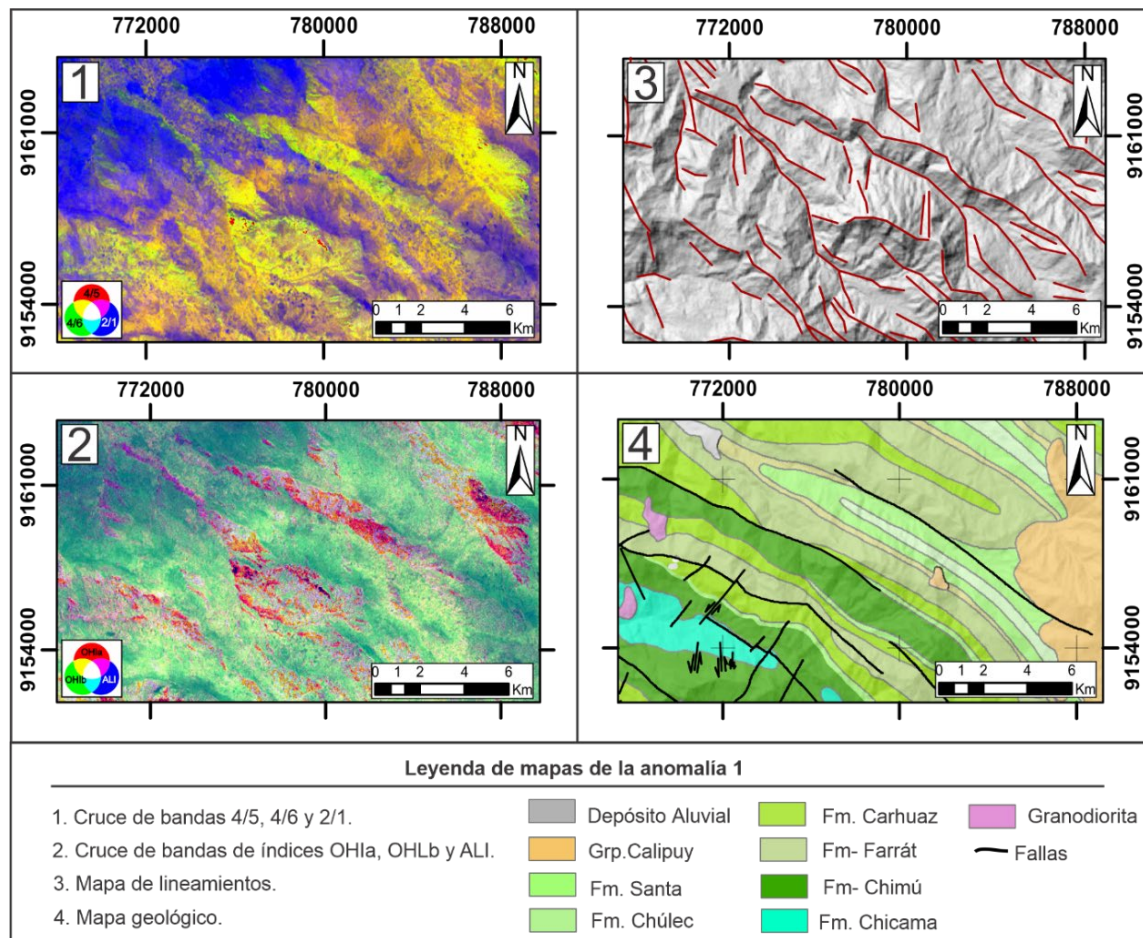
Índices del SWIR	Mineral de reconocimiento	Matemática de bandas
OHIa	Moscovita, Illita, Montmorillonita	$\frac{\text{Banda 4} * \text{Banda 7}}{\text{Banda 6} * \text{Banda 6}}$
OHIb	Pirofilita	$\frac{\text{Banda 4} * \text{Banda 7}}{\text{Banda 5} * \text{Banda 5}}$
ALI	Alunita	$\frac{\text{Banda 7} * \text{Banda 7}}{\text{Banda 5} * \text{Banda 8}}$

Nota. Estos índices se hallan mediante matemática de bandas, representan minerales característicos de alteración hidrotermal. (Ninomiya, 2004)

En la anomalía 1 (Fig. 60) se observan colores verdes a amarillos intercalados (imagen 1) mostrando una respuesta favorable a alteración argílica, estas mismas bandas coinciden con las tonalidades rojas y magentas (imagen 2), dados por los índices OH_{Ia} y ALI, según Ninomiya (2004) reacción típica para micas como montmorillonita, moscovita, illita y alunita.

Figura 60

Mapa de la anomalía 1



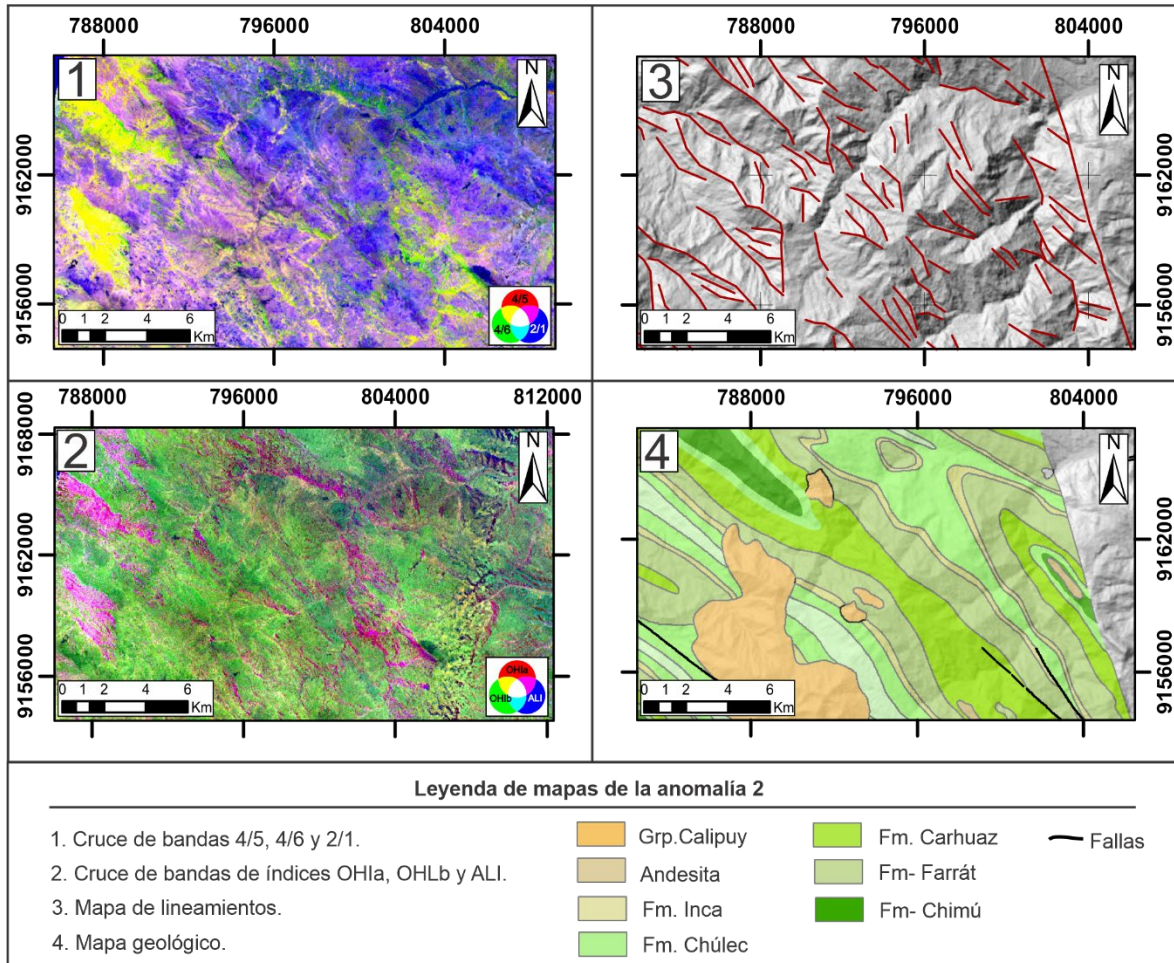
Nota. Siendo 1: Cruce de bandas 4/5, 4/6 y 2/1 representando las alteraciones argílica avanzada, argílica a filica y óxidos ferrosos respectivamente (Fu *et al.*, 2007; Pérez *et al.*, 2010; Caiza, 2018). 2: Cruce de bandas de los índices OH_{Ia}, OH_{Ib} y ALI (Ninomiya, 2004). 3: Mapa de lineamientos y 4: Mapa geológico a escala 1:100000.

Los lineamientos, van en general en dirección NW, producto de la deflexión de Cajamarca (Bazán 2017), comportamiento también particular en los cruces de bandas, pues los minerales siguen la dirección principal, indicando que la actividad tectónica está actuando a favor de la formación de depósitos minerales, en este caso un sistema mineral de tipo pórfido según el análisis de teledetección (**Fig. 55**). También se destaca la coincidencia de los lineamientos con algunos contactos de formaciones geológicas. En general la zona es volcanosedimentaria por eso la gran facilidad en los cambios de dirección.

Al oeste de la anomalía 2 (**Fig. 61**) se encuentran dos zonas amplias que son muy similares en la imagen 1 y 2, resaltan un color amarillo intenso mostrando relación con la alteración argílica avanzada y argílica a filica, en la imagen 2 estas zonas presentan tonos magentas que con los índices OH1a y ALI indican la presencia de minerales de alteración hidrotermal (Pérez et al., 2010). Las áreas delimitadas por un fuerte lineamiento, producto al igual que la anomalía 1, de la deflexión de Cajamarca (Bazán, 2017). El comportamiento geológico es volcanosedimentario. El mapa de teledetección (**Fig. 55**) indica que allí pueden existir varios sistemas de potencial mineral como lo son: Epitermal de baja y alta sulfuración, pórfidos y un híbrido entre pórfidos y epitermal de alta sulfuración.

Figura 61

Mapa de la anomalía 2



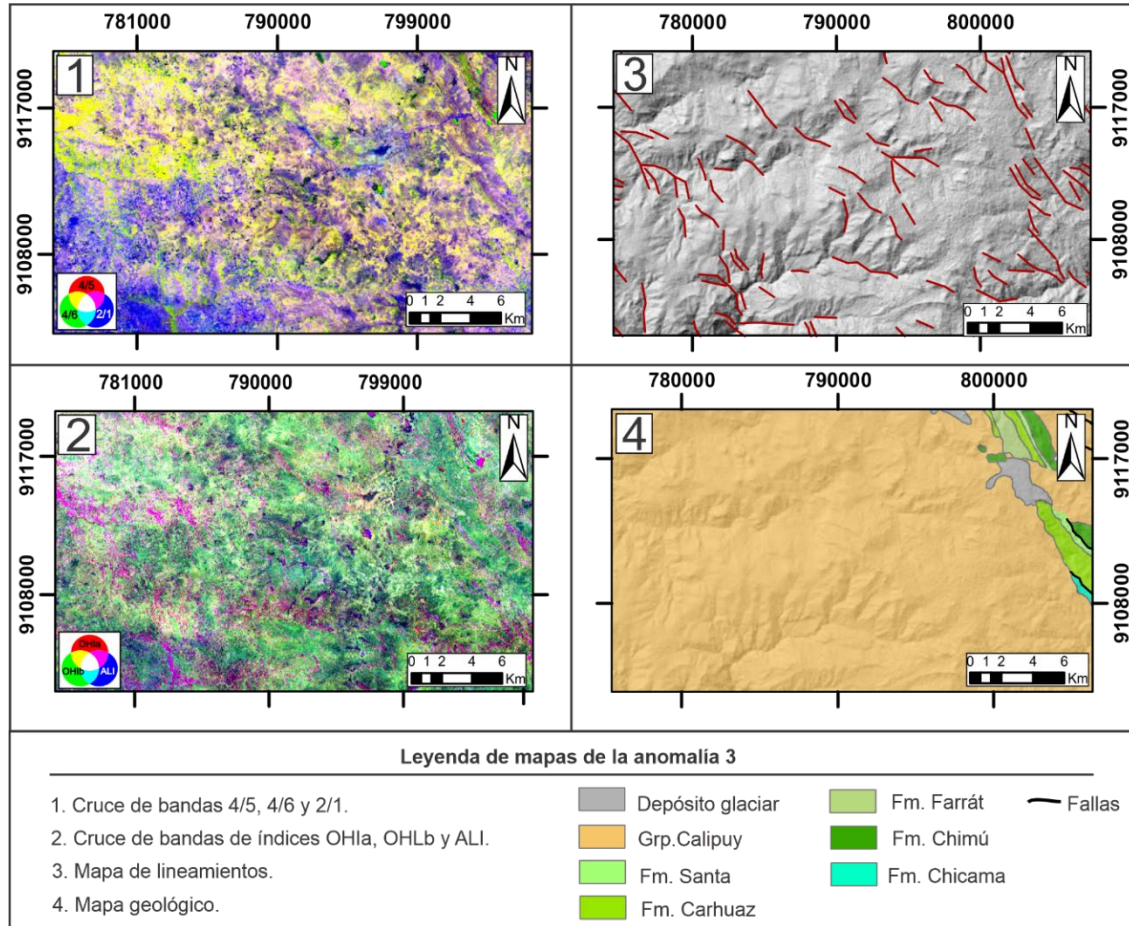
Nota. Siendo 1: Cruce de bandas 4/5, 4/6 y 2/1 representando las alteraciones argílica avanzada, argílica a filíca y óxidos ferrosos respectivamente (Fu *et al.*, 2007; Pérez *et al.*, 2010; Caiza, 2018). 2: Cruce de bandas de los índices OHIa, OHLb y ALI (Ninomiya, 2004). 3: Mapa de lineamientos y 4: Mapa geológico a escala 1:100000.

La zona oeste de la anomalía 3 (**Fig. 62**) presenta dos lineamientos fuertes en dirección NE, las tonalidades amarillo verdosas y magenta de las imágenes 1 y 2 respectivamente siguen esta dirección indicando la depositación de minerales de alteración hidrotermal (Pérez et al., 2010) concluyendo así la existencia de fluidos hidotremales que aprovecharon esas zonas de fracturas para dar lugar a la formación de depósitos minerales.

El mapa de la sección de teledetección (**Fig. 55**) indica para esta zona la presencia de sistemas minerales asociados a pórfidos. Como se observa la zona está cubierta en casi su totalidad por las rocas del Grupo Calipuy, cuerpos volcanosedimentarios representados en su mayoría por rocas andesíticas o tobáceas (Reyes, 1980; Díaz et al., 2015; Díaz et al., 2017; Bernuy et al., 2018).

Figura 62

Mapa de la anomalía 3

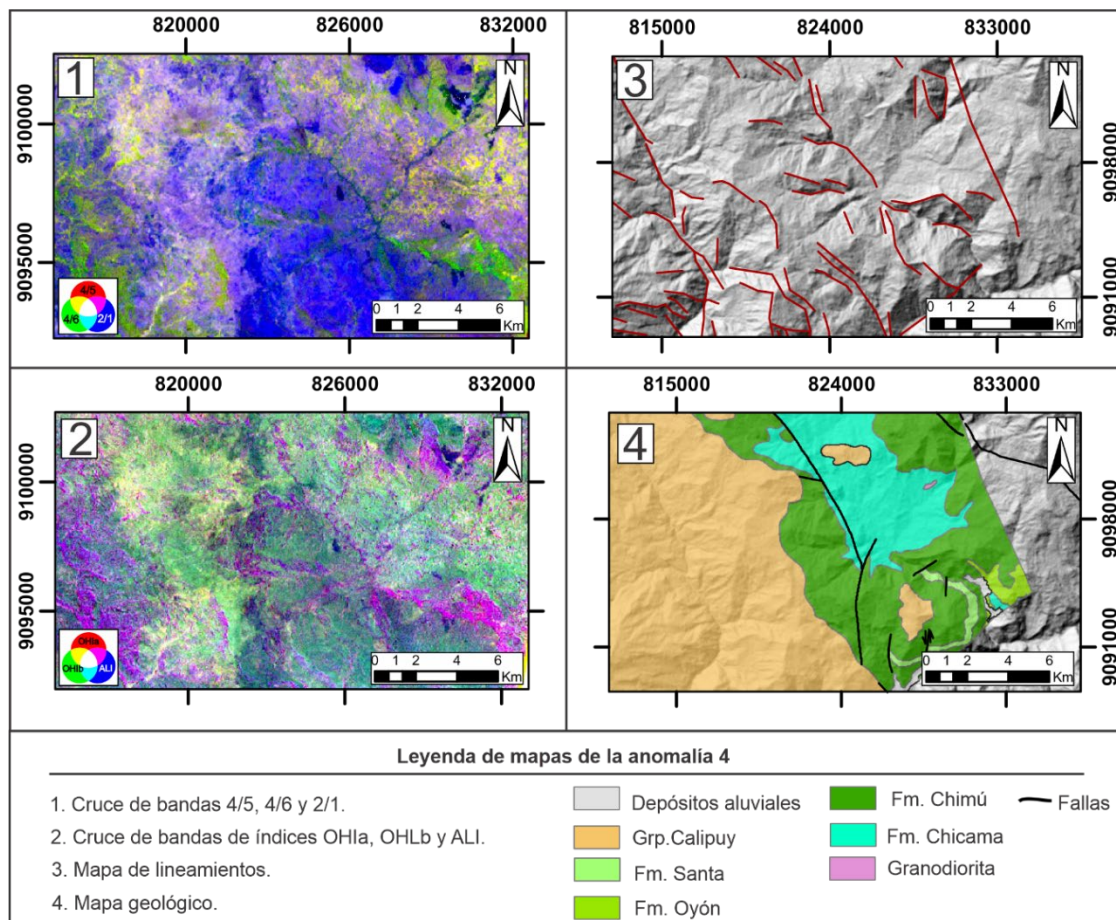


Nota. Siendo 1: Cruce de bandas 4/5, 4/6 y 2/1 representando las alteraciones argílica avanzada, argílica a filíca y óxidos ferrosos respectivamente (Fu *et al.*, 2007; Pérez *et al.*, 2010; Caiza, 2018). 2: Cruce de bandas de los índices OH1a, OH1b y ALI (Ninomiya, 2004). 3: Mapa de lineamientos y 4: Mapa geológico a escala 1:100000.

En la zona más oriental de la anomalía 4 (**Fig. 63**), al norte de está, y al sureste, se encuentran tonalidades verdes a amarillas en la imagen 1 correspondiente a alteraciones argílica a filíca, relacionándose a las claras tonalidades magenta de la imagen 2, dados por la combinación de los índices OH1a y ALI indicando minerales como moscovita, illita, montmorillonita y alunita, los cuales son productos de alteración (Ninomiya, 2004).

Figura 63

Mapa de la anomalía 4



Nota. Siendo 1: Cruce de bandas 4/5, 4/6 y 2/1 representando las alteraciones argílica avanzada, argílica a fílica y óxidos ferrosos respectivamente (Fu *et al.*, 2007; Pérez *et al.*, 2010; Caiza, 2018). 2: Cruce de bandas de los índices OH1a, OH1b y ALI (Ninomiya, 2004). 3: Mapa de lineamientos y 4: Mapa geológico a escala 1:100000.

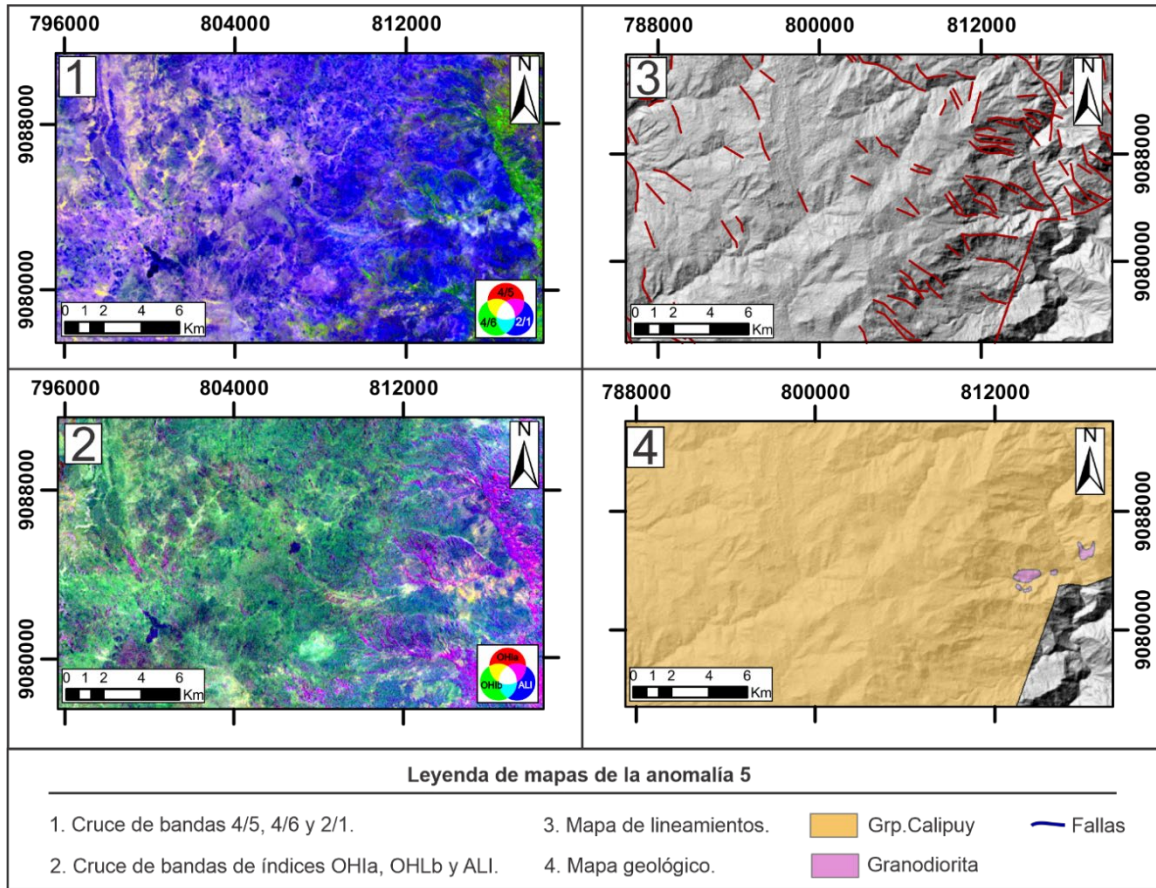
Las tres zonas se relación a un aumento la cantidad de lineamientos circundantes, de forma particular, solo los dos más distantes se asocian a contactos litológicos, en cambio, el restante se localiza directamente en el Grupo Calipuy. El análisis de firmas espectrales (**Fig. 55**) da como resultado que en esta zona se presentan sistemas de potencial mineral asociados a pórfidos.

Al este de la anomalía 5 (**Fig. 64**) se observa una zona que resalta y coincide en la imagen 1 y 2, siendo en la primera de tonalidad verde oscura y en la segunda magenta, correspondiente a la alteración argilíca a filica y a el índice OHIIa respectivamente, lo cual tiene bastante coherencia pues según Ninomiya (2004) los minerales representativos de este índice son Moscovita, Illita, Montmorillonita encajando así con los minerales representativos de este tipo de alteración (Sillitoe 2000; 2010).

Adicionalmente, en esta zona hay una alta densidad de lineamientos, por los que se pueden estar filtrando flujos hidrotermales producto de los cuerpos granodioríticos y trayendo así la creación de sistemas minerales asociados a epitermales de baja, alta sulfuración y/o pórfidos como lo indica el mapa de teledetección (**Fig. 55**).

Figura 64

Mapa de la anomalía 5



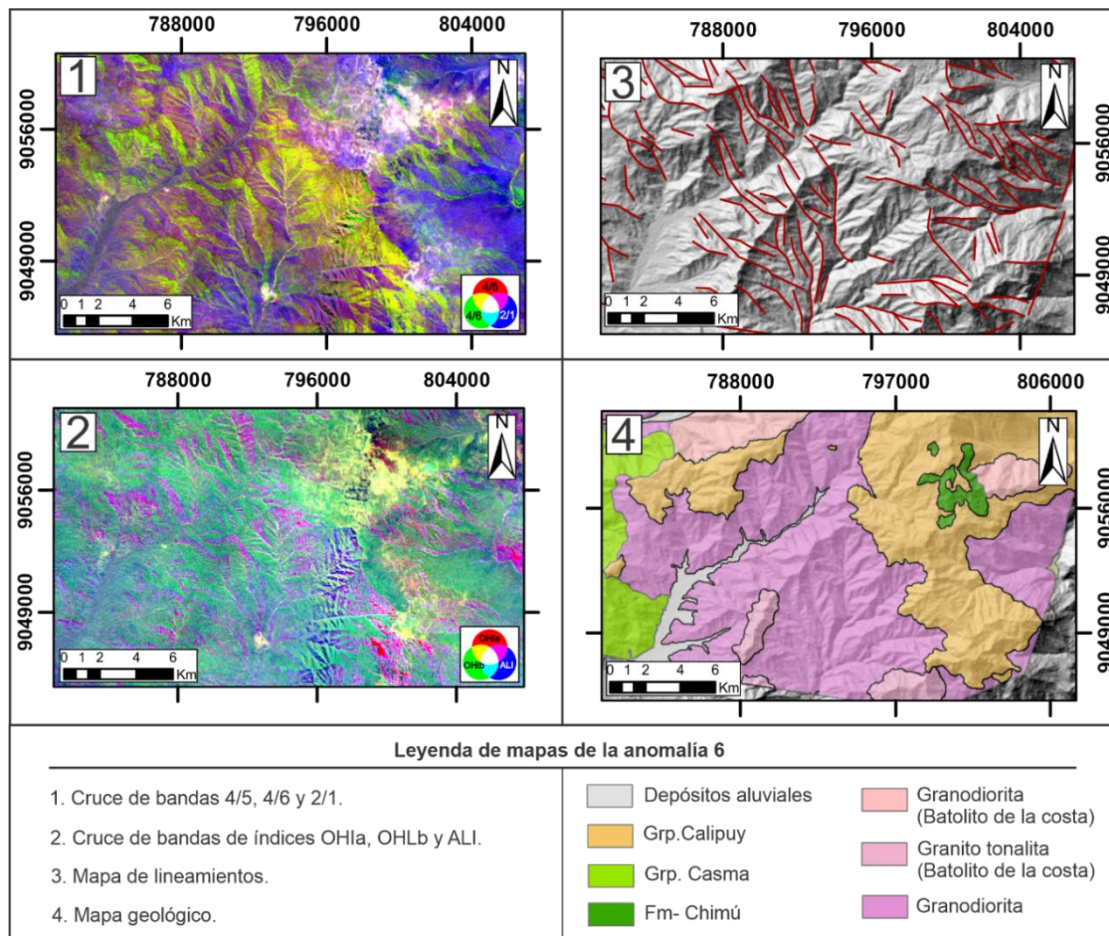
Nota. Siendo 1: Cruce de bandas 4/5, 4/6 y 2/1 representando las alteraciones argílica avanzada, argílica a filica y óxidos ferrosos respectivamente (Fu *et al.*, 2007; Pérez *et al.*, 2010; Caiza, 2018). 2: Cruce de bandas de los índices OHIa, OHIb y ALI (Ninomiya, 2004). 3: Mapa de lineamientos y 4: Mapa geológico a escala 1:100000.

La gran cantidad de lineamientos que presenta la zona 6 (**Fig. 65**) y los cambios de dirección NE indican que el lugar presenta una alta actividad tectónica, lo que tiene sentido pues al sur está la denominada deflexión de Conchucos (Pizarro, 2016). Las combinaciones de bandas resaltan ese cambio abrupto e indican bastantes zonas de alteración hidrotermal (tonalidades verdes en la imagen 1 y magentas en la 2).

Relacionado a ello y con seguridad producto de filtraciones de fluidos hidrotermales pues la zona está cubierta en alrededor de un 80% por rocas ígneas y volcánicas lo que indica una alta actividad magmática concordando así con el análisis de firmas espectrales (**Fig. 55**) el cual concluye que en esta zona hay presencia de yacimientos un sistema mineral asociado a un pórfido.

Figura 65

Mapa de la anomalía 6



Nota. Siendo 1: Cruce de bandas 4/5, 4/6 y 2/1 representando las alteraciones argílica avanzada, argílica a fílica y óxidos ferrosos respectivamente (Fu *et al.*, 2007; Pérez *et al.*, 2010; Caiza, 2018). 2: Cruce de bandas de los índices OH1a, OH1b y ALI (Ninomiya, 2004). 3: Mapa de lineamientos y 4: Mapa geológico a escala 1:100000.

6. Conclusiones

En total se encontraron 6 áreas de potencial de sistemas minerales mediante el análisis integral de geoestadística, geoquímica y sensores. El dendograma fue fundamental, pues al agrupar los elementos con mayor similitud permitió identificar el conjunto de elementos más representativos que fue el Cluster 1.1 sobre el cual se realizó todo el análisis geoestadístico y geoquímico.

De igual importancia se encontró que al comparar los mapas de distribución geoquímica de los elementos traza contra los mapas de cuartiles, este último sintetiza y representa las altas concentraciones de los elementos mostrando además las relaciones que no son diferenciables con el análisis individual de estos.

El análisis de firmas espectrales con minerales característicos de zonas de alteración hidrotermal permitió definir áreas de sistemas minerales asociados a yacimientos de tipo epitermales de baja y alta sulfuración, pórfidos e híbridos de pórfidos y epitermales de alta sulfuración, siguiendo los ensambles mineralógicos definidos por Sillitoe.

Las 6 zonas anómalas finales se determinaron mediante la comparación entre el mapa del cuartil del clúster 1.1 y el mapa producto del análisis de sensores remotos. El análisis de cada anomalía se hizo en conjunto con combinación de bandas de alteraciones hidrotermales, índices de Ninomiya, lineamientos y geología a escala 1:100000.

El análisis integral de los índices de Ninomiya en cada una de las anomalías presenta una correlación del índice OH1a con las zonas de alteración de argílica a fílica descrita por Sillitoe y determinadas por los ratios de bandas, trayendo consigo un resultado bastante confiable de áreas con presencia de minerales de moscovita, illita y montmorillonita, indicando así la presencia de sistemas minerales.

Respecto a la geología, en la zona sur correspondiente a la anomalía 6 está representada en su gran mayoría por rocas ígneas, lo cual indica actividad magmática; Las anomalías 3, 4 y 5 están en su mayoría cubiertas por rocas del grupo Calipuy, cuerpos volcanosedimentarios formados principalmente de andesitas y tobas; La zona central en las anomalías 1 y 2 en su mayoría están formadas por cuerpos sedimentario por lo que se ve fuertemente el impacto tectónico producto de la deflexión de Cajamarca.

Finalmente, los lineamientos fueron fundamentales al momento de comprender la distribución de los minerales en las imágenes de combinación de bandas, pues en la mayoría seguían la dirección de estos. Es de resaltar que la alta actividad tectónica de la zona producto de las dos deflexiones que la rodean es fundamental en la generación de yacimientos minerales tal y como lo indican los análisis integrales.

7. Recomendaciones

Tener en cuenta que es indispensable hacer la limpieza a los datos geoquímicos (límites de detección), y la posterior normalización de estos para obtener resultados coherentes. También convertir todos los datos a una misma unidad para evitar confusiones. Así mismo, las imágenes satelitales deben ser corregidas teniendo en cuenta el formato, tipo y nivel de información de esta, para el caso de la ASTER L1B aplicar la corrección atmosférica pues ya tiene incluida la geométrica y la radiométrica.

Para este caso se asumió que los pixeles de las imágenes satelitales ASTER eran puros, pero se debe tener presente que al unir las bandas los pixeles están mezclados, pues los subsistemas presentan diferentes tipos de resolución, para el caso del VNIR de 15 metros y del SWIR de 30 metros.

Gracias a los óptimos resultados obtenidos, encontramos que efectivamente existe la probabilidad de encontrar nuevas posibilidades de explotación minera en las zonas anómalas del área de estudio, por lo que muy recomendable continuar estudios a una escala más local y con métodos de mayor resolución espacial, para encontrar depósitos que ayuden a resolver el problema planteado al inicio de este proyecto.

Referencias

- Abrams, M., & Yamaguchi, Y. (2019). Twenty Years of ASTER Contributions to Lithologic Mapping and Mineral Exploration. *Remote sensing*, Vol. 11 (1394), 28p. doi: 10.3390/rs11111394.
- Abrams, M., Hook., S., & Ramachandran, B. (2002). *ASTER User Handbook*. NASA. Version 2, 135p.
- Adams, J. (1974). Visible and Near-Infrared Diffuse Reflectance Spectra of Pyroxenes as Applied to Remote Sensing of Solid Objects in the Solar System. *J. Geophys Res.*, Vol.79, p. 4829-4836. doi: org/10.1029/JB079i032p04829.
- Aitchison, J. (1982). The statistical analysis of compositional data (with discussion). *Journal of the Royal Statistical Society, Series B (Statistical Methodology)*, Vol. 44 (2), p. 139-177.
- Aljovín, C., Ricardo, L., Oscar, B., Tuiro, M., Chappuis, M., Vidal, C., . . . Vargas, L. (2017). Atlas Geoquímico Del Perú. *NGEMMET, Special Publication. (2), 194 p.*
- Alonso, F. (2006). *Teledetección*. Obtenido de SIG y Teledetección en la Universidad de Murcia: https://www.um.es/geograf/sigmur/sigpdf/temario_10.pdf, Publicación Especial, p. 181-218
- Arivazhagan, S., & Anbazhagan, S. (2017). ASTER Data Analyses for Lithological Discrimination of Sittampundi Anorthositic Complex, Southern India. *Geosciences Research*, Vol. 2 (3), p. 196-209. doi: org/10.22606/gr.2017.23005.
- Bazán, O. (2017). Evolución geotectónica de la Deflexión de Cajamarca y su Evolución geotectónica de la Deflexión de Cajamarca y su. *Resúmenes ampliados del XVIII Congreso Peruano de Geología*, Publicación Especial Vol. 12, p. 241-245.
- Bazan, O., & Lagos, A. (2018). Fallamiento en bloques y desacople cortical en la Deflexión de Cajamarca. *Sociedad Geológica del Perú. Resúmenes Extendidos del XIX Congreso Peruano de Geología*, 4p.

- Beiranvand, A. P., & Hashim, M. (2012). The application of ASTER remote sensing data to porphyry copper and epithermal. *Ore Geology Reviews*, Vol. 44, p.1-9. doi: 10.1016/j.oregeorev.2011.09.009.
- Bernuy, V. O., Fidel, S. L., Macharé, O. J., & Mamani, H. M. (2018). *Mapa geológico del Perú, Escala 1:1000000. Versión Digital*. Lima, Perú: INGEMMET, publicación especial. 1p.
- Beskow, G. (1924). V. M. Goldschmidt: Geochemische Verteilungsgesetze der Elemente. *Geologiska Föreningen i Stockholm Förhandlingar*, Vol. 46(6-7), p. 738-743. doi: 10.1080/11035892409454037.
- Cabrera, M. E., Vargas, G. D., Galindo, G. G., García, D. M., & Ordóñez, C. M. (2011). *Protocolo de procesamiento digital de imágenes para la cuantificación de la deforestación nivel Subnacional escala gruesa y fina*. Bogotá D.C., Colombia: El Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales –IDEAM–, 44p.
- Caiza, C. E. (2018). *Estimación de zonas de alteración hidrotermal mediante interpretación de imágenes satelitales tipo aster y uso del equipo terraspec en la zona oriental de cerro de pasco, Perú*. Quito: Universidad Central de Ecuador, 112 p.
- Camprubí, A., & Talbinson, a. (2006). Depósitos epitermales en México: actualización de su conocimiento y reclasificación empírica. *Boletín de la sociedad geológica Mexicana*, Tomo LVIII (1), p 27-81.
- Candia, R., & Caiozzi, G. (2005). *Revista médica de Chile*, 113(9), pp1111-1115. doi:http://dx.doi.org/10.4067/S0034-98872005000900017
- Chuvieco, E. (1995). *Fundamentos de Teledetección Espacial*. Madrid: Ediciones Rialp, S.A. 2.ª Edición, 224p.
- Clark, P. E., & Lee, M. R. (2010). *Remote Sensing Tools for Exploration. Observing and Interpreting the Electromagnetic Spectrum*. New York, NY: Springer Science+Business Media, 335p. doi: 10.1007/978-1-4419-6830-2.

- Clark, R. N. (1999). *Spectroscopy of Rocks and Minerals, and Principles of Spectroscopy*. New York: U.S. Geological Survey, John Wiley and Sons, Inc, 293p.
- Clark, R., & Roush, T. (1984). Reflectance spectroscopy: Quantitative analysis techniques for remote sensing applications. *Geophysical Research*, Vol. 89, p. 6329- 6340.
- Correal, M., & Peña, D. (2008). Modelo factorial dinámico threshold. *Revista Colombiana de Estadística*, 31(2), pp183-192.
- Cressie, N. (1993). *Statistics for Spatial Data*. John Wiley & Sons, Inc.
- Dagnino, J. (2014). *Revista Chilena de Anestesia*, Vol. 43(2), p. 150-153. doi:org/10.25237/revchilanestv43n02.15
- De la Fuente, S. (2011a). Análisis Conglomerados. *Publicación Especial, Universidad Autónoma de Madrid*, 57p.
- De la Fuente, S. (2011b). Análisis Factorial. *Publicación Especial, Universidad Autónoma de Madrid*, 34p.
- Díaz, A., Carpio, M., & Ramirez, J. (2015). *Estudio geológico económico de rocas y minerales industriales en la región de Cajamarca. Proyecto GE30*. Lima, Perú: INGEMMET, publicación especial. 376p.
- Díaz, A., Ramirez, J., Jhonny, T., & Carpio, M. (2017). *Prospección de recursos de rocas y minerales industriales en la región de la libertad. Proyecto GE-34 A*. Lima, Perú: INGEMMET, publicación especial. 309p.
- Díaz, M. (2002). *Geoestadística Aplicada*. Recuperado el 2020, de http://mmc.geofisica.unam.mx/gmee/cursos/Doctos_Permanentes/GeoEstadistica.pdf
- Dominguez, S. (2014). ¿Matrices Policóricas/Tetracóricas o Matrices Pearson? Un estudio metodológico. *Revista Argentina de Ciencias del Comportamiento*, 6(1), p39-48. Obtenido de <https://revistas.unc.edu.ar/index.php/racc>

- Drury, S. A. (1993). *Image Interpretation in Geology*, . UK: Chapman and Hall, 2nd edition, 283 p .
- Einaudi, M., Hedenquist, J., & Inan, E. (2003). Sulfidation state of fluids in active and extinct hydrothermal systems: transitions from porphyry to epithermal environments. *Society of Economic Geologists, Special Publication*, Vol. 10, p. 285-313.
- ERSDAC, E. R. (2003). *Aster reference Guide*. Version 1.0, 61p.
- Everitt, B., Landau, S., Leese, M., & Stahl, D. (2011). *Cluster Analysis* (5 ed.). Chichester: John Wiley and Sons, Ltd.
- Feizi, F., & Mansouri, E. (2014). Recognition of a porphyry system using ASTER data in Bideghan – Qom province (central of Iran). *Solid Earth Discussions (SED)*, Vol. 6, p. 1765-1798.
- Ferrando, P., & Anguiano, C. (2010). El Análisis Factorial como técnica de investigación en Psicología. *Papeles del Psicólogo*, 31(1), pp18-33. Obtenido de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=77812441003>
- Ferreo, S., Palacio, M., & Campanella, O. (2002). Análisis de componentes principales en teledetección. Consideraciones estadísticas para optimizar su interpretación. *Revista de Teledetección*, 17, pp43-54.
- Frost, B. R., & Frost, C. C. (2014). *Essentials of Igneous and Metamorphic Petrology*. New York: Cambridge University Press, 1° edition, p. 331.
- Fu, B., Zheng, G., Ninomiya, Y., Wang, C., & Sun, G. (2007). Mapping hydrocarbon seepage-induced anomalies in the arid region, west China using multispectral remote sensing. *Blackwell Publishing Ltd*, Vol. 38, p. 225-231. doi: 10.1111/j.1365-3121.2007.00739.x.
- Fujisada, H. (1998). ASTER Level-1 Data Processing Algorithm. *IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING*, Vol. 36 (4), p. 1101-1112. doi:10.1109/36.700994.

- Gallardo, J. (2000). Introducción al Análisis Cluster. Consideraciones Generales. En *Análisis de Datos Multivariantes*. Recuperado el 2020, de <https://www.ugr.es/~gallardo/>
- Gallardo, J. (2000). Métodos Jerárquicos de Análisis Cluster. En *Análisis de Datos Multivariantes*. Recuperado el 2020, de <https://www.ugr.es/~gallardo/>
- Gao, B. (1996). NDWI—A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 58(3), p. 257–266. doi:10.1016/s0034-4257(96)00067-3 .
- García, O., & Moreno, G. (2006). Herramientas de Análisis Estadístico y Espacial aplicadas en la separación Línea Base – Anomalía Geoquímica. Implicaciones en Exploración de Recursos Naturales. Parte 1: Revisión metodológica. *Geología Colombiana*, 31, pp27-38.
- Giggembach, W. F. (2003). Magma Degassing and Mineral Deposition in Hydrothermal Systems along Convergent Plate Boundaries. *Economic geology, SpecialPublication*, Vol. 10, p.1-18.
- Gil, R. (2010). *Igneous Rocks and Processes: a practical guide*. UK: John Wiley & Sons, 472 p. .
- Ginzburg, I. I. (1960). *Principles of Geochemical Prospecting. Techniques of prospecting for non-ferrous ores and rare metals*. London. Oxford. New York. Paris: Pergamon Press. 324p.
- Goetz, A. F., Rowan, L. C., & Kingston, M. (1982). Mineral Identification from Orbit: Initial Results from the Shuttle Multispectral Infrared Radiometer. *Science*, Vol. 218, p.1020-1024.
- Goetz, A. F., Vane, G., Solomon, J. E., & and Rock, B. N. (1985). Imaging Spectrometry for Earth Remote Sensing. *Science*, Vol. 228, p.1147-1153.
- Goldschmidt, V. M. (1930). Geochemische Verteilungsgesetze und kosmische Häufigkeit der Elemente. *Naturwissenschaften (The Science of Nature)*, Vol. 18, p. 47-49. doi:10.1007/bf01492200.

- Goldschmidt, V. M. (1937). The Principles of Distribution of Chemical Elements in Minerals and Rocks. *The seventh Hugo Müller Lecture, delivered before the Chemical Society*, p. 655–673. doi:10.1039/jr9370000655 .
- González, P., Díaz, A., Torres, E., & Garnica, E. (1994). Una Aplicación Del Análisis De Componentes Principales En El Área Educativa. *Revista Economía*(9), 18p.
- Gordon, E., Brown, I., & Calas, G. (2012). *Mineral-aqueous solution interfaces and their impact on the environment*. California, USA: Geochemical Perspectives. 276p.
- Govett, G. J. (1983). *Rock Geochemistry in Mineral Exploration*. Netherlands: Elsevier Inc. Handbook of Exploration Geochemistry Vol. 3, 444p.
- Hair, J., Anderson, R., Tathan, R., & Black, W. (1999). *Análisis Multivariante* (Quinta ed.). Madrid: Prentice Hall Iberia.
- Haldar, S. K. (2018). *Mineral Exploration. Principles and Applications*. Amsterdam, Netherlands: Elsevier Inc. , 2.^a Edition, 370p.
- Heald, P., & Foley, N. &. (1987). Comparative anatomy of volcanic-hosted epithermal deposits: acid-sulfate and adularia-sericite types. *Economic Geology*, Vol 82(1), p. 1-26.
- Hedenquist, J. W., & Lowenstern, J. B. (1994). The role of magmas in the formation of hydrothermal ore deposits. *Nature*, Vol. 370, p. 519-527.
- Hedenquist, J., Arribas, A. J., & Gonzalez, E. (2000). Exploration for epithermal gold deposits. *Society of Economic Geologists Reviews*, Vol. 13, p. 245-277.
- Hunt, G. (1977). Spectral signatures of particulate minerals, in the visible and near-infrared. *Geophysics*, Vol. 42, p. 501-513.
- Hunt, G., & Salisbury, J. (1970). Visible and near infrared spectra of minerals and rocks. *I. Silicate minerals, Mod. Geology* , Vol. 1, p. 283-300.
- Inzana, J., Kusky, T., Higgs, G., & Tucker, R. (2003). Supervised classifications of landsat TM band ratio images and landsat TM band ratio image with radar for geological

- interpretations of central Madagascar. *J. Afr. Earth Sci.*, Vol. 37, p. 59–72, doi:10.1016/S0899-5362(03)00071-X.
- Jerram, D., & Petford, N. (2011). *The Field Description of Igneous Rocks*. UK: Wiley-Blackwell a John Wiley & Sons, Ltd., Publication, 2^a edition, 258p.
- Kahn, J. (2006). Factor Analysis in Counseling Psychology Research, Training, and Practice: Principles, Advances, and Applications. *The Counseling Psychologist*, 34(5), pp684-718. doi:10.1177/0011000006286347
- Kruse, F. A. (1988). Use of Airborne Imaging Spectrometer data to map minerals associated with hydrothermally altered rocks in the northern Grapevine Mountains, Nevada and California. *Remote Sens. Environ.*, Vol. 24(1), p. 31-51.
- Kruse, F. A., Lefkoff, A. B., & Dietz, J. B. (1993). Expert System-Based Mineral Mapping in Northern Death Valley, California/Nevada, Using the Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS). *Remote sensing of environment*, Vol. 44(2-3), p. 309-336. doi:10.1016/0034-4257(93)90024-R.
- Lago, M., Galé, C., Ubide, T., Larrea, P., Tomás, S., & Majarena, U. (2015). Petrografía y composición química de rocas volcánicas: descubrir historias magmáticas. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, Vol. 23(1), p. 33-39.
- Landau, S., & Chis Ster, I. (2010). Cluster Analysis: Overview. *International Encyclopedia of Education*, p. 72-83. doi:10.1016/B978-0-08-044894-7.01315-4
- Le Bas, M. J., & Streckeisen, A. L. (1991). The IUGS systematics of igneous rocks. *Journal of the Geological Society*, Vol. 148, p. 825-833.
- Le Maitre, R. W., Streckeisen, A., Zanettin, B., Bas, M. J., Bonin, B., & Bateman, P. (2002). *Igneous Rocks A Classification and Glossary of Terms: Recommendations of the International Union of Geological Sciences Subcommission on the Systematics of Igneous Rocks*. New York: Cambridge University Press, 2^o edition, 254p.
- Ledesma, R. (2004). Cálculo de intervalos de confianza para el coeficiente Alfa de Cronbach en ViSta. *Psico-USF*, 9, 6p.

- Lillesand, T. M., Kiefer, R. W., & Chipman, J. (2015). *Remote Sensing and Image Interpretation*. USA: Wiley, 7th Edition, 770 p.
- Litvak, V., & Godeas, M. (2003). Espectrometría de reflectancia: metodología y aplicaciones. *Revista de la asociación Argentina de geología económica*, Vol. 14, p. 42-48.
- Lloret, S., Ferreres, A., Hernández, A., & Tomás, I. (2014). El análisis factorial exploratorio de los ítems: una guía práctica, revisada y actualizada. *Anales de Psicología*, 30(3), pp1151-1169. doi:dx.doi.org/10.6018/analesps.30.3.199361
- Looney, S., & Gullledge, T. (1985). Use of the Correlation Coefficient With Normal Probability Plots. *The American Statistician*, Vol. 39(1), p. 75-79. doi:doi.org/10.2307/2683917
- Lopez, J., Fernández, S., & Lozada, C. (2008). Análisis Factorial Con Componentes Principales Para Interpretación de Imágenes Satelitales "Landsat TM 7" Aplicado en una Ventana del Departamento de Risaralda. *Scientia Et Technica*, 16(38), pp241-246.
- López, P., & Fachelli, S. (2015). *Metología de la Investigacion Social Cuantitativa* (1 ed.). Barcelona: Universidad Autonoma de Barcelona. Obtenido de <http://ddd.uab.cat/record/129382>
- Macheyeki, A. S., Li, X., Kafumu, D., & Yuan, F. (2020). *Applied Geochemistry Advances in Mineral Exploration Techniques*. Amsterdam, Netherlands: Elsevier Inc. 211p.
- Mamani, T. (2017). *Aplicación de imágenes ASTER en la detección de zonas de alteraciones hidrotermales, sector Titire*. Puno-Perú: Universidad Nacional del Altiplano, 181p.
- Marjoribanks, R. (2010). *Geological Methods in Mineral Exploration and Mining*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2.^a Edition, 248p. doi:10.1007/978-3-540-74375-0_1.
- Méndez, C., & Rondón, M. (2012). Introducción al análisis factorial exploratorio. *Revista Colombiana de Psiquiatría*, 41(1), pp197-207. doi:10.1016/S0034-7450(14)60077-9

- Middlemost, A. E. (2013). *Magmas, Rocks and Planetary Development. A survey of magma/igneous rock systems*. New York: Routledge. Taylor & Francis, 1ª edición, 322 p.
- Morales, P. (2013). *El Análisis Factorial en la construcción e interpretación de tests, escalas y cuestionarios*. Publicación especial , Universidad Pontificia Comillas, Facultad de Ciencias Humanas y Sociales, Madrid. Obtenido de <http://www.upcomillas.es/personal/peter/investigacion/AnalisisFactorial.pdf>
- Müller, A. (2014). Viktor Moritz Goldschmidt (1888–1947) and Vladimir Ivanovich Vernadsky (1863–1945): The father and grandfather of geochemistry? *Journal of Geochemical Exploration*, Vol. 147, p. 37- 45. doi: 10.1016/j.gexplo.2014.02.006.
- NASA. (07 de Septiembre de 2004). *ASTER*. Recuperado el Agosto de 2020, de Jet Propulsion Laboratory: <https://asterweb.jpl.nasa.gov/index.asp>
- NASA. (s.f.). *Terra: the EOS Flagship*. Recuperado el Agosto de 2020, de About Terra: <https://terra.nasa.gov/about/mission>
- Navarro, P. (2007). *Características metalogenéticas de los yacimientos asociados al grupo calipuy en el norte del Perú, departamentos de la libertad y ancash*. Lima, Perú: INGEMMET, publicación especial, 27p.
- Ninomiya, Y. (2004). Lithologic mapping with multispectral ASTER TIR and SWIR data. *Proceedings of SPIE*, Vol. 5234, p. 180-190. doi:10.1117/12.511902.
- Pérez, D., D’Odorico, P., & Godeas, M. (2010). Reconocimiento de alteración hidrotermal con el sensor ASTER, en el curso medio del río Santa Cruz (31°40’S), Provincia de San Juan. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, Vol. 66 (4), p. 653-633.
- Pérez, E., & Medrano, L. (2010). Análisis Factorial Exploratorio: Bases Conceptuales y Metodológicas. *Revista Argentina de Ciencias del Comportamiento*, 2(1), pp58-66.
- Pérez, G. C., & Muñoz, N. A. (2006). *Teledetección: Nociones y aplicaciones*. España: Universidad de Salamanca, 382 p.

- Philpotts, A. R., & Ague, J. J. (2009). *Principles of Igneous and Metamorphic Petrology*. New York: Cambridge University Press, 2^a edition, 685p.
- Pizarro, M. (2016). *Características geológicas del distrito minero aurífero de huamachuco y su potencial para la exploración, la Libertad - Perú*. Arequipa, Perú: Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa. 95p.
- Ptitsyn, A. (2018). *Lectures in Geochemistry*. London, UK: CRC Press. Taylor & Francis Group, 98p.
- Rapisarda, F., Brigo, D., & Mercurio, F. (2007). Parameterizing correlations: a geometric interpretation. *IMA Journal of Management Mathematics*, 18(1), p55-73. doi:10.1093/imaman/dpl010
- Restrepo, L., & Gonzáles, J. (2007). De Pearson a Spearman. *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias*, Vol. 20, p. 183-192.
- Reyes, R. L. (1980). *Geología de los cuadrángulos de Cajamarca, San Marcos y Cajabamba*. Lima: INGEMMET, publicación especial, serie A carta geológica Nacional, boletín N° 31. 83p.
- Richards, J. (2009). Postsubduction porphyry Cu-Au and epithermal Au deposits: Products of remelting of subduction-modified lithosphere. *Geology*, Vol. 37, p. 247-250. doi: 10.1130/G25451A.1.
- Rivera, C. R. (2007). *Características metalogénicas de los yacimientos asociados al volcanismo cenozoico (grupo calipuy) en el norte del Perú, región cajamarca*. Lima, Perú: INGEMMET, publicación especial. 82p.
- Rodríguez, F. (2008). *Determinación de zonas de alteración hidrotermal mediante imágenes ASTER, Oeste de Cajamarca*. Cusco: Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco, 107p.
- Rowan, L., Hook, S., Abrams, M., & Mars., J. (2003). Mapping hydrothermally altered rocks at Cuprite, Nevada, using the Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER), a new satellite-imaging system. *Economic Geology*

and the Bulletin of the Society of Economic Geologists, Vol. 98 (5), p.1019-1027, doi.10.2113/gsecongeo.98.5.1019.

Sabins, F. (1997). *Remote Sensing - Principles and Interpretation*. New York, NY: W.H. Freeman, 3.^a Edition, 494 p.

Sabins, F. F. (1999). Remote sensing for mineral exploration. *Ore Geology Reviews*, 14(3-4), p. 157–183. doi:org/10.1016/S0169-1368(99)00007-4.

Schowengerdt, R. A. (2007). *Remote Sensing: Models and Methods for Image Processing*. UK: Elsevier, 3.^a Edition, 558P.

Seedorff, E., Dilles, J., Proffett, J., Einaudi, M., Zurcher, L., Stavast, W., . . . Johnson, D. (2005). Porphyry-related deposits: Characteristics and origin of hypogene features. *Economic Geology 100th Anniversary Volume*, p 251-298.

Sillitoe, R. (1995a). The influence of magmatic-hydrothermal models on exploration strategies for volcano-plutonic arcs in Thompson J.F.H. (ed.). *Magmas, fluids and ore deposits: Mineralogical Association of Canada Short Course Series*, Vol. 23, p. 511-525.

Sillitoe, R. (1999). Styles of High-Sulphidation Gold, Silver and Copper Mineralisation in Porphyry and Epithermal Environments. *Pacrim '99 Congress, 27 West Hill Park, Highgate Village, London N6 6ND, England*, p. 29-44.

Sillitoe, R. H. (2000). Gold-Rich Porphyry Deposits: Descriptive and Genetic Models and Their Role in Exploration and Discovery. *27 West Hill Park*, Highgate ViUage, London N6 6ND, England. Society of Economic Geologists, Reviews*, Vol. 13, p. 315-345.

Sillitoe, R. H. (2010). Porphyry Copper Systems. *27 West Hill Park, Highgate Village, London N6 6ND, England. Economic Geology, Society of Economic Geologists, Inc.*, Vol. 105, p. 3–41.

- Sillitoe, R., & Hedenquist, J. (2003). Linkages between Volcanotectonic Settings, Ore-Fluid Compositions, and Epithermal Precious Metal Deposits. *Society of Economic Geologists, Special Publication Series*, Vol. 10, p. 314-343.
- Sucapuca, G. C. (2019). Caracterización petromineralógica de tres yacimientos epitermales del sur peruano. *INGEMMET. Boletín, Serie B: Geología Económica*, Vol. 58, 163p.
- Thio, S., & Comas, M. (2016). *CoDaPack v2 User's Guide*. Universidad de Girona, Girona.
- Tosdal, R. M., Dilles, J. H., & Cook, D. R. (2009). From Source to Sinks in Auriferous Magmatic-Hydrothermal Porphyry and Epithermal Deposits. *Elements*, Vol. 5, p. 289–295. doi: 10.2113/gselements.5.5.289.
- Tosdal, R., & Richards, J. (2001). Magmatic and structural controls on the development of porphyry Cu ± Mo ± Au deposits. *Economic Geology*, Vol. 14, p.157-181.
- Toselli, A. J. (2009). *Elementos Basicos de Petrologia Ignea*. San Miguel de Tucumán: Instituto Superior de Correlacion Geologica. Serie Miscelanea. Vol. 18, 344p.
- USGS. (2013). *Landsat 8*. Recuperado el Julio de 2020, de https://www.usgs.gov/land-resources/nli/landsat/landsat-8?qt-science_support_page_related_con=0#qt-science_support_page_related_con
- Valls, R. (12 de Agosto de 2020). Curso CoDaPack Extracción de toda la información de sus datos geoquímicos. Montréal, Canadá. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-5421-0914>.
- Valls, R. (3 de Marzo de 2021). El uso de cuartiles para la representación gráfica de datos geoquímicos. Montréal, Canadá. doi:10.17605/OSF.IO/745B8
- Van der Meer, F. D., & De Jong, S. M. (2001). *Remote Sensing and digital image processing. Imaging spectrometry. Basic principles and prospective applications*. New York, Boston, Dordrecht, London, Moscow: Kluwer Academic Publishers, Vol. 4, 395p.
- Vargas, C., Villon, C., & Pasapera, J. (2009). Comparación de Técnicas para el Mapeo de Cobertura Glaciar con Imágenes LANDSAT y ASTER en la Cordillera Blanca,

- Ancash, Perú. *Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, p. 6911-6917.
- Villadevall, S. D. (2008). *La prospección geoquímica. Geología económica, ambiental e hidrología*. Barcelona: Universitat de Barcelona, 20p.
- Villadevall, S. M., Vaquer, N. R., & Pérez, G. D. (1996). Geoquímica aplicada al medio ambiente. *ACTA GEOLOGICA HISPANICA*, Vol. 30, p. 111 -130.
- White, N., & Hedenquist, J. (1990). Epithermal environments and styles of mineralization: variations and their causes, and guidelines for exploration. *Journal of Geochemical Exploration*, Vol. 36(1-3), p. 445-474. Doi: 10.1016/0375-6742(90)90063-G.
- White, N., & Hedenquist, J. (1995). Epithermal gold deposits: styles, characteristics and exploration. *SEG Newsletter*, Vol. 23, p. 9-13.
- White, W. M. (2013). *Geochemistry*. Ithaca, New York, USA: Wiley-Blackwell. A John Wiley & Sons, Ltd., Publication, 1ª edición, 670p.
- Yamaguchi, Y. (1987). Possible Techniques for Lithologic Discrimination using the Short-Wavelength-Infrared Bands of the Japanese ERS-1. *Remote sensing of environment*, Vol. 23, p. 117-129. doi:10.1016/0034-4257(87)90074-5.
- Yamaguchi, Y., Kahle, A., Tsu, H., Kawakami, T., & Pniel, M. (Julio de 1998). Overview of Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER). *IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING*, 36(4), 1062-1071.