

# **UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA Y METALÚRGICA**



**TESIS:**

**“MODELADO FRACTAL EN PROSPECCIÓN GEOQUÍMICA DE LAS  
SUBCUENCAS DE ALTO CAMANÁ Y HORNILLOS ALTO-  
AREQUIPA”**

**PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE  
INGENIERO GEÓLOGO**

**ELABORADO POR:**

**AUGUSTO FABRIZIO SÁNCHEZ CAMACHO**

**ASESOR:**

**MSc. ING. CÉSAR RAMIRO SANTIAGO CHIRINOS**

**Lima – Perú**

**2019**

## DEDICATORIA

Dedico esta tesis principalmente a Dios, por darme la fuerza y la motivación durante este largo pero fructífero proceso, además de concederme el privilegio de estudiar y descubrir los misterios de Su maravillosa creación.

A mis padres, por su apoyo incondicional en todas mis necesidades y por sus sabios consejos que me han permitido llegar hasta este punto.

“Porque de él, y por él, y para él, son todas las cosas. A él sea la gloria por los siglos. Amén.”

(Romanos 11:36, RVR1960)

“Porque las cosas invisibles de él, su eterno poder y deidad, se hacen claramente visibles desde la creación del mundo, siendo entendidas por medio de las cosas hechas, de modo que no tienen excusa.”

(Romanos 1:20, RVR1960)

“Porque en él fueron creadas todas las cosas, las que hay en los cielos y las que hay en la tierra, visibles e invisibles; sean tronos, sean dominios, sean principados, sean potestades; todo fue creado por medio de él y para él. Y él es antes de todas las cosas, y todas las cosas en él subsisten”

(Colosenses 1:16-17, RVR1960)

## **AGRADECIMIENTOS**

Quiero agradecer al Ing. Elvis Sánchez, quien me apoyó con sus valiosas sugerencias y correcciones durante el desarrollo de esta tesis.

Agradezco a los ingenieros Iván Becerra, Jovita Soaña, Edid Equiapaza e Inés Trinidad, quiénes con su importante trabajo me ayudaron en las difíciles campañas de campo.

Agradezco a mi asesor de tesis MSc. César Santiago por el aporte de sus conocimientos y experiencia, y al especialista MSc. Lic. Atilio Mendoza por su tiempo para orientarme en la investigación.

Agradezco a los todos docentes que con su sabiduría, conocimiento y apoyo, motivaron a desarrollarme como persona y profesional en la Universidad Nacional de Ingeniería.

## RESUMEN

La presente tesis realiza el procesamiento de información geoquímica en sedimentos de quebrada y litogeoquímica, utilizando los modelos fractales Concentration – Área (C-A) y Number – Size (N-S), con el fin de determinar nuevos blancos de exploración de minerales económicamente importantes.

Los modelos fractales afrontan eficientemente varias dificultades que provienen de la aplicación del método tradicional (media y desviación estándar). Los más notorios son la eliminación de *outliers* y la transformación logarítmica de la base de datos para tentar una distribución normal o log-normal. Ambos procesos alteran la base de datos, lo cual no es conveniente. Con los modelos fractales no es necesario el proceso anterior, ya que se usan todos los datos sin excepción y se trabaja con cualquier tipo de distribución.

En el primer capítulo se describe el entorno de la investigación, haciendo énfasis en la problemática del método tradicional para delinear anomalías geoquímicas. Se plantean los objetivos generales específicos de esta tesis, además de describir los alcances del estudio. En el segundo capítulo se realiza la descripción de la geología de la zona de estudio, tocando los temas de la geología estructural, geotectónica y geología económica. En el tercer capítulo se desarrolla ampliamente el concepto de la geometría fractal, su presencia en la naturaleza, sus aplicaciones en la geología y los modelos fractales planteados para la exploración geoquímica. Además se trata brevemente el método hiperbólico, que se utiliza para la validación de los análisis químicos de grandes cantidades de muestras. En el cuarto capítulo se procede con la aplicación del modelado fractal, tanto en sedimentos de quebrada como en litogeoquímica, de los elementos As, Cu, Cr, Hg, Mo, Ni, Pb y Zn. Se determinan las diferentes poblaciones geoquímicas (de fondo y anómalas) y se generan los mapas

de anomalías geoquímicas de cada elemento. En el quinto capítulo se hace uso de diferentes capas de información para la validación de las zonas anómalas delimitadas por los modelos fractales. Estas capas son los yacimientos minerales y las fallas geológicas. Finalmente, en las conclusiones se responde a los objetivos planteados al inicio de esta tesis; y se enuncian las recomendaciones de nuevos blancos de exploración.

## ABSTRACT

This thesis performs the processing of geochemical data in stream sediment and litho-geochemistry, using the fractal models Concentration - Area (CA) and Number - Size (NS), in order to determine new exploration targets of economically important minerals .

Fractal models efficiently face several difficulties that come from the application of the traditional method (means and standard deviation). The most notorious ones are the elimination of the outliers and the logarithmic transformation of the dataset so that a normal or log-normal distribution is established. Both processes alter the dataset, which is not convenient. With the fractal models, the previous process is not necessary, all the data are used without exception and we work with any type of distribution.

The first chapter describes the research environment, emphasizing on the problems of the traditional method to delineate geochemical anomalies. The specific general objectives of this thesis are presented, as well as describing the scope of the study. In the second chapter the description of the geology of the study area is made, touching on the topics of structural geology, geotectonics and economic geology. In the third chapter the concept of fractal geometry, its presence in nature, its applications in geology and fractal models for geochemical exploration have been extended. It also deals briefly with the hyperbolic method, which is used for the validation of chemical analyzes of large quantities of samples. In the fourth chapter we proceed with the application of the fractal model, both in stream sediment and litho-geochemical data, of the elements As, Cu, Cr, Hg, Mo, Ni, Pb and Zn. The different geochemical populations (background and anomalies) are determined and the maps of geochemical anomalies of each element are generated. In the fifth

chapter, the use of different layers of information for the validation of the anomalous zones delimited by the fractal models is explained. These layers are mineral deposits and geological faults. Finally, the conclusions respond to the objectives set out at the beginning of this thesis; and the recommendations of new exploration targets are enunciated.

## ÍNDICE

### CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1	Generalidades de la investigación .....	18
1.1.1	Planteamiento del problema.....	18
1.1.2	Objetivos.....	20
1.1.3	Alcances del estudio .....	20
1.1.4	Metodología .....	21
1.1.5	Trabajos Previos .....	22
1.2	Generalidades de la zona de estudio.....	23
1.2.1	Ubicación y accesibilidad .....	23
1.2.2	Fisiografía y geomorfología.....	28
1.2.3	Clima.....	29

### CAPÍTULO 2: MARCO GEOLÓGICO REGIONAL

2.1	Zona de Trabajo .....	30
2.2	Unidades Geológicas.....	30
2.2.1	Mesozoico.....	31
2.2.2	Cenozoico.....	35
2.3	Geología Estructural.....	44
2.4	Marco Geotectónico y Metalogenético.....	45
2.5	Geología económica.....	47
2.5.1	Caylloma.....	47
2.5.2	Madrigal.....	47

### CAPÍTULO 3: MARCO TEÓRICO



3.1	Introducción a los conjuntos fractales .....	50
3.1.1	Definición de los fractales .....	50
3.1.2	Características de los conjuntos fractales .....	51
3.1.3	Modelos fractales aplicados a la geoquímica .....	61
3.2	Geoquímica aplicada a la exploración minera .....	65
3.2.1	Conceptos Básicos .....	65
3.2.2	Control y aseguramiento de calidad .....	74
3.2.3	Métodos de interpolación .....	78

#### **CAPÍTULO 4: MODELADO FRACTAL EN PROSPECCIÓN GEOQUÍMICA**

4.1	Modelado Fractal de Sedimentos de Quebrada.....	81
4.1.1	Procesamiento de datos.....	81
4.1.2	Análisis estadístico de sedimentos de Quebrada .....	83
4.1.3	Modelo Concentración – Área (C-A).....	87
4.1.4	Modelo Number- Size (N-S) .....	96
4.2	Procesamiento de datos litogeoquímicas.....	104
4.2.1	Muestreo litogeoquímico .....	104
4.2.2	Control de Calidad de resultados de los análisis (QC) .....	106
4.2.3	Análisis estadístico.....	108
4.2.4	Aplicación del modelo Number – Size (N-S).....	111

#### **CAPÍTULO 5: VALIDACIÓN DEL MODELADO FRACTAL Y DISCUSIÓN**

5.1	Validación de los Modelos Fractales.....	124
5.1.1	Correlación: Sedimentos de Quebrada - ocurrencias y yacimientos minerales existentes .....	125
5.1.2	Correlación: Sedimentos de Quebrada - Geología estructural.....	127

5.1.3 Correlación: Sedimentos de Quebrada - Litogeoquímica/Geología Estructural .....	130
5.2 Discusión.....	134
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>140</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>143</b>

## **LISTA DE FIGURAS**

Figura 1.1: Mapa de Ubicación (UTM WGS-84 19S) .....	26
Figura 1.2: Mapa de accesos.....	27
Figura 2.1: Mapa geológico de las subcuencas de estudio .....	32
Figura 2.2: Intercalación de tobas y lavas del Centro Volcánico Hualca Hualca. ....	42
Figura 2.3: Mapa de ubicación de fallas geológicas en la zona de estudio .....	44
Figura 2.4: Mapa Metalogenético y Geotectónico de la zona de estudio.....	46
Figura 2.5: Mapa de ubicación de yacimientos minerales y principales ocurrencias de la zona de estudio.....	49
Figura 3.1: Fractal de Mandelbrot (1983).....	51
Figura 3.2: Isla de Koch, mostrando la autosimilaridad característica de un fractal.	52
Figura 3.3: Dimensiones de conjuntos tradicionales y fractales .....	53
Figura 3.4: Ley potencial transformada a una línea recta por medio de logaritmos.	54
Figura 3.5: Construcción de los conjuntos fractales .....	56
Figura 3.6: Conjuntos Fractales .....	56
Figura 3.7: Demostración de la fractalidad de las líneas de costa.....	57
Figura 3.8: Fallas a diferente escala. ....	59
Figura 3.9: Múltiples ramificaciones a diferentes escalas del río Nilo, Lago Nasser, Sur de Egipto.....	59
Figura 3.10: Pliegues a diferente escala .....	60
Figura 3.11: Ciclo geoquímico de las rocas .....	67
Figura 3.12: Control y Aseguramiento de Calidad (QA/QC) .....	75
Figura 3.13: Límite de aceptación lineal.....	76
Figura 3.14: Gráfico de Scott-Long .....	77
Figura 3.15: Gráfica del método hiperbólico del Arsénico en litogeoquímica.....	78

Figura 3.16: Área de influencia (Círculo a amarillo) para el cálculo del valor del punto amarillo.....	79
Figura 4.1: Mapa de distribución de muestras de sedimentos de quebrada.....	82
Figura 4.2: Histogramas de distribución elemental de As, Cr, Cu, Hg, Mo, Ni, Pb y Zn en sedimentos de quebrada .....	85
Figura 4.3: Gráfico Q-Q Plot del As, Cr, Cu, Hg, Mo, Ni, Pb y Zn en sedimentos de quebrada. ....	86
Figura 4.4: Mapa de interpolación del As en sedimentos de quebrada con el método IDW. ....	88
Figura 4.5: Tabla de reclasificación en 40 intervalos del mapa de interpolación del As en sedimentos de quebrada. ....	89
Figura 4.6: Gráfica logarítmica del modelo C-A del Arsénico en sedimentos de quebrada. ....	90
Figura 4.7: Mapa geoquímico del As, obtenido de la reclasificación del mapa de interpolación del As (Figura 4.4) con los puntos de quiebre del modelo fractal C-A. ....	91
Figura 4.8: Gráficos logarítmicos del modelo C-A (C-A Log-Log Plot) del As, Cr, Cu, Hg, Mo, Ni, Pb y Zn en sedimentos de quebrada.....	92
Figura 4.9: Mapas geoquímicos delineados con el modelo fractal C-A de (A) Arsénico, (B) Cromo, (C) Cobre y (D) Mercurio en sedimentos de quebrada. ....	94
Figura 4.10: Mapas geoquímicos delineados con modelo fractal C-A del (E) Molibdeno, (F) Níquel, (G) Plomo y (H) Zinc en sedimentos de quebrada. ....	96
Figura 4.11: Gráfica logarítmica del modelo N-S del Arsénico en sedimentos de quebrada. ....	98

Figura 4.12: Mapa geoquímico del As, obtenido de la reclasificación del mapa de interpolación del As (Figura 4.4) con los puntos de quiebre del modelo fractal N-S. .....	99
Figura 4.13: Gráfica logarítmica del modelo N-S (N-S Log-Log Plot) del As, Cr, Cu, Hg, Mo, Ni, Pb y Zn en sedimentos de quebrada.....	100
Figura 4.14: Mapas geoquímicos delineados con el modelo fractal N-S de (A) Arsénico, (B) Cromo, (C) Cobre y (D) Mercurio en sedimentos de quebrada.....	102
Figura 4.15: Mapas geoquímicos delineados con modelo fractal N-S del (E) Molibdeno, (F) Níquel, (G) Plomo y (H) Zinc en sedimentos de quebrada. HA: Hornillos Alto; AC: Alto Camaná. ....	103
Figura 4.16: Distribución espacial de muestras litogeoquímicas en la zona de estudio .....	105
Figura 4.17: Gráfica del método hiperbólico para evaluación de precisión de As, Cr, Cu, Hg, Mo, Ni, Pb y Zn.....	107
Figura 4.18: Histogramas de distribución elemental de As, Cu, Cr, Hg, Mo, Ni, Pb y Zn en litogeoquímica .....	109
Figura 4.19: QQ-Plots del As, Cr, Cu, Hg, Mo, Ni, Pb y Zn en litogeoquímica.....	110
Figura 4.20: Gráfica logarítmica del modelo N-S del Arsénico en litogeoquímica .	112
Figura 4.21: Mapa geoquímico de puntos del As, clasificado con los puntos de quiebre del modelo fractal N-S. ....	113
Figura 4.22: Gráfica logarítmica del modelo N-S (N-S Log-Log Plot) del As, Cr, Cu, Hg, Mo, Ni, Pb y Zn en muestras litogeoquímicas.....	114
Figura 4.23: Mapas geoquímicos delineados con el modelo fractal N-S de (A) Arsénico, (B) Cromo, (C) Cobre y (D) Mercurio en muestras litogeoquímicas. HA: Hornillos Alto; AC: Alto Camaná. ....	118

Figura 4.24: Mapas geoquímicos delineados con modelo fractal N-S del (E) Molibdeno, (F) Níquel, (G) Plomo y (H) Zinc en muestras litogeoquímicas. HA: Hornillos Alto; AC: Alto Camaná. ....	122
Figura 5.1: Comparación de las zonas anómalas delineadas con el modelo fractal N-S con las ocurrencias y yacimientos minerales existentes. HA: Hornillos Alto; AC: Alto Camaná.....	126
Figura 5.2: Comparación entre los mapas geoquímicos delineados con el modelo fractal N-S en sedimentos de quebrada y la geología estructural para el As, Cu, Cr y Hg.....	128
Figura 5.3: Comparación entre los mapas geoquímicos delineados con el modelo fractal N-S en sedimentos de quebrada y la geología estructural para el Mo, Ni, Pb y Zn .....	129
Figura 5.4: Comparación entre las anomalías de litogeoquímica y sedimentos de quebrada delineadas con el modelo fractal N-S de los elementos As, Cr, Cu y Hg. HA: Hornillos Alto; AC: Alto Camaná .....	131
Figura 5.5: Comparación entre las anomalías de litogeoquímica y sedimentos de quebrada delineadas con el modelo fractal N-S de los elementos As, Cr, Cu y Hg. HA: Hornillos Alto; AC: Alto Camaná .....	133
Figura 5.6: Comparación entre mapas geoquímicos del presente estudio y publicaciones previas para el As, Cr y Cu.....	135
Figura 5.7: Comparación entre mapas geoquímicos del presente estudio y publicaciones previas para el Mo, Ni y Pb .....	136
Figura 5.8: Comparación entre mapas geoquímicos del presente estudio y publicaciones previas para el Zn.....	137

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1.1: Distancias y alturas de los pueblos en la zona de estudio.....	25
Tabla 1.2: Tiempo de viaje a Chivay .....	25
Tabla 2.1: Resumen de la geología económica de la zona de estudio.....	48
Tabla 3.1: Ejemplos de procesos causantes de los patrones de dispersión geoquímica a varias escalas.....	62
Tabla 3.2: Ejemplos de los tipos de dispersión geoquímica (paisajes geoquímicos) a diferentes escalas.....	62
Tabla 3.3: Movilidad relativa de elementos comunes.....	70
Tabla 3.4: Elementos indicadores asociados a depósitos minerales.....	71
Tabla 3.5: Abundancia promedio de los elementos en la corteza terrestre .....	72
Tabla 4.1: Límites de detección de los análisis químicos en sedimentos de quebrada .....	83
Tabla 4.2: Poblaciones geoquímicas obtenidas del modelo fractal C-A (ppm) en sedimentos de quebrada .....	93
Tabla 4.3: Poblaciones geoquímicas obtenidas del modelo fractal N-S (ppm) en sedimentos de quebrada. ....	101
Tabla 4.4: Límites de detección de los análisis químicos en sedimentos de quebrada. .....	106
Tabla 4.5: Resumen de resultados del método hiperbólico para evaluación de precisión .....	108
Tabla 4.6: Poblaciones geoquímicas obtenidas del modelo fractal N-S (ppm) en muestras litogeoquímicas .....	115

Tabla 5.1: Comparación de los valores de fondo (background) obtenidos con el modelo fractal N-S y los pertenecientes a INGEMMET (2002) en sedimentos de quebrada .....	138
Tabla 5.2: Resumen de las poblaciones geoquímicas en muestras de roca del modelo N-S comparado con los valores de Corteza Continental (Taylor, 1964) .....	139



## **LISTA DE FOTOS**

Foto 2.1: Intercalación de areniscas grises y limolitas gris oscuras de la Formación Labra – Grupo Yura.....	34
Foto 2.2: Nivel grueso de tobas de ceniza y líticos perteneciente a la Unidad Tuti .	36
Foto 2.3: Afloramiento de lavas andesíticas porfiríticas grises del Centro Volcánico Chonta.....	38
Foto 2.4: Afloramiento del Centro Volcánico Mismi. Presenta fuerte fracturamiento con alteración hidrotermal pervasiva y presencia de arcillas, sericita, diseminación de sulfuros y limonitas. ....	40
Foto 2.5: Intercalación de limolitas, areniscas y lutitas pertenecientes a la Formación Colca. ....	43

## **LISTA DE ANEXOS**

Anexo 1: Base de datos geoquímicos de sedimentos de quebrada

Anexo 2: Base de datos geoquímicos de las muestras de roca (litogeoquímica)

Anexo 3: Mapa geológico de la zona de estudio señalando las zonas anómalas obtenidas del análisis fractal

Anexo 4: Muestras de roca con valores anómalos en la zona C

Anexo 5: Muestras de roca con valores anómalos en la zona D

# CAPÍTULO I

## INTRODUCCIÓN

### 1.1 Generalidades de la investigación

El desarrollo del presente trabajo de tesis hace uso de los modelos fractales para delimitación de zonas de anomalías geoquímicas de las unidades litológicas aflorantes en las Subcuencas Alto Camaná y Hornillos Alto, con la finalidad de dar nuevos blancos de exploración. Estas subcuencas se encuentran repartidas principalmente en dos franjas metalogénicas (Acosta, 2017): La franja XXIII de epitermales de Au-Ag del Mio-Plioceno y la franja XXI-A de epitermales de Au-Ag hospedadas en rocas volcánicas, lo cual se corrobora con el hecho de encontrar numerosos yacimientos de minerales metálicos (Ag, Au, Zn y Cu) en vetas alojadas en rocas volcánicas y la presencia de numerosos prospectos mineros.

#### 1.1.1 Planteamiento del problema

En diversas ocasiones el método convencional utilizado para encontrar áreas anómalas en la exploración geoquímica tiene dificultades para aplicarse con las distribuciones encontradas en la naturaleza, sobre todo cuando estas no son

normales o log-normales. Además, se tiene que identificar cuáles con los valores demasiado altos (atípicos o *outliers*) para que estos no afecten en el cálculo de los valores de fondo y umbrales (*Background y Threshold*) en la zona. Al final, todo ello puede desencadenar errores en las interpretaciones e inconsistencias en la delimitación de áreas anómalas.

Estas complicaciones son resueltas por la aplicación de los Modelos Fractales para la delimitación de anomalías geoquímicas. Los fractales, estos fueron propuestos por Mandelbrot (1983) para referirse a objetos y formas irregulares que no pueden ser descritos con la geometría euclidiana tradicional. Estas formas están presentes en la naturaleza, y la geología no es la excepción. Bölviken (1992) demostró que los procesos de dispersión geoquímica tienen una naturaleza fractal, desde entonces se han desarrollado diversos modelos fractales para el delineado de anomalías geoquímicas teniendo mejores resultados para encontrar áreas con anomalías que con el método tradicional (Cheng et al., 1994; Daya, 2015; Sadeghi et al., 2012, Afzal et al., 2010).

Por lo tanto, en el marco de la tesis se desarrollará los métodos fractales N-S (Number-Size) y C-A (Concentration-Area) para determinar anomalías geoquímicas o nuevos blancos de exploración, utilizando la información que se tiene disponible de estudios previos con sedimentos de quebrada y muestras litogeoquímicas. Además, los resultados obtenidos podrán ser contrastados con las minas existentes en la zona para validar la información.

### 1.1.2 Objetivos

El trabajo de Tesis de Grado, tiene los siguientes objetivos:

#### Generales

- Utilizar los modelos fractales para delinear anomalías geoquímicas de elementos económicamente importantes y ubicar posibles blancos de exploración.
- Demostrar la multifractalidad de los patrones de dispersión primaria y secundaria.
- Presentar el estudio y sus resultados como tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero Geólogo.

#### Específicos

- Utilizar los métodos fractales N-S (Number-Size) y C-A (Concentration-Area) para determinar anomalías geoquímicas en las subcuencas hidrográficas Alto Camaná y Hornillos Alto.
- Comprobar la validez de las zonas anómalas delimitadas con los modelos fractales, utilizando la ubicación de las minas dentro de las subcuencas hidrográficas Alto Camaná y Hornillos Alto.
- Relacionar las anomalías con las características geológicas, tales como las fallas y geología superficial.

### 1.1.3 Alcances del estudio

- Brindar un nuevo enfoque en los fenómenos geológicos que ayude al mejor entendimiento y descripción de estos.
- Mostrar la aplicación de los métodos fractales en la rama de la exploración geoquímica.

- Generar nueva información litogeoquímica que será de utilidad en posteriores estudios.

#### 1.1.4 Metodología

##### 1.1.4.1 *Trabajos de Pre-Campo*

El presente trabajo se inició con una previa recopilación información acerca de la zona de estudio; recopilación bibliográfica (métodos fractales, geología, estudios de prospección, informes técnicos de minas existentes). Asimismo, según la bibliografía acerca de los fractales, se elegirá los métodos más apropiados: N-S (Number-Size) y C-A (Concentration-Area)

Para la litogeoquímica se utilizó el método de muestreo aleatorio estratificado, para determinar la ubicación de las muestras, el primer factor a tomar en cuenta es la geología (es decir muestrear todas las unidades litológicas que afloran en las subcuencas); los demás factores importantes son la cantidad y calidad de los accesos, la geología estructural, la geoquímica de estudios anteriores. El producto de esta etapa será la generación de un mapa de muestreo previo, que podrá variar ligeramente en la campaña de campo. Cabe resaltar que el método fractal es aplicable aun cuando no se disponga de una malla de muestreo sistemática.

##### 1.1.4.2 *Trabajos de campo*

En el mes de octubre del 2017 se realizó el trabajo de campo a las subcuencas de Alto Camaná y Hornillos Alto, donde se realizó la toma de 312 muestras de rocas principalmente volcánicas, piroclásticas y sedimentarias clásticas, según la malla elaborada en gabinete. Se tomó aproximadamente 3 kilogramos de fragmentos de roca fresca (limpia de alteraciones superficiales), además de su respectiva muestra de mano.

### 1.1.4.3 *Trabajos post-campo*

Posteriormente, en gabinete, se procesó y sistematizó la información de campo, se describió macroscópicamente las muestras de mano y selecciono 273 muestras para realizar los análisis químicos correspondientes.

Los resultados de los análisis químicos fueron procesados en Excel con el propósito de hallar los valores anómalos de metales base (Cu, Pb, Zn, Ni) y elementos guía o “pathfinders” (As, Mo, Hg) con los modelos fractales C-A y N-S.

Se utilizaron datos de sedimentos de quebrada realizados por INGEMMET, 2002 y 2008, así como litogeoquímicas obtenidas en las campañas de campo. Finalmente se correlacionaron las respectivas capas para las interpretaciones.

### 1.1.5 Trabajos Previos

En la zona se tienen diferentes estudios de carácter regional y local, referidos tanto a la geología como a la minería, de estos se tiene:

- Dávila (1988) realiza el mapeo geológico del cuadrángulo de Caylloma
- Palacios et al. (1993) realiza un estudio de la geología de la Cordillera Occidental en el que mapea el cuadrángulo de Chivay, ambos trabajos fueron parte de la Serie A: Carta Geológica Nacional del INGEMMET.
- Navarro et al. (2013) realizó un informe técnico caracterizando todas las alteraciones hidrotermales presentes en la zona de estudio.
- Fletcher *et al.* (1989) relaciona las ocurrencias polimetálicas de la Cordillera Occidental al sur del Perú con controles estructurales.
- Echevarría *et al.* (2006), hace un estudio del distrito minero Caylloma y concluye edades miocénicas para las vetas en rocas volcánicas cenozoicas de composición andesítica.

- Chapman (2016) realiza el último informe técnico del distrito minero de Caylloma, que es propiedad de Fortuna Silver Mines Inc., en donde se detalla la geología y producción minera del área.
- El INGEMMET ha realizado estudios de prospección geoquímica con sedimentos de quebrada desde el 2002 hasta el 2008, la Franja N°2 (2002) contiene a las Subcuencas de Alto Camaná y Hornillos Alto.

## **1.2 Generalidades de la zona de estudio**

Las subcuencas de Alto Camaná y Hornillos Alto se encuentran ubicadas al sur del Perú, al NE del departamento de Arequipa y al SE del departamento de Cuzco. Abarcan total o parcialmente los cuadrángulos de Caylloma 31-s y Chivay 32-s. La geología presente en las subcuencas está conformada principalmente por rocas volcánicas (depósitos de lavas y flujos piroclásticos) del Cenozoico (Paleógeno-Neógeno) y en menor proporción, se tienen afloramientos de secuencias clástica-carbonatadas del Jurásico-Cretácico.

### **1.2.1 Ubicación y accesibilidad**

El área de estudio comprende una superficie total 3000 km<sup>2</sup> aproximadamente entre las dos subcuencas y se ubica al SE del territorio peruano, en la parte sur de la Cordillera Occidental de los Andes. Políticamente se encuentra al noreste del departamento de Arequipa limitando por el norte con el departamento de Cusco (Ver Figura 1.1).

Aproximadamente se encuentra entre las coordenadas WGS84 UTM Zona 19S:

175000 E – 237000 E

8251600 N – 8332830 N



Expresadas en coordenadas geográficas:

72°01'59" a 71°27'17" Longitud Oeste

15°47'38" a 15°03'38" Latitud Sur

Dentro de las subcuencas de estudio se encuentran centros poblados importantes entre 3200 y 3600 msnm, tales como Chivay, Coporaque, Yanque, Maca, Lari y Cabanaconde, todos estos a lo largo del Cañón del Colca en la Subcuenca de Camaná. En la de Hornillos Alto, los poblados más importantes son el de Caylloma (4300 msnm) y Sibayo (3850 msnm).

Para llegar a la zona de estudio se fue por vía aérea desde Lima a Arequipa, luego el trayecto fue por carretera para llegar a los pueblos de Chivay y Caylloma, en la Tabla 1.1 se sintetiza las distancias y alturas de los pueblos visitados durante la campaña. La Tabla 1.2 muestra un resumen de los tiempos de viaje desde Chivay a los demás pueblos del Colca.

En la Figura 1.2 se muestra los caminos principales, trochas carrozables y caminos de herradura que se utilizaron durante la campaña de campo.

*Tabla 1.1: Distancias y alturas de los pueblos en la zona de estudio*

<b>Distrito</b>	<b>Dist. a Arequipa (Km)</b>	<b>Dist. a Chivay (Km)</b>	<b>Altura (msnm)</b>
Caylloma	230	98	4340
Sibayo	168	36	3850
Tuti	185	20	3800
Chivay	151	0	3651
Coporaque	157	6	3575
Achoma	165	14	3450
Yanque	159	8	3417
Ichupampa	164	13	3400
Pinchollo	185	34	3600
Lari	175	24	3330
Cabanaconde	207	56	3287
Maca	174	23	3262
Madrigal	181	30	3262
Tapay	214	63	3000

Nota: Elaboración Propia

*Tabla 1.2: Tiempo de viaje a Chivay*

<b>Distrito</b>	<b>Tiempo a Chivay</b>
Yanque	10 min
Achoma	40 min
Maca	60 min
Pinchollo	80 min
Cabanaconde	160 min
Coporaque	15 min
Ichupampa	45 min
Lari	70 min
Madrigal	90 min
Tapay	480 min
Tuti	40 min
Sibayo	60 min
Caylloma	240 min

Nota: Elaboración Propia

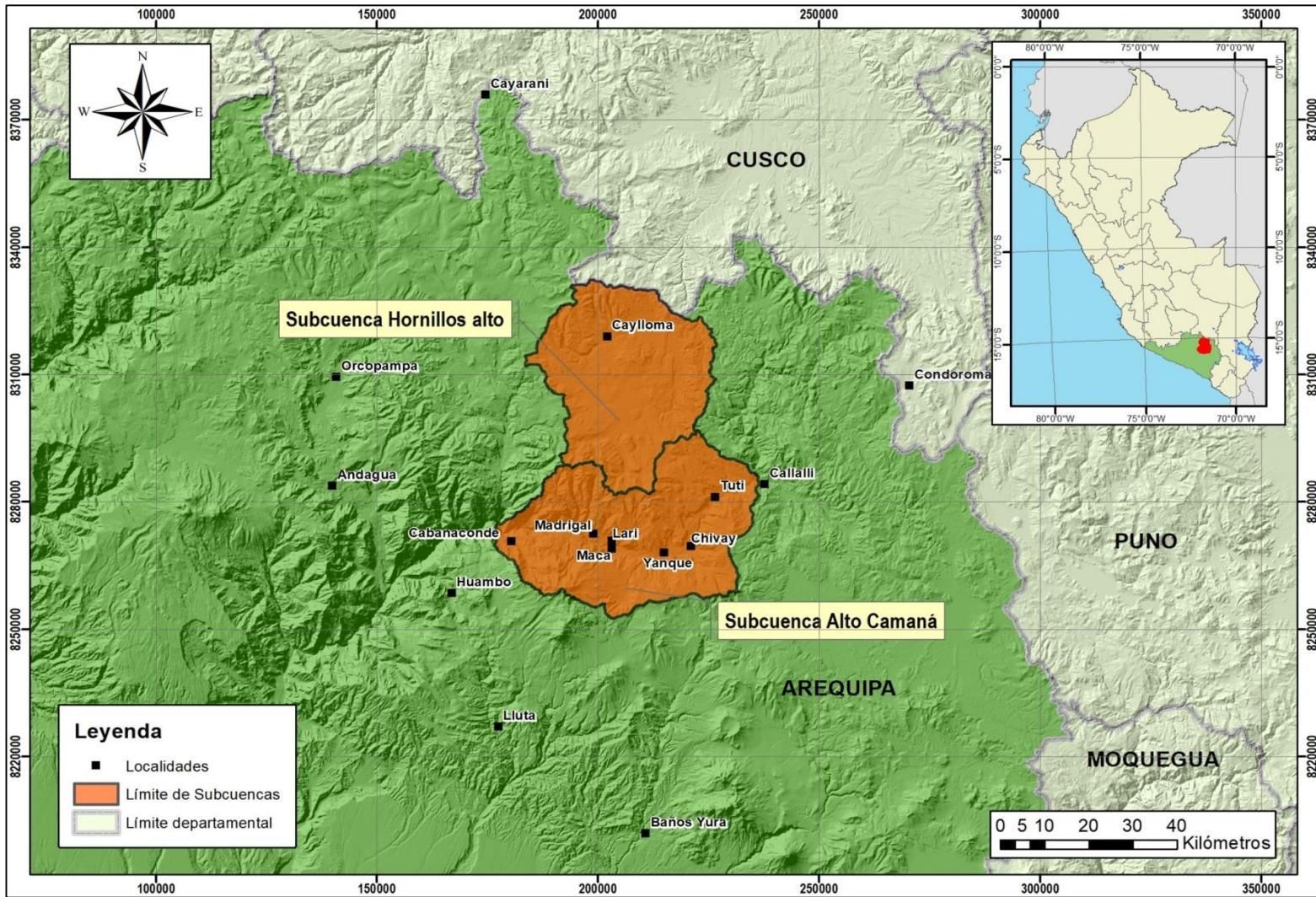


Figura 1.1: Mapa de Ubicación (UTM WGS-84 19S)

Nota: Elaboración Propia

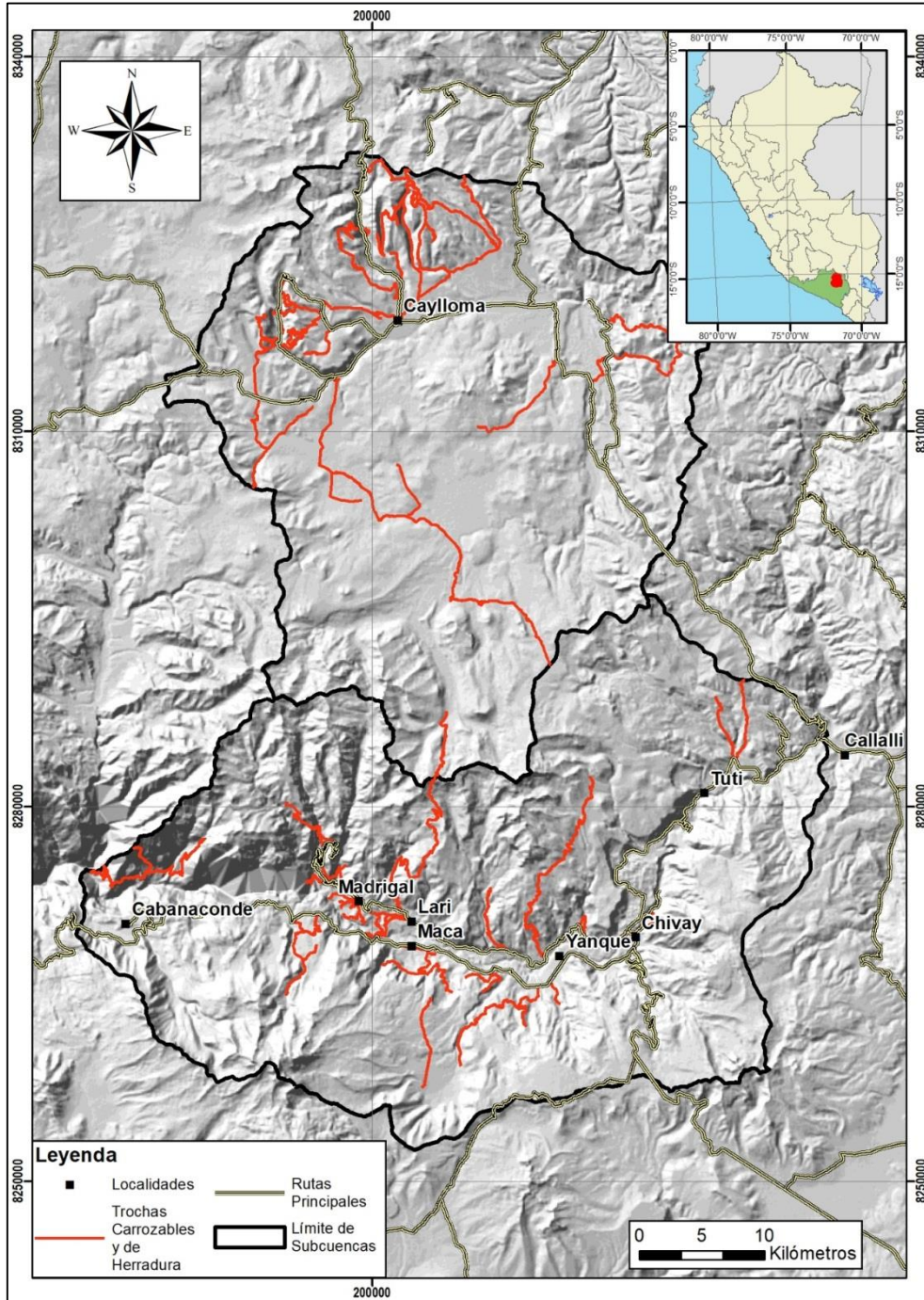


Figura 1.2: Mapa de accesos  
 Nota: Elaboración Propia

### 1.2.2 Fisiografía y geomorfología

La zona de estudio se encuentra principalmente sobre las regiones Suni (3500 a 4100 msnm) y Puna (4100 a 4800 msnm), llegando en algunos puntos hasta más de 5000 msnm (Región Janca). El relieve de la región Suni se caracteriza por relieves empinados y desfiladeros rocosos, considerada la región natural de los Andes Peruanos (Chivay).

La región Puna presenta relieves planos en algunas ocasiones plano (peneplanicies) u ondulado y en otras, escarpado. Esta región contiene un considerable número de mesetas, lagos y lagunas (Caylloma).

La topografía de esta zona es accidentada y corresponde principalmente a Cordillera Occidental de los Andes. El río Colca conforma un cañón con las profundidades más grandes del planeta. Existen 2 unidades geomórficas importantes cubiertas por las subcuencas, éstas son:

**Cordillera Occidental**, que es el resultado de procesos de plegamiento y levantamiento ocurridos en el Mesozoico y Cenozoico, predomina también la actividad erosiva de los ríos, glaciares y vientos. Los ríos han ocasionado la formación de fosos profundos. El que más destaca es el Cañón del río Colca, que tiene una longitud de 64 km, desde la localidad de Pinchollo hasta la desembocadura de la Quebrada Andamayo. Alcanza su mayor profundidad cerca del mirador de Cruz del Cóndor, y tiene unas de las mayores profundidades del mundo (3670 m).

**Planicie Alta (Puna)**, tiene una topografía casi llana a ondulada, destacan cerros y volcanes con más de 5000 msnm (Mismi), presenta lagunas y bofedales. Presenta rasgos típicos de glaciares de valle. Las elevaciones por encima de 5000 msnm presentan nieve, aunque en algunos casos comprende conos volcánicos.

### 1.2.3 Clima

En la región que se encuentra entre los 3500 y 5000 msnm, el clima es templado sub-húmedo, con temperaturas anuales medias de aprox. 10 °C, puede llegar a mínimas extremas de -10 °C y máximas de 20 °C. Ocurren lluvias entre enero y marzo.

En las regiones con alturas sobre 4100 msnm se tiene un clima frígido, con fuerte oscilación térmica entre la sombra y el sol, entre el día y la noche; la temperatura media anual está en 4 °C, con máximos de 19 °C y mínimos que pueden llegar a los -25 °C, una de las más bajas del Perú.

## **CAPÍTULO 2**

### **MARCO GEOLÓGICO REGIONAL**

#### **2.1 Zona de Trabajo**

La zona de trabajo, se encuentra dentro de las subcuencas hidrográficas de Alto Camaná y Hornillos Alto (departamento de Arequipa), esta zona forma parte de los estudios de Línea Base Geoambiental del INGEMMET, para realizar estudios litogeoquímicos y determinar las fuentes de contaminación, naturales o antrópicas. Con ello se busca generar información relevante para las comunidades aledañas a dichos proyectos, con el objetivo de evitar conflictos socio-ambientales.

Dentro de las subcuencas, existen minas y proyectos importantes, tales como Madrigal, Caylloma, Humajala, El Molino y Tambomayo, y abarcan total o parcialmente los cuadrángulos de Cailloma (31s), Chivay (32s), Callalli (32t), Condorama (31t) y Huambo (32r).

#### **2.2 Unidades Geológicas**

La geología superficial presente en la zona de trabajo está conformada principalmente por rocas volcánicas (depósitos de lavas y flujos piroclásticos) del Cenozoico (Paleógeno-Neógeno) y en menor proporción, afloramientos de

secuencias siliciclásticas-carbonatadas del Jurásico-Cretácico (Figura 2.1). A continuación, se realizará una descripción de la geología presente.

## 2.2.1 Mesozoico

### 2.2.1.1 *Grupo Yura*

Estudiada inicialmente en Arequipa con la denominación estratigráfica de Formación (Jenks, 1948), dividido luego por la variación vertical de sus facies en las Formaciones Puente, Cachíos, Labra, Gramadal y Hualhuani por Benavides (1962).

#### **Formación Puente**

Aflora en ambos márgenes de la Quebrada Ichohuayjo (al sureste de Cailloma, Subcuenca Hornillos Alto). Litológicamente está constituida por una secuencia de areniscas cuarzosas de grano medio a fino, en estratos de 10 a 20 cm., y algunos niveles de limolitas carbonosas de grano muy fino. Se ha visto un espesor aproximado de 500 m.



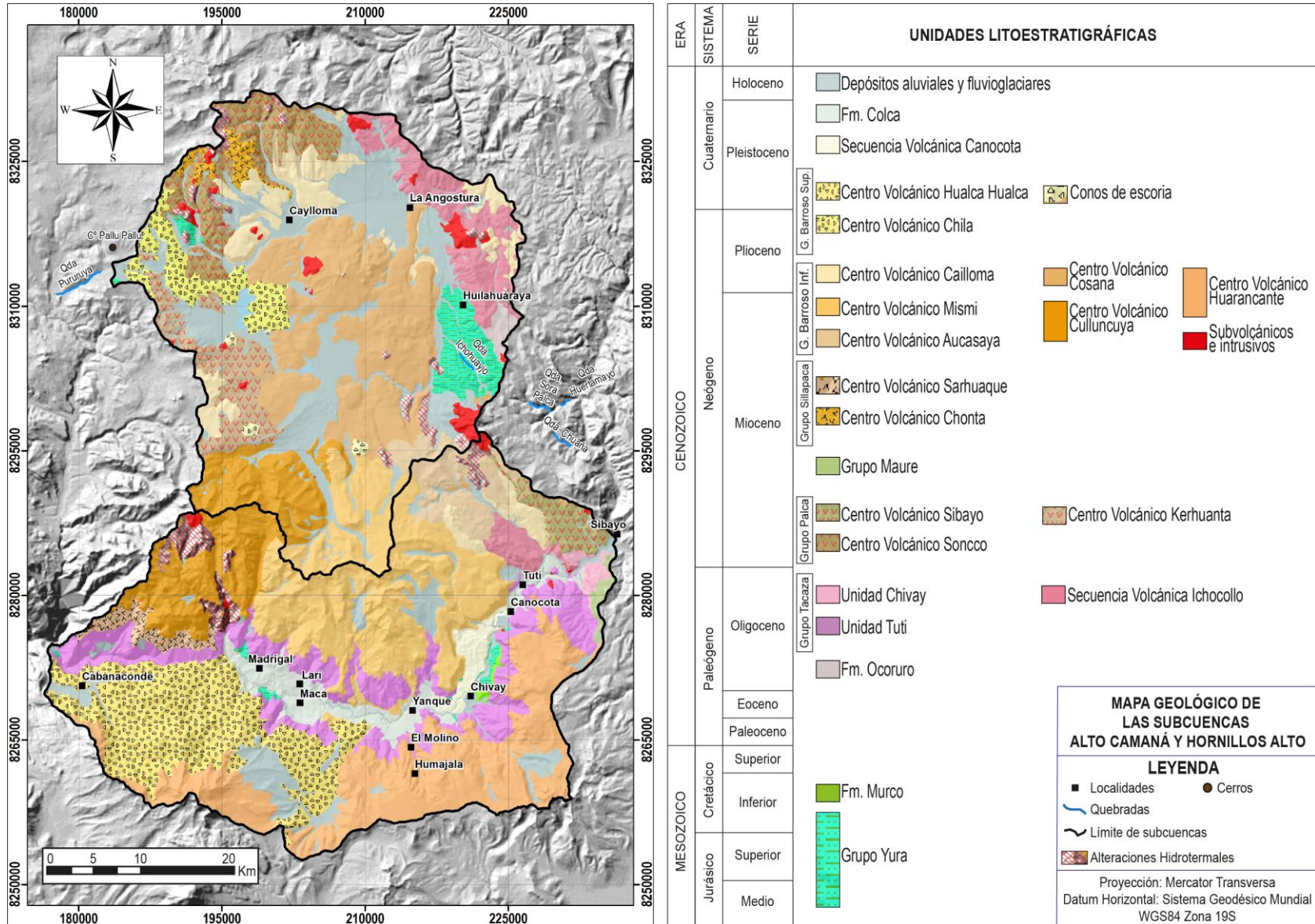


Figura 2.1: Mapa geológico de las subcuencas de estudio

Nota: Extraído de Geocatmin (<http://geocatmin.ingemmet.gob.pe/geocatmin/>). Modificado de los cuadrángulos de Cailloma (31s), Chivay (32s), Callalli (32t), Condorama (31t) y Huambo (32r).

### **Formación Cachíos**

Aflora en parte del flanco oriental del anticlinal de Ichohuayjo (al sureste de Cailloma, Subcuenca Hornillos Alto), en la quebrada del mismo nombre. Consiste de limolitas gris oscuras a negras en estratos de 5 a 10 cm con algunas intercalaciones de areniscas negras de grano fino en estratos de 10 a 20 cm. Se sitúa encima de la Formación Puente e infrayace en concordancia a la Formación Labra. Se estima un espesor de más o menos 400 metros.

### **Formación Labra**

Se observan afloramientos desde la Quebrada Chuaña hasta el caserío Huilahuaraya (sureste de la subcuenca Hornillos Alto) y también en la margen izquierda de la Quebrada Pururuya (oeste de la misma subcuenca). Litológicamente está constituida por una intercalación de areniscas grises de grano medio a fino, en estratos de 10 a 20 cm, con limolitas gris oscuras en estratos de 5 a 15 cm. Esta unidad yace sobre la Formación Cachíos, concordantemente y subyace en la misma forma a la Formación Gramadal. El espesor de esta unidad se ha estimado en ~ 1200 metros. Ver Foto 2.1.

### **Formación Gramadal**

Aflora en la unión de las quebradas Huertamayo y Sara Palca (sureste de la subcuenca Hornillos Alto), y en las faldas del Cerro Pallu Pallu (oeste de la misma subcuenca) en la subcuenca Hornillos Alto. Consiste en calizas grises floatstone y mudstone en estratos de 10 a 20 cm con intercalaciones de niveles lutáceos negros hacia la base y areniscas gris blanquecinas hacia el techo. La base y el techo de la Formación Gramadal son concordantes con las formaciones Labra y Hualhuani respectivamente. Se estima un espesor aproximado de 200 m.

### Formación Hualhuani

Se tiene afloramientos de esta unidad en la Subcuenca Alto Camaná, al norte del pueblo de Chivay con espesor aproximado de 300m. Compuesta por cuarzoarenitas de grano medio a fino de color blanco a gris claro, aunque por intemperismo suelen dar coloraciones amarillentas a pardas en estratos de 2 a 3m, algunos niveles presentan estratificación cruzada. Intercalada con los estratos de areniscas, se tiene delgados niveles de lutitas rojas y algunos niveles conglomeráticos.



*Foto 2.1: Intercalación de areniscas grises y limolitas gris oscuras de la Formación Labra – Grupo Yura.*

Nota: Ubicación WGS 84 UTM 19S: E 197648, N 8272946.

#### 2.2.1.2 Formación Murco

Aflora en los alrededores de Chivay con un espesor de 300 m (Subcuenca Alto Camaná). Sobreyace en forma concordante a la Formación Hualhuani e infrayace al Grupo Tacaza en discordancia. Consiste principalmente de lutitas rojizas a violáceas, además presenta intercalaciones de limolitas y areniscas rojizas. No se

tiene afloramientos de esta unidad en la Subcuenca Hornillos Alto. (Palacios *et al.*, 1993)

## 2.2.2 Cenozoico

### 2.2.2.1 *Formación Ocoruro*

Aflora en la parte oriental de la Subcuenca de Hornillos Alto. Consta de intercalaciones de conglomerados polimícticos con matriz roja y clastos de calizas, cuarcitas y volcánicos intercalados con tobas de bloques y lavas andesítica de color gris. Espesor promedio 1300 m (Navarro *et al.*, 2018)

### 2.2.2.2 *Grupo Tacaza*

Litológicamente consta de coladas, tobas y brechas de origen volcánico, intercaladas con delgados niveles de areniscas y conglomerados. Es de edad Oligocena y sobreyace en discordancia angular a las formaciones Hualhuani y Murco.

En Hornillos Alto se le denomina como Secuencia Volcánica Ichocollo en la parte noreste, y en Alto Camaná se le ha dividido en dos unidades: Unidad Tuti y Unidad Chivay (Cerpa & Paniagua, 2009), aflorando a lo largo de toda la subcuenca.

#### **Unidad Tuti**

Se encuentra en ambos flancos del valle del Río Colca, infrayace a los depósitos lacustrinos de la Formación Colca. Consta de depósitos de flujos de lava gris oscuro y depósitos de flujos piroclásticos de cenizas, de coloración gris. Tienen un espesor aproximado de 600m a 1000m. Ver Foto 2.2.

#### **Unidad Chivay**

Presenta afloramientos al extremo oeste de la subcuenca. Consiste en depósitos de flujo de lavas gris oscuro y depósitos piroclásticos de cenizas, coloración gris. Tiene un espesor aproximado de 500m.



*Foto 2.2: Nivel grueso de tobas de ceniza y líticos perteneciente a la Unidad Tuti*  
Nota: Ubicación WGS84 UTM 19S: E 200973, N 8269197.

### **Secuencia Volcánica Ichocollo (Formación Ichocollo)**

Aflora principalmente al noreste de la subcuenca Hornillos Alto. Está compuesto de tobas de bloques polimícticos, de color gris oscuro intercalados de tobas de pómez de color gris violáceo y gris blanquecino. Hacia el tope se observa una toba de cenizas de color gris. Espesor aproximado de 250 m (Navarro *et al.*, 2018).

#### **2.2.2.3 Grupo Palca**

### **Centro Volcánico Soncco**

Aflora solo en la Subcuenca Hornillos Alto. En rasgos generales consiste en intercalaciones de depósitos de flujos piroclásticos de pómez, ceniza y bloques, de

colores gris verdosos a gris blanquecinos con niveles de flujos de lava andesítica afanítica hacia el tope de la secuencia. Tiene un espesor aproximado de 980m (Navarro & Torres, 2008).

#### **Centro Volcánico Sibayo**

Se presenta al noreste de la subcuenca Alto Camaná. Consta de depósitos de flujos piroclásticos de tobas de bloques y cenizas de color gris verdoso en la base y hacia el techo depósitos de flujo de lava. Tiene un espesor aproximado de 250m (Cereceda & Cueva, 2008).

#### **Centro Volcánico Kerhuanta**

Aflora al oeste de la subcuenca Hornillos Alto. Está compuesto de intercalaciones de depósitos de flujos piroclásticos de tobas de pómez y ceniza hacia la base, hacia el tope predominan los depósitos de flujos de lava porfirítica y afírica, gris azulina a gris verdosa. Con un espesor aproximado de 340m (Navarro & Torres, 2008).

#### **2.2.2.4 Grupo Maure**

Se tiene un pequeño afloramiento en la parte más oriental de la Subcuenca Alto Camaná. Según Cerpa *et al.* (2011), en la base está conformado por conglomerados con clastos de 12 cm de diámetro seguidos por areniscas verdosas intercaladas con niveles calcáreos, en la parte superior se tienen flujos piroclásticos de cenizas y cristales de colores blancos y rojizos, intercalados con flujos piroclásticos de cenizas rico en líticos, tiene un espesor aproximado de 500m.

### 2.2.2.5 Grupo Sillapaca

#### **Centro Volcánico Chonta**

Los afloramientos de esta unidad se encuentran al norte de la subcuenca Hornillos Alto. Se han diferenciado 2 eventos. En la base consiste en intercalaciones de tobas de cenizas gris verdosas con tobas de pómez y cenizas; y hacia el tope cambia a depósitos de flujos de lava porfírica de color gris. Tiene un espesor aproximado de 300m (Navarro & Torres, 2008). Ver Foto 2.3.



*Foto 2.3: Afloramiento de lavas andesíticas porfíricas grises del Centro Volcánico Chonta.*

Nota: Ubicación WGS84 UTM 19S: E 197660, N 8324478.

#### **Centro Volcánico Sarhuaque**

Aflora al oeste de la subcuenca Alto Camaná. Consta de depósitos de flujos piroclásticos de pómez y ceniza soldada, de coloración gris oscura (Torres & Muñoz, 2009).

#### 2.2.2.6 *Grupo Barroso Inferior*

##### **Centro Volcánico Aucasaya**

Sus afloramientos se encuentran en el extremo este del límite de ambas subcuencas. Consiste en depósitos de tobas de cenizas y líticos con cristales de cuarzo, los fragmentos líticos son polimícticos. Tiene un espesor promedio de 400 m (Cereceda & Cueva, 2008).

##### **Centro Volcánico Culluncuya**

Se presenta en el límite oeste de ambas subcuencas. Consiste en depósitos de flujos piroclásticos de bloques, ceniza y pómez de color gris verdoso, flujos de lava andesítica afanítica y porfirítica que varían de color gris azulino a gris violáceo. Tiene un espesor aproximado de 1000m (Navarro & Torres, 2008).

##### **Centro Volcánico Huarancante**

Aflora al sur y al este de la subcuenca Alto Camaná. Se han diferenciado 6 eventos. Estos varían entre depósitos de flujos piroclásticos de líticos y ceniza de colores grisáceos, y depósitos de flujos de lava afanítica y porfirítica, de composición andesítica y dacítica. Hay una predominancia de los depósitos de flujos piroclásticos (Cerpa & Paniagua, 2009).

##### **Centro Volcánico Mismi**

La mayor parte de esta unidad aflora al norte de la subcuenca Alto Camaná. Compuesto por depósitos de flujos de lava andesítica color gris claro a gris verdoso y depósitos de flujos piroclásticos de bloques y ceniza de color gris blanquecino. Tiene un espesor aproximado de 800m (Cerpa & Paniagua, 2009). Ver Foto 2.3.





*Foto 2.4: Afloramiento del Centro Volcánico Mismi. Presenta fuerte fracturamiento con alteración hidrotermal pervasiva y presencia de arcillas, sericita, diseminación de sulfuros y limonitas.*

Nota: Ubicación WGS 84 UTM 19 S: E 202766, N 8275182.

### **Centro Volcánico Cosana**

Se encuentra localizado en su mayor extensión al centro de la subcuenca Hornillos Alto, a 8 Km al SE del pueblo de Caylloma., constituidos por depósitos de flujos piroclásticos de pómez y ceniza, y flujos de lava afanítica gris verdosa a gris azulino. Tiene un espesor aproximado de 300m (Cereceda & Cueva, 2008).

### **Centro Volcánico Cailloma**

Se tiene afloramientos de esta unidad en ambas subcuencas, sin embargo, está presente en su mayor extensión en Hornillos Alto. Compuestos casi en su totalidad por depósitos de flujo piroclástico de pómez y ceniza, de color gris blanquecino, y al tope depósitos volcanoclásticos, limolitas y conglomerados. Tiene un espesor aproximado de 1200m (Navarro & Torres, 2008).

### 2.2.2.7 *Grupo Barroso Superior.*

#### **Centro Volcánico Chila**

Aflora en la parte occidental de la subcuenca Hornillos Alto, a 14 km al oeste del pueblo de Cailloma. Consiste en intercalaciones de depósitos de flujos de lava gris azulinos a gris verdosos de textura afanítica; con niveles de flujos piroclásticos de pómez y ceniza, de bloques y ceniza; de color gris blanquecino a gris verdoso. Tiene un espesor aproximado de 500m (Navarro & Torres, 2008).

#### **Centro Volcánico Hualca-Hualca**

Se extiende al suroeste de la subcuenca Alto Camaná. Consiste en depósitos de flujos de lava afanítica gris oscura, posteriormente intercalaciones de depósitos de avalancha y flujos piroclásticos con lavas porfíricas gris violáceas, y hacia el tope presenta flujos piroclásticos de bloques y cenizas. Tiene un espesor aproximado de 800m (Torres & Muñoz, 2009). Ver Figura 2.2.

#### **Conos de escoria**

Presenta algunos afloramientos aislados al sur y al oeste de la subcuenca Hornillos Alto. Consiste en depósitos de tobas de escoria y bombas, textura escoriácea con estructuras de fluidización (Torres & Muñoz, 2009). Presenta una edad K/Ar de  $0.060 \pm 0.023$  Ma (Kaneoka & Guevara, 1984).

### 2.2.2.8 *Secuencia Volcánica Canocota*

Se encuentra en la parte oriental de la subcuenca Alto Camaná. Según Cerpa & Paniagua (2009) se trata de flujos de lava andesítica gris verdosa y vesicular. Tiene un espesor aproximado de 120 m.



Figura 2.2: Intercalación de tobas y lavas del Centro Volcánico Hualca Hualca.

Nota: Ubicación WGS 84 19S: E 209775, N 8267134

#### 2.2.2.9 Formación Colca

Se trata de sedimentos fluviales y lacustrinos que rellenan el valle del Colca en la subcuenca Alto Camaná desde Pinchollo en el oeste hasta más allá de Tuti al este. Descansa en forma discordante sobre el Grupo Tacaza. Está compuesto por areniscas, conglomerados y limoarcillitas de origen lacustre. Su potencia máxima estimada es de 350m (Palacios et al. 1991). En esta unidad se pueden apreciar una variedad de facies fluviales a lacustrinas, todas estas se encuentran interdigitadas. Ver Foto 2.5.

#### 2.2.2.10 Depósitos Recientes

Consta de depósitos morrénicos, fluvio-glaciares, aluviales y fluviales; se encuentran relleno de la topografía a lo largo de toda la zona de estudio. Los depósitos morrénicos consisten en gravas y bloques angulosos a subangulosos, consolidados en una matriz limosa. Los depósitos fluvio-glaciares se componen de

cantos, gravas y arenas, de composición heterogénea, subangulosos, sedimentados por corrientes de agua. Los depósitos aluviales son acumulaciones de arenas depositada en los cauces de los ríos y quebradas conformando terrazas recientes.



*Foto 2.5: Intercalación de limolitas, areniscas y lutitas pertenecientes a la Formación Colca.*

Nota: Ubicación WGS84 UTM 19S: E 196547, N 8273251.

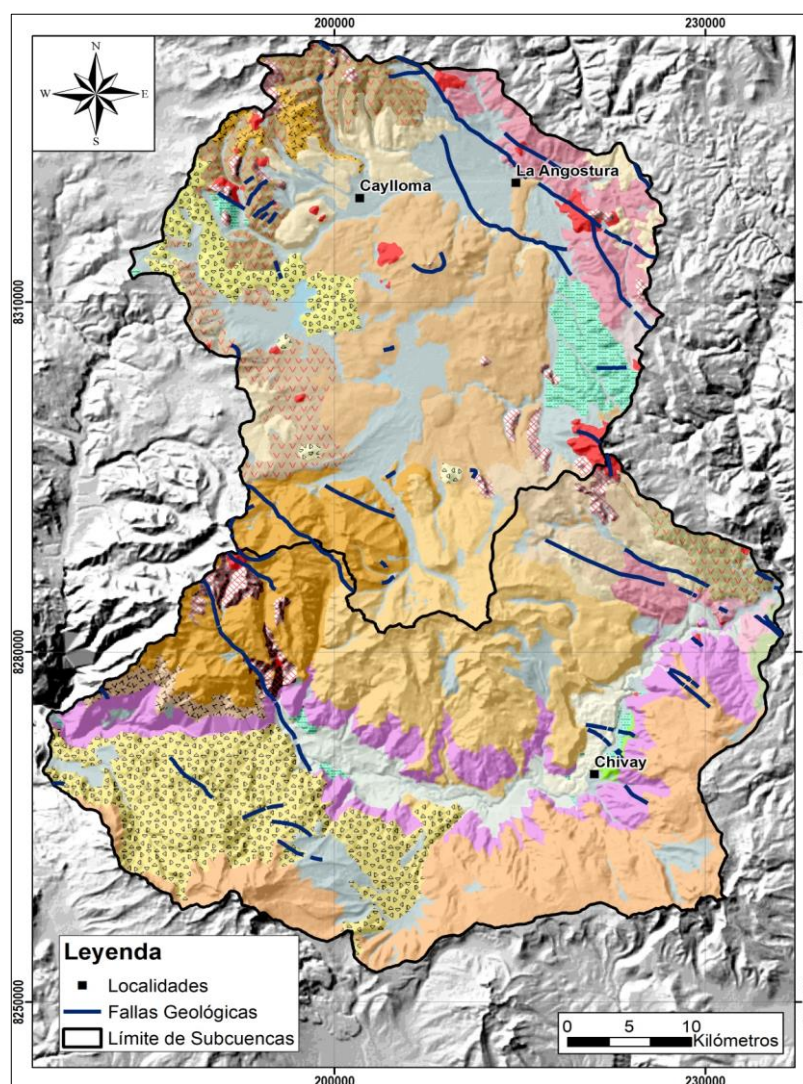
#### 2.2.2.11 *Subvolcánicos e Intrusivos*

En la subcuenca Alto Camaná, al este se tiene un afloramiento aislado de un Intrusivo Granítico/Granodiorítico; y al oeste, al norte de la Mina Madrigal, aflora un Intrusivo Tonalítico, ambos pertenecientes al Mioceno. Al este se tiene un Subvolcánico Andesítico de edad Pliocena.

En el caso de Hornillos Alto, se tienen afloramientos aislados de Subvolcánicos distribuidos en todo la subcuenca, sus edades varían desde los 4 a 11 Ma (Mioceno – Plioceno), su composición varía entre andesita y dacita.

### 2.3 Geología Estructural

En la zona de estudio están presentes estructuras pertenecientes al Ciclo Andino, dividido en las fases Peruana, Incaica, Pliocénica, Formación de la Caldera Cailloma y Cuaternaria (Dávila, 1988). Este tectonismo ha generado fallas con una orientación general NO-SE y en menor proporción NE-SO; afectando principalmente a las unidades volcánicas del Oligoceno y Mioceno. En la figura 2.3 se muestran estas estructuras.



*Figura 2.3: Mapa de ubicación de fallas geológicas en la zona de estudio*

Nota: Extraído del Geocatmin (<http://geocatmin.ingemmet.gob.pe/geocatmin/>). Estratigrafía detallada en la figura 2.1

## **2.4 Marco Geotectónico y Metalogenético**

Estas subcuencas se encuentran repartidas principalmente en dos franjas metalogenéticas (Acosta, 2017). La franja XXIII de epitermales de Au-Ag del Mio-Plioceno y la franja XXI-A de epitermales de Au-Ag hospedadas en rocas volcánicas, lo cual se corrobora con el hecho de encontrar numerosos yacimientos de minerales metálicos (Ag, Au, Zn y Cu) en vetas alojadas en rocas volcánicas. Además, de presentar un buen número de anomalías que están en etapas iniciales de prospección.

En la zona de trabajo, se encuentra el Alto Condoroma – Caylloma, que está controlado por el sistema de fallas Condoroma – Caylloma – Mollebamba, según Carlotto (2010) (Figura 2.4). Durante el Cenozoico estas fallas generaron grandes cámaras magmáticas, dando lugar a la formación de calderas que emitieron grandes volúmenes de ignimbritas. A ambos lados del Alto Condoroma – Caylloma se desarrollaron las cuencas continentales sinorogénicas Tacaza (30-24 Ma) y Maure (22-5 Ma), cuyos sedimentos están intercalados con niveles espesos de ignimbritas. En el caso de la Cordillera Occidental, está caracterizado por la intensa actividad volcánica relacionado a los arcos volcánicos cenozoicos denominados: Toquepala-Tantará (75-55 Ma), Challaviento-Llama (55-42 Ma), Anta-Pativilca (42-30 Ma), Tacaza-Calamarca (30-24 Ma), Huaylillas-Palca-Sillapaca-Calipuy (24-10 Ma), Barroso inferior-Negritos (10-3 Ma), Barroso superior (3-1 Ma) y Arco Frontal (<1 Ma).

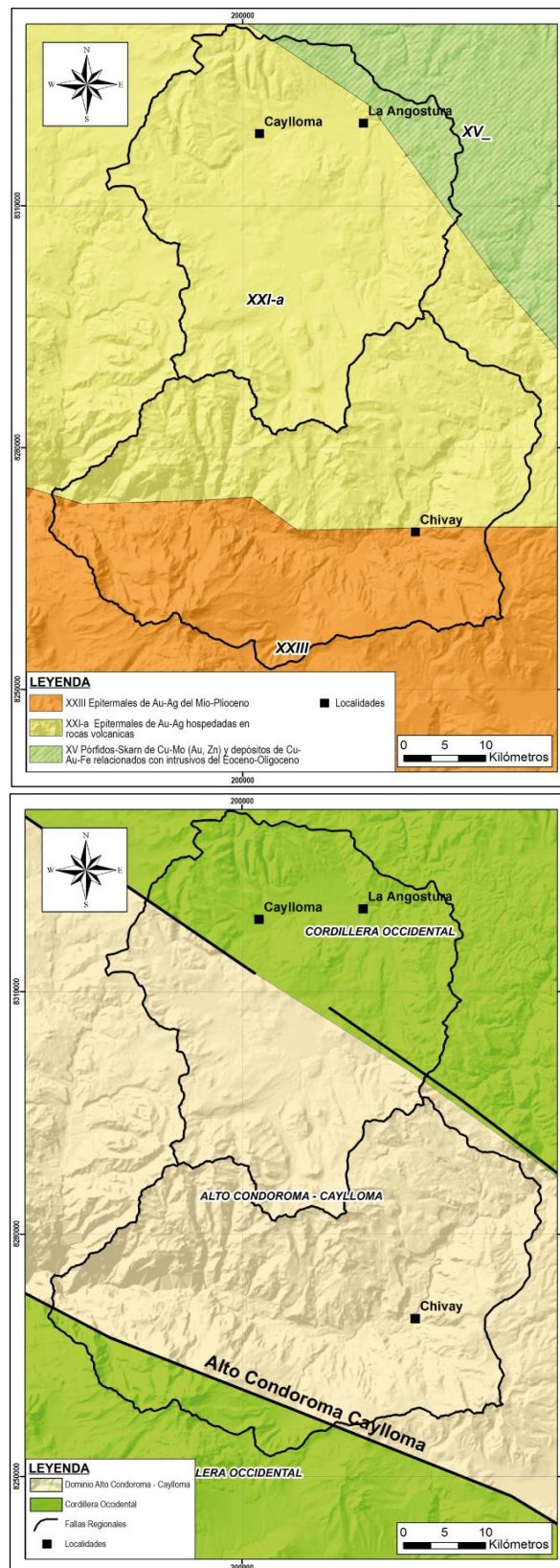


Figura 2.4: Mapa Metalogénico y Geotectónico de la zona de estudio

Nota: Extraído del Geocatmin (<http://geocatmin.ingemmet.gob.pe/geocatmin/>)

## 2.5 Geología económica

En el área de estudio, la actividad minera principalmente está dedicada a la extracción de Au, Ag, Pb y Zn. Los principales centros mineros son los ubicados en Madrigal (Mina Madrigal) y Caylloma (Bateas, El Diablo, Cuchilladas).

### 2.5.1 Caylloma

El distrito minero de Caylloma se localiza a 14 Km al NO del pueblo de Caylloma, a una altitud comprendida entre los 4500 y 5000 msnm. El distrito es explotado desde periodos coloniales con una producción superior a los 100 millones de onzas de Ag (Navarro & Rodríguez, 2013). La mineralización se encuentra en vetas que están alojadas en rocas volcánicas Miocénicas y con poca mineralización en el basamento sedimentario del Mesozoico. Esta zona representa la mayor concentración de mineral de la zona de estudio, la cual está contenida en una serie de fracturas y fallas que tienen una orientación NO-SE de primer orden. La alteración es pervasiva en los depósitos volcánicos de los centros volcánicos Soncco y Chonta. Las edades de mineralización se encuentran entre los 15 y 18 Ma (Echevarría et al, 2006). Las principales vetas del distrito minero son San Cristobal, Bateas, Trinidad y Cuchilladas.

### 2.5.2 Madrigal

Se ubica en el distrito de Madrigal en la subcuenca Alto Camaná entre los 3500 y 3692 msnm. Hay una veta de Zn-Cu-Ag. Las estructuras tienen un rumbo de N80°O y buzamiento de 72°NE, su espesor varía entre 0.9 y 19 metros en una zona de clavo mineralizado. La roca caja está constituida por cuarcitas y pizarras del Grupo Yura del Jurásico, la que subyace en discordancia a los volcánicos del Grupo Tacaza; en los afloramientos de este grupo, se muestran aureolas de alteración como propilitización, silicificación y piritización. Se consideran tres periodos de actividad



intrusiva durante el Cenozoico: a) intrusivo satélite, de edad relativa de premineralización, b) las felsitas que relacionan genéticamente a la mineralización, y c) las diabasas (Arbizú, 1977). Actualmente se encuentra en proceso de cierre.

En la Tabla 2.1 se muestra un resumen de las ocurrencias minerales más importantes y los yacimientos existentes en la zona. La Figura 2.4 muestra la ubicación de estos.

*Tabla 2.1: Resumen de la geología económica de la zona de estudio*

<b>Nombre</b>	<b>Este 19S</b>	<b>Norte 19S</b>	<b>Tipo</b>	<b>Clasificación</b>	<b>Elementos</b>
Coriminas	197443	8325708	Mina	Polimetálico	Pb-Ag-Zn-Cu
Chonta	199798	8325069	Mina	Polimetálico	Pb-Ag-Zn-Cu
Puca Orcco	213081	8322474	Anomalía	Metálico	?
Cuchilladas	192932	8322286	Mina	Polimetálico	Pb-Ag-Zn-Cu
Lenuria 34	196186	8320727	Mina	Filoneano	Pb-Zn-Ag
El Diablo	196362	8320793	Mina	Polimetálico	Pb-Zn
Chapi	201523	8317887	Ocurrencia Mineral	Relleno de Fisuras	Ag-Au
Caylloma	192521	8319467	Mina	Polimetálico	Pb-Ag-Zn-Cu
Peñas Blancas	185576	8313756	Anomalía	Epitermal	Au?
Arco del Cobre	223534	8268502	Ocurrencia Mineral	Manto	Pb-Ag-Zn-Cu
San Felipe	198260	8275959	Ocurrencia Mineral	Polimetálico	Cu-Pb-Zn
Madrigal	195932	8278050	Mina	Filoneano	Cu-Pb-Zn
Satélite 20	196507	8277721	Ocurrencia Mineral	Filoneano	Pb-Ag-Zn-Cu
San José	183310	8275919	Ocurrencia Mineral	Filoneano	Ag-Pb
Lenuria 35	195240	8321127	Mina	Filoneano	Pb-Zn-Ag
El Molino	223534	8268502	Anomalía	Manto	Pb-Ag-Zn-Cu
Humajala	214495	8262000	Proyecto	Epitermal	Ag/Au

Nota: Recopilado de Geocatmin (<http://geocatmin.ingemmet.gob.pe/geocatmin/>)

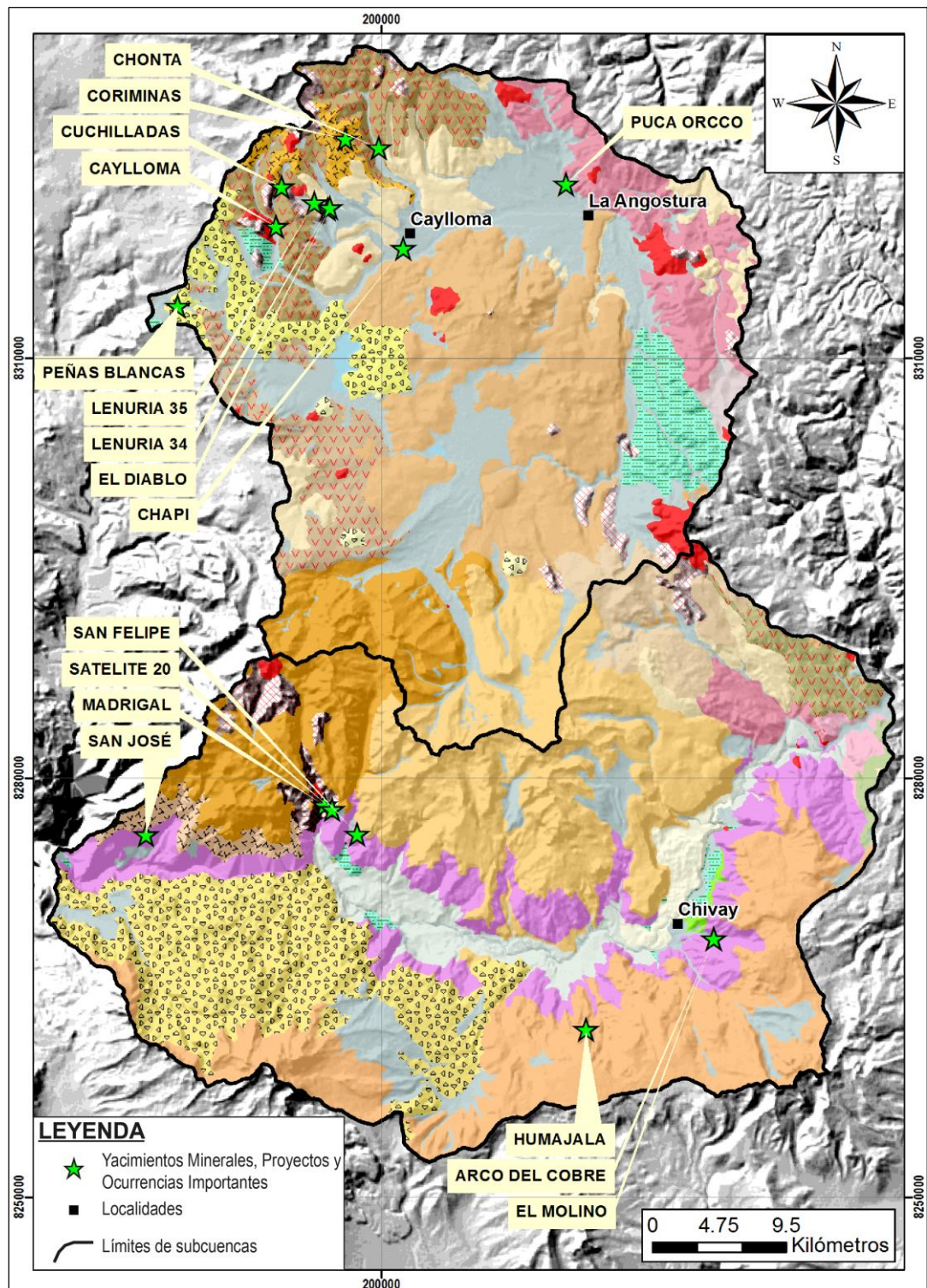


Figura 2.5: Mapa de ubicación de yacimientos minerales y principales ocurrencias de la zona de estudio

Nota: Extraído del Geocatmin (<http://geocatmin.ingemmet.gob.pe/geocatmin/>). Estratigrafía detallada en la figura 2.1

## **CAPÍTULO 3**

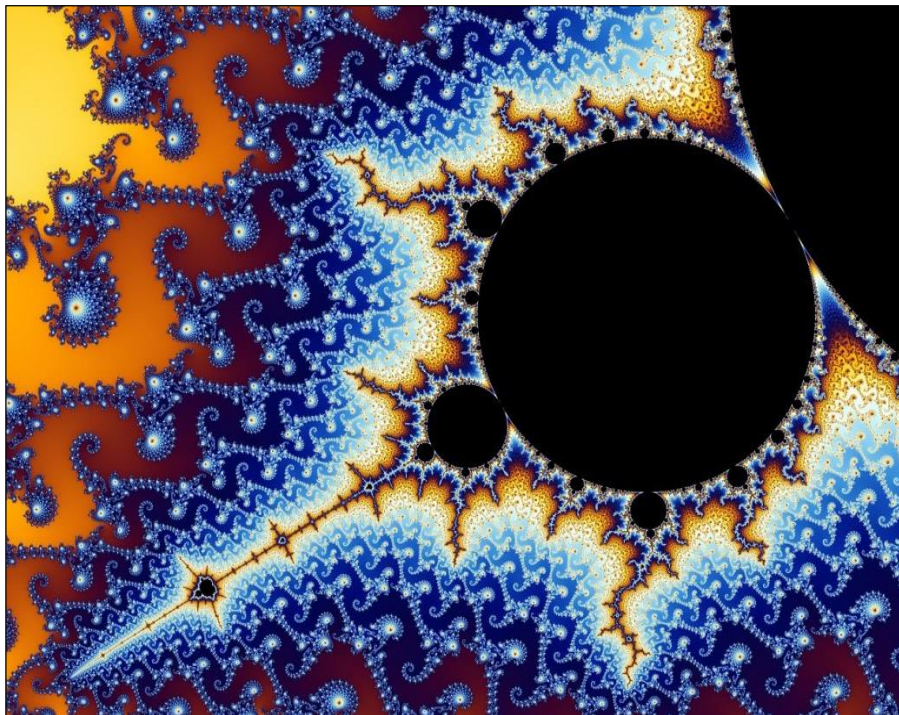
### **MARCO TEÓRICO**

#### **3.1 Introducción a los conjuntos fractales**

En esta sección se definirá los conceptos fundamentales para la comprensión de la geometría fractal, su presencia en la naturaleza y su aplicación en la geología, en especial, su desarrollo en la exploración geoquímica.

##### **3.1.1 Definición de los fractales**

El desarrollo de la geometría fractal se hizo conocida con la obra “La geometría fractal de la naturaleza” publicada por el matemático B. Mandelbrot en el año 1983. La definición puede ser dada desde diferentes puntos de vista, ya sea desde el aspecto práctico hasta el puramente matemático. Consiste en objetos geométricos cuya estructura se repite en diferentes escalas, esta estructura puede ser generada por un proceso recursivo o iterativo capaz de producir estructuras similares independientemente de la escala de visualización. En la Figura 3.1 se muestra un ejemplo de un objeto fractal.



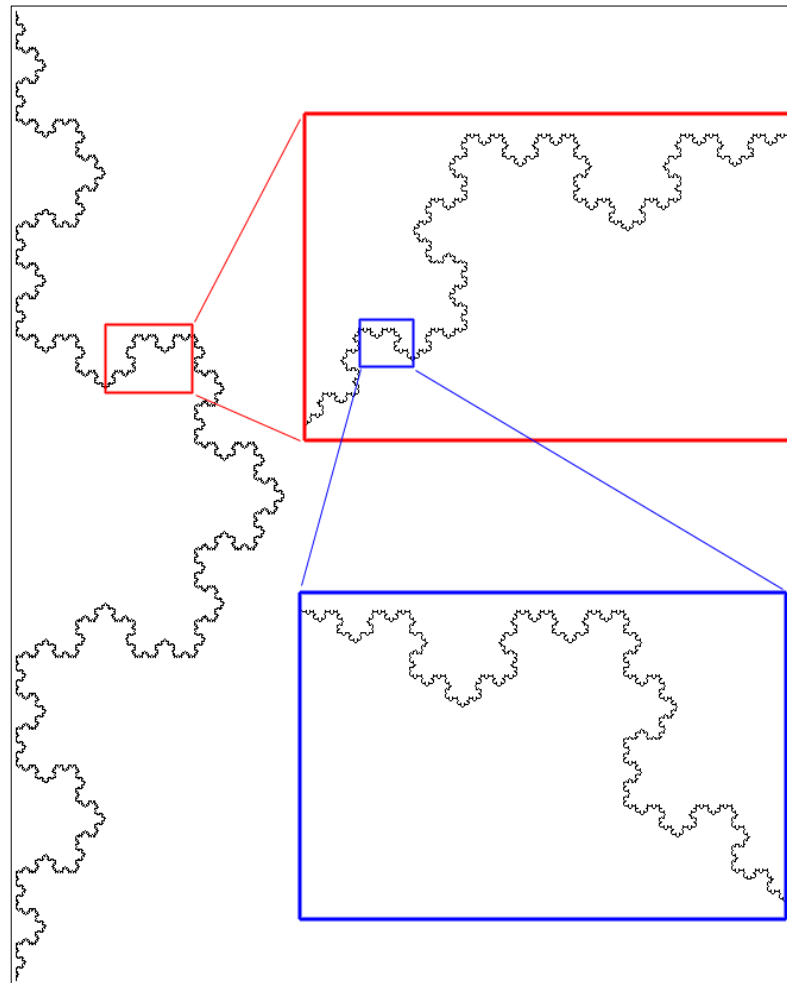
*Figura 3.1: Fractal de Mandelbrot (1983)*

Nota: Imagen tomada de [https://en.wikipedia.org/wiki/Mandelbrot\\_set](https://en.wikipedia.org/wiki/Mandelbrot_set)

### 3.1.2 Características de los conjuntos fractales

#### 3.1.2.1 *Autosimilitud o autosimilaridad*

Se refiere a que estos conjuntos poseen las mismas características a diferentes escalas, es decir que las estructuras que encontramos a una escala pequeña permanecerán en una escala mayor. A esta repetición de características también se le conoce como “Invariancia de la escala”. Por ejemplo, en la Figura 3.2 podemos observar a la Isla de Koch, si nos acercamos a una distancia menor, encontraremos las mismas formas una y otra vez.



*Figura 3.2: Isla de Koch, mostrando la autosimilaridad característica de un fractal*

Nota: Imagen tomada de <http://paulbourke.net/fractals/fracdim/>

### 3.1.2.2 Dimensión fractal

La geometría Euclídea tradicional básicamente consta de puntos, líneas, curvas, etc., que tienen una dimensión específica, 1 para una línea, 2 para una superficie, 3 para un volumen. Los conjuntos fractales tienen estructuras muy complejas como para ser descritas por esta geometría. Es por ello que Mandelbrot (1967) desarrolló el concepto de la dimensión fractal, la cual no es un número entero,

sino fraccionario. Cada objeto fractal tiene una dimensión fractal característica. En la Figura 3.3 se muestra las dimensiones de diferentes formas, tradicionales y fractales.

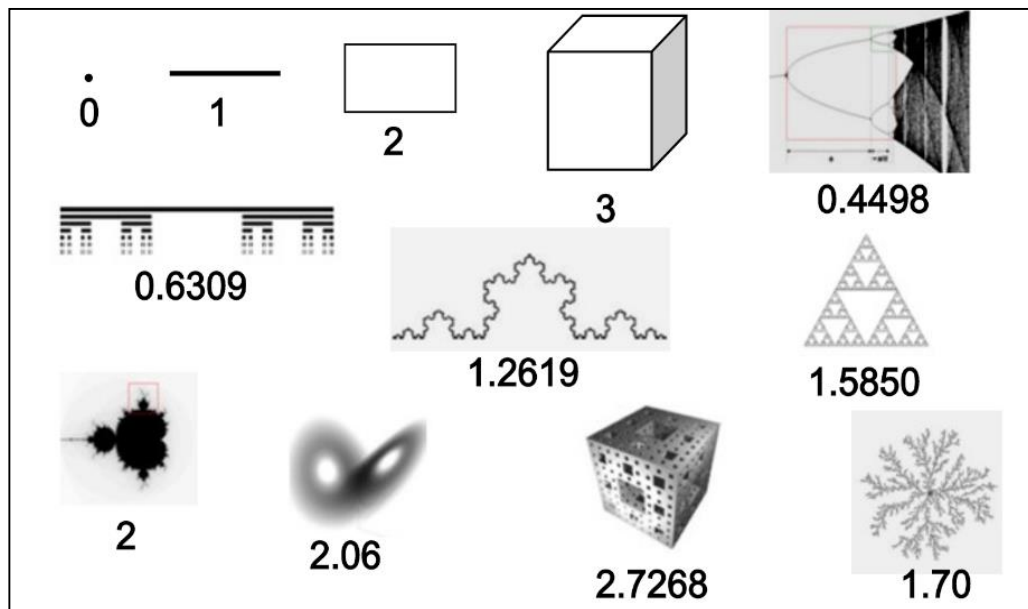


Figura 3.3: Dimensiones de conjuntos tradicionales y fractales

Nota: Imagen tomada de <http://arquitecturaynaturalezabajoelsol.blogspot.com/2011/01/las-ciudades-como-estructuras-complejas.html>

### 3.1.2.3 Ley potencial (Power-Law)

Todos los conjuntos fractales cumplen con esta ley, que básicamente se trata de una función exponencial. Cabe mencionar que esta ley se encuentra frecuentemente en la naturaleza. La invariancia de la escala, explicada anteriormente, genera este tipo de distribución. Al transformar esta función mediante logaritmos, obtendremos una recta cuya pendiente será la dimensión fractal (ver Figura 3.4). Esta transformación es muy común en las diversas aplicaciones que tiene la geometría fractal.

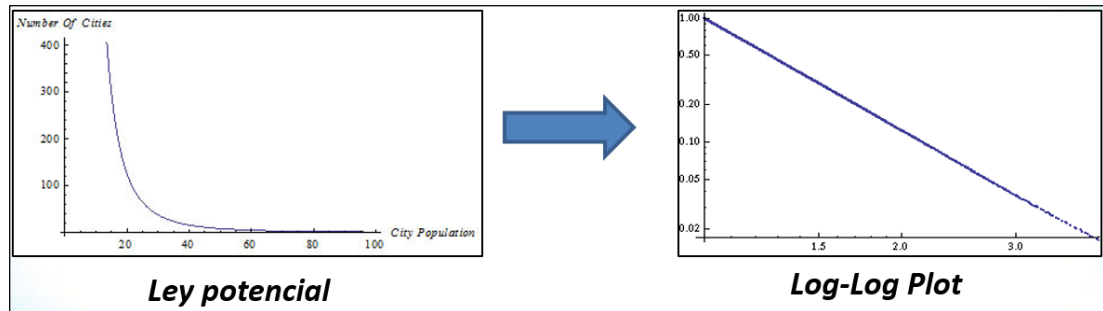


Figura 3.4: Ley potencial transformada a una línea recta por medio de logaritmos

#### 3.1.2.4 Construcción de un objeto fractal

Desde el primer concepto propuesto por Mandelbrot (1967), los fractales han tenido un amplio rango de aplicaciones. Sería complicado definirlos con una simple expresión. Sin embargo, cumplen un mismo principio básico, una función exponencial, el cual se muestra a continuación:

$$N_i = \frac{C}{r_i^D} \quad (3.1)$$

Dónde  $N_i$  es el número de conjuntos con una dimensión lineal característica  $r_i$ ,  $D$  es la dimensión fractal y  $C$  es una constante de proporcionalidad. Si la dimensión fuese un número entero coincidiría con la dimensión Euclidea, pero en el caso de la dimensión fractal este número no es entero, sino un número fraccionario, de ahí es que se acuña el concepto de “fractal” (Barton et al., 1995)

Ahora bien, para poder hallar el valor de  $D$ , es decir, la dimensión fractal de un objeto, lo que se hace es tomar logaritmos en ambos lados de la ecuación (3.1), después de haber hecho dos iteraciones con “ $i$ ” e “ $i+1$ ”; posteriormente despejamos el valor de  $D$  y lo que se obtiene es la siguiente relación:

$$D = \frac{\ln(N_{i+1}/N_i)}{\ln(r_i/r_{i+1})} = \frac{\log(N_{i+1}/N_i)}{\log(r_i/r_{i+1})} \quad (3.2)$$

Como podemos notar en la ecuación (3.2), solo es necesario hacer una división de dos iteraciones consecutivas cualesquiera del objeto fractal para poder hallar el valor de la dimensión fractal. Veamos algunos ejemplos de construcción de conjuntos fractales. El conjunto de Cantor se puede construir teniendo una línea finita con una longitud igual a 1, realizamos la primera iteración dividiéndola en tres partes iguales y dejando solo 2, repetimos el mismo proceso con las partes sobrantes, y así sucesivamente. Para la primera iteración tenemos que el número de elementos con dimensión  $r_1=1/3$  es  $N_1=2$ , para la segunda iteración el número de elementos con dimensión  $r_2=1/9$  es  $N_2=4$ , por lo que reemplazando estos valores en la ecuación (3.2) obtenemos que  $D=0.6309$  (Figura 3.5A), si vemos el conjunto de Cantor o polvo de Cantor (Figura 3.6A) notaremos que es una serie de puntos que no llega a ser una línea, es por ello que no se le puede dar una dimensión de 1, sino que debe ser menor a 1; ahora es obvio que este conjunto no es solamente un punto, entonces su dimensión debe ser mayor que 0; en conclusión la dimensión debe estar entre 0 y 1; esto es comprobado por el resultado de la ecuación, el conjunto de Cantor tiene una dimensión fractal de 0.6309. De manera análoga construimos la alfombra de Sierpinski (Figura 3.6B), quitando la parte central de un cuadrado que está dividido en 9 partes, reemplazamos las iteraciones en la ecuación (3.2) y obtenemos una dimensión fractal de 1.8928 (Figura 3.5B). Este resultado cumple con el hecho de que este conjunto no llega a ser una superficie y es más compleja que una línea, es decir tiene una dimensión entre 1 y 2. Finalmente una extrapolación del concepto anterior puede ser hecha en 3 dimensiones (Figura 3.5C), este conjunto obtenido no llega a ser un volumen entero o completo y es mucho más complejo que una simple



superficie, en otras palabras, tiene una dimensión fractal entre 2 y 3, la cual es 2.7268. Este conjunto se llama la esponja de Menger (Figura 3.6C).

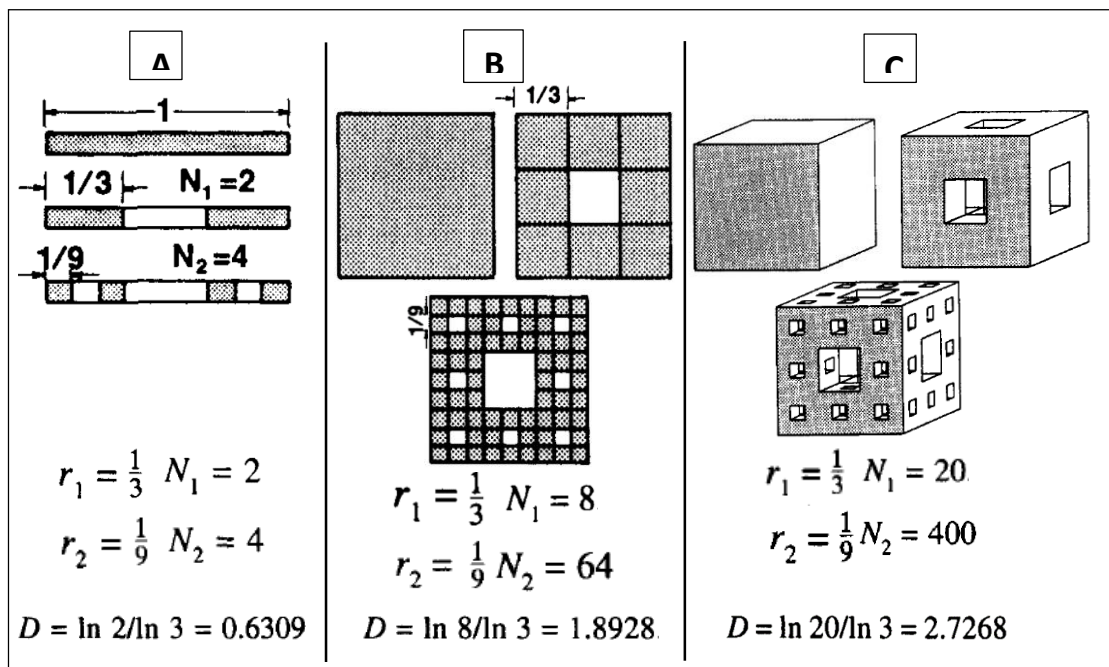


Figura 3.5: Construcción de los conjuntos fractales

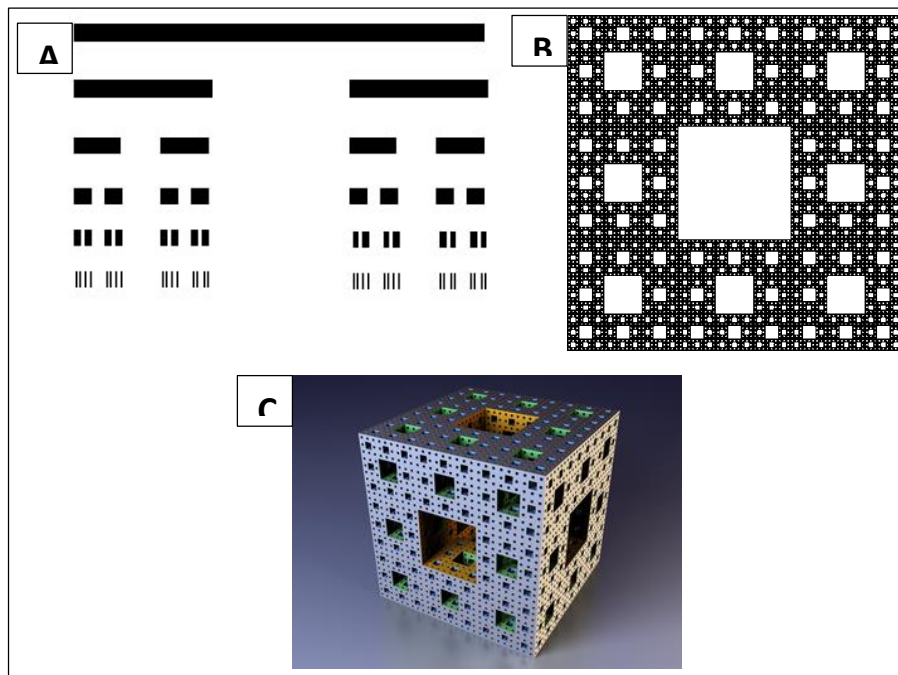


Figura 3.6: Conjuntos Fractales

Nota: Imágenes tomadas de Turcotte (1997)

### 3.1.2.5 Aplicación en la geología

La forma en que Mandelbrot explicó de manera didáctica que en la naturaleza estaban presentes los conjuntos fractales (nubes, hojas, venas del cuerpo humano, etc.) fue mediante su famosa publicación “¿How Long Is the Coast of Britain? Statistical Self-Similarity and Fractional Dimension” en un congreso de matemáticas en el año 1967. En tal publicación explicaba que una línea de costa, en este caso la de Gran Bretaña, tenía una dimensión fractal. Postulaba que si medimos la costa con una regla de 200 km obtendríamos una longitud de costa de 2400km, luego si la medíamos con una regla más pequeña de 100 km, entonces la costa tendría unos 2800 km; con una regla de 50 km, la costa tenía 3400 km. Esto sucedía debido a que mientras más pequeñas las reglas, más detalles de la compleja línea de costa eran medidos; por ende, la longitud de la línea de costa era cada vez mayor. Ahora bien, esta relación entre la longitud de la regla y la longitud de la línea de costa cumple con una ley potencial, la cual es característica de los conjuntos fractales. Si nosotros colocamos estos valores en una gráfica logarítmica, lo que obtendremos es una línea de pendiente negativa, cuyo significado es la dimensión fractal de la línea de costa (Figura 3.7).

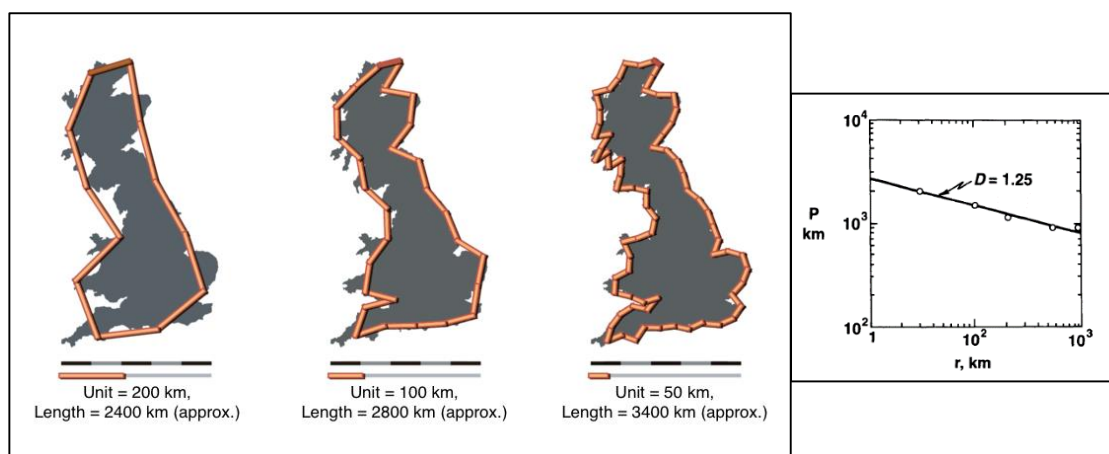


Figura 3.7: Demostración de la fractalidad de las líneas de costa

Nota: Imagen tomada de <https://fractalescio.wordpress.com/2014/11/12/cuanto-mide-la-costa-de-gran-bretana/>

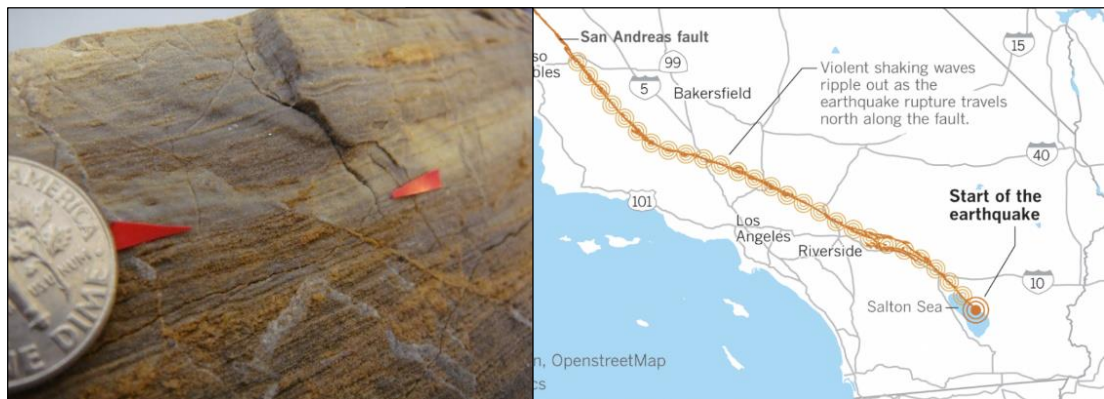
Este hecho abrió las puertas a que muchos buscaran la relación fractal de muchos fenómenos naturales, teniendo muchos resultados positivos. Y la geología no fue la excepción. Recopilaciones completas de estas investigaciones en muchas ramas de la geología se encuentran en Barton et al. (1995) y en Turcotte (1997). Existen razones teóricas y empíricas que demuestran la fractalidad de los procesos geológicos, las cuales son expuestas en el siguiente subtítulo.

### 3.1.2.6 *¿Por qué son aplicables los conjuntos fractales en geología?*

Hay un concepto implícito en la enseñanza de la geología que es asumido como fundamental para el entendimiento los procesos que transforman el planeta, la escala. Un ejemplo práctico es el hecho de colocar algún objeto que sirva de referencia en cuanto al tamaño en las fotografías que tomamos en el campo de un pliegue, una falla, una fractura, etc; debido a que, sin la escala nos sería imposible determinar si la fotografía cubre 10 cm o 10 km (Turcotte, 1997). Esto no es más que la definición de Invariancia de la escala. Muchos de los procesos geológicos se repiten a diferentes tamaños, tales como las fallas, los pliegues, los movimientos sísmicos, erosión, ríos, erupciones volcánicas, etc. Todos estos fenómenos son los que han transformado nuestro planeta desde sus inicios hasta el día de hoy (escala temporal), y con diferente intensidad. Se debe mencionar también que todo proceso invariante de la escala siempre genera una relación fractal, es decir el conjunto obtenido cumple con la ley potencial mencionada en el acápite 3.1.2.3. En las figuras 3.8, 3.9 y 3.10 se muestran algunos fenómenos geológicos que se repiten desde escalas que van desde los centímetros hasta los miles de kilómetros.

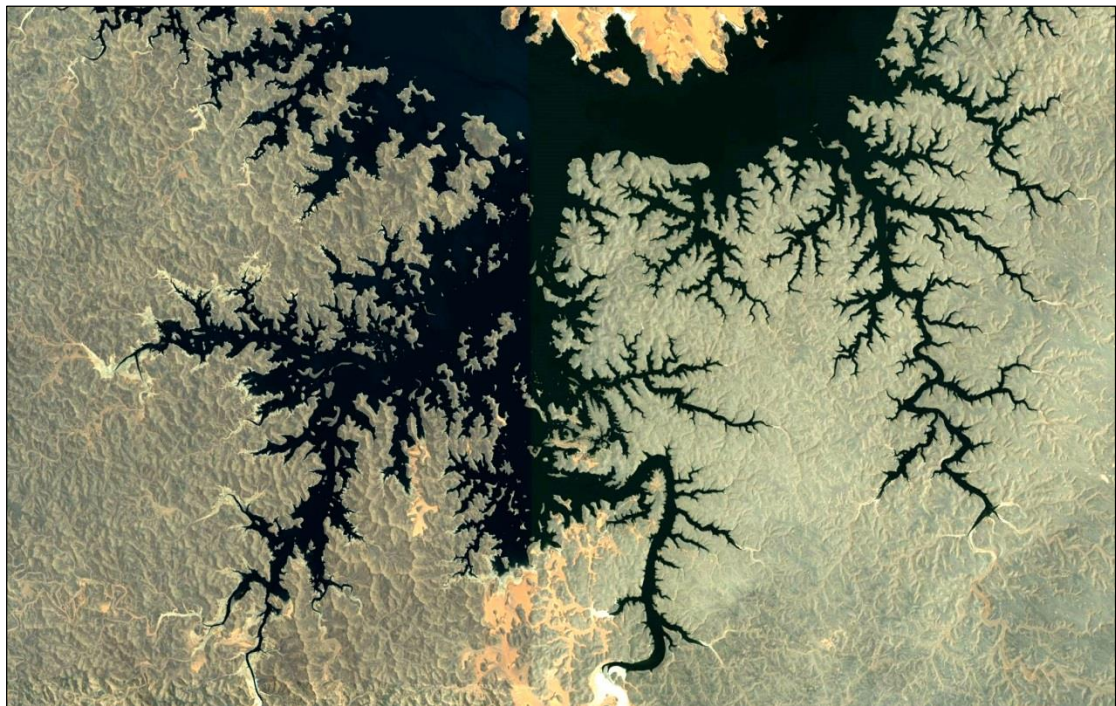
La línea de una costa, por ejemplo, tiene una forma caótica y prácticamente imposible de describir. Sabemos que esta complejidad ha sido moldeada por millones de años de erosión marina, choque y separación de placas tectónicas, etc.; es decir

procesos geológicos invariantes de la escala, por tanto, es de esperarse que aquella cumpla con una ley potencial y tenga una dimensión fractal; lo cual fue demostrado por Mandelbrot (1967).



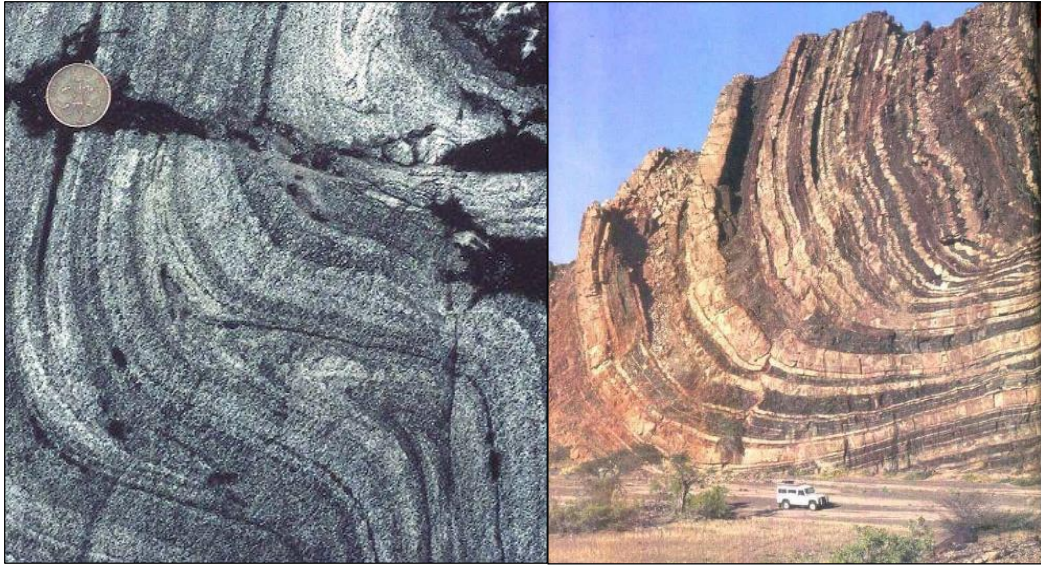
*Figura 3.8: Fallas a diferente escala.*

Nota: A la izquierda se puede notar una microfalla de la escala de una moneda, y a la derecha la falla de San Andrés de miles de kilómetros. Imágenes tomadas de <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Microfault.jpg> y [http://art-en-provence.com/map-of-san-andreas-fault-in-southern-california/](http://art-en-provence.com/map-of-san-andreas-fault-in-southern-california/image-gallery-for-website-map-of-san-andreas-fault-in-southern-california/)



*Figura 3.9: Múltiples ramificaciones a diferentes escalas del río Nilo, Lago Nasser, Sur de Egipto.*

Nota: Imagen tomada de <http://paulbourke.net/fractals/googleearth/egypt2.jpg>



*Figura 3.10: Pliegues a diferente escala*

Nota: A la izquierda tenemos micropliegues, a la derecha un sinclinal de centenares de metros. Imagen tomada de [https://facweb.northseattle.edu/tbrazianuas/geol101tb\\_partial/labs/reviewlab.html](https://facweb.northseattle.edu/tbrazianuas/geol101tb_partial/labs/reviewlab.html)

### 3.1.2.7 Desarrollo de la fractalidad en la geología

Teniendo como base lo anterior, muchos autores realizaron investigaciones acerca de las aplicaciones de la geometría fractal en la geología. Por ejemplo, Sammis *et al.* (1986) propuso el modelo de conminución para la fragmentación de dimensión fractal teórica de 2.5850. El mismo autor obtuvo una dimensión fractal  $D=2.6 \pm 0.11$  en escalas de 0.5 $\mu$ m-10mm para las brechas de fallas. Notar que la dimensión es muy cercana al modelo. En sedimentología, Orford & Whalley (1983) describieron y clasificaron, según la morfología, partículas de forma irregular usando sus dimensiones fractales de sus bordes en microscopio. En deposición mineral, Saunders & Schoenly (1995) determinaron que los patrones que generaban las dendritas de electrum en un yacimiento epitermal tenía una dimensión fractal característica (Método sandbox); Gumiel *et al.* (1992) relaciona el espesor de las venillas con su frecuencia acumulada en un sistema filoneano. Esta relación es fractal (presenta una ley de potencia) y la utiliza para discriminar entre sistemas favorables y no favorables para la mineralización económica. En geomorfología, Prusinkiewicz

& Hammel (1993) han generado modelos de montañas y ríos a partir de simples iteraciones hechas con computadora. Bruno *et al.* (1992) y Bruno *et al.* (1994) encontraron que los bordes de los flujos de lava (“aa” o pahoehoe) tienen una dimensión fractal (0.5m – 60km) y utilizaron este concepto para cuantificar los efectos de la reología en estos flujos. Petford *et al.* (1993) cuantifica la irregularidad de la morfología de los granos en granitoides utilizando su dimensión fractal. Schlager (2004) demuestra la naturaleza fractal en secuencias estratigráficas carbonatadas. Maria & Carey (2002) utiliza el análisis fractal para caracterizar las formas de partículas de origen volcánico. Curl (1986) y Laverty (1987) hallan la relación fractal ambientes kársticos y cuevas.

### 3.1.3 Modelos fractales aplicados a la geoquímica

Se estableció anteriormente que para que un objeto o conjunto sea fractal, este debe ser generado por procesos que sean independientes de la escala (invariantes de la escala). Podemos ver esto en los procesos que generan la dispersión geoquímica de los elementos, ya que se encuentran en un amplio rango de tamaños desde lo microscópico hasta lo continental, a diferentes velocidades y en todo el tiempo geológico, de mayor a menor intensidad (ver Tabla 3.1).

*Tabla 3.1: Ejemplos de procesos causantes de los patrones de dispersión geoquímica a varias escalas*

<b>Escala lineal (m)</b>	<b>Ejemplos de procesos</b>
$<10^{-6}$	Reacciones químicas, fusión, solidificación, difusión, disolución
$10^{-6}$ - $10^{-2}$	Crecimiento de los cristales, intemperismo, precipitación, evaporación
$10^{-2}$ - $10^2$	Movimiento de agua subterránea, sedimentación, erosión, actividad ígnea
$10^2$ - $10^6$	Erupciones volcánicas, formación de montañas, desplazamiento glacial, expansión del fondo oceánico
$>10^6$	Movimiento continental, transporte fluvial, corrientes oceánicas, transporte atmosférico

Nota: Modificado de Bölviken et al. (1992)

Además, existe una gran cantidad de datos empíricos que muestran que los patrones de dispersión geoquímica existen en un amplio rango de escalas (ver Tabla 3.2).

*Tabla 3.2: Ejemplos de los tipos de dispersión geoquímica (paisajes geoquímicos) a diferentes escalas*

<b>Escala lineal (m)</b>	<b>Ejemplos de patrones de dispersión</b>
$<10^{-6}$	Distribución de elementos traza en minerales (microsonda rayos X)
$10^{-6}$ - $10^{-2}$	Distribución de minerales en sección delgada
$10^{-2}$ - $10^2$	Distribución de contenidos de elementos mayores y menores en núcleos de perforación
$10^2$ - $10^6$	Distribución regional de contenidos de elementos mayores y menores en muestras geológicas
$>10^6$	Provincias metalogenéticas y geoquímicas de escala regional a continental

Nota: Modificado de Bölviken et al. (1992)

Teniendo como base teórica lo anterior, se desarrollaron diferentes modelos fractales para el delineado de las anomalías geoquímicas, ya que se demostraba que los patrones de dispersión geoquímica tenían una relación fractal implícita. Es por ello que Cheng et al. (1994) desarrollo el modelo fractal Concentration-Area (C-A),

que representó el primer avance importante en modelado fractal y multifractal de datos geoquímicos. Posteriormente Cheng et al. (1999) introdujo el modelo Spectrum-Area (S-A) como una variación del C-A para separar poblaciones geoquímicas superpuestas. Li et al. (2003) propuso el modelo Concentration-Distance (C-D), también usado para discriminar anomalías geoquímicas del background. Afzal et al. (2011) extendió el modelo C-A de Cheng hacia tres dimensiones y propusieron el modelo Concentration-Volume (C-V) para identificar zonas de mineralización en depósitos minerales. El modelo Number-Size (N-S) fue propuesto por Mandelbrot (1983), cuyas variantes son aplicadas en varios campos de la geología, incluyendo la exploración geoquímica (Zuo & Wang, 2015)

Para la presente tesis se desarrollarán los modelos más utilizados en la exploración: el Concentration-Area (C-A) y Number-Size (N-S), los cuáles se explican en los siguientes subtítulos.

#### 3.1.3.1 Modelo Fractal Concentration-Area (C-A)

Propuesto por Cheng *et al.* (1994), es utilizado para separar las anomalías geoquímicas del *background*. Relaciona la concentración del elemento con el área encerrada por los contornos de concentración, estos cumplen con una ley potencial. El modelo es descrito por la siguiente fórmula:

$$A(r \geq r_i) = cr_i^{-D} \quad (3.3)$$

Donde “A” denota el área con concentraciones mayores que el contorno de valor “r”, “C” es una constante, “D” es la dimensión fractal del modelo. Los valores de A con los de r usualmente muestran una ley de potencia. Esos son colocados en una gráfica logarítmica y se obtienen 2 o más líneas rectas con diferentes pendientes, cuyos puntos de quiebre representan diferentes los valores de *threshold* para separar



los datos geoquímicos en diferentes poblaciones. Cabe señalar que previamente se debe hacer una interpolación para la obtención de los contornos. Es por ello que este modelo considera la variabilidad espacial de los datos geoquímicos.

### 3.1.3.2 *Modelo Fractal Number-Size (N-S)*

Fue propuesto por Mandelbrot (1983), y puede ser utilizado para describir la distribución de las poblaciones geoquímicas sin un pre procesamiento de los datos. Este modelo muestra que hay una relación entre los atributos deseados (concentración del elemento en esta tesis) y su número acumulativo de muestras (Deng *et al.*, 2010; Sadeghi *et al.*, 2012, Hashemi & Afzal, 2012; Afzal *et al.*, 2013, Daya, 2014; Zuo & Wang, 2016). La ecuación que describe el modelo se muestra a continuación:

$$N(\geq r) = cr^{-D} \quad (3.4)$$

Donde “N” denota el número acumulativo de muestras con concentraciones mayores a “r”, “C” es una constante, “D” es la dimensión fractal del modelo. Los valores de “N” con los de “r” usualmente muestran una ley de potencia. Según Mandelbrot (1983), al colocar los valores de “N” y “r” en una gráfica logarítmica, se obtiene líneas rectas con diferentes pendientes negativas que corresponden a diferentes intervalos de concentración (Daya, 2014).

## **3.2 Geoquímica aplicada a la exploración minera**

En los depósitos minerales, los iones pueden ser liberados por diversos procesos en ciertos ambientes, lo cual genera la concentración inusual de estos. Estas anomalías pueden ser detectadas por el análisis sistemático de rocas, sedimentos, aguas o plantas. Cuando este se localiza, se convierte en un “target” o “blanco” para estudios más detallados, ya sean geológicos, geofísicos o geoquímicos. Esto se hace con el objeto de encontrar la fuente que genera esta anomalía, es decir el depósito mineral, al que se le determinará el potencial económico para su posible explotación. Es necesario conocer los procesos geológicos que formaron dicho depósito y los posteriores que generaron su alteración en la superficie terrestre. En otras palabras, se requiere conocer las propiedades de los elementos que afectan su movilidad y dispersión en ciertas circunstancias ambientales.

### **3.2.1 Conceptos Básicos**

#### ***3.2.1.1 Ciclo geoquímico***

Comienza con la consolidación del magma y la formación de las rocas ígneas. La acción de los agentes externos provoca la meteorización de tales rocas y la formación de sedimentos que al consolidarse (procesos de diagénesis) forman las rocas sedimentarias. La acción de la presión y de la temperatura sobre las rocas sedimentarias y las rocas ígneas provoca una serie de cambios mineralógicos que conducen a la formación de las rocas metamórficas. En determinadas condiciones, las rocas metamórficas pueden fundirse para formar magmas secundarios. En todos estos procesos, los elementos son transportados en diferentes formas químicas, reciclándose y cambiando de estado continuamente entre los ambientes geoquímicos (Rivera, 2001). Ver Figura 3.11.

### 3.2.1.2 *Ambientes geoquímicos*

Un ambiente geoquímico se puede definir como el conjunto de variables o factores, tales como: la presión, temperatura, disponibilidad; que intervienen en la abundancia, distribución y migración de los elementos en sus diferentes fases químicas, por medio de los distintos procesos geológicos internos y externos que ocurren en diferentes esferas geoquímicas de la tierra (Hurtado, 2002) Según las variables mencionadas anteriormente, podemos clasificar estos ambientes en dos grandes grupos: Primarios y Secundarios.

El ambiente geoquímico primario se caracteriza por condiciones de confinamiento, altas temperaturas y altas presiones, circulación restringida de fluidos y bajo contenido de oxígeno libre. Este ambiente está presente en las rocas ígneas y metamórficas que ahora se encuentran expuestas en superficie. El ambiente geoquímico secundario contrasta con el anterior en que se caracteriza por bajas temperaturas y presiones, abundante cantidad de oxígeno, libre circulación de fluidos; en este ambiente ocurren la meteorización, erosión, transporte y sedimentación en la superficie de la tierra (Rivera, 2001).

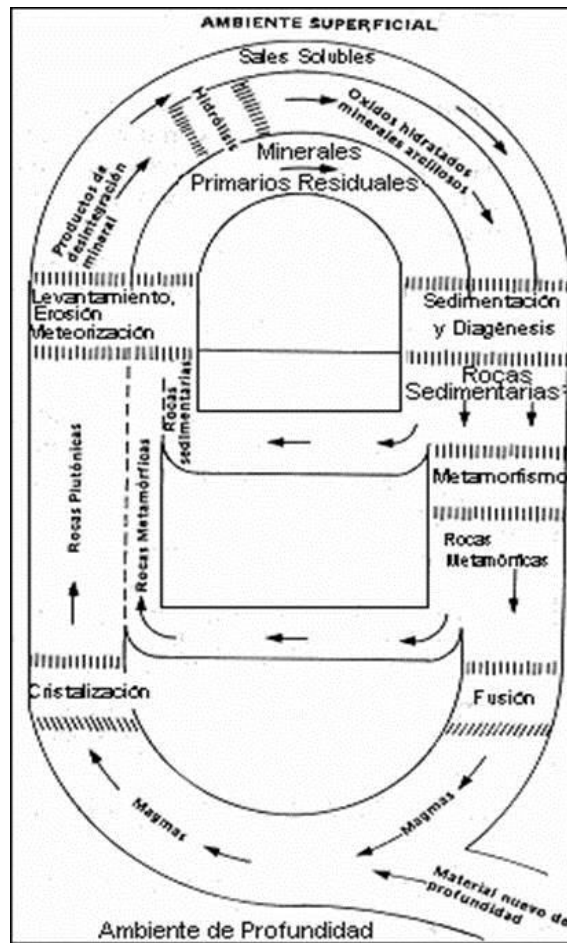


Figura 3.11: Ciclo geoquímico de las rocas

Nota: Tomado de

<http://www.medellin.unal.edu.co/~rrodriguez/Geoquimica/Intro%20exploracion%20geoquimica.htm>

### 3.2.1.3 Dispersión geoquímica

Se define como la forma en que un elemento migra de un ambiente a otro, a través de diferentes procesos físico-químicos y mecánicos. Se pueden clasificar desde dos puntos de vista: de acuerdo al origen y de acuerdo al fraccionamiento.

Según el origen, pueden ser patrones de dispersión primarios y secundarios. Los primarios se generan con las altas presiones y temperaturas, el producto de estos se ve en las rocas ígneas, metamórficas o en alteraciones hidrotermales (ambiente primario). Los secundarios se relacionan con los procesos geológicos que ocurren en

la superficie de la tierra, erosión y transporte (bajas temperaturas y presiones), estos patrones son visibles en las rocas sedimentarias y los suelos. Ambos patrones tienen principios de dispersión análogos, ya que la dispersión primaria se da por fisuras, fracturas y poros de las rocas en profundidad en donde los minerales son depositados; y la dispersión secundaria se lleva a cabo entre las fracturas o juntas (diaclasas) de las rocas y en los espacios porosos de los suelos en superficie (Rivera, 2001)

Según el fraccionamiento, pueden ser patrones de dispersión mecánica y química. Los patrones de dispersión mecánica se deben al accionar principalmente de la gravedad mediante la acción de los agentes geológicos mecánicos como lo son el viento, el agua, el hielo; la aplicación de estos conceptos se da en la búsqueda de minerales que son relativamente estables (oro, platino, casiterita, cromita) bajo las condiciones prevaletientes en superficie en las que no sea posible un intemperismo químico (depósitos tipo placer). Los patrones de dispersión química se manifiestan con la meteorización y precipitación de las soluciones en la que, los elementos son transportados en forma de iones y depositados en diferentes formas dependiendo de las condiciones físico-químicas que encuentren; ejemplo de ello son los iones de  $\text{Cu}^{+2}$  en las aguas subterráneas que salen de un depósito de calcopirita  $\text{CuFeS}_2$  y que pueden ser absorbidos por las arcillas o materia orgánica (Rivera, 2001).

#### 3.2.1.4 *Movilidad geoquímica*

Es la facilidad con que un elemento viaja de un ambiente geoquímico a otro. Esta facilidad depende de las propiedades físicas y químicas de la fase móvil.

La movilidad hipógena (en condiciones de alta temperatura y presión) se da durante la cristalización del magma. En este escenario existe una relativa estabilidad entre los fluidos y las fases cristalinas. Al darse el enfriamiento, los iones que no

pueden incorporarse a las redes cristalinas estables pasan a concentrarse en el fluido residual; una pequeña parte de estos fluidos queda atrapada mecánicamente entre los intersticios de los cristales (inclusiones fluidas). La totalidad de estos fluidos residuales comienzan a enriquecerse aún más en iones móviles (metales) y se comportan como soluciones acuosas que generan depósitos hidrotermales, pegmatitas, aguas juveniles, etc; propios del ambiente geoquímico primario.

La movilidad supergénica relaciona la estabilidad de los minerales y la movilidad de sus elementos constituyentes en condiciones de baja temperatura y presión. Es de importancia saber la solubilidad relativa de las sustancias en aguas superficiales y los efectos de la actividad orgánica que están en contacto son las soluciones en superficie (Castillo, 1986). En la Tabla 3.3 se muestra un resumen de la movilidad relativa de algunos elementos en circunstancias particulares.

Tabla 3.3: Movilidad relativa de elementos comunes

Elemento	Ácido pH < 5,5	Neutral pH 5,5 - 7,0	Alcalino pH>7,0
Cobre	Altamente soluble en pH muy bajo	Ligeramente soluble a insoluble	Insoluble
Uranio	Insoluble, soluble debajo de pH = 3	Ligeramente soluble	Muy soluble
Molibdeno	Insoluble	Insoluble	Muy soluble como MoO <sub>4</sub> excepto en ambientes ricos en Ca.
Plomo	Insoluble	Insoluble	Ligeramente soluble a insoluble
Zinc	Muy soluble	Moderadamente soluble	Ligeramente soluble a insoluble
Níquel	Soluble. Limitado por precipitación de limonita	Ligeramente soluble a insoluble	Insoluble
Cobalto	Soluble. Limitado por precipitación de limonita	Soluble	Soluble?
Hierro	Insoluble, excepto como Fe <sup>2+</sup>	Ligeramente soluble como Fe <sup>2+</sup>	Insoluble
Manganeso	Soluble como Mn <sup>2+</sup>	Ligeramente soluble	Insoluble

Nota: Modificado de Rivera (2001)

### 3.2.1.5 Agrupaciones geoquímicas

Tener un conocimiento detallado acerca de las agrupaciones geoquímicas de dos o más elementos resulta ser de gran importancia en la exploración minera y estudios ambientales. A grandes rasgos se pueden diferenciar dos tipos de agrupaciones: los elementos asociados y los *pathfinders* o elementos indicadores.

Los elementos asociados se presentan una estrecha relación que es independiente del ambiente en que estos ocurren, esto es debido a que presentan

una movilidad muy similar. Existen agrupaciones en que ninguno de los elementos asociados es apropiado para su exploración, por su carencia de movilidad, pero que puede indicarnos, al ser hallado, la presencia sugerida o necesaria de otros elementos. Ejemplos de estas asociaciones son: K-Rb, Ca-Sr, Zn-Cd, Pt-Ru-Rh-Pd-Os-Ir, elementos de tierras raras, etc.

Los elementos *pathfinders* se pueden definir como un elemento asociado con un depósito mineral que puede ser detectado más fácilmente en comparación con elemento principal, debido a que este tiene una mayor movilidad, una dispersión más amplia, pueden ser analizados más fácilmente y con mayor precisión, esto se traduce en una facilidad en su detección y un ahorro en los costos de prospección (Vásquez, 2009). En la Tabla 3.4 se muestra a asociación de ciertos *pathfinders* con diferentes depósitos minerales.

Tabla 3.4: Elementos indicadores asociados a depósitos minerales

Elemento “ <i>Pathfinder</i> ”	Tipo de depósito
As	Vetas Au, Ag
As	Depósito de sulfuros complejos Au-Ag-Cu-Zn
B	Skarns W-Be-Zn-Mo-Cu-Pb
B	Vetas o greissen Sn-W-Be
Hg	Depósito de sulfuros complejos Pb-Zn-Ag
Mo	Depósito de metamorfismo de contacto W-Sn
Mn	Depósitos de pórfidos de cobre, vetas, Ba-Ag
Se, V, Mo	Depósitos de areniscas, U
Cu, Bi, As, Co, Mo, Ni	Depósitos de vetas, U
Mo, Te, Au	Depósitos de pórfidos de cobre
Pd, Cr, Cu, Ni, Co	Platino en rocas ultramáficas
Zn	Depósitos de sulfuros masivos en general Ag-Pb-Zn
Zn, Cu	Depósitos de sulfuros masivos en general Cu-Pb-Zn
Se	Depósitos de sulfuros masivos en general
SO <sub>4</sub>	Depósitos de sulfuros masivos en general

Nota: Tomado de Rivera (2001)



### 3.2.1.6 Abundancia promedio de los elementos en la corteza terrestre

Para las posteriores interpretaciones se necesita tener una referencia con respecto al contenido normal de los elementos en las rocas. Taylor (1964) presentó una tabla con los contenidos promedio de los elementos en la corteza terrestre. Estas tablas son utilizadas para determinar si los valores encontrados en una zona se pueden ser considerados anómalos o no, ya que, aun teniendo valores altos, estos pueden ser considerados como valores normales o de fondo. La Tabla 3.5 muestra en parte la concentración promedio de los elementos en la corteza terrestre, granitos y basaltos.

*Tabla 3.5: Abundancia promedio de los elementos en la corteza terrestre*

Atomic number	Element	Crustal average		Basalt average	Reference	Granite average	Reference
1	H	—					
2	He	—					
3	Li	20	ppm	10	(1)	30	(1)
4	Be	2-8	ppm	0-5	(2)	5	(2)
5	B	10	ppm	5	(3)	15	(4)
6	C	200	ppm	100	(5)	300	(5)
7	N	20	ppm	20	(6)	20	(6)
8	O	46-4	%				
9	F	625	ppm	400	(6)	850	(6)
10	Ne	—					
11	Na	2-36	%	1-94	(5)	2-77	(5)
12	Mg	2-33	%	4-5	(5)	0-16	(7)
13	Al	8-23	%	8-76	(5)	7-70	(5)
14	Si	28-15	%	24-0	(5)	32-3	(5)
15	P	1050	ppm	1400	(5)	700	(5)
16	S	260	ppm	250	(8)	270	(8)
17	Cl	130	ppm	60	(6)	200	(6)
18	A	—					
19	K	2-09	%	0-83	(5)	3-34	(5)
20	Ca	4-15	%	6-72	(5)	1-58	(5)
21	Sc	22	ppm	38	(9)	5	(10)
22	Ti	0-57	%	0-90	(5)	0-23	(5)
23	V	135	ppm	250	(6)	20	(10)
24	Cr	100	ppm	200	(5)	4	(11)
25	Mn	950	ppm	1500	(6)	400	(6)
26	Fe	5-63	%	8-56	(5)	2-70	(5)
27	Co	25	ppm	48	(12)	1	(12)
28	Ni	75	ppm	150	(13, 14)	0-5	(15)
29	Cu	55	ppm	100	(5)	10	(6)
30	Zn	70	ppm	100	(16)	40	(6)
31	Ga	15	ppm	12	(17)	18	(17)
32	Ge	1-5	ppm	1-5	(5)	1-5	(5)
33	As	1-8	ppm	2	(6)	1-5	(6)
34	Se	0-05	ppm	0-05	(6)	0-05	(6)
35	Br	2-5	ppm	3-6	(6)	1-3	(6)
36	Kr	—					
37	Rb	90	ppm	30	(1, 18)	150	(1, 18)
38	Sr	375	ppm	465	(19)	285	(19)
39	Y	33	ppm	25	(20)	40	(6)
40	Zr	165	ppm	150	(21)	180	(6)
41	Nb	20	ppm	20	(6)	20	(6)
42	Mo	1-5	ppm	1	(22, 23, 24)	2	(22, 23, 24)
43	Te	—					
44	Ru	—					
45	Rh	—					
46	Pd	—					
47	Ag	0-07	ppm	0-1	(6)	0-04	(6)
48	Cd	0-2	ppm	0-2	(25, 26)	0-2	(25, 26)
49	In	0-1	ppm	0-1	(27)	0-1	(27)

Nota: Tomado de Taylor (1964)

### 3.2.1.7 *Prospección geoquímica*

Se entiende por prospección geoquímica a la aplicación práctica de los principios geoquímicos en la exploración de depósitos minerales. Involucra la medida sistemática de varios elementos en materiales geológicos de fácil recolección, como lo son las rocas, sedimentos de quebrada, suelos, agua, vegetación o gases. El objetivo es encontrar alguna abundancia de elementos por encima de lo normal, es decir una anomalía, la cual puede ser indicio de mineralización. La prospección geoquímica de depósitos minerales está basada en la premisa fundamental de que la composición química de los materiales de la corteza terrestre será diferente en la vecindad de los depósitos (Rivera, 2001).

Se pueden reconocer cuatro fases de un estudio geoquímico: (1) el muestreo sistemático de los materiales naturales apropiados, (2) estudios de laboratorio, que determinan el contenido de los elementos con técnicas altamente sensibles, (3) procesamiento de los resultados analíticos con diferentes métodos (estadística, fractales), (4) interpretación de la información resultante usando el conocimiento disponible (mapas geoquímicos, geológicos, imágenes satelitales).

Dependiendo del material muestreado, los estudios geoquímicos se pueden dividir en litogeoquímicos (rocas, suelos, sedimentos), hidroggeoquímicos (aguas), atmogeoquímicos (gases) y biogeoquímicos (plantas)

### 3.2.1.8 *Muestreo geoquímico*

Es la acción de recoger muestras representativas o selección de una porción dada de material que representará las características de un conjunto, cuyo objetivo es reducir su volumen, pero garantizando mantener sus características globales,

físicas, químicas o mineralógicas (Ortega, 2017). Los programas de muestreo más comunes se aplican en las rocas y sedimentos.

#### 3.2.1.9 *Muestreo de sedimentos de quebrada.*

Cuando los depósitos minerales en su mayoría se encuentran ocultos (no aflorantes) se necesita realizar un muestreo de sedimentos de quebrada, el que tienen por principal objetivo el reconocimiento de zonas anómalas (patrones de dispersión) generadas por el intemperismo de una ocurrencia mineral desconocida. Estas muestras de sedimentos de drenaje deben ser tomadas de manera que incluyan fracciones de arena, limo y arcillas.

#### 3.2.1.10 *Muestreo geoquímico de rocas*

En este tipo de muestreo se obtiene fragmentos de rocas de los afloramientos ya sean naturales o hechos por el hombre (carreteras). El fin es conocer la composición química de la unidad en particular, reconocer contaminación o alteración, identificar unidades geológicas indicadoras de depósitos minerales, etc.

### 3.2.2 Control y aseguramiento de calidad

Los resultados de los análisis químicos no serán validados ni confiables si no son sometidos a un riguroso control de calidad (QA/QC). Para ello se aplican protocolos para evitar errores considerables que afecten significativamente las interpretaciones de los resultados. El aseguramiento de calidad se define como el conjunto de actividades necesarias para garantizar que una determinada actividad u operación alcance un grado aceptable de calidad y el control de calidad se define como el conjunto de técnicas utilizadas para determinar el nivel de calidad realmente alcanzado en una operación (Simón, 2004). Para evaluar la calidad se toman en

cuenta tres conceptos: la precisión, exactitud y contaminación. En la Figura 3.12 se muestra un resumen de estos conceptos.

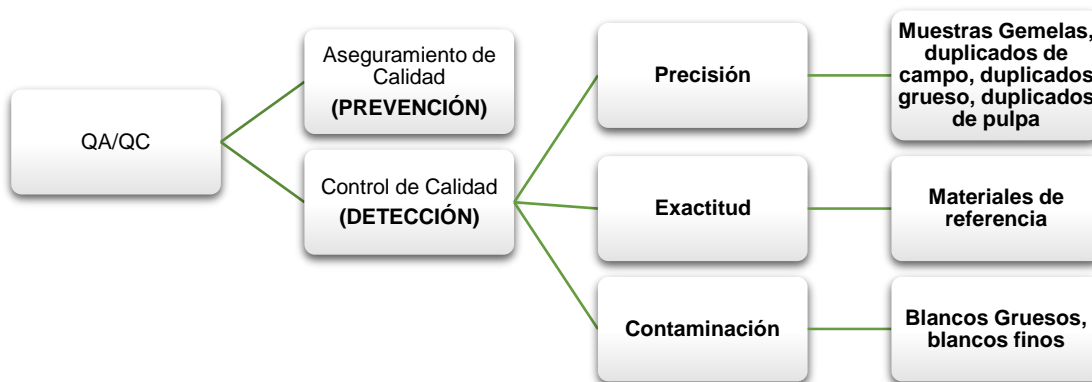


Figura 3.12: Control y Aseguramiento de Calidad (QA/QC)

### 3.2.2.1 Precisión

La habilidad de repetir consistentemente los resultados de una medición en condiciones similares. En otras palabras, es repetir acciones en condiciones tan cercanas a las originales como sea posible. En la presente tesis se evaluará la precisión de los resultados, por lo que se detallará el método utilizado.

La manera en que se mide la precisión en exploración geológica es el error relativo (ARD: Absolute Relative Difference). Se define como el valor absoluto de la diferencia entre el valor original y el valor duplicado, dividido por el promedio entre ambos valores. La ecuación se muestra a continuación:

$$ER = \frac{2*|Vo-Vd|}{(Vo+Vd)} \quad (3.5)$$

Dónde Vo es el valor original de la muestra y Vd el valor de la muestra duplicada. ER es el error relativo. Se denomina a Par Fallido al par de muestras duplicadas con un error relativo (ER) mayor al 30%, en el caso de duplicados de

campo. En los duplicados de preparación el ER es 20% y en duplicados de pulpa el ER es 10%. Estos porcentajes corresponden al límite o rango de aceptación.

También se pueden colocar los duplicados en una gráfica de dispersión, en el eje de las abscisas se colocan los valores originales y en el eje de las ordenadas los valores de los duplicados. Estos puntos generados deben estar lo más cercanos a la recta  $X=Y$ . Las regiones de aceptación (color verde) se encuentran entre las rectas que se generan de igualar la fórmula del error relativo con los rangos de aceptación (Figura 3.13).

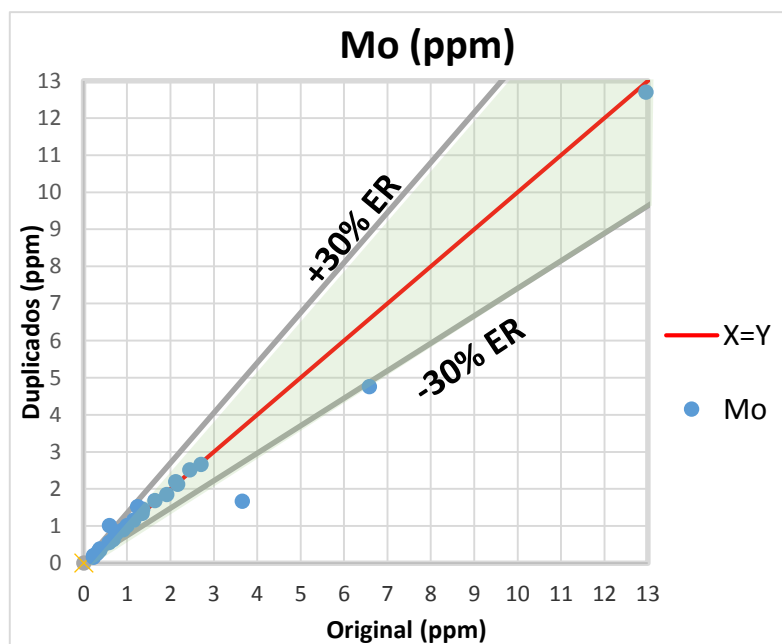


Figura 3.13: Límite de aceptación lineal

Una forma práctica de determinar las muestras fallidas es utilizando el gráfico Max y Min, que fue diseñado por Scott Long, este se basa en que el procedimiento de evaluación de la precisión no tiene en cuenta el sentido de las desviaciones, sino su magnitud. (Figura 3.14).

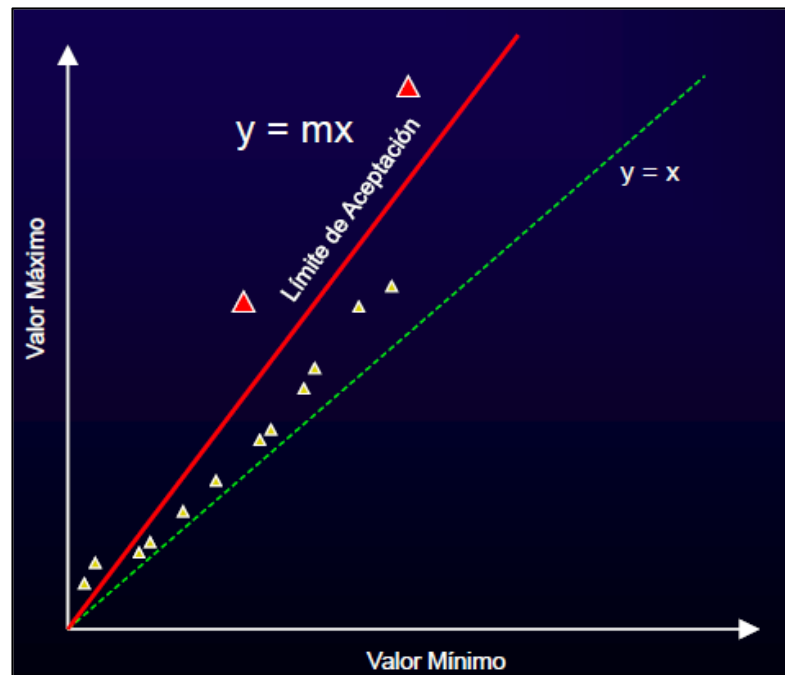


Figura 3.14: Gráfico de Scott-Long

Nota: Tomado de Simon (2017)

Cabe resaltar que mientras los valores se acercan más al límite de detección, el error relativo aumentará exponencialmente, por lo que lo más adecuado será ajustar el área de aceptación con una hipérbola (Simón, 2004) de fórmula:  $y^2 = m^2x^2 + b^2$ , en donde “m” corresponde a la pendiente de la recta de +30% de ER y “b” corresponde a un rango de valores relacionado al límite de detección (entre 10 a 20 veces el LD, para los duplicados de campo). (Figura 3.15)

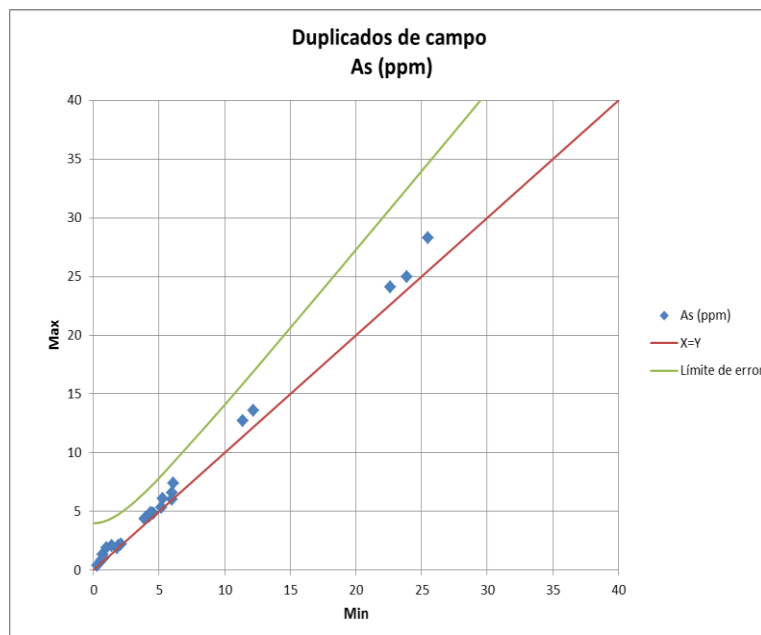


Figura 3.15: Gráfica del método hiperbólico del Arsénico en litogeoquímica

### 3.2.2.2 Exactitud

Es la proximidad de un valor real o aceptado como apropiado. Comparación de acciones originales con otras realizadas en condiciones tan ideales como sea posible.

### 3.2.2.3 Contaminación

Transferencia involuntaria de material de una muestra o del medio circundante a otra muestra. Medición del efecto de la operación sobre un material probablemente estéril.

### 3.2.3 Métodos de interpolación

Existen varios métodos de interpolación en geoquímica, sin embargo, los más utilizados son el IDW y el Krigging. Para el presente trabajo se hará uso del método IDW porque elimina los efectos de suavizado no deseados y la alta cantidad de

errores de truncamiento generados por el Kriging al no tener una malla de muestreo sistemática (Afzal et al., 2013).

### 3.2.3.1 Método de interpolación Distancia Inversa Ponderada (IDW, en inglés)

Este método asume que cada punto de entrada (p.ej., muestra de sedimento de quebrada) tiene una influencia local sobre las zonas y/o puntos a interpolar, que disminuye con la distancia. Mientras más cerca este el punto, mayor será la influencia. En la Figura 3.16, los puntos rojos más cercanos poseen mayor peso al determinar el valor del punto amarillo. Los valores asignados a puntos desconocidos se calculan con un ponderado promedio de los valores disponibles en los puntos conocidos (Hosseini-Nazab & Daya, 2017). La ventaja de este método es que es intuitivo y su aplicación es sencilla.

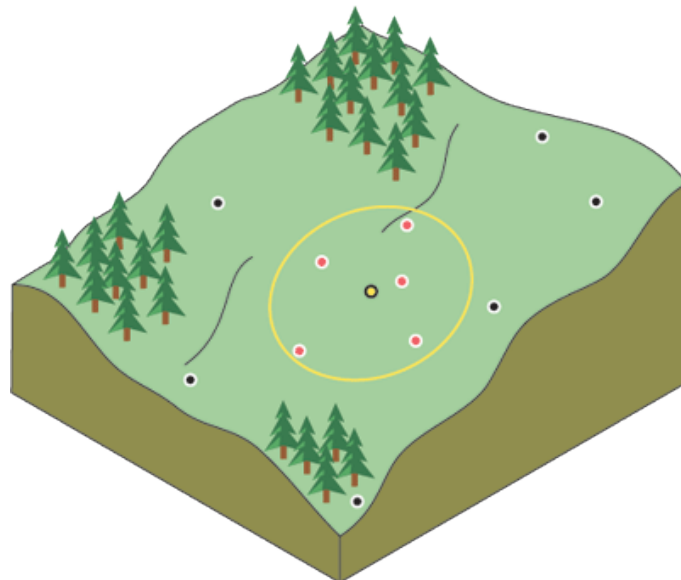


Figura 3.16: Área de influencia (Círculo a amarillo) para el cálculo del valor del punto amarillo

Nota: Imagen tomada de <http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/tools/3d-analyst-toolbox/how-idw-works.htm>



## **CAPÍTULO 4**

### **MODELADO FRACTAL EN PROSPECCIÓN GEOQUÍMICA**

En este capítulo se desarrollará la aplicación del modelado fractal en la prospección geoquímica. Los modelos utilizados son N-S y C-A, para calcular los valores de fondo (*background*) y umbrales (*threshold*) en muestras de rocas y sedimentos. Lo cual permitirá la obtención de poblaciones geoquímicas para la generación de mapas de isovalores, donde se puedan identificar y delinear las anomalías geoquímicas dentro del área de estudio.

Los datos geoquímicos utilizados fueron extraídos de la base de datos abiertos publicados en el portal Geocatmin del Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (INGEMMET), seleccionándose los datos dentro de las Subcuencas Alto Camaná y Hornillos Alto (departamento de Arequipa) donde se desarrolló el presente trabajo. Los datos de sedimentos de quebrada corresponden al estudio de Franja II (INGEMMET, 2002), los datos litogeoquímicos corresponde al Proyecto GR38A.

Después de la revisión de la información recopilada, se encontró que la mayoría de datos de sedimentos de quebrada (p.ej. Au, Ag), se encuentran por debajo del límite de detección. Por lo tanto, para tener una información completa tanto en litogeoquímica y sedimentos de quebrada, los elementos seleccionados para aplicar el modelado fractal son As, Cr, Cu, Hg, Mo, Ni, Pb y Zn.

## **4.1 Modelado Fractal de Sedimentos de Quebrada**

### **4.1.1 Procesamiento de datos**

Se utilizó la información de 250 datos de sedimentos de quebrada, de estudios realizados en la Franja II por el INGEMMET (2002), ubicados en el área de estudio. Esta información se extrajo de la página web del Geocatmin (<http://geocatmin.ingemmet.gob.pe/geocatmin/>), perteneciente a INGEMMET. En la Figura 4.1 se muestra la distribución espacial de las muestras de sedimentos de quebrada en el área de estudio. En el Anexo 1 se adjunta la base de datos de sedimentos de quebrada utilizada para el análisis.

Según INGEMMET (2002), para la obtención de muestras se realizó un pre-tamizado de 2 a 3 kg de sedimento a malla -30 (600  $\mu\text{m}$ ) para luego ser tamizado a malla -80 (180  $\mu\text{m}$ ), resultando material en una cantidad de 250 a 300 gr aproximadamente, suficiente para ser analizada químicamente. Las muestras fueron analizadas por 31 elementos utilizando el método ICP por digestión de agua regia, con extracción suficiente para metales básicos: Cu, Pb, Zn, Co y Ni de manera cuantitativa, y extracción moderada para elementos insolubles como: Cr, Sn, W, V y Zr. Los límites de detección y los 31 elementos analizados se muestran en la Tabla 4.1.

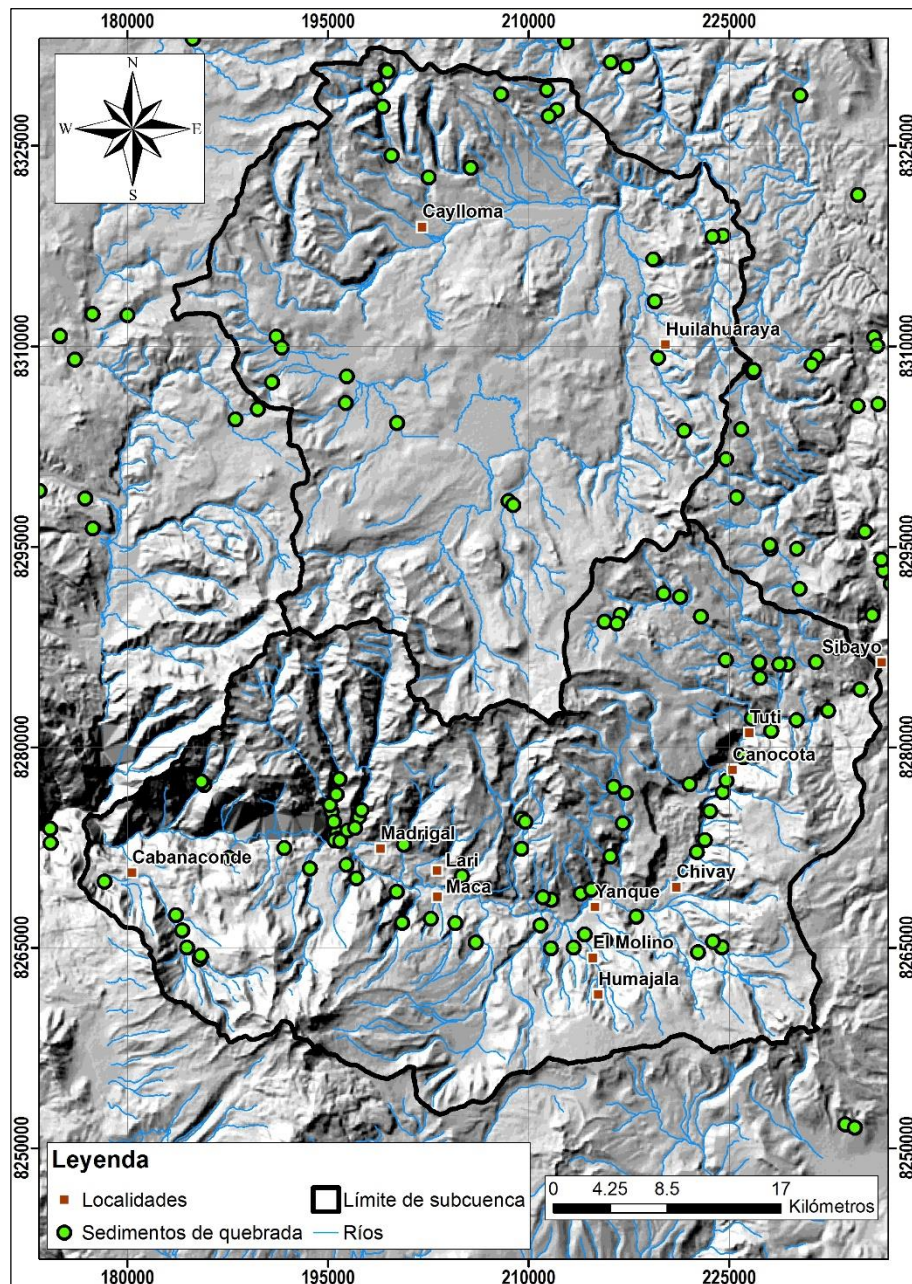


Figura 4.1: Mapa de distribución de muestras de sedimentos de quebrada

Nota: Datos tomados de Geocatmin (<http://geocatmin.ingemmet.gob.pe/geocatmin/>)

Tabla 4.1: Límites de detección de los análisis químicos en sedimentos de quebrada

<b>Al</b>	<b>Sb</b>	<b>As</b>	<b>Be</b>	<b>Bi</b>	<b>Cd</b>	<b>Ca</b>	<b>Cr</b>	<b>Co</b>	<b>Cu</b>	<b>Tl</b>
%	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	%	ppm	ppm	ppm	ppm
0.01	5	3	0.5	0.5	1	0.01	1	1	0.5	2
<b>Fe</b>	<b>La</b>	<b>Pb</b>	<b>Mg</b>	<b>Mn</b>	<b>Mo</b>	<b>Ni</b>	<b>P</b>	<b>K</b>	<b>Sc</b>	<b>Au</b>
%	ppm	ppm	%	ppm	ppm	ppm	%	%	ppm	ppb
0.01	0.5	2	0.01	2	1	1	0.01	0.01	0.5	10
<b>Ag</b>	<b>Na</b>	<b>Sr</b>	<b>Sn</b>	<b>Ti</b>	<b>W</b>	<b>V</b>	<b>Y</b>	<b>Zn</b>	<b>Zr</b>	<b>Hg</b>
ppm	%	ppm	ppm	%	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
0.2	0.01	0.5	10	0.01	10	2	0.5	0.5	0.5	0.01

Nota: Tomado de INGEMMET, 2002

#### 4.1.2 Análisis estadístico de sedimentos de Quebrada

Se realizó el análisis estadístico de las 250 muestras de sedimentos de quebrada en los elementos seleccionados. El control de calidad de los datos no es mostrado en la publicación INGEMMET (2002), debido a que estos provienen de diferentes estudios desde el año 1985. Además, no se nos proporciona información acerca de estándares ni muestras duplicadas necesarias para un control de calidad (QC). Por lo tanto, se asume que los datos utilizados son válidos y se procede al análisis estadístico.

Se utilizaron histogramas y gráficos Q-Q Plots para determinar la distribución del conjunto de dato. Los programas utilizados para este fin fueron Microsoft Excel y RStudio. Como se aprecia en la Figura 4.2, las distribuciones elementales As, Cr, Hg, Mo, Ni, Pb y Zn no presentan normalidad (no hay simetría para que se forme la campana de Gauss), además de tener sesgos positivos y negativos (*skewness*); solo el Cu tiene cierta aproximación a una distribución normal. En la Figura 4.3, según los gráficos Q-Q Plots se puede comprobar que los elementos no tienen una distribución normal. Para que una distribución se considere normal, en una gráfica Q-Q Plot, los

puntos deben aproximarse a la línea de color rojo, de lo contrario no puede afirmarse que esta distribución sea normal (Deng, et al. 2010; Hassanpour & Afzal, 2011; Hashemi & Afzal, 2012). Para aplicar el modelado fractal, la condición de una distribución normal de los datos no es necesaria.

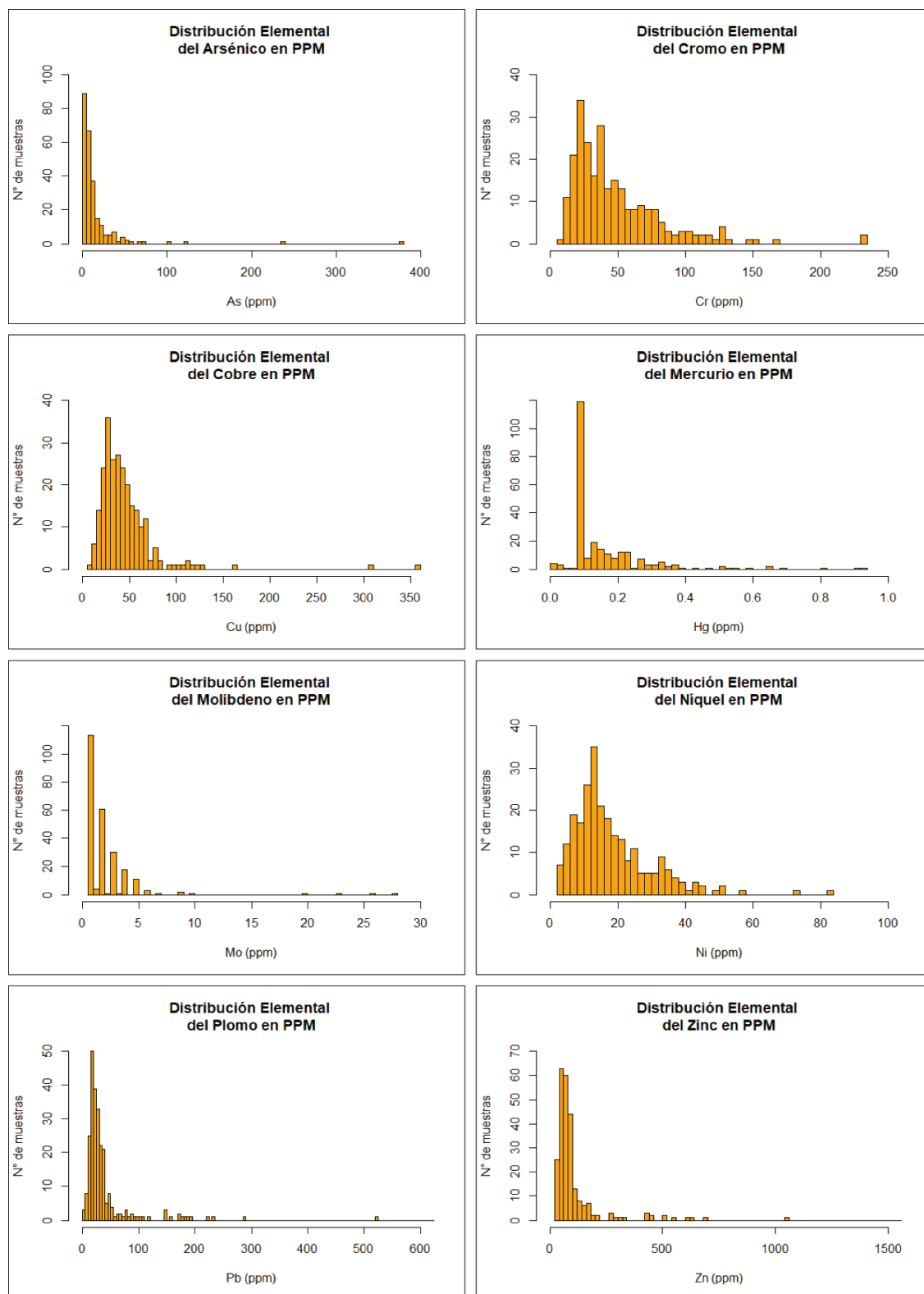


Figura 4.2: Histogramas de distribución elemental de As, Cr, Cu, Hg, Mo, Ni, Pb y Zn en sedimentos de quebrada

Nota: Elaboración propia

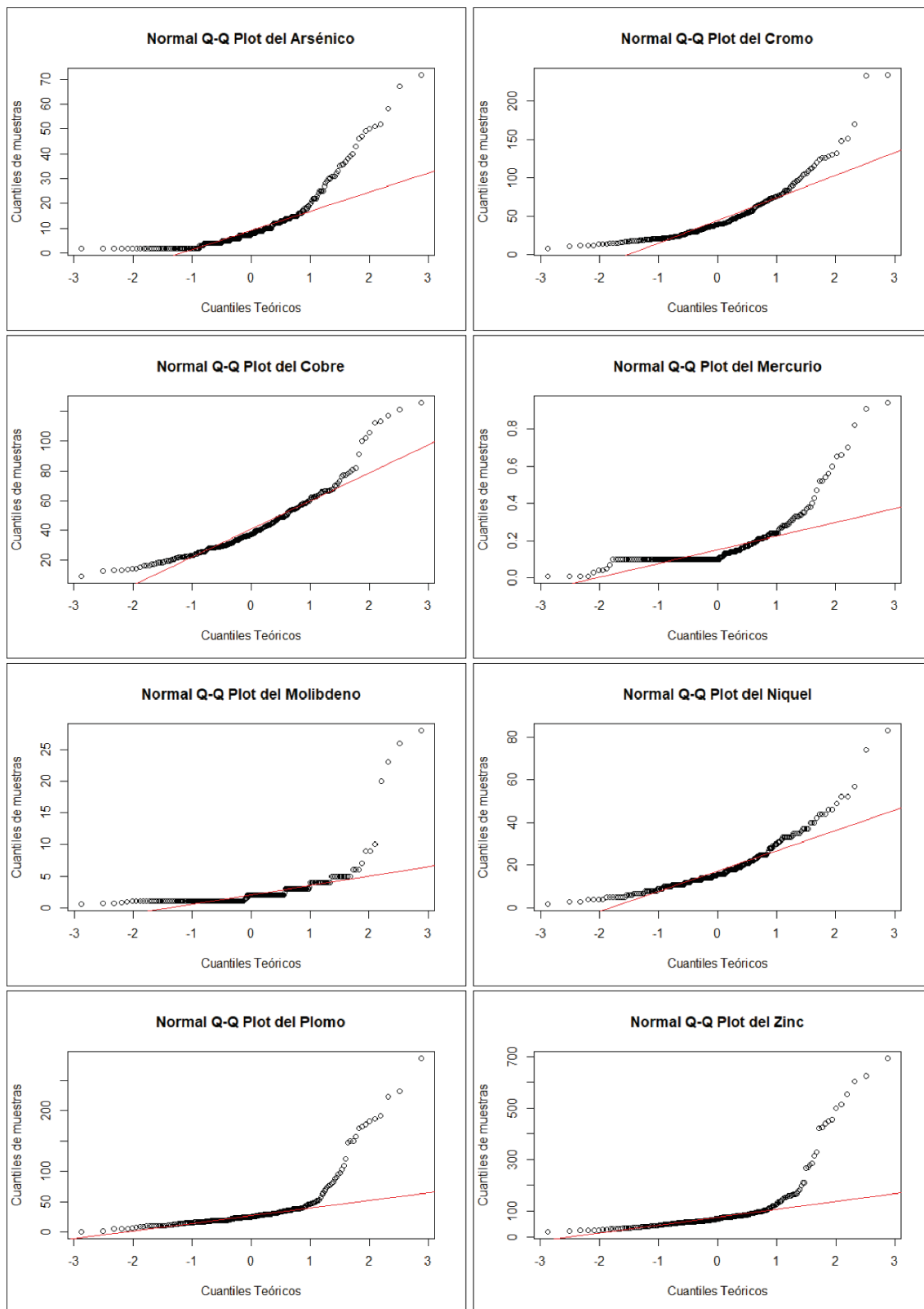


Figura 4.3: Gráfico Q-Q Plot del As, Cr, Cu, Hg, Mo, Ni, Pb y Zn en sedimentos de quebrada.

Nota: Elaboración propia

#### 4.1.3 Modelo Concentración – Área (C-A)

Este modelo involucra en su ecuación a la **concentración** y al **área**. Para su aplicación (ver subtítulo 3.1.3.1) es necesario realizar una interpolación previa a fin de generar un mapa de distribución geoquímica, en base a dicho mapa se desarrollarán los modelos fractales C-A. El método utilizado para dicha interpolación es la Distancia Inversa Ponderada o “IDW” (ver subtítulo 3.2.3.1), que es preferible para datos dispersos espacialmente y ausencia de muestreo sistemático. El tamaño de la celda utilizada fue de 100x100 m y una potencia de 2 (la potencia indica el grado de influencia espacial de un punto con determinada concentración). Se construyeron las gráficas logarítmicas o Log-Log Plots de la concentración elemental “C” versus el área total con valores elementales mayores a “C”, en base a los mapas interpolados anteriormente con el método IDW (Khalajmasoumi *et al.*, 2016). Del análisis de estos Log-Log Plots, calculamos los puntos de quiebre entre las recta de ajuste para reclasificar los mapas de interpolación que se generaron previamente. El producto final son los mapas geoquímicos delineados por el modelo fractal C-A para cada elemento.

#### **Metodología**

La implementación del modelo Concentración – Área se describe de manera más detallada en los siguientes pasos:

1. En Microsoft Excel, se filtra la base de datos geoquímicos de sedimentos de quebrada (Anexo 1) para utilizar los elementos seleccionados en esta tesis (As, Cr, Cu, Hg, Mo, Ni, Pb y Zn), posteriormente se proyectan los puntos en el software ArcGis para su visualización (Figura 4.1).
2. Generar mapas de interpolación con los datos geoquímicos y el método Distancia Inversa Ponderada (*IDW*) utilizando la herramienta *Geostatistical*



*Analyst Tools – Interpolation – IDW* del ArcGis 10.4. En la Figura 4.4 se muestra el mapa de interpolación del Arsénico.

3. Los mapas de interpolación se generan en formato ráster, estos son reclasificados en 40 intervalos de concentración (ppm) con la herramienta *Spatial Analyst Tools – Reclass – Reclassify* del ArcGis 10.4.
4. Con los mapas reclasificados se procede a extraer las estadísticas zonales, es decir, el área que encierra cada intervalo de concentración. Para ello utilizamos la herramienta *Spatial Analyst Tools – Zonal – Zonal Statistics as Table*, que nos generará los datos mencionados en una tabla que posteriormente convertimos a un libro de Excel (.xls). En la Figura 4.5 se muestra la tabla con la información zonal obtenida al aplicar la herramienta mencionada anteriormente.

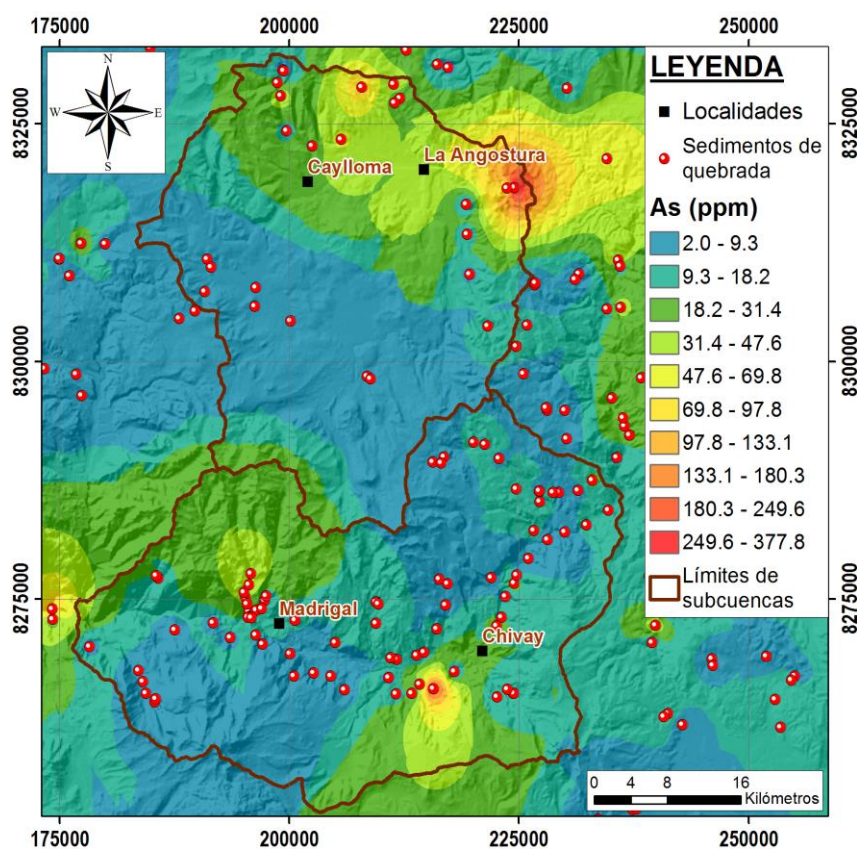


Figura 4.4: Mapa de interpolación del As en sedimentos de quebrada con el método IDW.

Nota: Elaboración propia

5. En Microsoft Excel elaboramos las gráficas logarítmicas o Log-Log Plots. Una manera sencilla de hacerlo es tomando logaritmos a los datos de concentración **C** y de área **A** encerrada por el contorno de concentración “C”. De esta manera podemos graficar la función del modelo fractal C-A (ecuación 3.3) en un plano cartesiano. En el eje X colocamos las concentraciones **C** y en el eje Y, el área **A**.
6. En las gráficas logarítmicas del modelo C-A, se trazan diferentes líneas de tendencia según se observe, que puede variar entre 3 a 5 líneas con sus respectivas ecuaciones y coeficientes de Pearson. Ver Figura 4.6.

OBJEC	Value	COUNT	AREA	MIN	MAX	RANGE	MEAN	STD	SUM
1	2402292	0.212474	2.00001	7.896126	5.896116	5.363961	1.431544	12885800.262566	
2	2856430	0.25264	7.896135	15.266278	7.370143	11.218995	2.036583	32046274.2408	
3	1405291	0.124293	15.266287	24.110455	8.844168	19.295767	2.580745	27116167.957819	
4	708723	0.062684	24.110462	32.954632	8.84417	27.824314	2.406053	19719731.062439	
5	326256	0.028856	32.954655	43.272846	10.318192	37.74602	3.013781	12314865.525688	
6	133748	0.01183	43.273094	53.590927	10.317833	47.614779	2.9082	6368381.512024	
7	69475	0.006145	53.59108	63.909271	10.318192	58.564717	3.021061	4068783.724625	
8	37598	0.003325	63.909351	72.753326	8.843975	67.398618	2.557191	2534053.235569	
9	23275	0.002059	72.754578	83.07029	10.315712	77.633435	2.967559	1806918.198959	
10	18105	0.001601	83.072556	93.389282	10.316727	88.071492	2.969319	1594534.355453	
11	11708	0.001036	93.390396	102.232986	8.84259	97.608204	2.550942	1142796.847092	
12	9476	0.000838	102.236229	112.548927	10.312698	107.179655	2.974692	1015634.40966	
13	6321	0.000559	112.552582	121.3964	8.843819	116.80986	2.548998	738355.124748	
14	4948	0.000438	121.397018	130.239014	8.841995	125.660022	2.560655	621765.789383	
15	4550	0.000402	130.246231	140.557816	10.311584	135.203723	2.964876	615176.937683	
16	3155	0.000279	140.560043	149.400558	8.840515	144.844195	2.557361	456983.435913	
17	2974	0.000263	149.403671	159.720535	10.316864	154.366309	2.968156	459085.402679	
18	2104	0.000186	159.72522	168.559723	8.834503	164.012126	2.56885	345081.513565	
19	1750	0.000155	168.566025	177.405426	8.839401	172.848936	2.551437	302485.638428	
20	1696	0.00015	177.421341	187.724106	10.302765	182.38465	2.977207	309324.366608	
21	1208	0.000107	187.737595	196.558975	8.821381	192.008977	2.567326	231946.844177	
22	1180	0.000104	196.573273	206.871399	10.298126	201.560137	2.984563	237840.96138	
23	842	0.000074	206.893143	215.722656	8.829514	211.248532	2.550906	177871.263916	
24	717	0.000063	215.742111	224.556808	8.814697	220.069518	2.526622	157789.84407	
25	706	0.000062	224.599014	234.89592	10.296906	229.629286	2.993188	162118.275665	
26	427	0.000038	234.914581	243.737122	8.82254	239.084415	2.596549	102089.045212	
27	387	0.000034	243.755661	253.995682	10.240021	248.705856	2.931665	96249.166138	
28	276	0.000024	254.096054	262.885162	8.789108	258.286739	2.524616	71287.14003	
29	243	0.000021	262.92276	271.711334	8.788574	267.223526	2.595311	64935.316742	
30	228	0.00002	271.823029	282.045197	10.222168	276.732559	2.910013	63095.023529	
31	169	0.000015	282.13504	290.898132	8.763092	286.438902	2.600139	48408.174469	
32	164	0.000015	290.942841	301.09259	10.14975	295.967656	2.916173	48538.695618	
33	118	0.00001	301.25119	309.924622	8.673431	305.554758	2.610821	36055.461426	
34	106	0.000009	310.084381	318.874023	8.789642	314.479339	2.631087	33334.809967	
35	90	0.000006	318.981650	328.733460	10.751801	323.936801	2.948112	32060.752107	

Figura 4.5: Tabla de reclasificación en 40 intervalos del mapa de interpolación del As en sedimentos de quebrada.

Nota: Las columnas sombreadas de celeste son las que serán utilizadas para el modelo fractal C-A. **MIN**: Límite inferior del intervalo de concentración, **MAX**: Límite superior del intervalo de concentración, **COUNT**: Número de celdas de 100x100m dentro del intervalo.

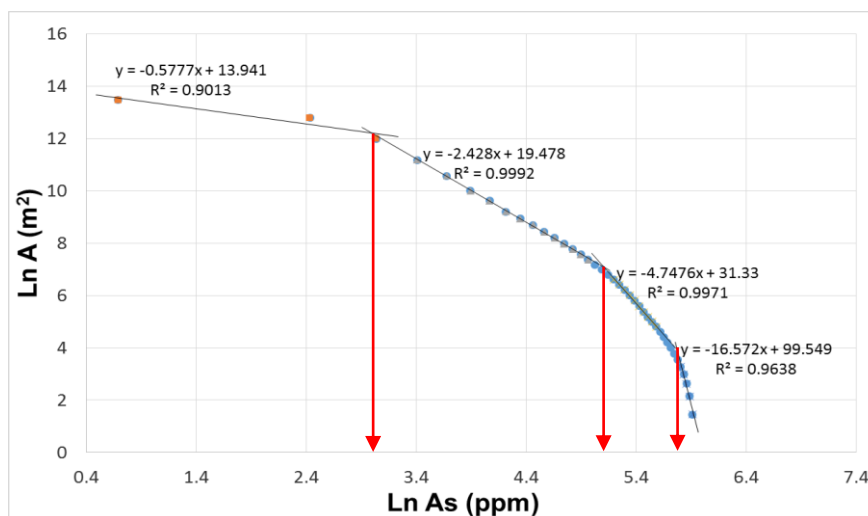


Figura 4.6: Gráfica logarítmica del modelo C-A del Arsénico en sedimentos de quebrada.

Nota: Elaboración propia

7. Con las ecuaciones de las líneas de tendencia se calcula el valor del punto de intersección entre ellas, lo que representa los puntos de quiebre o puntos de separación de las poblaciones geoquímicas (*threshold*).
8. Estos valores obtenidos se utilizan para reclasificar los mapas de interpolación previamente generados en el paso 2. Finalmente se obtiene el mapa geoquímico por elemento según el modelo fractal C-A, el cual está dividido en poblaciones geoquímicas desde las normales o de fondo hasta las fuertemente anómalas. Ver Figura 4.7.

De forma análoga se realiza el mismo procedimiento con los demás elementos. La Figura 4.8 muestra las gráficas logarítmicas generadas utilizando el modelo C-A para cada elemento. Cada uno de los segmentos representa una población geoquímica, los cambios de pendiente representan los valores de fondo (*background*) y/o umbrales (*threshold*). Como se aprecia, las primeras líneas (desde la izquierda) representan los valores de fondo (*background*), las cuales pueden subdividirse en bajo y normal. Los segmentos siguientes pueden clasificarse como

poblaciones anómalas de baja, moderada y alta intensidad. En la Tabla 4.2 se muestra un resumen de los valores obtenidos por el modelo C-A.

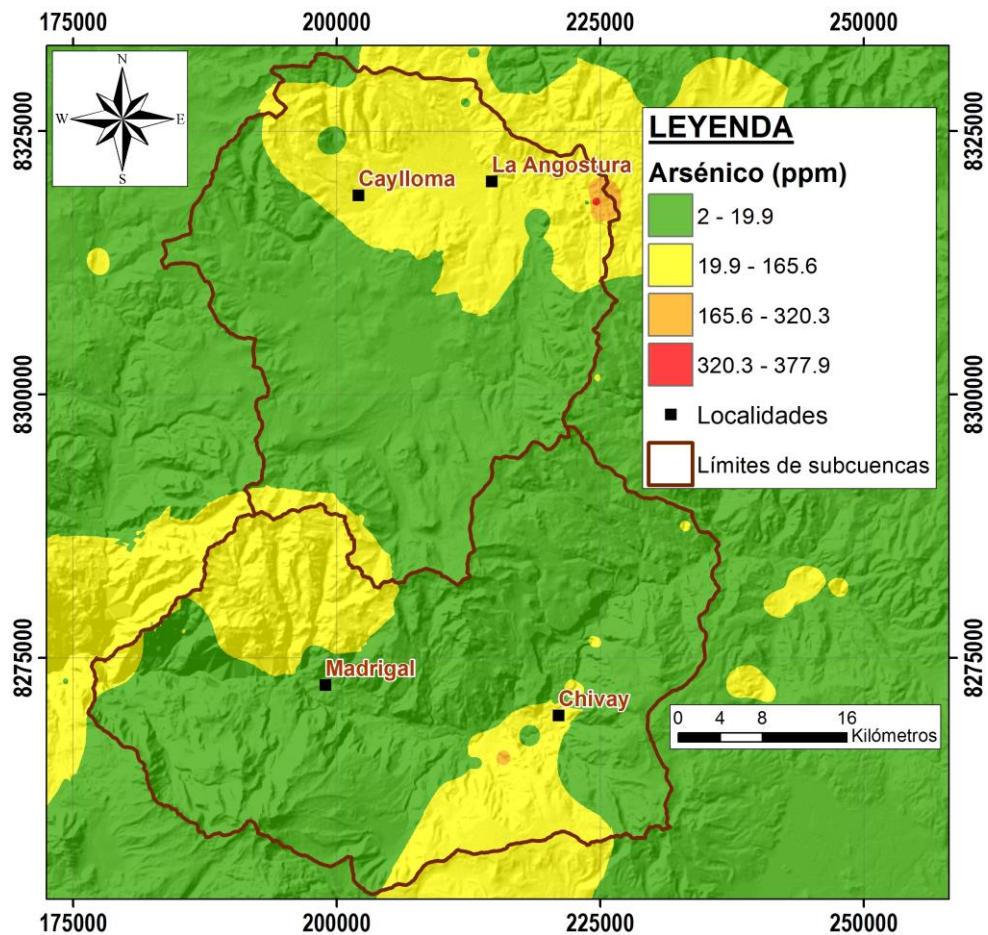


Figura 4.7: Mapa geoquímico del As, obtenido de la reclasificación del mapa de interpolación del As (Figura 4.4) con los puntos de quiebre del modelo fractal C-A.

Nota: Elaboración propia.

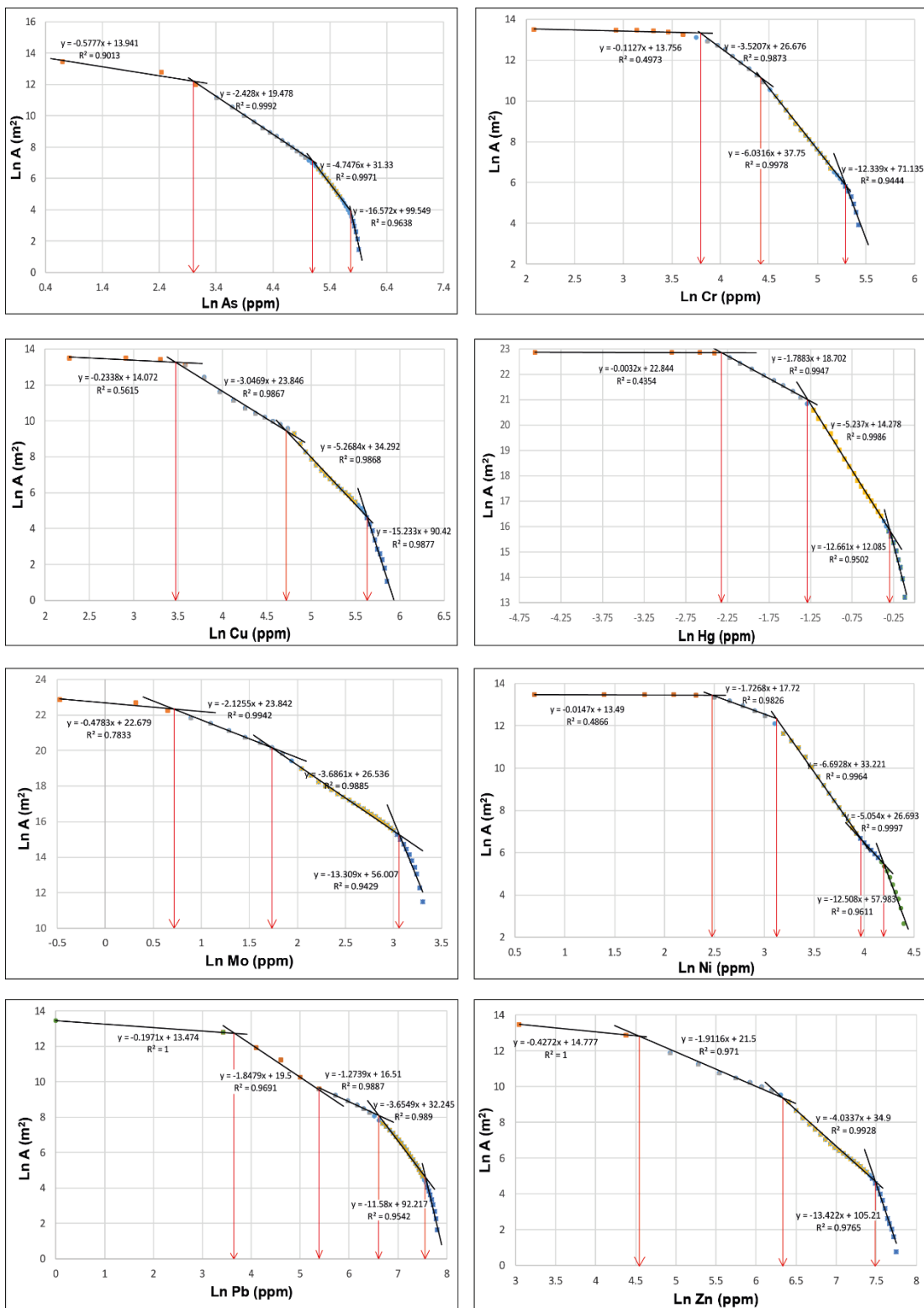


Figura 4.8: Gráficos logarítmicos del modelo C-A (C-A Log-Log Plot) del As, Cr, Cu, Hg, Mo, Ni, Pb y Zn en sedimentos de quebrada.

Nota: Elaboración propia

Tabla 4.2: Poblaciones geoquímicas obtenidas del modelo fractal C-A (ppm) en sedimentos de quebrada

Elemento	Valores de fondo		Anomalía		
	Bajo	Normal	Baja	Moderada	Alta
As	-	2-19.9	19.9-165.6	165.6-320.3	320.3-377.9
Cr	8-44.3	44.3-82.3	82.3-198.9	198.9-233.9	-
Cu	9.7-32.28	32.28-110.2	110.2-279.4	279.4-355.7	-
Hg	0.01-0.098	0.098-0.27	0.27-0.74	0.74-0.93	-
Mo	0.62-2.02	2.02-5.62	5.62-21.38	21.38-27.98	-
Ni	2-11.82	11.8-22.24	22.24-54.59	54.59-68.03	68.03-82.9
Pb	1-38.5	38.5-217	217-741.4	741.4-1934	1934-2505.2
Zn	-	21.1-92.7	92.7-552.5	552.5-1788.4	1788.4-2373.5

Nota: Elaboración propia

Con los valores de fondo y umbrales obtenidos en el procesamiento de sedimentos de quebrada con el modelo C-A, se realiza una reclasificación y lo que resulta en nuevos mapas de isovalores geoquímicos (delineado). Estos archivos se generan en formato ráster con las herramientas geoestadísticas de ArcGis.

En las Figuras 4.9 y 4.10 se muestra el delineado de anomalías geoquímicas basado en los valores obtenidos del modelo C-A. Como se puede apreciar, según el modelo existen anomalías moderadas de As al norte de la subcuenca Hornillos Alto (HA) y en el límite con la subcuenca Alto Camaná (AC) (mina Madrigal). También se tiene una anomalía fuerte al noreste de la subcuenca Hornillos Alto (HA) (320 – 377 ppm) a 10 km del poblado La Angostura (Figura 4.9A). En el caso del Cr, se tiene una anomalía leve al este de la subcuenca Hornillos Alto, y una anomalía fuerte al oeste, ya fuera de la subcuenca; en la subcuenca Alto Camaná predominan los valores inferiores al *background* regional, a excepción de una anomalía puntual fuerte en la parte central (Figura 4.9B). Para el Cu tenemos solamente un área anómala (<110 ppm) al norte de la subcuenca Alto Camaná (Madrigal) (Figura 4.9C). Las

anomalías de Hg están repartidas al norte y oeste Hornillos Alto, con una zona anómala al norte de Alto Camaná (<0.27 ppm) (Figura 4.9D).

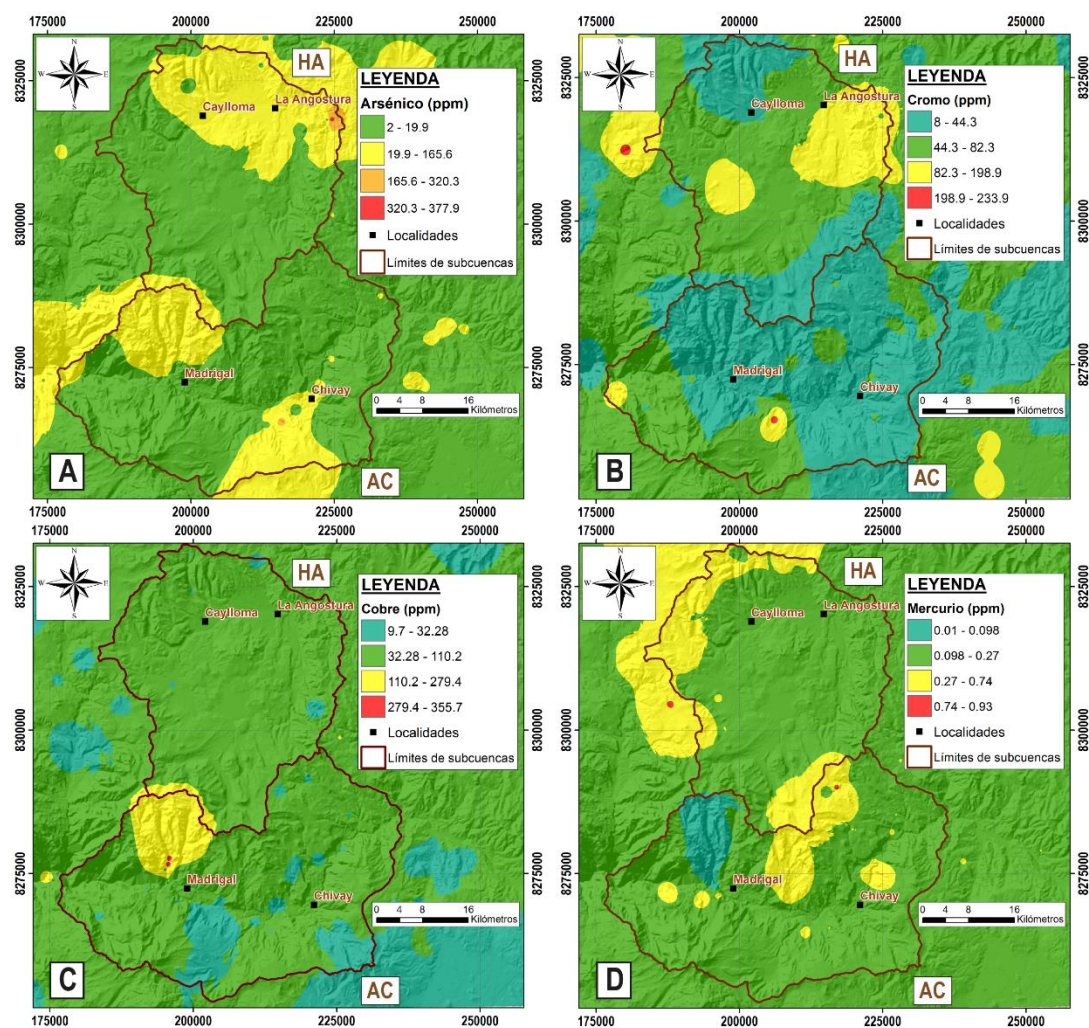


Figura 4.9: Mapas geoquímicos delineados con el modelo fractal C-A de (A) Arsénico, (B) Cromo, (C) Cobre y (D) Mercurio en sedimentos de quebrada.

Nota: Elaboración propia. HA: Hornillos Alto; AC: Alto Camaná.

El Mo tiene una anomalía de moderada a fuerte intensidad al extremo norte de la Subcuenca Hornillos Alto (<6 ppm), sin embargo, a nivel general en ambas subcuencas predominan los valores de fondo (*background*), con gran extensión de zonas con concentraciones inferiores al *background* regional (Figura 4.10E). El Ni presenta concentraciones anómalas moderadas en los alrededores de La Angostura

(22-54 ppm, Subcuenca Hornillos Alto), también hay una anomalía fuerte puntual en la parte central sur de Alto Camaná (<54 ppm); no obstante, la mayor parte de las subcuencas tienen concentraciones dentro del rango iguales o inferior al *background* regional (Figura 4.10F). El Pb muestra solamente una zona fuertemente anómala al extremo noreste de Hornillos Alto (217-2500 ppm), abundan en las subcuencas concentraciones iguales al *background*, con mayor predominancia de zonas de concentración inferior al *background* regional, (Figura 4.10G). Finalmente, el Zn muestra dos zonas anómalas principales; la primera de leve a moderada se extiende en casi todo el norte de Hornillos Alto; y la segunda se encuentra al norte de Alto Camaná, cabe destacar que presenta valores fuertemente anómalos en los alrededores de Madrigal (Figura 4.10H).



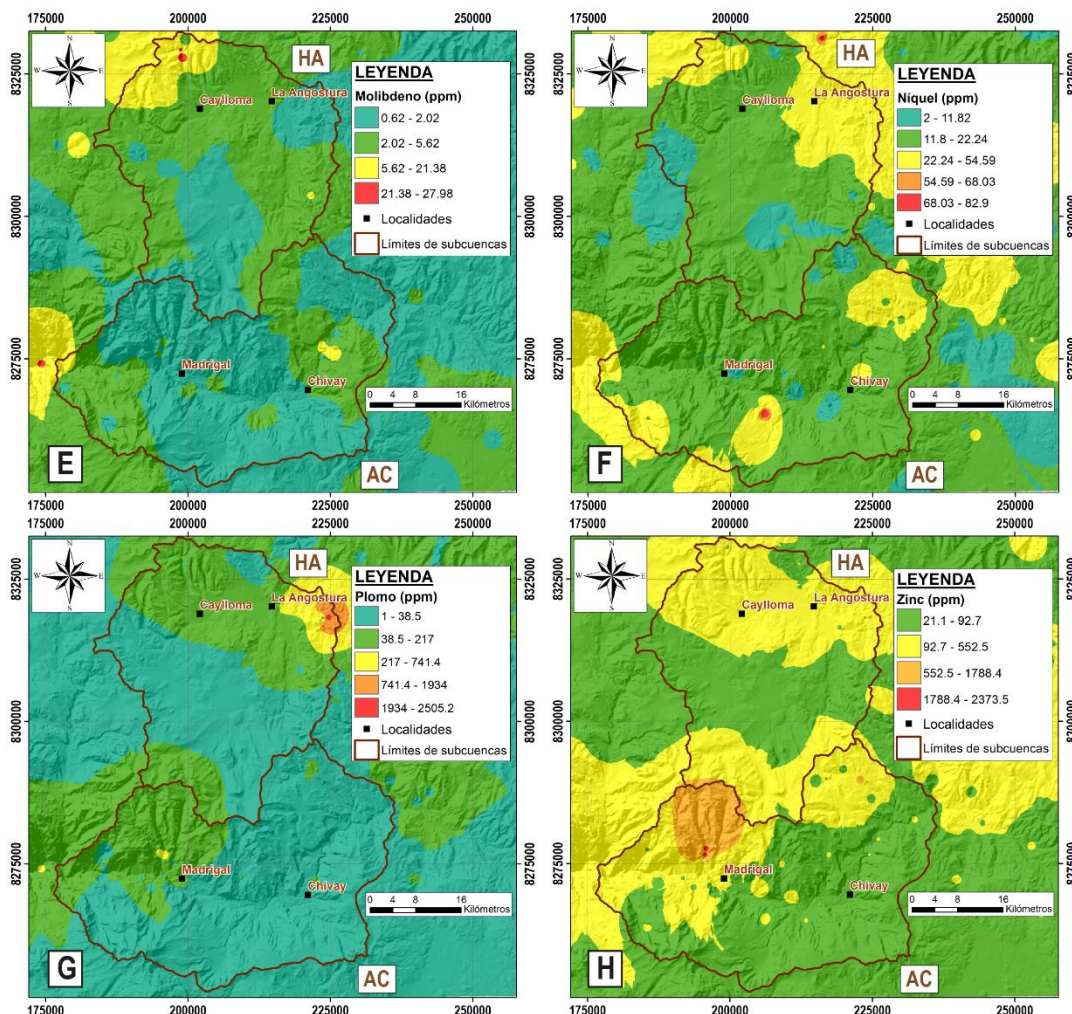


Figura 4.10: Mapas geoquímicos delineados con modelo fractal C-A del (E) Molibdeno, (F) Níquel, (G) Plomo y (H) Zinc en sedimentos de quebrada.

Nota: Elaboración propia. HA: Hornillos Alto; AC: Alto Camaná.

#### 4.1.4 Modelo Number- Size (N-S)

Este modelo involucra en su ecuación a la **concentración (S)** y al **número de muestras (N)**. Para su aplicación no es necesario un pre-procesamiento de los datos, es decir se trabaja con la base de datos original, sin ninguna transformación o eliminación de valores atípicos, ni tampoco se involucra a los mapas de interpolación en sus cálculos, esto debido a que no se considera el área en la ecuación de este modelo (ver subtítulo 3.1.3.2). Se construyeron las gráficas logarítmicas o Log-Log

Plots de la concentración elemental **S** versus el número acumulativo de muestras **N** con concentraciones mayores o iguales a “S”. Del análisis de estos Log-Log Plots, calculamos los puntos de quiebre entre las rectas de ajuste para reclasificar los mapas de interpolación que se generaron previamente. El producto final son los mapas geoquímicos delineados por el modelo fractal N-S para cada elemento.

### **Metodología**

La implementación del modelo Number – Size (N-S) se describe de manera más detallada en los siguientes pasos:

1. En Microsoft Excel, se filtra la base de datos geoquímicos de sedimentos de quebrada (Anexo 1) para utilizar los elementos seleccionados en esta tesis (As, Cr, Cu, Hg, Mo, Ni, Pb y Zn). Separar los datos geoquímicos en intervalos de concentración con la herramienta Análisis de Datos – Estadística Descriptiva.
2. En el mismo programa, elaboramos las gráficas logarítmicas o Log-Log Plots. Tomamos logaritmos de los datos de concentración **S** y de número acumulativo de muestras **N** con concentraciones mayores a “S”. De esta manera podemos graficar la función del modelo fractal N-S (ecuación 3.4) en un plano cartesiano. En el eje X colocamos las concentraciones **S** y en el eje Y, el número de muestras **N**.
3. En las gráficas logarítmicas N-S, se trazan diferentes líneas de tendencia según se observe, que puede variar entre 3 a 5 líneas con sus respectivas ecuaciones y coeficientes de Pearson. Ver Figura 4.11.
4. Con las ecuaciones de las líneas de tendencia se calcula el valor del punto de intersección entre ellas, lo que representa los puntos de quiebre o puntos de separación de las poblaciones geoquímicas (*threshold*).

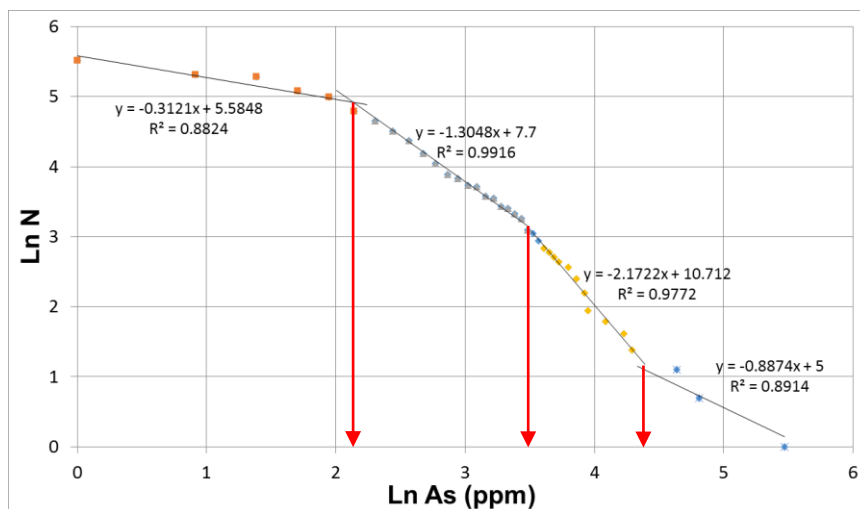


Figura 4.11: Gráfica logarítmica del modelo N-S del Arsénico en sedimentos de quebrada.

Nota: Elaboración propia

- Estos valores obtenidos se utilizan para reclasificar los mapas de interpolación previamente generados en el paso 2 del modelo C-A. Finalmente se obtiene el mapa geoquímico por elemento según el modelo fractal N-S, el cual está dividido en poblaciones geoquímicas desde las normales o de fondo hasta las fuertemente anómalas. Ver Figura 4.12.

De forma análoga se realiza el mismo procedimiento con los demás elementos. La Figura 4.13 muestra las gráficas de los modelos fractales N-S de los elementos seleccionados. Al igual que el modelo fractal C-A, cada línea representa una población geoquímica, los puntos de quiebre representan cambios en las etapas de enriquecimiento, que también se pueden interpretar como *background* y *threshold*, según sea el caso. Mediante el modelo N-S se obtuvieron entre 4 y 5 poblaciones geoquímicas para cada elemento. Se observó también que este modelo delinea mejor las poblaciones dentro del *background*, en todos los casos se obtuvo dos

poblaciones dentro de los valores normales regionales (*background*) para la zona.

En la Tabla 4.3 se resumen los resultados de este modelo.

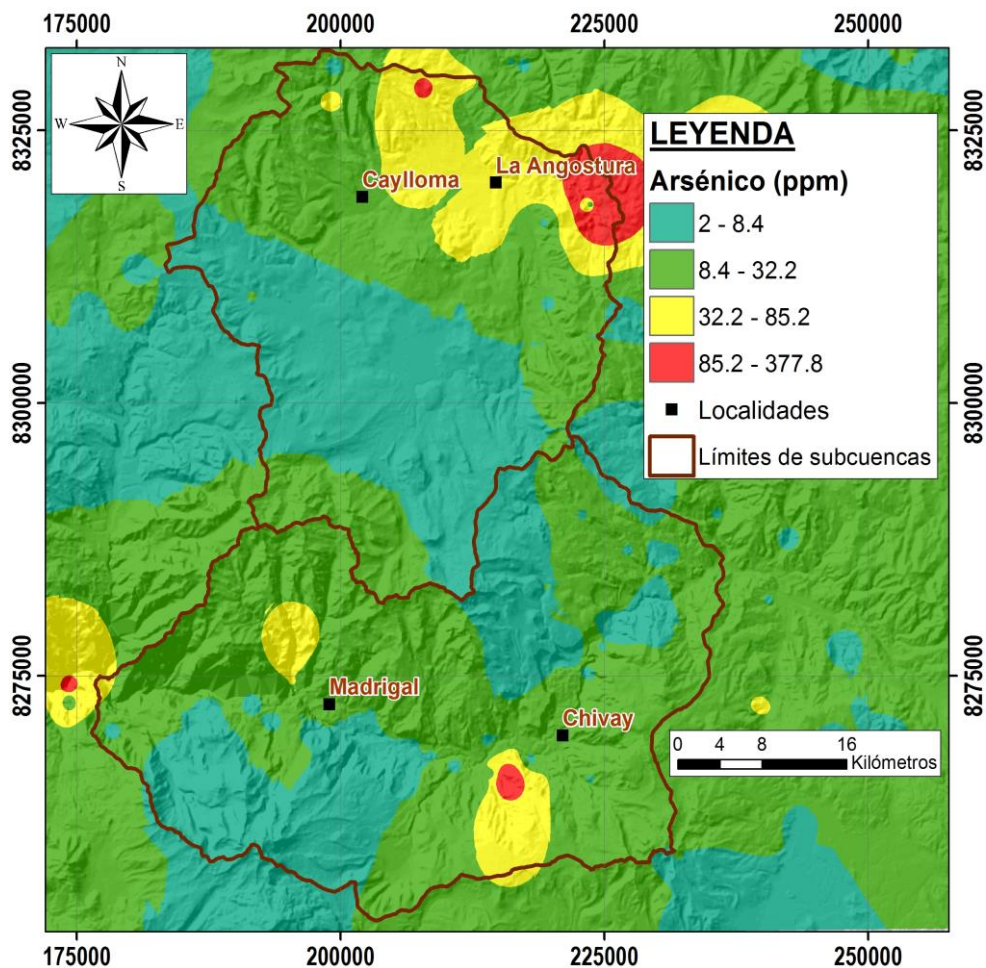


Figura 4.12: Mapa geoquímico del As, obtenido de la reclasificación del mapa de interpolación del As (Figura 4.4) con los puntos de quiebre del modelo fractal N-S.

Nota: Elaboración propia

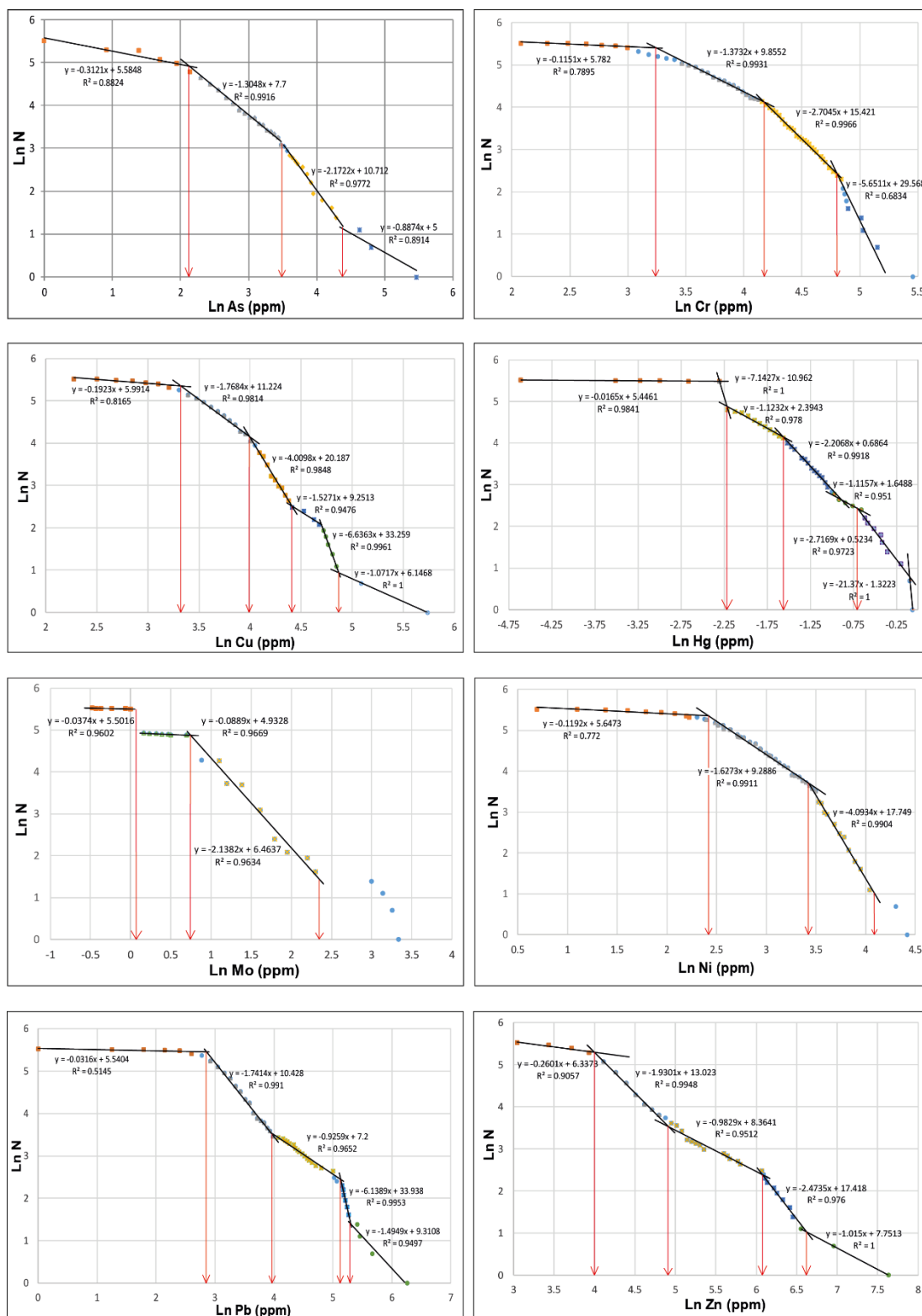


Figura 4.13: Gráfica logarítmica del modelo N-S (N-S Log-Log Plot) del As, Cr, Cu, Hg, Mo, Ni, Pb y Zn en sedimentos de quebrada.

Nota: Elaboración propia

Tabla 4.3: Poblaciones geoquímicas obtenidas del modelo fractal N-S (ppm) en sedimentos de quebrada.

Elemento	Valores de Fondo		Anomalía		
	Bajo	Normal	Baja	Moderada	Alta
As	2-8.4	8.4-32.2	32.2-85.2	85.2-377.8	-
Cr	8-25.5	25.5-65.4	65.4-121.6	121.6-233.9	-
Cu	9.7-27.6	27.6-54.5	54.5-81.8	81.8-109.8	109.8-355.8
Hg	0.01-0.11	0.11-0.21	0.21-0.49	0.49-0.91	0.91-0.94
Mo	0.62-1.07	1.07-2.01	2.01-10.07	10.07-27.97	-
Ni	2-10.91	10.91-30.8	30.8-56.82	56.82-82.99	-
Pb	1-17.4	17.4-52.3	52.3-168.8	168.8-200.9	200.9-2505.2
Zn	21.1-54.7	54.7-136.8	136.8-434.4	434.4-657.4	657.4-2373.5

Nota: Elaboración propia

En las Figuras 4.14 y 4.15 se muestra el delineado de anomalías geoquímicas basado en los valores obtenidos del modelo N-S. El As presenta anomalías moderadas y fuertes al norte de Hornillos Alto en los alrededores de La Angostura (<32 ppm); así como al sureste de Alto Camaná (Figura 4.14A). Hay anomalías leves de Cr en la parte central y este de Hornillos Alto (65-121 ppm) y anomalías puntuales moderadas al sur y este de Alto Camaná (Figura 4.14B). El Cu presenta valores de moderados a muy altos (82-355 ppm) al noroeste de Alto Camaná (alrededores de Madrigal) (Figura 4.14C). El Hg presenta anomalías leves en todo el norte y oeste de Hornillos Alto (0.21-0.44.8ppm); en Alto Camaná las anomalías leves se encuentran a noreste, con anomalías moderadas puntuales cerca de Chivay y Madrigal (Figura 4.14D).

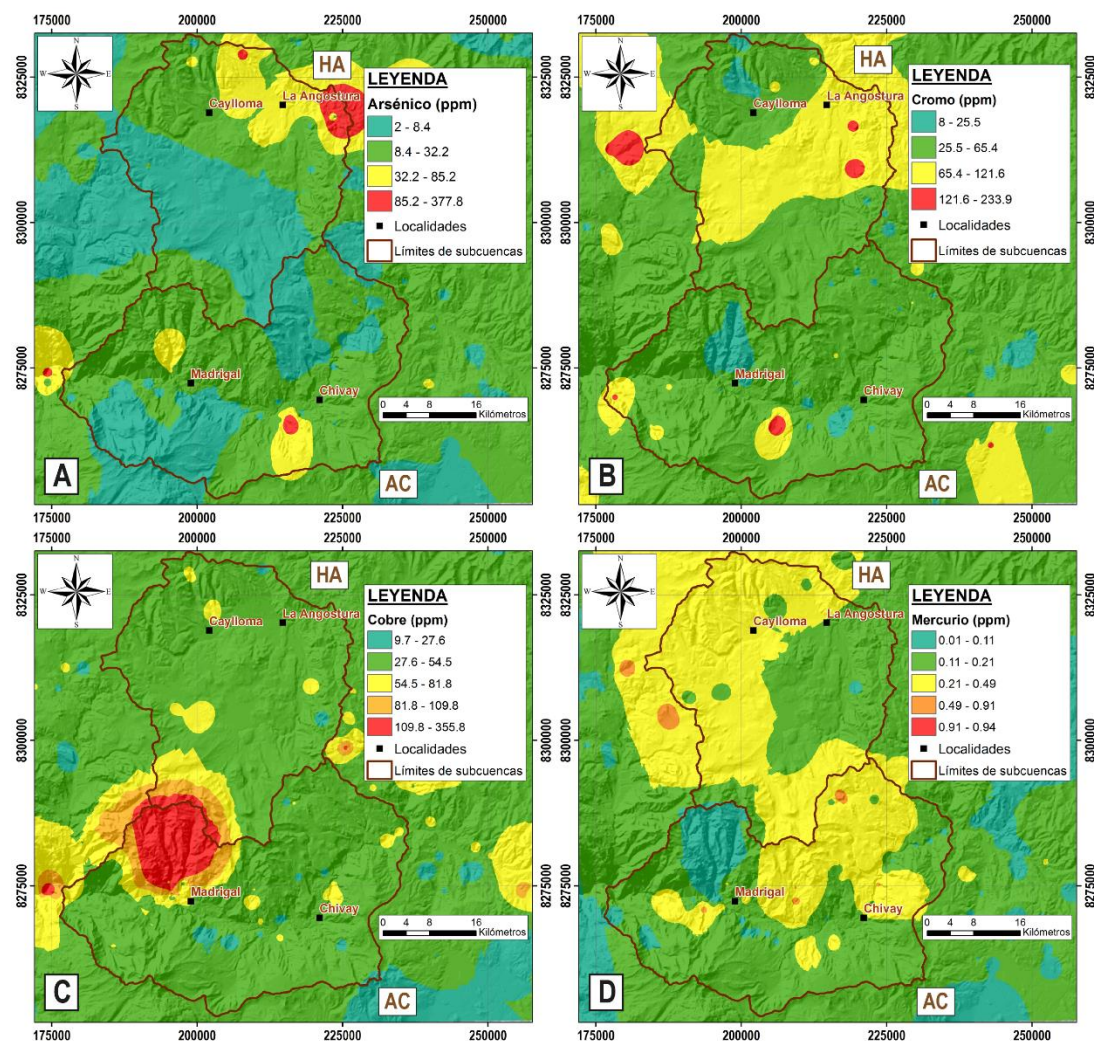


Figura 4.14: Mapas geoquímicos delineados con el modelo fractal N-S de (A) Arsénico, (B) Cromo, (C) Cobre y (D) Mercurio en sedimentos de quebrada.

Nota: Elaboración propia. HA: Hornillos Alto; AC: Alto Camaná.

El Mo presenta zonas levemente anómalas al noroeste de la Subcuenca Hornillos Alto con una anomalía muy alta al extremo norte (<10 ppm); en la Subcuenca Alto Camaná presenta anomalías leves en la parte este y oeste (Figura 4.15E). El Ni presenta valores dentro de los rangos normales regionales, a excepción de leves anomalías al noreste de la Subcuenca Hornillos Alto (Figura 4.15F). En el caso del Pb, se tiene una zona fuertemente anómala al noreste de Subcuenca Hornillos Alto (<168 ppm), y una de menor extensión al noroeste de la Subcuenca Alto Camaná (Figura 4.15G). Finalmente, el Zn tiene una zona fuertemente anómala

al noroeste de la Subcuenca Alto Camaná (<434 ppm), así como zonas de anomalía leves a moderadas en el norte y noreste de la Subcuenca Hornillos Alto (Figura 4.15H).

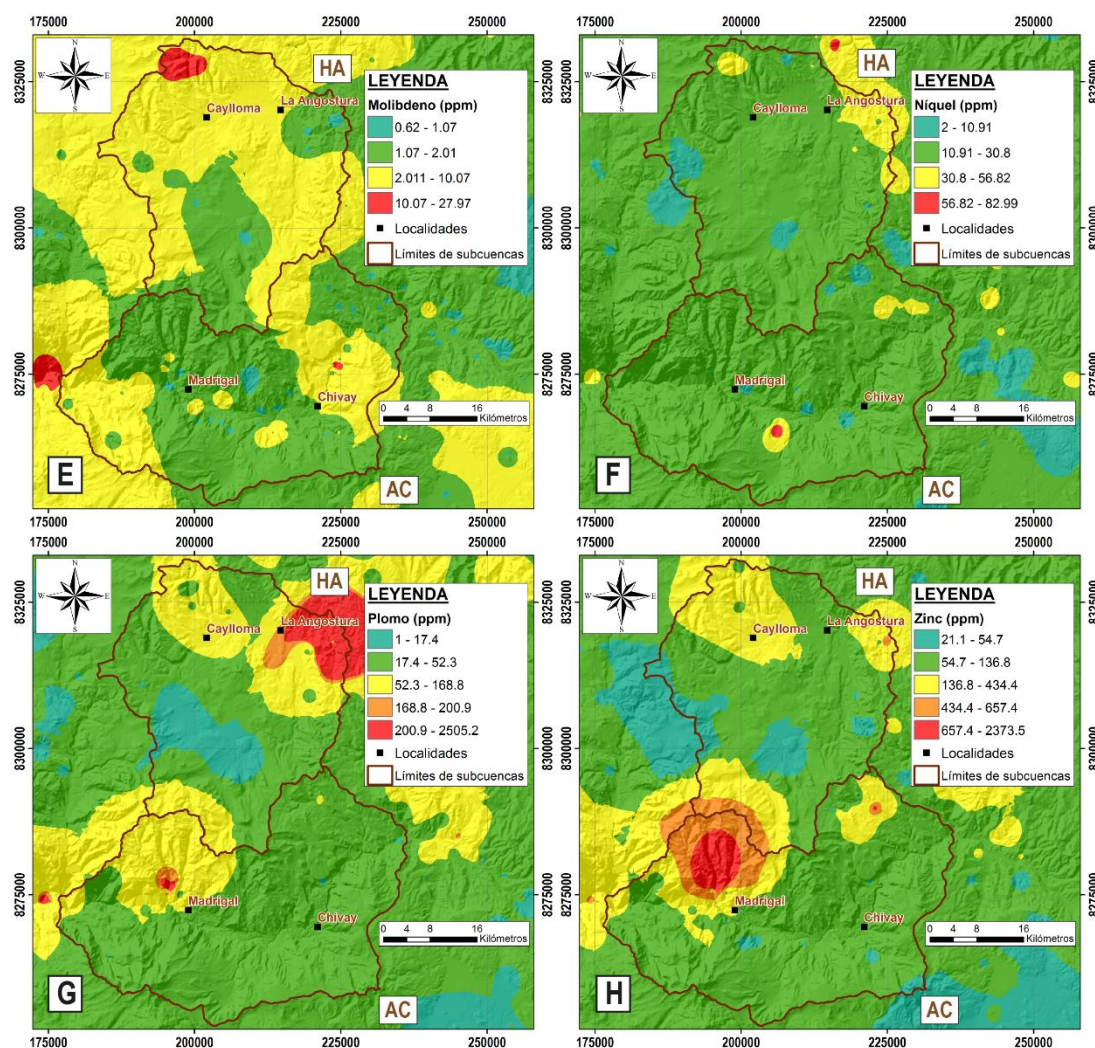


Figura 4.15: Mapas geoquímicos delineados con modelo fractal N-S del (E) Molibdeno, (F) Níquel, (G) Plomo y (H) Zinc en sedimentos de quebrada. HA: Hornillos Alto; AC: Alto Camaná.

Nota: Elaboración propia

La aplicación de los modelos fractales C-A y N-S en sedimentos de quebrada, permite establecer zonas anómalas en el área de estudio en función a la agrupación de anomalías por elemento químico, las cuales son: [1] al noroeste de la subcuenca Hornillos Alto en los alrededores de Caylloma (As, Hg, Mo, Pb y Zn), [2] al noreste



de la subcuenca Hornillos Alto en los alrededores de La Angostura (As, Cr, Ni, Pb y Zn), [3] al noroeste de la subcuenca Alto Camaná en los alrededores de Madrigal (Cu, As y Zn) y [4] al noreste de la Subcuenca Alto Camaná (Hg, Zn, Ni).

## **4.2 Procesamiento de datos litogeoquímicas**

### **4.2.1 Muestreo litogeoquímico**

Se han utilizados 273 muestras de roca, las cuales son parte de los estudios litogeoquímicos de subcuencas hidrográficas colectadas por el proyecto GR38A en el 2017 en las subcuencas Hornillos Alto y Alto Camaná y han sido extraídas del portal Geocatmin del INGEMMET (<http://geocatmin.ingemmet.gob.pe/geocatmin/>). Se utilizó el modelo N-S para discriminar las diferentes poblaciones geoquímicas. La alta variabilidad espacial y la poca dispersión en el muestreo litogeoquímico no permiten generar mapas de interpolación precisos, por lo que la aplicación del modelo C-A no es adecuada. En estos casos el modelo N-S es más apropiado (ver subtítulo 3.1.3.2). Además, se utilizarán mapas geoquímicos de puntos, que son convenientes para las posteriores comparaciones con los mapas de interpolación de sedimentos de quebrada. En la Figura 4.16 se muestra la distribución espacial de las muestras recolectadas en campo.

El muestreo litogeoquímico consistió en la extracción de 3 kg de roca fresca del afloramiento por muestra, adicionalmente fueron removidas las pátinas de oxidación y/o intemperismo que podría alterar el resultado de los análisis químicos. Estas muestras fueron analizadas con el método ICP-MS (roca total y por Fusión XRF); en la Tabla 4.4 se muestran los límites de detección.

Los elementos utilizados para el análisis fractal en litogeoquímica son As, Cr, Cu, Hg, Mo, Ni, Pb, Zn.

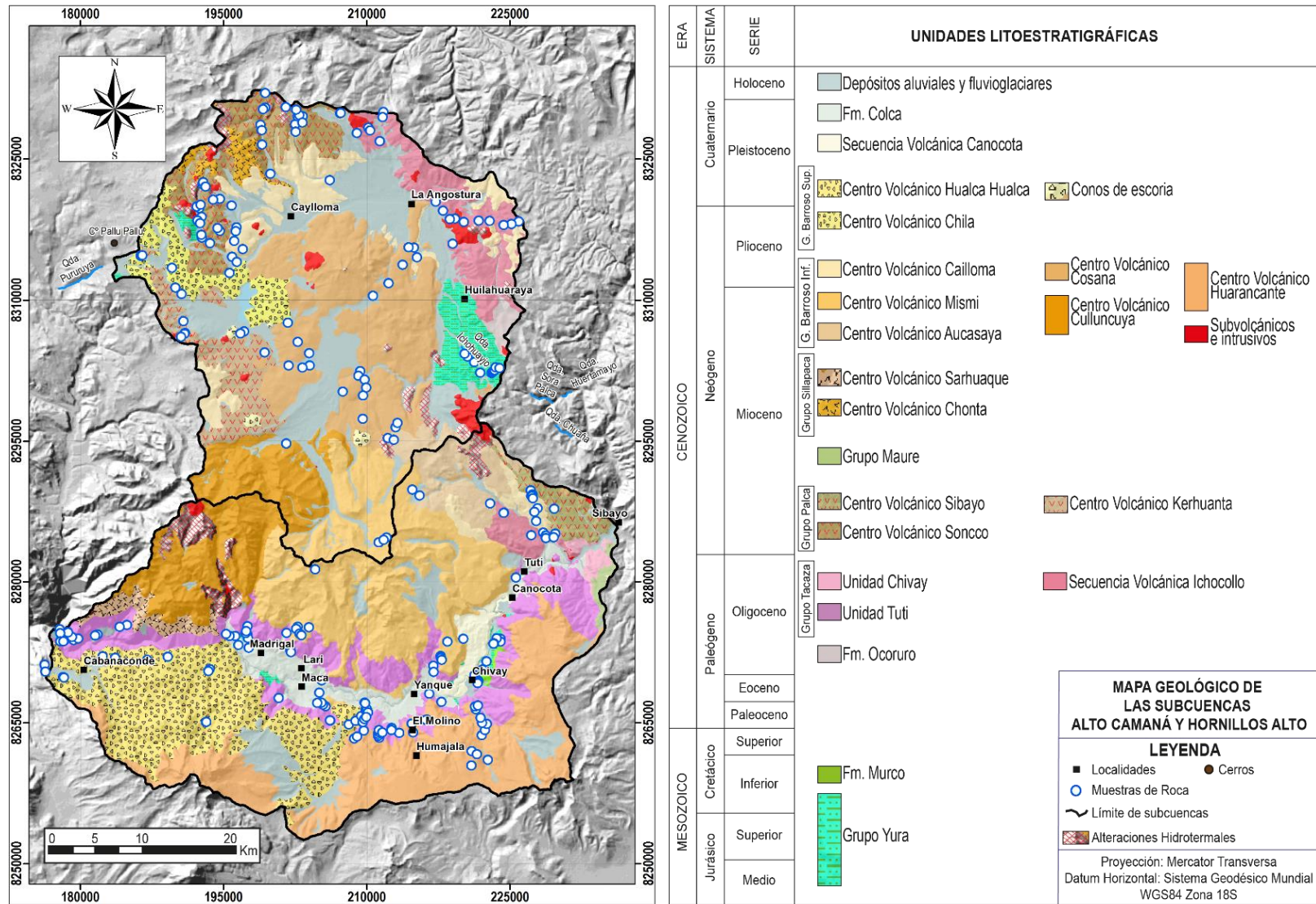


Figura 4.16: Distribución espacial de muestras litogeoquímicas en la zona de estudio

Nota: Elaboración propia

Tabla 4.4: Límites de detección de los análisis químicos en sedimentos de quebrada.

<b>Al</b>	<b>Sb</b>	<b>As</b>	<b>Be</b>	<b>Bi</b>	<b>Cd</b>	<b>Ca</b>	<b>Cr</b>	<b>Co</b>	<b>Cu</b>	<b>Tl</b>
%	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	%	ppm	ppm	ppm	ppm
0.01	5	0.05	0.5	0.01	0.02	0.01	1	0.1	0.2	0.02
<b>Fe</b>	<b>La</b>	<b>Pb</b>	<b>Mg</b>	<b>Mn</b>	<b>Mo</b>	<b>Ni</b>	<b>P</b>	<b>K</b>	<b>Sc</b>	<b>Au</b>
%	ppm	ppm	%	ppm	ppm	ppm	ppm	%	ppm	-
0.01	0.5	0.5	0.01	5	0.05	0.2	10	0.01	0.1	-
<b>Ag</b>	<b>Na</b>	<b>Sr</b>	<b>Sn</b>	<b>Ti</b>	<b>W</b>	<b>V</b>	<b>Y</b>	<b>Zn</b>	<b>Zr</b>	<b>Hg</b>
ppm	%	ppm	ppm	%	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
0.01	0.01	0.2	0.2	0.005	0.1	1	0.1	2	0.5	0.005

Nota: Elaboración propia

#### 4.2.2 Control de Calidad de resultados de los análisis (QC)

Se realizó el control de calidad de los resultados de los análisis químicos de las muestras de roca colectadas por el Proyecto 2017, mediante el método hiperbólico (Simón, 2004) (ver subtítulo 3.2.2.1). A diferencia de los sedimentos de quebrada, donde el control de calidad se asume como ya realizado en la publicación de INGEMMET (2002). Durante las campañas de campo se colectaron 26 muestras duplicadas para realizar el control de calidad. A continuación, se mostrará la validación de los elementos materia de este trabajo. En la Figura 4.17 se muestran las gráficas del método hiperbólico de As, Cr, Cu, Hg, Mo, Ni, Pb y Zn los puntos que se encuentran en la zona delimitada por la línea  $X=Y$  y la hipérbola límite de error son pares duplicados aceptables. En la Tabla 4.5 se ha resumido los resultados de la evaluación de precisión, lo cual nos lleva a la conclusión de no rechazar los análisis, debido a que sus errores están dentro de los límites precisión aceptables, con lo cual se procede con el análisis estadístico.

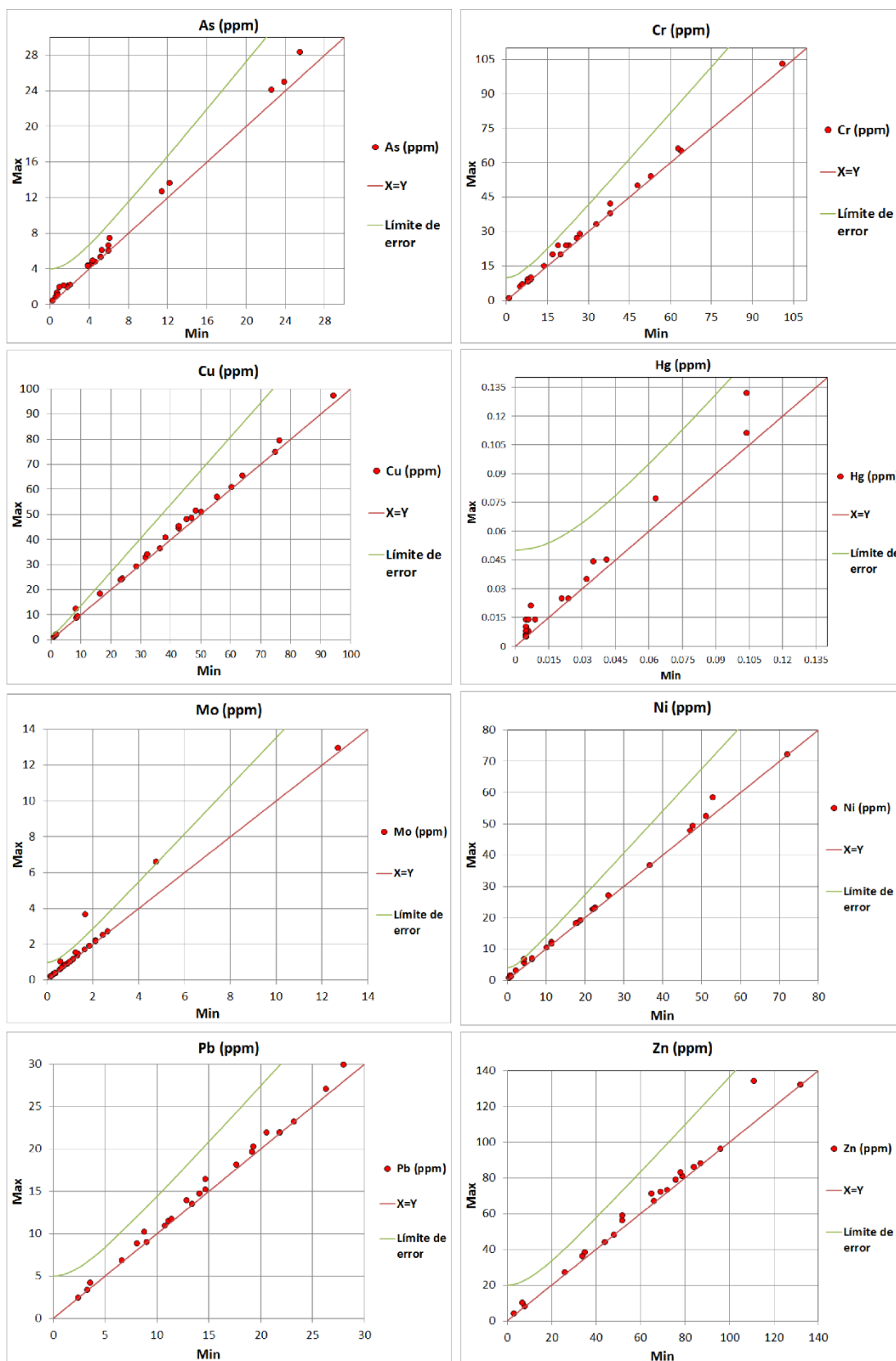


Figura 4.17: Gráfica del método hiperbólico para evaluación de precisión de As, Cr, Cu, Hg, Mo, Ni, Pb y Zn

Nota: Elaboración propia

Tabla 4.5: Resumen de resultados del método hiperbólico para evaluación de precisión

Elementos	# Muestras	# Duplicados	Rango de inserción	Pares fallidos	Porcentaje de fallos (%)	Condición
As	273	26	9.52%	0	0.00%	Alta Precisión
Cr	273	26	9.52%	0	0.00%	Alta Precisión
Cu	273	26	9.52%	1	3.85%	Buena Precisión
Hg	273	26	9.52%	0	0.00%	Alta Precisión
Mo	273	26	9.52%	2	7.69%	Buena Precisión
Ni	273	26	9.52%	0	0.00%	Alta Precisión
Pb	273	26	9.52%	0	0.00%	Alta Precisión
Zn	273	26	9.52%	0	0.00%	Alta Precisión

Nota: Elaboración propia

#### 4.2.3 Análisis estadístico

Se realizó el mismo procedimiento estadístico realizado con los sedimentos de quebrada, para determinar la distribución normal de los datos. En la Figura 4.18 se muestra los histogramas de As, Cr, Cu, Hg, Mo, Ni, Pb y Zn. Como se puede apreciar estos no presentan una distribución normal; sino que tienen, en su mayoría, un sesgo positivo de los datos.

En la Figura 4.19 se tiene los Q-Q Plots de As, Cr, Cu, Hg, Mo, Ni, Pb y Zn, no se aproximan a la línea de normalidad, a excepción del cobre; por lo que podemos afirmar que no presentan una distribución normal. Por lo tanto, es necesario aplicar los métodos fractales.

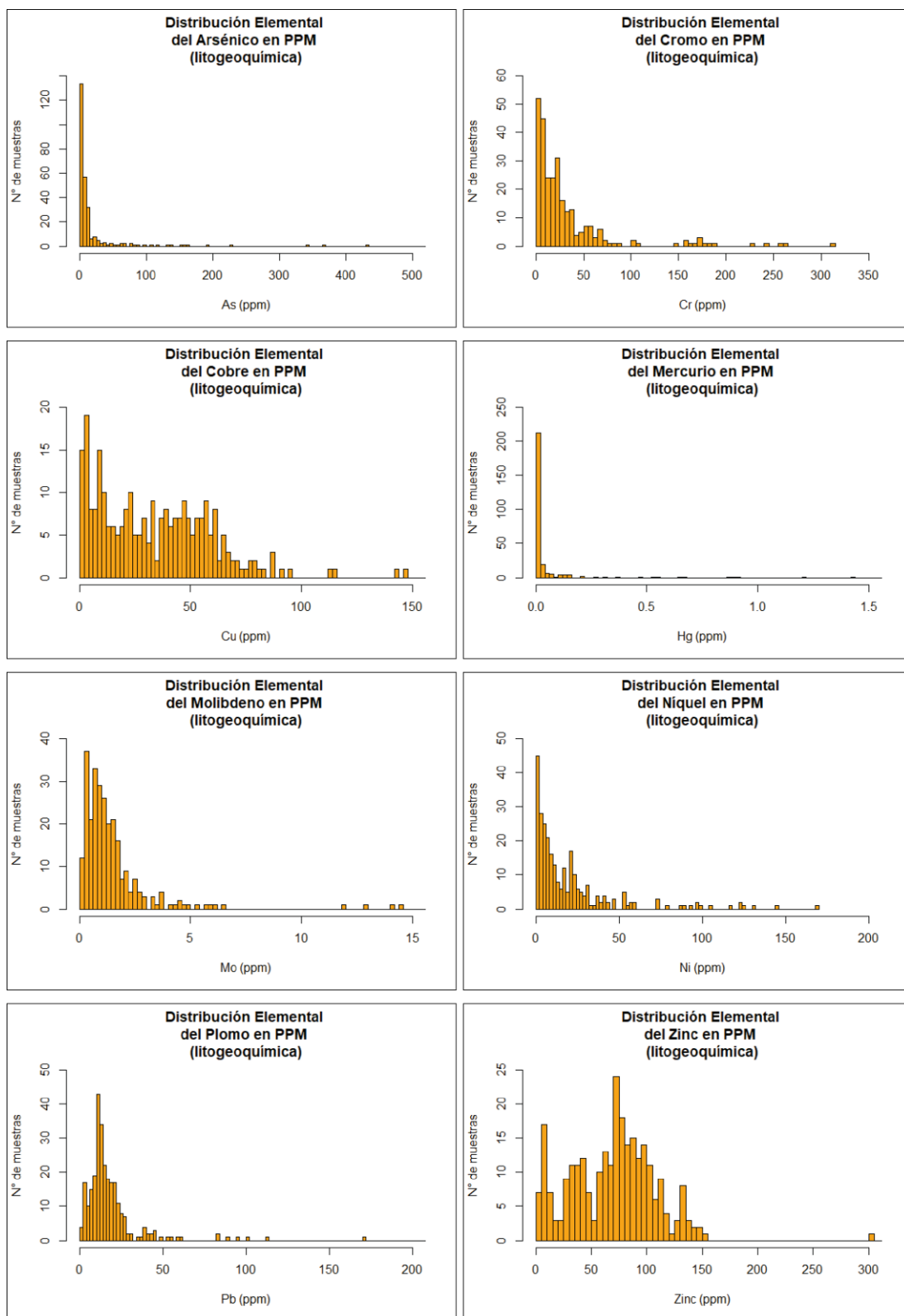


Figura 4.18: Histogramas de distribución elemental de As, Cu, Cr, Hg, Mo, Ni, Pb y Zn en litogeoquímica

Nota: Elaboración propia

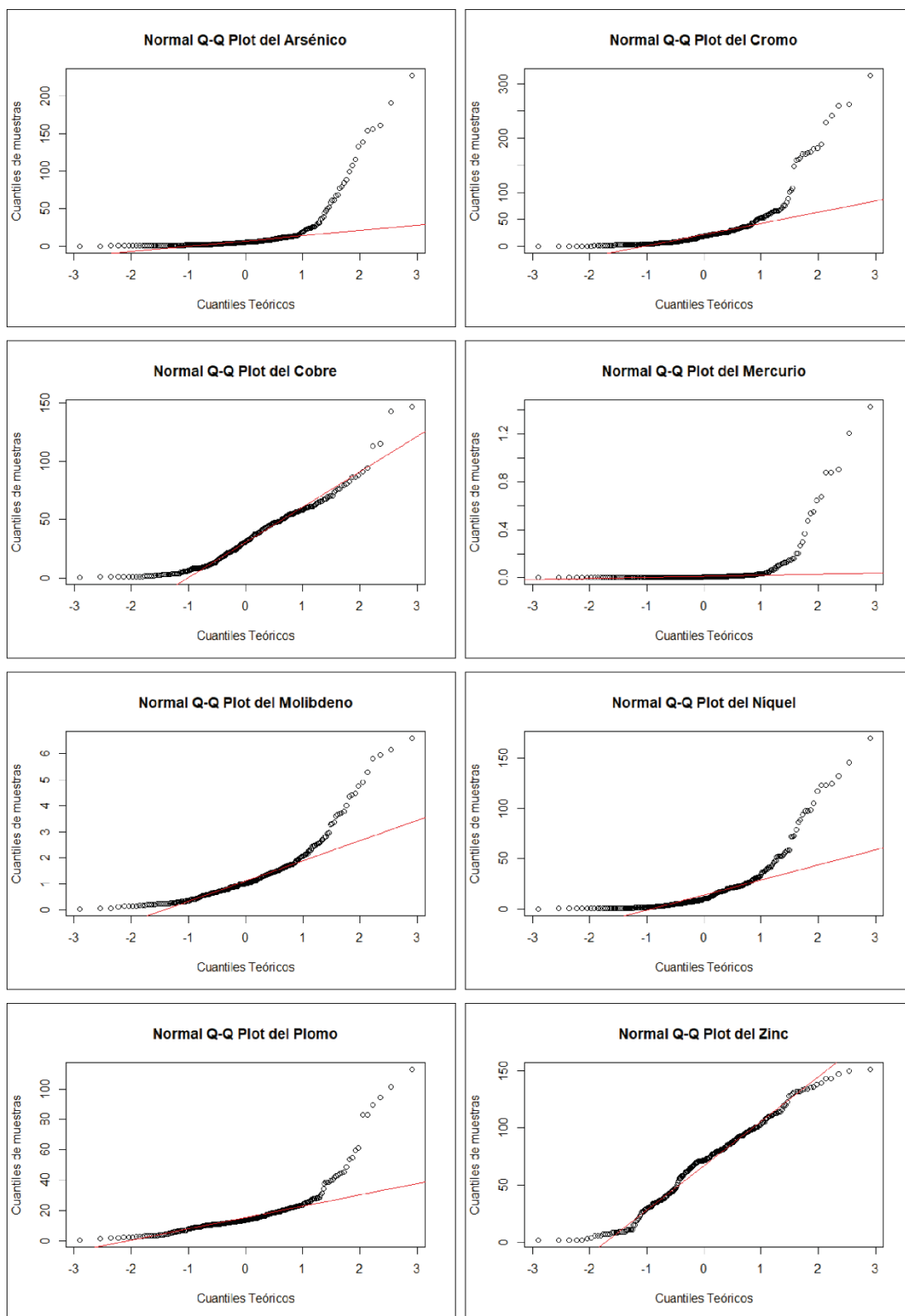


Figura 4.19: QQ-Plots del As, Cr, Cu, Hg, Mo, Ni, Pb y Zn en litogeoquímica  
 Nota: Elaboración propia

#### 4.2.4 Aplicación del modelo Number – Size (N-S)

Para la aplicación de este modelo, no es necesario un pre-procesamiento de la información, por lo tanto, se procede con el análisis directo de la base de datos (ver subtítulo 3.1.3.2). Se construyeron las gráficas logarítmicas o Log-Log Plots de la concentración elemental **S** versus el número acumulativo de muestras **N** con concentraciones mayores o iguales a “S”. Del análisis de estos Log-Log Plots, calculamos los puntos de quiebre entre las rectas de ajuste, que representan el *background* o *threshold*. El producto final son los mapas geoquímicos de puntos clasificados por el modelo fractal N-S para cada elemento.

#### **Metodología**

La implementación del modelo Number – Size (N-S) en litogeoquímica se describe de manera más detallada en los siguientes pasos:

1. En Microsoft Excel, se filtra la base de datos geoquímicos de litogeoquímica (Anexo 2) para utilizar los elementos seleccionados en esta tesis (As, Cr, Cu, Hg, Mo, Ni, Pb y Zn). Separar los datos geoquímicos en intervalos de concentración con la herramienta Análisis de Datos – Estadísticas Descriptiva.
2. En el mismo programa, elaboramos las gráficas logarítmicas o Log-Log Plots. Tomamos logaritmos de los datos de concentración **S** y de número acumulativo de muestras **N** con concentraciones mayores a “S”. De esta manera podemos graficar la función del modelo fractal N-S (ecuación 3.4) en un plano cartesiano. En el eje X colocamos las concentraciones **S** y en el eje Y, el número de muestras **N**.



3. En las gráficas logarítmicas N-S, se trazan diferentes líneas de tendencia según se observe, que puede variar entre 3 a 5 líneas con sus respectivas ecuaciones y coeficientes de Pearson. Ver Figura 4.20.
4. Con las ecuaciones de las líneas de tendencia se calcula el valor del punto de intersección entre ellas, lo que representa los puntos de quiebre o puntos de separación de las poblaciones geoquímicas (*threshold*).
5. Estos valores obtenidos se utilizan para clasificar los mapas de puntos (mapa de distribución de muestras litogeoquímicas) de cada elemento. Finalmente se obtiene el mapa geoquímico de puntos por elemento según el modelo fractal N-S, el cual está dividido en poblaciones geoquímicas desde las normales o de fondo hasta las fuertemente anómalas. Ver Figura 4.21.

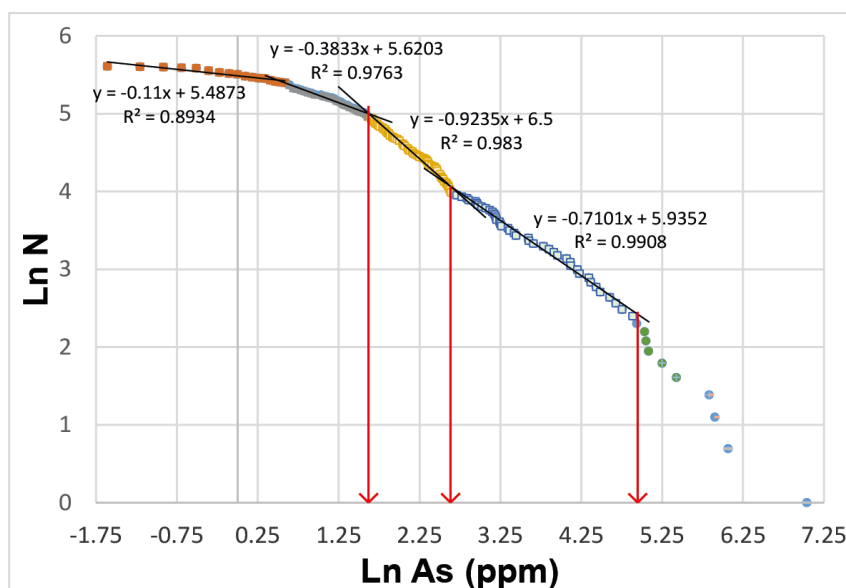


Figura 4.20: Gráfica logarítmica del modelo N-S del Arsénico en litogeoquímica

Nota: Elaboración propia

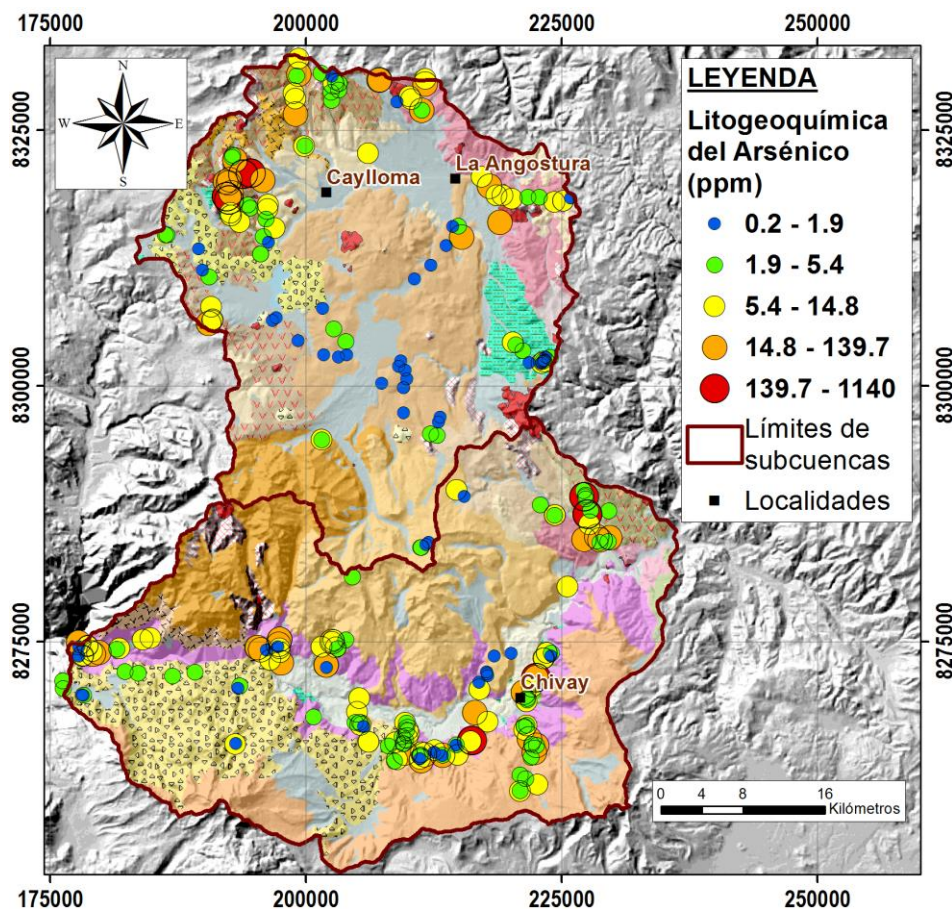


Figura 4.21: Mapa geoquímico de puntos del As, clasificado con los puntos de quiebre del modelo fractal N-S.

Nota: Elaboración propia

De manera análoga se realiza el mismo procedimiento para los otros elementos. En la Figura 4.22 se muestran las gráficas de los modelos fractales N-S de los elementos seleccionados. Cada línea representa una población geoquímica y los puntos de quiebre representan cambios en las etapas de enriquecimiento, que también se pueden interpretar como *background* y *threshold*, según sea el caso. Las gráficas muestran el comportamiento multifractal de la dispersión de los elementos estudiados, debido a que, se tiene entre 3 y 5 poblaciones geoquímicas para cada elemento (líneas con diferentes pendientes), estas pueden clasificarse como valores de fondo y anomalía. En la Tabla 4.6 se resume los resultados del modelo fractal N-S en litogeoquímica.

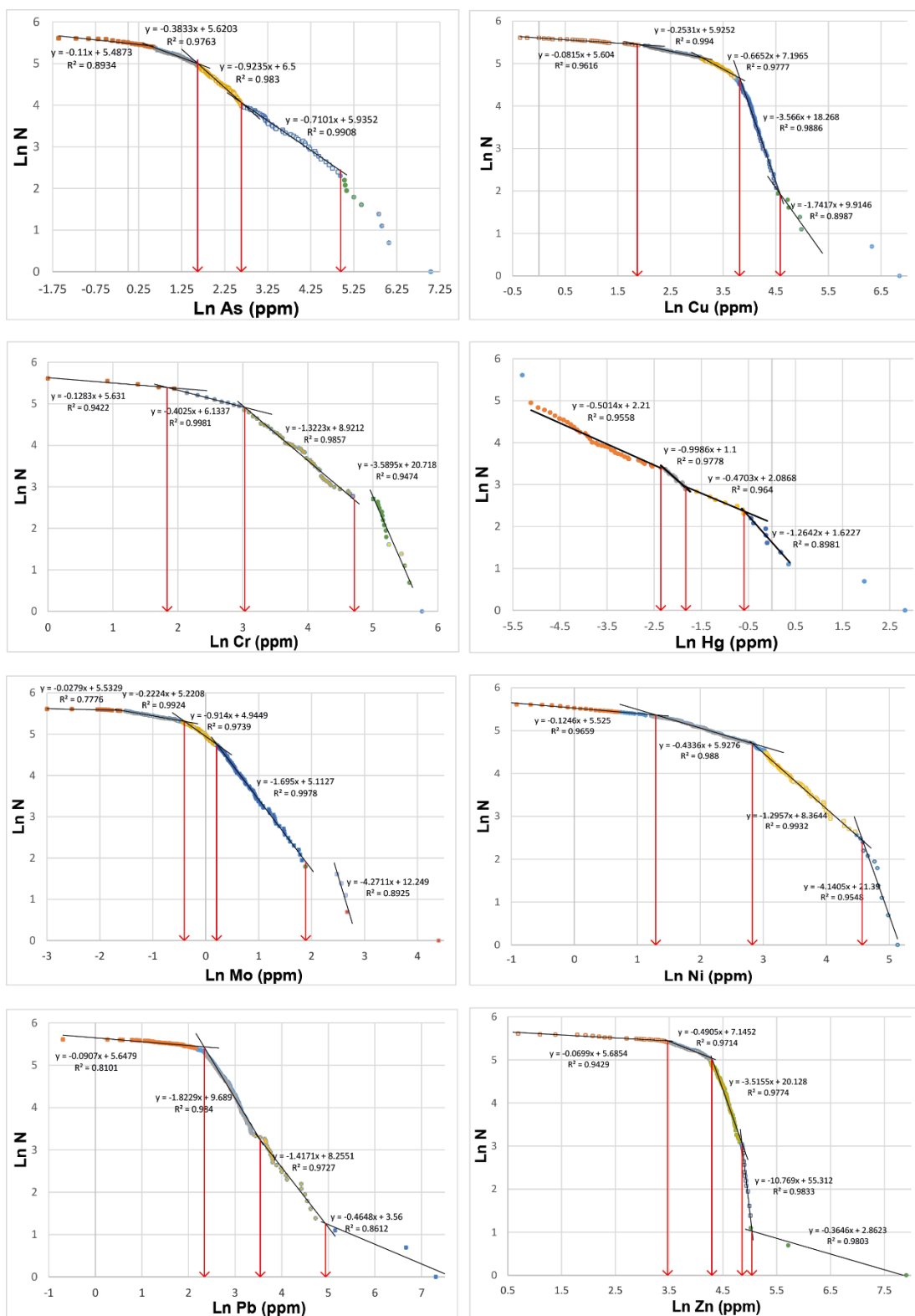


Figura 4.22: Gráfica logarítmica del modelo N-S (N-S Log-Log Plot) del As, Cr, Cu, Hg, Mo, Ni, Pb y Zn en muestras litogeoquímicas.

Nota: Elaboración propia

Tabla 4.6: Poblaciones geoquímicas obtenidas del modelo fractal N-S (ppm) en muestras litogeoquímicas

Elemento	Valor de Fondo			Anomalía	
	Bajo	Normal	Leve	Moderada	Fuerte
<b>As</b>	0.2-1.9	1.9-5.4	5.4-14.8	14.4-139.7	139.7-1140
<b>Cr</b>	1-6	7-20	21-108	109-315	-
<b>Cu</b>	0.7-6.5	6.5-44.7	44.7-93.6	93.6-944	-
<b>Hg</b>	-	0.005-0.106	0.106-0.16	0.16-0.55	0.55-16.9
<b>Mo</b>	0.05-0.67	0.67-1.24	1.24-7.21	-	7.21-81.4
<b>Ni</b>	0.4-3.59	3.59-17.28	17.28-97.51	97.5-169.5	-
<b>Pb</b>	0.5-10.6	10.6-27.9	-	27.9-137	137-1490
<b>Zn</b>	2-32	33-73	74-127	128-154	155-2720

Nota: Elaboración propia

En las Figuras 4.23 y 4.24 se muestran los mapas de distribución de las poblaciones geoquímicas delimitadas con el modelo fractal N-S.

#### Arsénico (As)

Presenta 5 poblaciones geoquímicas. En la Subcuenca Hornillos Alto, los valores de fondo bajos y normales (0.2-5.4 ppm), relacionado con tobas de cristales y lavas andesíticas de los centros volcánicos Cosana (parte central) y Mismi (en el sur), así como en limolitas y areniscas del Grupo Yura (este). Las anomalías fuertes (>139 ppm) se presentan en tobas de ceniza del Centro Volcánico Soncco y en afloramientos de rocas subvolcánicas andesíticas del Mioceno, ambos al noroeste de la subcuenca.

En la Subcuenca Alto Camaná, se encuentran anomalías fuertes en tobas con argilización débil a moderada (LIMs, goe, diseminación de sulfuros, cz-ser) del Centro Volcánico Cailloma al noreste; la Unidad Tuti alberga anomalías moderadas (14-139 ppm) en tobas con argilización moderada (OxsFe y diseminación de sulfuros, cao) y en brechas hidrotermales a lo largo de la parte central de la subcuenca (Figura 4.23A).

### Cromo (Cr)

Presenta 4 poblaciones geoquímicas. En la Subcuenca Hornillos Alto, los valores de fondo bajos (>6 ppm) se encuentran en tobas líticas del Centro Volcánico Soncco al norte y tobas vítreas del Centro Volcánico Cailloma al noroeste. Las concentraciones normales (7-20 ppm) están en tobas de composición andesítica del Centro Volcánico Soncco al noroeste y en cuarzoarenitas del Grupo Yura al sureste. Se encuentran anomalías leves (21-108 ppm) en flujos de lava del Centro Volcánico Cosana en la parte central, en tobas de la Secuencia Volcánica Ichocollo asociadas con un Subvolcánico Andesítico al noreste y en tobas de ceniza del Centro Volcánico Chila al oeste.

En la Subcuenca Alto Camaná, los valores bajos y normales se encuentran principalmente en lavas andesíticas y rocas alteradas (OXsFe, silicificaciones y diseminaciones de sulfuros) de la Unidad Tuti a lo largo de la parte central. Las anomalías leves están en tobas de cristales del Centro Volcánico Hualca Hualca al oeste y en flujos de lava del Centro Volcánico Mismi en la parte central. Las anomalías moderadas (109-315 ppm) están concentradas al este de la subcuenca, específicamente en andesitas levemente alteradas (presencia de OxsFe, sílice y cloritas en oquedades) de los centros volcánicos Cailloma y Sibayo (Figura 4.23B).

### Cobre (Cu)

Se delimita 4 poblaciones geoquímicas. En la Subcuenca Hornillos Alto, los valores más bajos (>6.5 ppm) están en tobas vítreas del Centro Volcánico Cailloma al oeste, y en las tobas de ceniza de composición intermedia (dacítica y andesítica) del Centro Volcánico Soncco al norte. Valores normales (6.5-44.7 ppm) son hallados en cuarzoarenitas del Grupo Yura al sureste y tobas de ceniza de la Secuencia Volcánica Ichocollo al noreste. Las anomalías leves (44.7-93.6 ppm) se encuentra en

tobas de ceniza de composición andesítica del Centro Volcánico Chila al oeste, en flujos de lava del Centro Volcánico Cosana. Las anomalías fuertes (93.6-944 ppm) se encuentran en las tobas de ceniza del Centro Volcánico Soncco en contacto con la zona de alteración hidrotermal al noroeste de la subcuenca.

En la Subcuenca Alto Camaná, los valores normales se presentan en tobas de ceniza y andesitas de la Unidad Tuti y en los centros volcánicos Mismi, Huarancante y Hualca Hualca a lo largo de la parte central de la subcuenca. Los valores altos (>93.6 ppm) se presentan en tobas alteradas (leve argilización, venas de yeso, LIMs y goe en pátinas) de la Unidad Tuti (al oeste y centro) y en rocas alteradas con OxsFe (LIMs y goe, posible protolito: tobas) del Centro Volcánico Huarancante (al sureste) (Figura 4.23C).

#### Mercurio (Hg)

Dividido en 4 poblaciones geoquímicas por el modelo. En Hornillos Alto, solamente se tienen valores normales (<0.106 ppm) en toda la subcuenca.

En la Subcuenca Alto Camaná, los valores normales se asocian a las tobas y andesitas de la Unidad Tuti, y los centros volcánicos Huarancante, Mismi y Hualca Hualca. Las anomalías moderadas (0.16-0.55 ppm) se encuentran en rocas alteradas con OxsFe, arcillas (cao), cuarzo y sericita (posible protolito: tobas) del Centro Volcánico Hualca Hualca. Las anomalías fuertes (>0.55 ppm) se encuentran rocas alteradas y brechas hidrotermales (silicificación, OxsFe, diseminación de sulfuros y arcillas) de la Unidad Tuti (parte central sur), en rocas alteradas de la Secuencia Volcánica Ichocollo (extremo este), y en brechas y alteraciones hidrotermales (fuerte fracturamiento, OxsFe, arcillas y sulfuros) del Centro Volcánico Mismi al norte (Figura 4.23D).

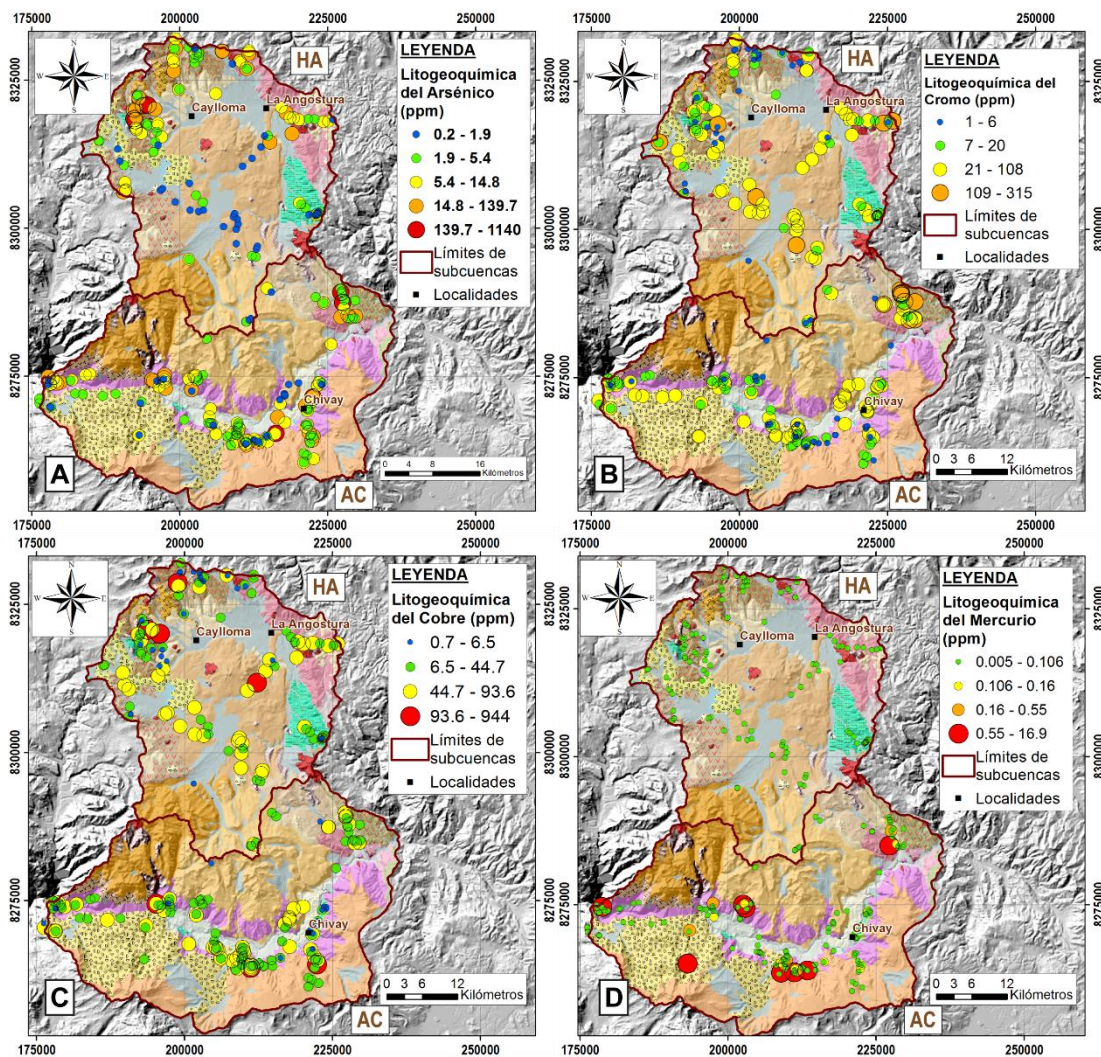


Figura 4.23: Mapas geoquímicos delineados con el modelo fractal N-S de (A) Arsénico, (B) Cromo, (C) Cobre y (D) Mercurio en muestras litogeoquímicas. HA: Hornillos Alto; AC: Alto Camaná.

Nota: Elaboración propia

### Molibdeno (Mo)

Presenta 4 poblaciones geoquímicas. En la Subcuenca Hornillos Alto, las poblaciones de fondo (<1.2 ppm) se encuentran en los siliciclásticos del Grupo Yura (al suroeste), en flujos de lava andesítica y tobas de ceniza de los centros volcánicos Cosana, Kerhuanta, Soncco y Cailloma al noroeste, también en la Secuencia Volcánica Ichocollo al noreste. Las tobas de ceniza andesítica del Centro Volcánico Cailloma al extremo norte presentan valores fuertemente anómalos (14 ppm).

En la Subcuenca Alto Camaná, los valores más bajos se concentran en los afloramientos de los siliciclásticos del Grupo Yura (al este de Chivay), los valores normales se encuentran en tobas y lavas andesíticas de la Unidad Tuti a lo largo de la parte central de la subcuenca. Las anomalías altas (>7.2 ppm) se presentan tobas alteradas con silicificación moderada (OxsFe, sulfuros y sílice) del Centro Volcánico Cailloma al extremo este (Figura 4.24E).

#### Níquel (Ni)

Delimitado en 4 poblaciones geoquímicas. En Hornillos Alto, los valores de fondo (<17.28 ppm) se observan en los siliciclásticos del Grupo Yura al sureste, tobas líticas y de cristales en el Centro Volcánico Soncco al norte, también en las tobas vítreas del Centro Volcánico Cailloma al oeste. Las anomalías leves (17-97 ppm) se presentan en tobas y lavas andesíticas de los centros volcánicos Chila (al oeste) y Cosana (parte central). Las anomalías fuertes (>97 ppm) se encuentran en lavas andesíticas de los centros volcánicos Soncco y Kerhuanta (al oeste), en igual forma se presenta también estos valores en tobas de ceniza levemente alteradas (OXsFe y OXsMn) de la Secuencia Volcánica Ichocollo en contacto con el Centro Volcánico Cailloma al extremo este.

En la Subcuenca Alto Camaná, los valores de fondo bajos y normales se encuentran en las secuencias volcánicas de la Unidad Tuti a lo largo de la parte central y en las tobas de cristales del Centro Volcánico Huarancante al sureste; las anomalías leves se hallan en tobas de ceniza y de cristales del Centro Volcánico Hualca Hualca al oeste; mientras que fuertes anomalías de este elemento son encontradas en andesitas de los centros volcánicos Cailloma y Sibayo al extremo este de la subcuenca (Figura 4.24F).



### Plomo (Pb)

Presenta 4 poblaciones geoquímicas. En la Subcuenca Hornillos Alto, los valores más bajos (<10.6 ppm) están en los siliciclásticos del Grupo Yura al sureste y en lavas andesíticas y tobas de ceniza del Centro Volcánico Chila al oeste. Los valores normales (10.6-27.9 ppm) son albergados en tobas y lavas del Centro Volcánico Cosana en la parte central, en las tobas vítreas del Centro Volcánico Cailloma al oeste; en tobas líticas y de ceniza pertenecientes al Centro Volcánico Soncco al norte. Se tienen anomalías moderadas (27.9-137 ppm) relacionadas con zonas de alteración hidrotermal (OxsFe, pátinas de sulfuros), en contacto con las tobas del Centro Volcánico Soncco al oeste, en la misma zona se tienen las anomalías en afloramientos subvolcánicos andesíticos del Mioceno. Al noreste, las anomalías moderadas se restringen a las tobas de ceniza de composición dacítica pertenecientes a la Secuencia Volcánica Ichocollo.

En la Subcuenca Alto Camaná, los valores de fondo están asociados a los centros volcánicos Huarancante al sureste, Cailloma y Sibayo al noreste, Mismi al norte y Hualca Hualca al oeste. Las anomalías moderadas se presentan en rocas alteradas (diseminación de sulfuros, OXsFe y arcillas) de la Unidad Tuti en la parte central, mientras que las anomalías fuertes (<137 ppm) se hallan al oeste en brechas y alteraciones hidrotermales (fuerte silicificación, OxsFe, moderados fracturamientos) de la misma unidad (Figura 4.24G).

### Zinc (Zn)

Presenta 5 poblaciones geoquímicas. En la Subcuenca Hornillos Alto las poblaciones de fondo (<73 ppm) se encuentran principalmente en los siliciclásticos del Grupo Yura al sureste, en las tobas vítreas del Centro Volcánico Cailloma al oeste y en tobas de ceniza de la Secuencia Volcánica Ichocollo al noreste. Las anomalías

leves (74-127 ppm) las encontramos en tobas y lavas de los centros volcánicos Cosana (parte central), Chila (al oeste) y Soncco (al noroeste). Las anomalías fuertes (>155 ppm) se hallan en tobas de ceniza del Centro Volcánico Soncco en contacto con la zona de alteración hidrotermal al noroeste.

En la Subcuenca Alto Camaná, los valores de fondo los encontramos en los siliciclásticos del Grupo Yura y la Formación Murco al este y en las tobas de cristales del Centro Volcánico Hualca Hualca al oeste. Las anomalías leves se presentan en flujos de lava de la Unidad Tuti a lo largo de la parte central y del Centro Volcánico Mismi al norte. Se tienen anomalías moderadas (128-154 ppm) en areniscas del Grupo Yura y la Formación Colca, y en un intrusivo diorítico al oeste de la subcuenca, cerca de la mina Madrigal (Figura 4.24H)

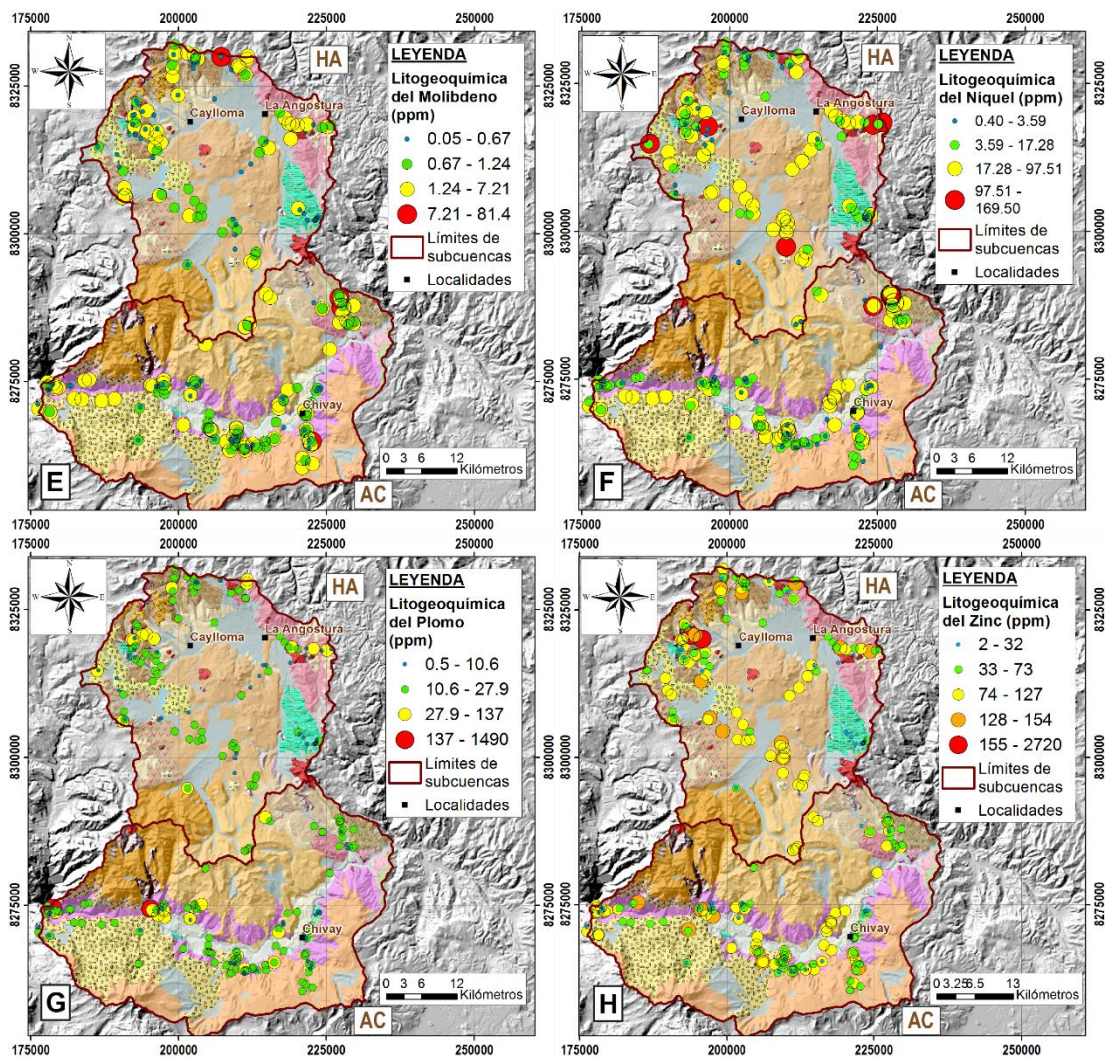


Figura 4.24: Mapas geoquímicos delineados con modelo fractal N-S del (E) Molibdeno, (F) Níquel, (G) Plomo y (H) Zinc en muestras litogeoquímicas. HA: Hornillos Alto; AC: Alto Camaná.

Nota: Elaboración propia

## CAPÍTULO 5

### VALIDACIÓN DEL MODELADO FRACTAL Y DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos mediante los modelos fractales C-A y N-S, han permitido elaborar mapas de anomalías geoquímicas en sedimentos de quebrada y rocas. Con respecto a los sedimentos de quebrada, se pueden generar mapas de isovalores en áreas, los métodos fractales (C-A y N-S), identifican prácticamente las mismas zonas anómalas de los elementos estudiados. Sin embargo, se diferencian notablemente en el tamaño de las áreas delimitadas.

La diferencia entre las áreas delimitadas puede deberse a dos razones: En primer lugar, a la variabilidad espacial y poca densidad de datos existente para sedimentos de quebrada en la zona de estudio, estos factores influyen en las relaciones entre la concentración y el área, lo que afecta la determinación de puntos de quiebre de las rectas en una gráfica logarítmica, es decir los puntos que consideramos *background* y *threshold*. En segundo lugar, como se precisó anteriormente, el modelo N-S no requiere de un tratamiento previo de los datos, como en el modelo C-A, por lo tanto, se trabaja directamente con la información que se tiene, esto puede ser otra razón por la que se obtienen diferencias en el tamaño de

las zonas anómalas. Por otra parte, se observó que el modelo fractal N-S, delimita mejor las poblaciones geoquímicas, lo cual permite diferenciar con mayor facilidad las zonas donde presentan anomalías en comparación al modelo fractal C-A.

En el caso de la litogeoquímica (rocas), se ha calculado los valores de fondo (*background*) y umbrales (*threshold*) basado en el modelo N-S, que permitió realizar un mapa de puntos para indicar las anomalías. Debido a la poca dispersión de datos, por el muestreo aleatorio estratificado realizado, no es posible tener un mapa de isovalores por áreas.

### **5.1 Validación de los Modelos Fractales**

Para validar que los resultados de los modelos fractales funcionan para la determinación de anomalías geoquímicas, se realiza la comparación de las diferentes capas de información geológica existente (Afzal et al., 2010; Hassanpour & Afzal, 2011; Hashemi & Afzal, 2012, Afzal et al., 2016) en la zona, como pueden ser la geología estructural, yacimientos minerales existentes, zonas de denuncios mineros, estudios de prospección previos entre otros.

Como caso práctico para la validación, se tomará como base los mapas de isovalores de sedimentos de quebradas generado con el uso del modelo N-S. La comparación se realizará con la información geológica disponible para determinar cualitativamente su grado de correlación, estas son: las ocurrencias y yacimientos existentes, geología estructural y la litogeoquímica que se detalla a continuación:

### 5.1.1 Correlación: Sedimentos de Quebrada - ocurrencias y yacimientos minerales existentes

En la Figura 5.1 se observa la ubicación de ocurrencias y yacimientos minerales existentes dentro de las subcuencas, de los elementos As, Cu, Pb y Zn (estos elementos son explotados en yacimientos epitermales de la zona de trabajo). Esto se compara con las zonas anómalas delimitadas por el modelo fractal N-S de los elementos.

En el caso de las anomalías de As, existe una correlación moderada entre las anomalías y los yacimientos existentes. En la Subcuenca Alto Camaná, las anomalías se relacionan con las minas Madrigal (Cu-Pb-Zn) y Satélite 20 (Pb-Ag-Zn-Cu). En la Subcuenca Hornillos Alto, se observa que las minas ubicadas al noreste se sitúan cerca de las zonas levemente anómalas (Figura 5.1A).

Para el Cu, las anomalías fuertes contienen al yacimiento de Madrigal (Cu), y a los proyectos Satélite 20 y San Felipe (Cu-Pb-Zn) en Alto Camaná. En la Subcuenca Hornillos Alto, las ocurrencias polimetálicas del distrito minero Caylloma se relacionan con zonas levemente anómalas de Cu al noroeste (Figura 5.1B).

En el caso del Pb y Zn, dos de las tres zonas anómalas delineadas contienen a la mayoría de los yacimientos, lo que nos indica que hay una correlación alta. Al noroeste de la Subcuenca Hornillos Alto las anomalías contienen a los yacimientos Coriminas, Cuchilladas, Chonta, El Diablo, Lenuria 34 y Lenuria 35 (Pb-Ag-Zn-Cu). Al noroeste de Alto Camaná, las anomalías contienen a las minas Madrigal (Cu, Pb Zn), San Felipe (Cu-Pb-Zn) y Satélite 20 (Pb-Ag-Zn-Cu) (Figura 5.1C y 5.1D).

Por lo tanto, podemos decir que existe una correlación positiva entre las zonas anómalas y los yacimientos existentes.

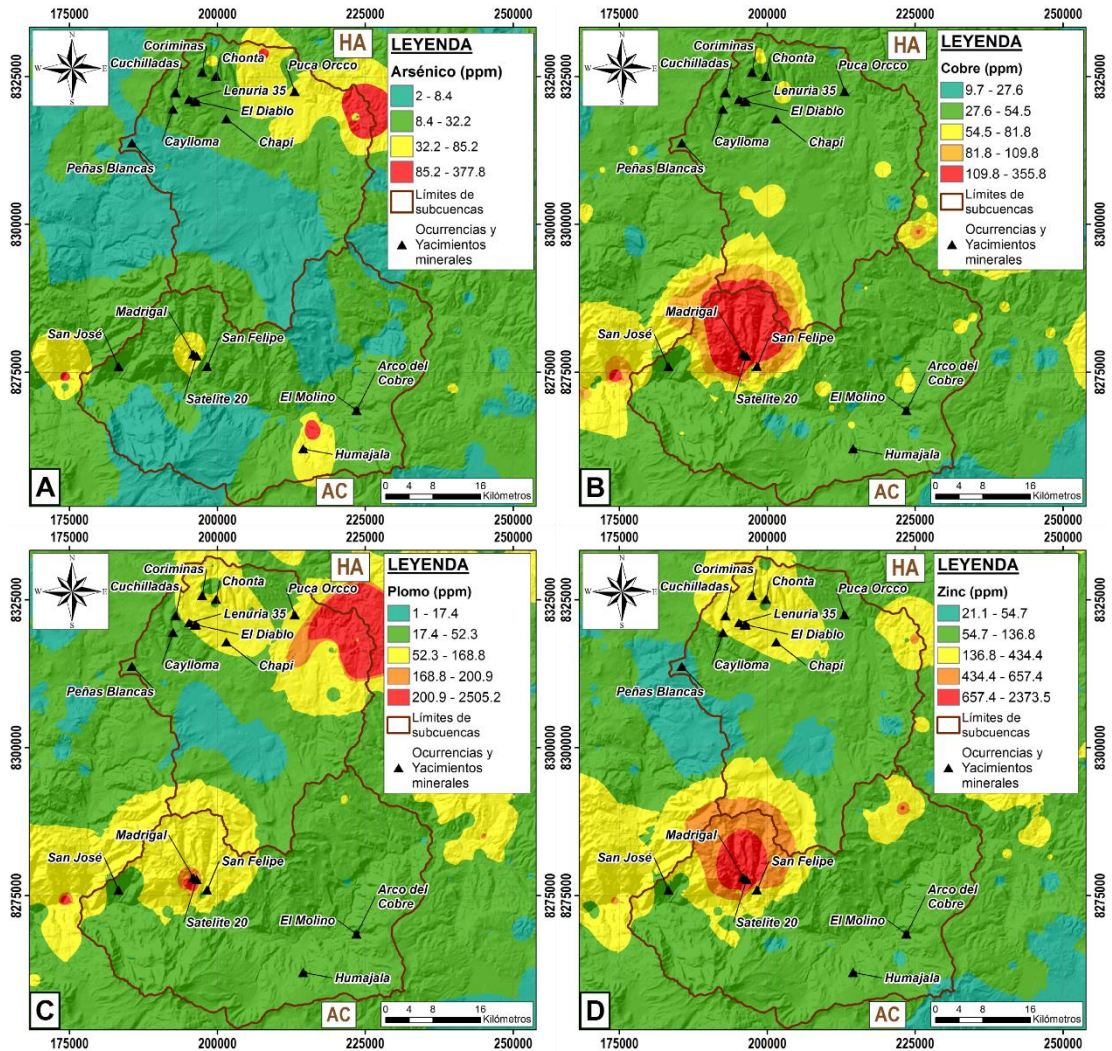


Figura 5.1: Comparación de las zonas anómalas delineadas con el modelo fractal N-S con las ocurrencias y yacimientos minerales existentes. HA: Hornillos Alto; AC: Alto Camaná

Nota: Elaboración propia

### 5.1.2 Correlación: Sedimentos de Quebrada - Geología estructural

Existe una correlación positiva entre las fallas y las zonas anómalas delineadas con los modelos fractales. Ver las Figuras 5.2 y 5.3.

Las anomalías del As y Pb tienen una buena correlación con las fallas al noreste de la Subcuenca Hornillos Alto, y al noroeste de la Subcuenca Alto Camaná (Figuras 5.2A y 5.3G). En el caso de las anomalías de Cr, se relacionan solamente con las fallas al noreste de Subcuenca Hornillos Alto (Figuras 5.2C).

Para el Cu parecen solamente estar relacionadas con las fallas al noroeste de la Subcuenca Alto Camaná (Figura 5.2B). Las anomalías de Ni se relacionan con las fallas al noreste de Hornillos Alto y con las que se encuentran al extremo noreste de la Subcuenca Alto Camaná (Figura 5.3F).

Las zonas anómalas del Zn se correlacionan con las fallas al noreste de la Subcuenca Hornillos Alto, también con las del noreste y noroeste de la Subcuenca Alto Camaná (Figura 5.3H). El Hg y Mo parecen no tener relación alguna con la geología estructural de la zona, sino más con controles litológicos (Figuras 5.2D y 5.3E).



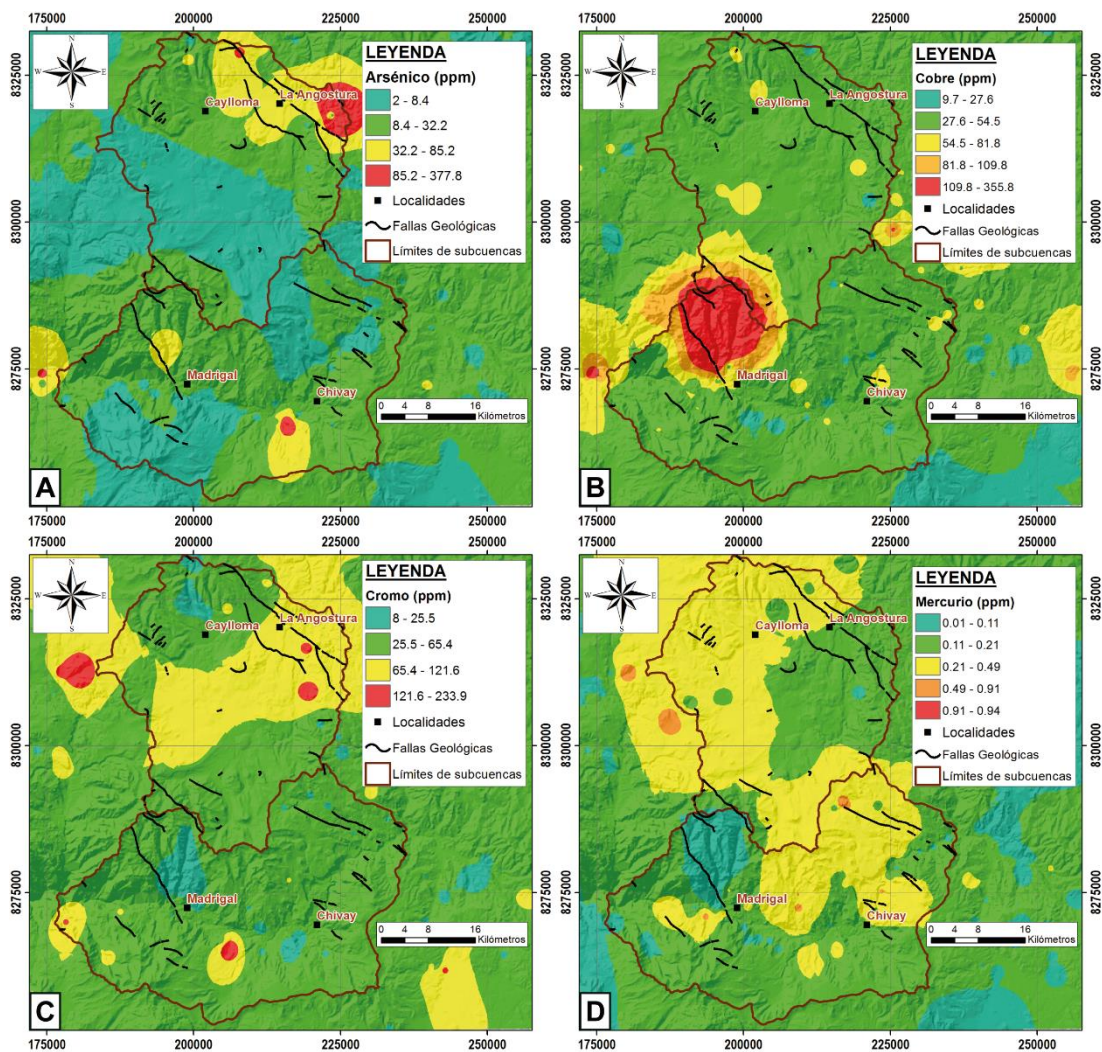


Figura 5.2: Comparación entre los mapas geoquímicos delineados con el modelo fractal N-S en sedimentos de quebrada y la geología estructural para el As, Cu, Cr y Hg

Nota: Elaboración propia

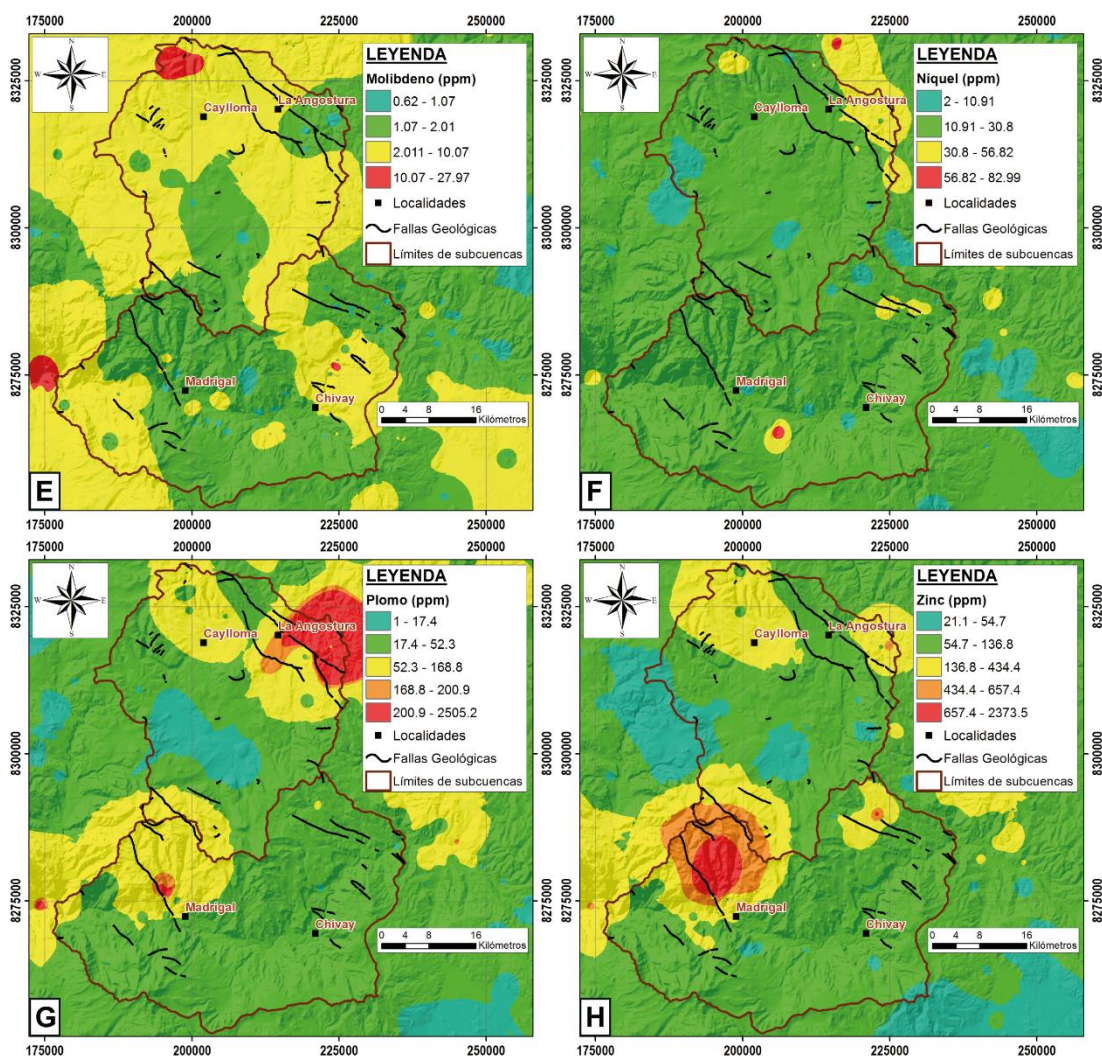


Figura 5.3: Comparación entre los mapas geoquímicos delineados con el modelo fractal N-S en sedimentos de quebrada y la geología estructural para el Mo, Ni, Pb y Zn

Nota: Elaboración propia

### 5.1.3 Correlación: Sedimentos de Quebrada - Litogeoquímica/Geología Estructural

En la Figura 5.4 se hace la comparación entre los valores anómalos en litogeoquímica y las zonas anómalas delineadas con el modelo fractal N-S en sedimentos de quebrada, relacionándolas con la geología estructural

En el caso del As, tenemos que los valores anómalos coinciden al norte de Hornillos Alto, al parecer controlados por fallas con dirección NO-SE y relacionados con la Secuencia Volcánica Ichocollo, Centro Volcánico Cailloma y Subvolcánicos Andesíticos del Mioceno (Figura 5.4A).

Para el Cr, las anomalías coinciden en la parte central y noreste de Hornillos Alto, tiene cierta relación con las fallas NO-SE al noreste y se relaciona con el Centro Volcánico Cosana (Figura 5.4B).

El Cu, las anomalías coinciden en la zona de la Mina Madrigal, al noroeste de Alto Camaná, relacionadas con las zonas de alteración hidrotermal en los alrededores de la mina y el Centro Volcánico Culluncuya, además se relacionan con las fallas NO-SE del noroeste de esta subcuenca (Figura 5.4C).

En el Hg, existe coincidencia de anomalías al noreste de Alto Camaná, relacionadas con fallas NO-SE y los afloramientos de los centros volcánicos Cailloma y Sibayo de esa misma zona (Figura 5.4D).

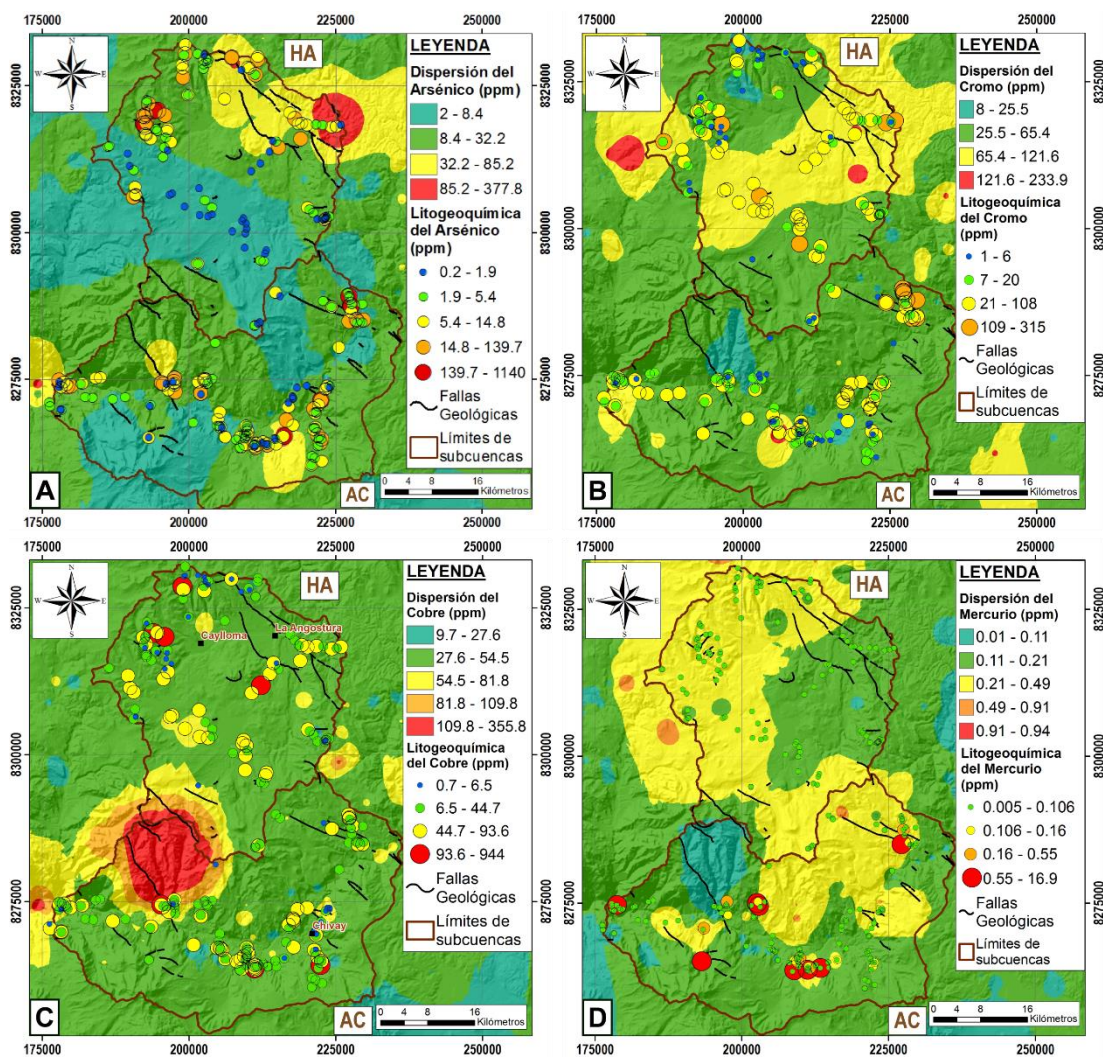


Figura 5.4: Comparación entre las anomalías de litogeoquímica y sedimentos de quebrada delineadas con el modelo fractal N-S de los elementos As, Cr, Cu y Hg. HA: Hornillos Alto; AC: Alto Camaná

Nota: Elaboración propia

El Mo presenta la principal coincidencia de anomalías al norte de la Subcuenca Hornillos Alto, al parecer controladas por el Centro Volcánico Soncco y los polígonos de Alteración Hidrotermal, además de estar relacionadas débilmente con las fallas NO-SE del noreste de la subcuenca (Figura 5.5A).

Para el Ni, las anomalías coinciden al noreste de la Subcuenca Hornillos Alto, relacionándose con afloramientos de subvolcánicos de composición andesítica,

Secuencia Volcánica Ichocollo y el Centro Volcánico Cailloma; en la Subcuenca Alto Camaná, al noreste existe coincidencia de anomalías relacionadas con fallas NO-SE, también se relacionan con la Secuencia Volcánica Ichocollo y con los centros volcánicos Sibayo y Cailloma (Figura 5.5B).

En el caso del Pb, las anomalías moderadas en litogeoquímica coinciden con las zonas anómalas de sedimentos de quebrada al norte de la Subcuenca Hornillos Alto, relacionándose con la Secuencia Volcánica Ichocollo y los centros volcánicos Cailloma y Soncco; en la Subcuenca Alto Camaná, las anomalías coinciden al noroeste, en los alrededores de la Mina Madrigal, así como están relacionadas con una falla NO-SE que cruza la zona anómala (Figura 5.5C).

Finalmente, para el Zn, las anomalías coinciden al noroeste de la Subcuenca Hornillos Alto, en los alrededores del distrito minero Caylloma, en donde afloran el Centro Volcánico Soncco, Subvolcánicos Andesíticos del Mioceno y zonas de Alteración Hidrotermal; además de presentarse sistemas de fallas NE-SO y NO-SE. En la Subcuenca Alto Camaná, los valores anómalos se presentan al noroeste de la subcuenca, en los alrededores de la mina Madrigal, en donde se tiene fallas NO-SE y zonas de Alteración Hidrotermal relacionadas con el Centro Volcánico Culluncuya (Figura 5.5D).

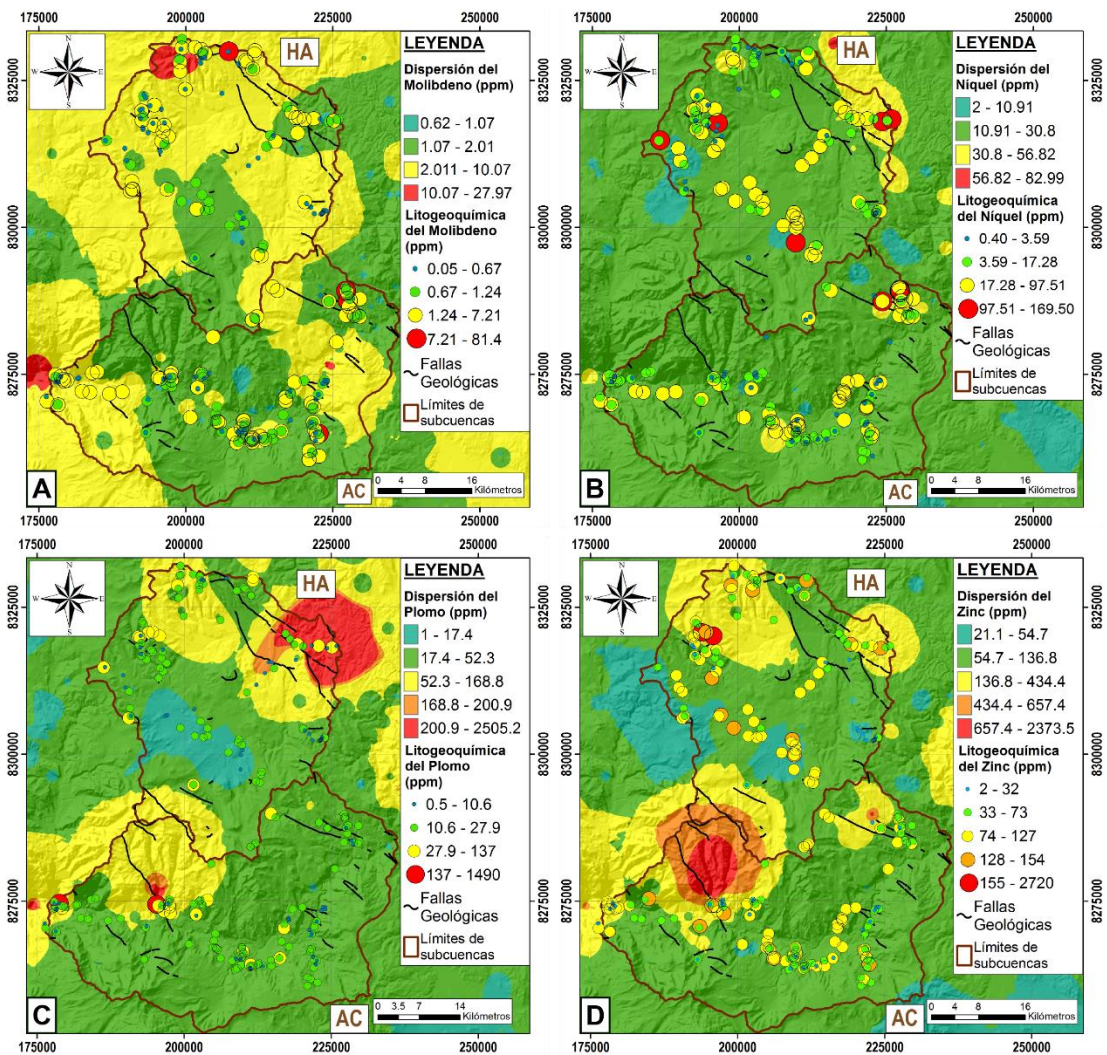


Figura 5.5: Comparación entre las anomalías de litogeoquímica y sedimentos de quebrada delineadas con el modelo fractal N-S de los elementos As, Cr, Cu y Hg. HA: Hornillos Alto; AC: Alto Camaná  
 Nota: Elaboración propia

## **5.2 Discusión**

Los resultados de este modelado fractal serán discutidos con los obtenidos en la publicación INGEMMET (2002). Las **Figuras 5.6, 5.7 y 5.8** muestran una comparación de los mapas geoquímicos procesados con el modelo fractal N-S del As, Cr, Cu, Mo, Ni, Pb y Zn con los mapas geoquímicos extraídos de INGEMMET (2002). Como se puede observar, se obtienen las mismas zonas anómalas, lo cual valida el modelo. Incluso para algunos elementos, como en el As, Ni y Zn, las anomalías son delineadas con mayor precisión. Esto nos muestra las ventajas del uso de los modelos fractales, además de su sencilla aplicación.

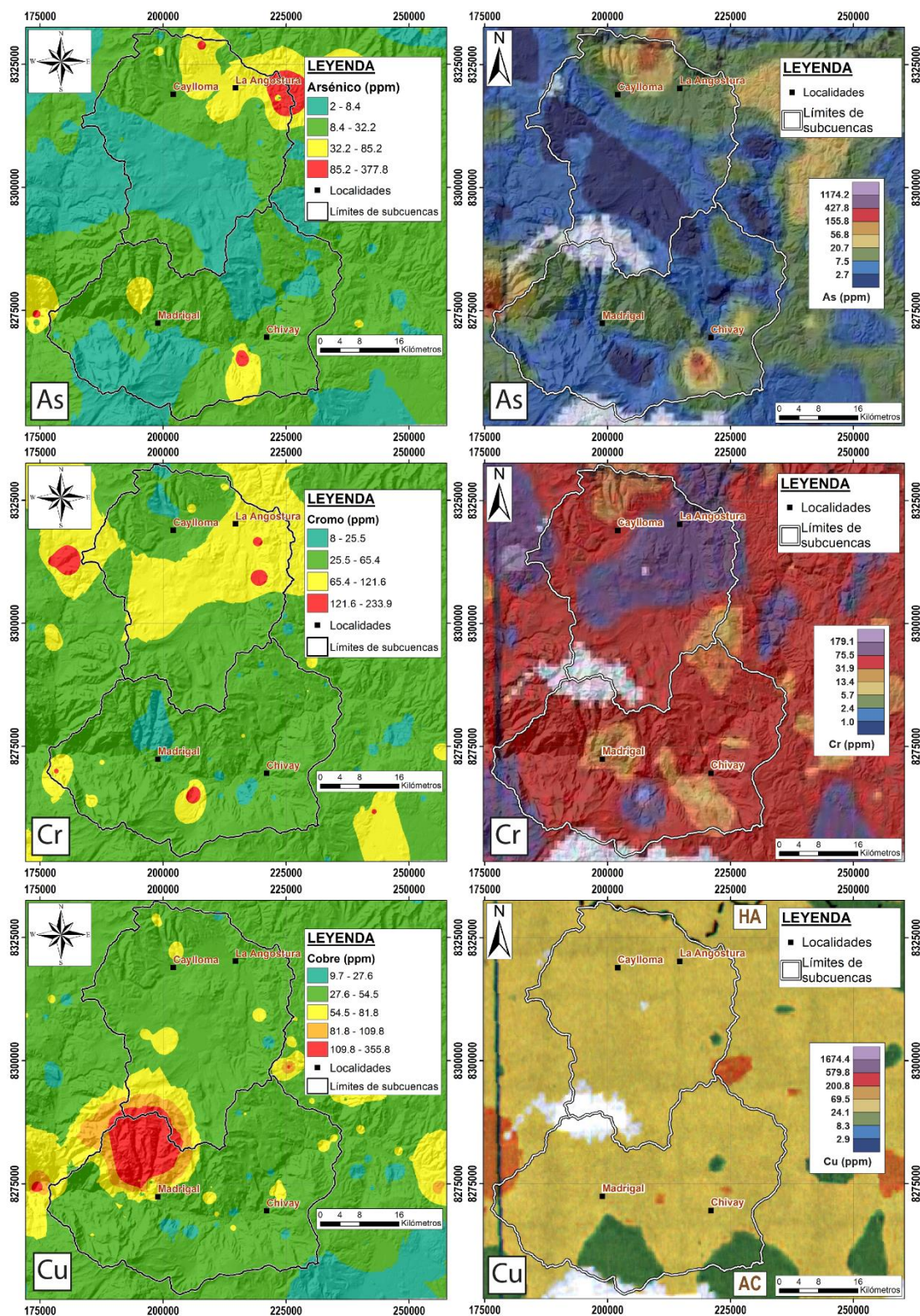


Figura 5.6: Comparación entre mapas geoquímicos del presente estudio y publicaciones previas para el As, Cr y Cu

Nota: Mapas a la izquierda de elaboración propia, mapas a la derecha extraídos de INGEMMET (2002).



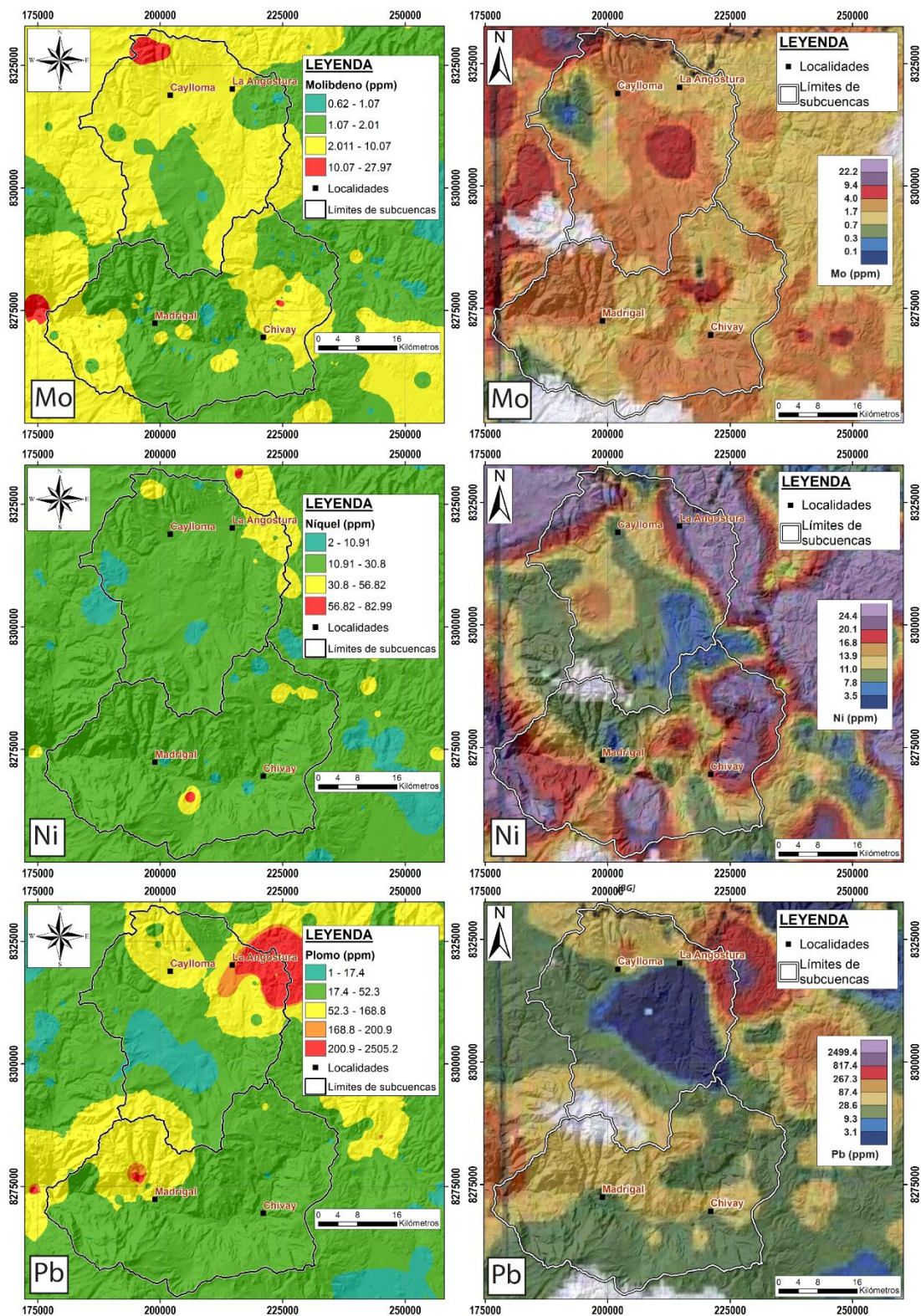


Figura 5.7: Comparación entre mapas geoquímicos del presente estudio y publicaciones previas para el Mo, Ni y Pb

Nota: Mapas a la izquierda de elaboración propia, mapas a la derecha extraídos de INGEMMET (2002).

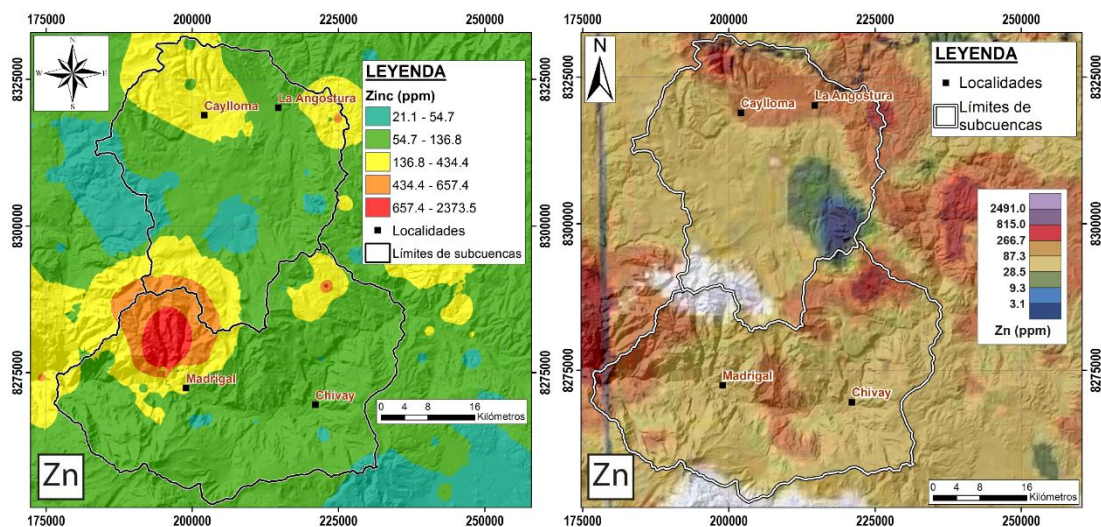


Figura 5.8: Comparación entre mapas geoquímicos del presente estudio y publicaciones previas para el Zn

Nota: Mapas a la izquierda de elaboración propia, mapas a la derecha extraídos de INGEMMET (2002).

Los métodos tradicionales para delinear anomalías geoquímicas, presuponen una distribución normal o log-normal de los datos, con el fin de obtener resultados confiables (Hawkes & Webb, 1979). Sin embargo, en la naturaleza (patrones de dispersión primario y secundario) esta distribución no siempre se cumple (Reimann & Filzmoser, 1999). Además de ello, en el método tradicional es necesario remover los valores atípicos o huracanados (*outliers*) de la base de datos que pueden afectar el cálculo de parámetros estadísticos importantes, como lo son la media o desviación estándar. En otras palabras, se altera la base de datos. Todos estos procesos pueden generar errores en el delineado de anomalías. Con el modelo fractal estos problemas son afrontados, ya que es aplicable para cualquier tipo distribución de los datos, sea normal o no; además no se tiene que eliminar ningún *outlier* ni hacer transformación alguna (logarítmica). Por lo tanto, se trabaja con todos los datos originales. En la Tabla 5.1 se hace una comparación entre los valores de fondo (*background*) obtenidos con el modelo fractal N-S y los obtenidos con el método tradicional en sedimentos de quebrada. Se observa que el As, Cu, Mo, Ni, Pb y Zn, con la excepción

del Hg y Cr, tienen valores de fondo prácticamente idénticos en ambos métodos, lo que confirma la validez de los modelos fractales.

*Tabla 5.1: Comparación de los valores de fondo (background) obtenidos con el modelo fractal N-S y los pertenecientes a INGEMMET (2002) en sedimentos de quebrada*

<b>Elemento (ppm)</b>	<b>As</b>	<b>Cr</b>	<b>Cu</b>	<b>Hg</b>	<b>Mo</b>	<b>Ni</b>	<b>Pb</b>	<b>Zn</b>
Valores de fondo con el modelo N-S	8.4	25.5	27.6	0.11	2.01	10.91	17.4	54.7
Valores de fondo de INGEMMET (2002)	10.69	47.03	27.02	0.062	2.77	10.63	16.65	61.18

Nota: Elaboración propia

Las poblaciones geoquímicas obtenidas en muestras de roca con el modelo fractal N-S se compararon con los valores de la Corteza Continental (CC) según Taylor (1964) (**Tabla 5.2**). Para el As, Cu, Hg, Mo, Pb y Zn se tiene que los valores de fondo coinciden o son cercanos al valor de la CC y que las poblaciones anómalas sobrepasan, en algunos casos en gran proporción, a la C.C. Para el As, las anomalías que sobrepasan a la CC se consideran bajas, moderadas y altas, teniendo como máximo valor a 1140 ppm (633 veces la CC). Para el Cu, las anomalías que sobrepasan a la CC se consideran bajas y moderadas, teniendo como máximo valor a 944 ppm (17 veces la CC). Para el Hg, las anomalías que sobrepasan a la CC se consideran bajas, moderadas y altas, teniendo como máximo valor a 16.9 ppm (211 veces la CC). Para el Mo, las anomalías que sobrepasan a la CC se consideran bajas y altas, teniendo como máximo valor a 81.4 ppm (54 veces la CC). Para el Pb, las anomalías que sobrepasan a la CC se consideran bajas y altas, teniendo como valor máximo a 1490 ppm (119 veces la CC). Para el Zn, las anomalías que sobrepasan la CC se consideran bajas, moderadas y altas, teniendo como máximo valor a 2720 ppm (38 veces la CC).

En el caso del Cr y el Ni, los valores de fondo son mucho menores a la CC. Para el Cr, se han diferenciado 3 poblaciones geoquímicas con valores menores a la CC, y están relacionadas con las correspondientes unidades litológicas (ver subtítulo 4.2.4, Cr). Solamente las anomalías moderadas de Cr (109-315 ppm) sobrepasan a la CC. Para el Ni, hay 3 poblaciones geoquímicas con valores menores que la CC, relacionadas litológicamente a unidades geológicas (ver subtítulo 4.2.4, Ni). Las anomalías moderadas del Ni (97.5-169.5 ppm) sobrepasan a la CC.

*Tabla 5.2: Resumen de las poblaciones geoquímicas en muestras de roca del modelo N-S comparado con los valores de Corteza Continental (Taylor, 1964)*

Elemento (ppm)	Valores de fondo			Anomalía		CC (Taylor, 1964)
	Bajo	Normal	Baja	Moderada	Alta	
As	0.2-1.9	1.9-5.4	5.4-14.8	14.4-139.7	139.7-1140	1.8
Cr	1-6	7-20	21-108	109-315	-	100
Cu	0.7-6.5	6.5-44.7	44.7-93.6	93.6-944	-	55
Hg	-	0.005-0.106	0.106-0.16	0.16-0.55	0.55-16.9	0.08
Mo	0.05-0.67	0.67-1.24	1.24-7.21	-	7.21-81.4	1.5
Ni	0.4-3.59	3.59-17.28	17.28-97.51	97.5-169.5	-	75
Pb	0.5-10.6	10.6-27.9	27.9-137	-	137-1490	12.5
Zn	2-32	33-73	74-127	128-154	155-2720	70

Nota: Elaboración propia

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### Conclusiones

- Se obtuvieron cuatro zonas anómalas aplicando los modelos fractales C-A y N-S en sedimentos de quebrada. La primera, ubicada al NO de la subcuenca Hornillos Alto en los alrededores del distrito de Caylloma (As, Hg, Mo, Pb y Zn). La segunda al NE de la subcuenca Hornillos Alto en los alrededores de la localidad de La Angostura (As, Cr, Ni, Pb y Zn). La tercera al NO de la subcuenca Alto Camaná en los alrededores de Madrigal (Cu, As y Zn). Finalmente, se tiene cuarta zona anómala al NE de la subcuenca Alto Camaná (As, Mo, Ni y Zn).
- Al norte de la subcuenca Hornillos Alto, las zonas anómalas de As, Ni y Zn están relacionadas con las fallas NO-SE y NE-SO; y al norte de la subcuenca Alto Camaná, las zonas anómalas de Zn, Pb y Cu se relacionan con las fallas NO-SE.
- De acuerdo con las poblaciones anómalas delimitadas por el modelo fractal N-S en muestras litogeoquímicas, se halló las anomalías más altas en las siguientes unidades litológicas: Centro Volcánico Soncco al norte de Hornillos Alto (As, Cu, Ni, Zn); en la zona de contacto de los centros volcánicos Sibayo y Cailloma al este de Alto Camaná (As, Cr, Ni, Mo), Secuencia Volcánica Ichocollo de ambas subcuencas (Pb, Hg, Ni).
- Los afloramientos de Subvolcánicos Andesíticos relacionados con las zonas de Alteración Hidrotermal en los alrededores de la Mina Madrigal al NE de Alto Camaná y el distrito minero Caylloma al NE de Hornillos Alto, se relacionan con los valores anómalos obtenidos en la litogeoquímica y sedimentos de quebrada.

- Se valida el modelo fractal al coincidir las anomalías con la ubicación de las minas existentes, geología estructural y anomalías de estudios anteriores.
- Se demuestra que el modelado fractal mejora el delineado de anomalías geoquímicas en la prospección.
- Los patrones de dispersión geoquímica, en muestras litogeoquímicas y sedimentos de quebrada, revelan un comportamiento multifractal, de acuerdo con las rectas obtenidas de las gráficas logarítmicas por elemento (Log-Log Plots).
- Se determinó que el modelo fractal N-S es mejor que el C-A al momento de delinear las anomalías geoquímicas en sedimentos de quebrada.
- El modelo N-S es el más apropiado para procesamiento de datos litogeoquímicos, donde no es necesario realizar una malla de muestreo.
- El modelo fractal resuelve los problemas presentados por el método tradicional (*outliers*, normalidad), teniendo una aplicación más sencilla y práctica.

### **Recomendaciones**

- En el Anexo 3 se señalan las cuatro zonas anómalas. Las zonas A y B corresponden al Distrito Minero Caylloma y a la Mina Madrigal, respectivamente; por lo que no se recomienda una exploración más detallada. La zona C corresponde a los alrededores de la localidad de La Angostura al noreste de la subcuenca Hornillos Alto, con anomalías de As, Pb y Zn. La zona D corresponde a los alrededores de Tuti y Sibayo al noreste de la subcuenca Alto Camaná, con anomalías de As, Pb, Mo y Ni. En ambas zonas las anomalías puntuales de rocas y las áreas anómalas de sedimentos se

superponen espacialmente, lo que supone la existencia de yacimientos suprayacentes, y no transportados.

En función a los elementos anómalos tanto en litogeoquímica como en sedimentos de quebrada y también a la litología de estas zonas, se presume la presencia de yacimientos polimetálicos, asociados con actividad hidrotermal y alojados en rocas volcánicas: epitermales y vetas. En los Anexos 4 y 5 se enlista algunas de las muestras de roca de las zonas C y D con las mayores concentraciones de los elementos analizados.

En la zona D se tienen afloramientos del Centro Volcánico Cailloma y el Grupo Palca, que hospedan varias ocurrencias minerales al noroeste de la subcuenca Hornillos Alto (zona A - Caylloma). Esto nos lleva darle a la zona D un nivel de prioridad mayor que la zona C. Además, la zona D está relativamente libre de denuncios y petitorios mineros, a diferencia de la zona C.

- Para el muestro litogeoquímico, evitar la poca dispersión espacial de los datos, ya que esta dificulta la generación de los mapas de interpolación y también la aplicación del modelo fractal C-A.
- Las unidades litológicas que se relacionaron con la mayoría de las anomalías fueron los centros volcánicos Soncco y Sibayo (Grupo Palca – Mioceno Inferior), la Secuencia Volcánica Ichocollo (Grupo Tacaza – Oligoceno Superior), Centro Volcánico Cailloma al este de Alto Camaná (Barroso Inferior – Mioceno Superior) y Subvolcánicos Andesíticos (Mioceno); por lo que se recomienda utilizarlos como una guía exploración para trabajos posteriores en la zona.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acosta, J. *et al.* (2017). Mapa Metalogenético del Perú. Programa de Metalogenia. INGEMMET. Lima, Perú
- Afzal, P., Khakzad, A., Moarefvand, P., Omran, N. R., Esfandiari, B., & Alghalandis, Y. F. (2010). Geochemical anomaly separation by multifractal modeling in Kahang (Gor Gor) porphyry system, Central Iran. *Journal of Geochemical Exploration*, 104(1–2), 34–46. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2009.11.003>
- Afzal, P., Fadakar Alghalandis, Y., Khakzad, A., Moarefvand, P., Rashidnejad Omran, N. (2011). Delineation of mineralization zones in porphyry Cu deposits by fractal concentration–volume modeling. *Journal of Geochemical Exploration* 108, 220–232.
- Afzal, P., Zarifi, A. Z., & Sadeghi, B. (2013). Separation of Geochemical Anomalies Using Factor Analysis and Concentration-Number (C-N) Fractal Modeling Based on Stream Sediments Data in Esfordi 1:100000 Sheet, Central Iran. *Iranian Journal of Earth Sciences* 5, 100–110.
- Afzal, P., Yasrebi, A. B., Saein, L. D., & Panahi, S. (2016). Prospecting of Ni mineralization based on geochemical exploration in Iran. *Journal of Geochemical Exploration*, 181, 294–304. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2016.10.003>



- Arbizú, F. (1977). Geología y depósitos del distrito minero de Madrigal, Provincia de Caylloma, Departamento de Arequipa. Tesis Bach., Prog. Acad. Ing. Geológica. Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Lima, Perú. 110p.
- Barton, C., La Pointe, P. (1995). Fractals in the Earth Sciences. Springer Science & Business Media. New York. 277p.
- Benavides, C. V. (1962). Estratigrafía pre-terciaria de la región de Arequipa. Bol. Sociedad Geológica del Perú. T-38, 62 p. Lima.
- Birdi, K. S. (1993). Fractals in Chemistry, Geochemistry and Biophysics: An introduction. Springer Science & Business Media. New York. 269p
- Bölviken, B., Stokke, P. R., Feder, J., & Jössang, T. (1992). The fractal nature of geochemical landscapes. Journal of Geochemical Exploration, 43(2), 91–109. [https://doi.org/10.1016/0375-6742\(92\)90001-O](https://doi.org/10.1016/0375-6742(92)90001-O)
- Bruno, B. C., Taylor, G. J., Rowland, S. K., Lucey, P. G. & Self, S. (1992). Lava flows are fractals. Geophysical Research Letters. 19(3), 305-308.
- Bruno, B. C., Taylor, G. J., Rowland, S. K. & Baloga, S. M. (1994). Quantifying the effect of rheology on lava-flow margins using fractal geometry. Bulletin of Volcanology. 56:193-206.
- Carlotto, V., Acosta, H., Mamani, M., Cerpa, L., Rodriguez, R., Jaimes, F., Navarro, P., Cueva, E. & Chacaltana, C. (2010). Los dominios geotectónicos del

territorio peruano. Trabajo presentado en XV Congreso Peruano de Geología. Sociedad Geológica del Perú. Resúmenes Extendidos. N°9, p. 47-50. Cusco, Perú.

- Castillo, R. (1986). Folleto para el curso de Geoquímica Aplicada G-0233. Universidad de Costa Rica. Escuela Centroamericana de Geología. 196p. Recuperado de [https://www.academia.edu/27485734/GEOQU%C3%8DMICA\\_APLICADA\\_-\\_ROLANDO\\_CASTILLO\\_MU%C3%91OZ?auto=download](https://www.academia.edu/27485734/GEOQU%C3%8DMICA_APLICADA_-_ROLANDO_CASTILLO_MU%C3%91OZ?auto=download)
- Cereceda, C. & Cueva, E. (2008). Mapa geológico del cuadrángulo de Cailloma Hoja 31s1 y 31s2. Escala 1:50 000. Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico. Lima, Perú.
- Cerpa, L. & Paniagua, M. (2009). Mapa geológico del cuadrángulo de Chivay – Hoja 32s1. Escala 1:50 000. Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico. Lima, Perú.
- Cerpa, L., Torres, D., Muñoz, L. & Aguilar, R. (2011). Mapa geológico del cuadrángulo de Callalli – Hoja 32t4. Escala 1:50 000. Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico. Lima, Perú.
- Chapman, E., Gutierrez, E. (2016). Technical Report: Caylloma Mine, Caylloma District, Perú. Fortuna Silver Mine Inc. Vancouver, Canadá. 175p
- Cheng, Q., Agterberg, F. P., & Ballantyne, S. B. (1994). The separation of geochemical anomalies from background by fractal methods. Journal of

Geochemical Exploration, 51(2), 109–130. [https://doi.org/10.1016/0375-6742\(94\)90013-2](https://doi.org/10.1016/0375-6742(94)90013-2)

- Cheng, Q., Xu, Y., Grunsky, E. (1999). Integrated spatial and spectral analysis for geochemical anomaly separation. In: Lippard S.J., Naess A, Sinding–Larsen R (Eds.), Proceedings of the Fifth Annual Conference of the International Association for Mathematical Geology, Trondheim, Norway 6–11th August, vol. 1, pp. 87–92.
- Curl, R. L. (1986). Fractal dimensions and geometries of caves. *Mathematical Geology*, 18(8), 765-783.
- Dávila, D. (1988). Geología del cuadrángulo de Cailloma, hoja 31s. INGEMMET. Boletín. Serie A: Carta Geológica Nacional N°40, 93 p.
- Daya, A. A. (2014). Comparative study of C-A, C-P, and N-S fractal methods for separating geochemical anomalies from background: A case study of Kamoshgaran region, northwest of Iran. *Journal of Geochemical Exploration* (Vol. 150). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2014.12.015>
- Deng, J., Wang, Q., Yang, L., Wang, Y., Gong, Q., & Liu, H. (2010). Delineation and explanation of geochemical anomalies using fractal models in the Heqing area, Yunnan Province, China. *Journal of Geochemical Exploration*, 105(3), 95–105. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2010.04.005>

- Echavarría, L., Nelson, E., Humphrey, J., Chavez, J., Escobedo, L., & Iriondo, A. (2006). Geologic evolution of the Caylloma epithermal vein district, Southern Perú. *Economic Geology*, 101(4), 843–863. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.101.4.843>
- Fletcher, C. J. N., Hawkins, M. P., & Tejada, R. (1989). Structural control and genesis of polymetallic deposits in the Altiplano and Western Cordillera of southern Peru. *Journal of South American Earth Sciences*, 2(1), 61–71. [https://doi.org/10.1016/0895-9811\(89\)90027-8](https://doi.org/10.1016/0895-9811(89)90027-8)
- Gumiel, P., Sanderson, D. J., Roberts, S. & Campos, R. (1992). El uso del análisis fractal como discriminación de sistemas filonianos auríferos en el área de La Codosera, Extremadura (España). *Geogaceta*, 12, 1-6.
- Hashemi, M., & Afzal, P. (2012). Identification of geochemical anomalies by using of number-size (N-S) fractal model in Bardaskan area, NE Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 6(12), 4785–4794. <https://doi.org/10.1007/s12517-012-0657-8>
- Hassanpour, S., & Afzal, P. (2011). Application of concentration-number (C-N) multifractal modeling for geochemical anomaly separation in Haftcheshmeh porphyry system, NW Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 6(3), 957–970. <https://doi.org/10.1007/s12517-011-0396-2>
- Hawkes, R., Webb, H. (1979) *Geochemistry in mineral exploration*, 2nd edn. Academic Press, New York, 657 pp

- Hosseini-nasab, M., & Daya, A. A. (2017). Separation of geochemical anomalies using inverse distant weighting (IDW) and Concentration-Area (C-A) fractal modeling based on stream sediments data in Janja region, SE Iran. *Bulletin of The Mineral Research and Exploration*, (156), 71–84.
- Hurtado, Y. R. (2002). *Prospección geoquímica del cuadrángulo de Chalhuanca (29-p) – Inventario de cursos minerales. Tesis de grado. Universidad Nacional de Ingeniería. Lima, Perú. 297p.*
- Instituto Geológico Minero y Metalúrgico. (2002). *Estudio de los recursos minerales del Perú: Franja N° 2. INGEMMET, Boletín, Serie B: Geología Económica, 11, 392 p.*
- Jenks. W. F. (1948). *Geología de la Hoja de Arequipa al 200,000. Inst. Geol. Del Perú. Bol. 9, 101 p. Lima, Peru.*
- Khalajmasoumi, M., Sadeghi, B., Carranza, E. J. M., & Sadeghi, M. (2016). Geochemical anomaly recognition of rare earth elements using multi-fractal modeling correlated with geological features, Central Iran. *Journal of Geochemical Exploration* 181, 318-332.
- Kaneoka, I & Guevara, C. (1984). K-Ar age determinations of late Tertiary and Quaternary Andean volcanic rocks, southern Peru *Geochemical Journal*, 18(5): 233-239.

- Lavery, M. (1987). Fractal in karst. *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol. 12, 475-480.
- Li, C., Ma., T., & Shi, J. (2003). Application of a fractal method relating concentrations and distances for separation of geochemical anomalies from background. *Journal of Geochemical Exploration*, 77(2–3), 167–175. [https://doi.org/10.1016/S0375-6742\(02\)00276-5](https://doi.org/10.1016/S0375-6742(02)00276-5)
- Mandelbrot, B. B. (1967). How Long Is the Coast of Britain? Statistical Self-Similarity and Fractional Dimension. *Science, New Series*, 196(3775), 636-638.
- Mandelbrot, B. B. (1983). *The fractal geometry of nature/Revised and enlarged edition*. New York, WH Freeman and Co., 1983, 495 p.
- Maria, A. & Carey, S. (2002). Using fractal analysis to quantitatively characterize the shapes of volcanic particles. *Journal of Geophysical Research*. 107(B11), 2283. DOI: 10.1029/2001JB000822
- Navarro, P. & Rodríguez, G. (2013). Caracterización de yacimientos minerales y zonas de alteración hidrotermal, asociados a la serie volcánica cenozoica del sur del Perú, zona de Cailloma, departamento de Arequipa. Programa de Metalogenia. INGEMMET. Lima-Perú. 19p
- Navarro, P. & Torres., D. (2008). Mapa geológico del cuadrángulo de Cailloma – Hoja 31s3 y 31s4. Escala 1:50 000. Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico. Lima, Perú

- Navarro, P., Cereceda, C., Cueva, E., Torres, D. & Cerpa, L. (2018). Mapa geológico del cuadrángulo de Cailloma 31s. Escala 1:100 000. Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (no publicado). Lima, Perú
- Orford, J. D., Whalley, W. B. (1983). The use of the fractal dimension to quantify the morphology of irregular-shaped particles. *Sedimentology*. 30, 655-668
- Ortega, M. (2017). Metodología para el análisis prospectivo y de exploración por minerales económicos. Informe de experiencia profesional. Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Lima, Perú. 129p.
- Palacios, O., De la Cruz, J., De la Cruz, N., Klinck, E. & Hawkins, M. (1993). Geología de la Cordillera Occidental y Altiplano al Oeste del Lago Titicaca – sur del Perú (Proyecto integrado del Sur). INGEMMET. Boletín. Serie A: Carta Geológica Nacional N°42, 257 p.
- Petford, N., Bryon, D., Atherthon, M. P. & Hunter, R. H. (1993). Fractal analysis in granitoid petrology: a means of quantify. *European Journal of Mineralogy*. 5(3), 593-598.
- Prusinkiewicz, P. & Hammel, M. (1993). A fractal model of mountains with rivers. Trabajo presentado en Proceeding of Graphics Interface '93. 174-180p. Toronto, Canadá.

- Reimann, C., Filzmoser, P., 1999. Normal and lognormal data distribution in geochemistry: death of a myth. Consequences for the statistical treatment of geochemical and environmental data. *Environmental Geology* 39, 1001–1014.
- Rivera, H. (2001). *Introducción a la geoquímica general y aplicada*. Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Lima, Perú. 279p.
- Sammis, C.G., Osborne, R.H., Anderson, J.L., Benerdt, M. and White, P. (1986). Self-similar cataclasites in the formation of fault gouge. *Pure Appl. Geophys.*, 124 (1/2); 53-79.
- Sadeghi, B., Moarefvand, P., Afzal, P., Yasrebi, A. B., & Saein, L. D. (2012). Application of fractal models to outline mineralized zones in the Zaghia iron ore deposit, Central Iran. *Journal of Geochemical Exploration*, 122, 9–19. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2012.04.011>
- Saunders J.A., Schoenly P.A. (1995) Fractal Structure of Electrum Dendrites in Bonanza Epithermal Au-Ag Deposits. In: Barton C.C., La Pointe P.R. (eds) *Fractals in the Earth Sciences*. Springer, Boston, MA
- Simón, A. (2004). Evaluation of Twin and Duplicate Samples: The Hyperbolic Method: Discussion. AMEC International.
- Simón, A. (2017). Taller de Aseguramiento y Control de la Calidad en la Exploración Geológica. Sesión 9: Control de Calidad. Geoexmin SpA. Cajamarca, Perú.



- Schlager, W. (2004). Fractal nature of stratigraphic sequences. *Geology*, 32, 185-188. DOI: 10.1130/G20253.1
- Taylor, S.R., 1964. Abundance of chemical elements in the continental crust; a new table. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 28(8), 1273-1285.
- Torres, D. & Muñoz, L. (2009). Mapa geológico del cuadrángulo de Chivay – Hoja 32s4. Escala 1:50 000. Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico. Lima, Perú.
- Turcotte, D. (1997). *Fractals and Chaos in Geology and Geophysics*. Cambridge University Press. New York, EEUU. 414p.
- Vásquez, R. (2009). Distribución de tierras raras y otros elementos traza en la franja polimetálica 9°-10°S del Perú Central. Tesis de Grado. Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Lima, Perú. 195p.
- Zuo, R., & Wang, J., 2016. Fractal/multifractal modeling of geochemical data: A review. *Journal of Geochemical Exploration* 164, 33–41.

**ANEXOS**

Anexo 1: Base de datos geoquímicos de sedimentos de quebrada

N°	Código de muestra	Este (UTM 19S)	Norte (UTM 19S)	Longitud	Latitud	Proyecto	As ppm	Cr ppm	Cu ppm	Hg ppm	Mo ppm	Ni ppm	Pb ppm	Zn ppm
1	HUA-00-042	164749	8267032	-72.127	-15.653	Franja N°2	15	21	58	0.1	5	19	30	96.1
2	HUA-00-047	169359	8271632	-72.083	-15.612	Franja N°2	19	65	100	0.1	9	37	50	162
3	ORC-00-056	167324	8296104	-72.099	-15.390	Franja N°2	2	52	28.7	0.13	1	21	47	87.7
4	ORC-00-037	168772	8308307	-72.084	-15.280	Franja N°2	2	20	22.4	0.1	1	7	9	65
5	ORC-00-031	170950	8319571	-72.062	-15.179	Franja N°2	2	35	27.7	0.1	2	44	11	53.2
6	orc-00037C	178273	8269969	-72.000	-15.628	Franja N°2	6	126	36.2	0.1	1	21	38	116
7	chi - 00123	185739	8277197	-71.930	-15.563	Franja N°2	11	55	50.7	0.17	1	16	23	96.8
8	orc-00039C	177382	8312436	-72.003	-15.244	Franja N°2	31	148	62.5	0.1	1	13	26	61.5
9	chi - 00109	206048	8265419	-71.742	-15.672	Franja N°2	2	234	22.5	0.1	1	83	32	105
10	cai - 00011	202512	8322655	-71.768	-15.155	Franja N°2	25	19	66.5	0.21	2	12	147	280
11	chi - 00112	213357	8265028	-71.674	-15.677	Franja N°2	12	34	30.1	0.18	2	13	31	96.5
12	chi - 00096	213889	8269067	-71.669	-15.640	Franja N°2	4	30	22.8	0.14	1	12	30	67.2
13	cai - 00046	212085	8327684	-71.679	-15.111	Franja N°2	14	84	43.9	0.34	2	33	38	94.7
14	chi - 00083	223153	8273072	-71.582	-15.605	Franja N°2	18	47	79.3	0.33	2	28	27	76.9
15	chi - 00088	224392	8265058	-71.571	-15.678	Franja N°2	21	25	25.5	0.15	1	11	36	48.3

N°	Código de muestra	Este (UTM 19S)	Norte (UTM 19S)	Longitud	Latitud	Proyecto	As ppm	Cr ppm	Cu ppm	Hg ppm	Mo ppm	Ni ppm	Pb ppm	Zn ppm
16	chi - 00089	224440	8265050	-71.571	-15.678	Franja N°2	7	39	18.6	0.1	3	16	18	69.4
17	chi - 00081	224490	8276638	-71.569	-15.573	Franja N°2	29	25	42	0.47	20	16	28	94.8
18	chi - 00062	228136	8281231	-71.534	-15.532	Franja N°2	4	47	44.9	0.15	5	21	25	61.7
19	con - 027	242470	8287410	-71.400	-15.478	Franja N°2	4	59	45.7	0.1	1	40	20	59.8
20	con - 049	235143	8296132	-71.468	-15.398	Franja N°2	22	74	63.7	0.1	2	37	41	161
21	con - 044	236114	8305695	-71.458	-15.312	Franja N°2	40	84	55.2	0.1	1	35	171	440
22	cal - 076	246061	8268678	-71.369	-15.647	Franja N°2	5	40	54	0.1	2	14	17	66.8
23	ORC-00-041	170766	8310007	-72.065	-15.265	Franja N°2	6	30	30.2	0.1	2	14	12	49
24	CAR-00-038	174946	8310767	-72.026	-15.259	Franja N°2	10	18	60.8	0.1	5	4	5	58.6
25	chi - 00128	184443	8265039	-71.944	-15.673	Franja N°2	2	66	36.5	0.1	5	25	18	52.5
26	chi - 00126	185382	8264155	-71.935	-15.681	Franja N°2	7	70	38.1	0.12	1	32	18	117
27	chi - 00125	185469	8264446	-71.934	-15.679	Franja N°2	4	66	66.4	0.1	1	18	17	77.3
28	cai - 00002	184892	8333004	-71.931	-15.059	Franja N°2	4	57	49	0.37	3	20	31	88
29	chi - 00121	187578	8271752	-71.913	-15.613	Franja N°2	6	67	33.7	0.43	2	18	38	80.1
30	chi - 00116	200127	8269199	-71.797	-15.637	Franja N°2	5	36	28.7	0.1	3	16	22	56.3
31	chi - 00093	205010	8270372	-71.751	-15.627	Franja N°2	10	33	31.3	0.22	3	12	37	120

N°	Código de muestra	Este (UTM 19S)	Norte (UTM 19S)	Longitud	Latitud	Proyecto	As ppm	Cr ppm	Cu ppm	Hg ppm	Mo ppm	Ni ppm	Pb ppm	Zn ppm
32	cai - 00016	196292	8305776	-71.828	-15.307	Franja N°2	2	116	62.3	0.29	3	18	17	55.7
33	chi - 00082	222025	8277253	-71.592	-15.567	Franja N°2	2	32	21.4	0.22	5	11	14	51.8
34	chi - 00080	223546	8275239	-71.578	-15.586	Franja N°2	5	29	59.9	0.52	1	19	31	83.9
35	chi - 00078	224785	8277512	-71.566	-15.565	Franja N°2	6	39	35	0.11	1	20	25	71.8
36	cai - 00071	216864	8289922	-71.638	-15.452	Franja N°2	2	37	49.2	0.94	2	16	31	83.9
37	cai - 00075	224717	8286559	-71.566	-15.483	Franja N°2	18	37	45.4	0.24	1	52	21	66.6
38	cai - 00049	221622	8303697	-71.593	-15.328	Franja N°2	10	22	15.5	0.11	6	10	23	25.1
39	cai - 00068	224743	8301580	-71.564	-15.348	Franja N°2	2	17	21.7	0.14	5	14	33	51.7
40	cai - 00045	217324	8330942	-71.630	-15.082	Franja N°2	7	96	46.7	0.18	2	46	23	89.8
41	cal - 113	233669	8251812	-71.486	-15.798	Franja N°2	4	15	13.9	0.1	4	5	29	23.8
42	chi - 00061	230014	8282041	-71.517	-15.525	Franja N°2	2	36	46.2	0.1	1	21	23	80.2
43	cai - 00056	229350	8286218	-71.523	-15.487	Franja N°2	4	68	35.8	0.24	2	35	20	80.6
44	cal - 043	239510	8270377	-71.430	-15.631	Franja N°2	9	21	30.7	0.1	2	11	25	78.4
45	con - 028	240306	8285936	-71.421	-15.491	Franja N°2	10	57	59.3	0.1	3	30	27	100
46	con - 011	242595	8339172	-71.394	-15.010	Franja N°2	3	69	20.9	0.1	1	7	13	57.8
47	cal - 108	252925	8264391	-71.305	-15.687	Franja N°2	15	21	19.3	0.1	4	7	18	38.6

N°	Código de muestra	Este (UTM 19S)	Norte (UTM 19S)	Longitud	Latitud	Proyecto	As ppm	Cr ppm	Cu ppm	Hg ppm	Mo ppm	Ni ppm	Pb ppm	Zn ppm
48	cal - 082	248158	8278160	-71.348	-15.562	Franja N°2	4	8	16.8	0.1	1	2	25	33.8
49	cal - 070	252966	8279157	-71.303	-15.553	Franja N°2	9	39	62.1	0.1	1	18	20	46.8
50	con - 033	253813	8297420	-71.294	-15.388	Franja N°2	10	46	26.3	0.1	1	6	19	31.4
51	con - 031	252760	8309864	-71.302	-15.276	Franja N°2	9	74	34.6	0.1	1	40	15	53.3
52	con - 014	248355	8337269	-71.340	-15.028	Franja N°2	2	30	22.5	0.1	2	14	6	63.3
53	cal - 067	256141	8274209	-71.274	-15.598	Franja N°2	9	77	102	0.1	1	36	18	75.1
54	cal - 066	257111	8273752	-71.265	-15.602	Franja N°2	10	76	76.1	0.1	2	33	12	77.1
55	HUA-00-053	166433	8256596	-72.112	-15.747	Franja N°2	5	12	19.6	0.1	2	5	20	43
56	HUA-00-044	165656	8268152	-72.118	-15.643	Franja N°2	14	22	62.1	0.1	4	18	24	86.3
57	ORC-00-049	164897	8300569	-72.121	-15.350	Franja N°2	2	21	31.6	0.1	1	13	22	65
58	ORC-00-057	165195	8294444	-72.119	-15.405	Franja N°2	17	89	112	0.1	2	26	98	1048
59	ORC-00-058	169299	8300765	-72.080	-15.349	Franja N°2	9	43	57.4	0.54	1	22	19	89.2
60	ORC-00-038	171043	8308138	-72.063	-15.282	Franja N°2	2	21	18.8	0.1	1	9	13	40.8
61	ORC-00-028	168487	8326036	-72.084	-15.120	Franja N°2	12	120	41.3	0.1	3	25	14	63.9
62	chi - 00120	191726	8272474	-71.875	-15.607	Franja N°2	2	49	29.8	0.1	4	16	31	73.1
63	32s-SGQ-518	195652	8273661	-71.838	-15.597	Cuenca Camaná-Majes-Colca	33.06	23.39	116.58	0.01	1.26	15.37	178	500.24

N°	Código de muestra	Este (UTM 19S)	Norte (UTM 19S)	Longitud	Latitud	Proyecto	As ppm	Cr ppm	Cu ppm	Hg ppm	Mo ppm	Ni ppm	Pb ppm	Zn ppm
64	32s-SGQ-515	195723	8273182	-71.837	-15.601	Cuenca Camaná-Majes-Colca	14.54	50.53	81.78	0.07	0.79	23	52.53	269.98
65	32s-SGQ-600	196451	8273797	-71.831	-15.595	Cuenca Camaná-Majes-Colca	12.9	22.44	105.27	0.2	1.37	13.1	44.21	170.14
66	32s-SGQ-508	195273	8275170	-71.841	-15.583	Cuenca Camaná-Majes-Colca	35.49	23.42	125.28	0.01	1.18	16	192	603.9
67	cai - 00041	188062	8304530	-71.905	-15.317	Franja N°2	3	30	28.4	0.82	4	9	25	39
68	cai - 00043	190810	8307323	-71.879	-15.292	Franja N°2	2	41	38.6	0.11	4	12	19	41.2
69	cai - 00013	191111	8310743	-71.876	-15.261	Franja N°2	2	52	33.4	0.33	1	8	16	53.8
70	chi - 00108	204522	8266857	-71.756	-15.659	Franja N°2	6	50	27.6	0.1	1	19	20	58.2
71	32s-SGQ-513	197317	8274801	-71.822	-15.586	Cuenca Camaná-Majes-Colca	8.84	22.37	73.08	0.18	0.94	12.35	28.4	133.46
72	cai - 00005	197209	8334880	-71.816	-15.044	Franja N°2	15	26	46.8	0.91	3	17	52	113
73	cai - 00004	202109	8337039	-71.770	-15.025	Franja N°2	5	14	22.7	0.24	2	8	34	33.6
74	chi - 00111	211668	8264984	-71.690	-15.677	Franja N°2	12	21	40	0.38	3	12	19	67.9
75	chi - 00097	214679	8269377	-71.661	-15.637	Franja N°2	8	41	23	0.1	1	15	28	71.8
76	chi - 00114	215714	8265551	-71.652	-15.672	Franja N°2	237	12	43.7	0.28	2	11	36	77.1
77	chi - 00103	209527	8274665	-71.709	-15.589	Franja N°2	25	36	40.4	0.34	1	17	40	82.2
78	cai - 00018	208494	8298422	-71.715	-15.374	Franja N°2	2	50	37.4	0.13	1	5	8	25.6
79	cai - 00012	205647	8323353	-71.739	-15.149	Franja N°2	51	73	48.8	0.16	3	14	51	161

N°	Código de muestra	Este (UTM 19S)	Norte (UTM 19S)	Longitud	Latitud	Proyecto	As ppm	Cr ppm	Cu ppm	Hg ppm	Mo ppm	Ni ppm	Pb ppm	Zn ppm
80	chi - 00101	216102	8271862	-71.648	-15.615	Franja N°2	9	40	37.3	0.11	1	12	34	58.2
81	chi - 00099	217239	8276602	-71.637	-15.573	Franja N°2	4	43	21.8	0.23	2	14	26	97.7
82	cai - 00072	220081	8291505	-71.608	-15.438	Franja N°2	12	21	28.3	0.22	2	5	21	47.7
83	cal - 064	234782	8284341	-71.472	-15.505	Franja N°2	13	33	56.6	0.1	2	22	15	76.7
84	cai - 00029	228785	8335310	-71.523	-15.044	Franja N°2	2	42	33	0.1	4	13	20	68.7
85	cal - 111	237375	8252820	-71.451	-15.789	Franja N°2	2	40	22.6	0.1	2	13	11	37.8
86	cal - 110	237831	8252892	-71.447	-15.789	Franja N°2	3	53	23.8	0.1	1	20	12	42.6
87	con - 055	237073	8292238	-71.450	-15.433	Franja N°2	20	32	52	0.2	1	21	150	153
88	con - 060	238371	8298272	-71.437	-15.379	Franja N°2	30	51	54.5	0.1	1	31	150	455
89	con - 061	241220	8300307	-71.411	-15.361	Franja N°2	24	65	55	0.1	1	29	232	315
90	con - 045	235828	8310671	-71.460	-15.267	Franja N°2	58	30	31.2	0.1	2	13	46	57.1
91	con - 047	236039	8310040	-71.458	-15.273	Franja N°2	4	35	14.4	0.1	4	11	6	45.8
92	cal - 084	247224	8277930	-71.357	-15.564	Franja N°2	5	20	13.7	0.1	2	5	26	48.8
93	cal - 068	252904	8278510	-71.304	-15.559	Franja N°2	15	30	65.6	0.1	1	25	13	128
94	HUA-00-046	164081	8263250	-72.133	-15.687	Franja N°2	10	21	28.9	0.1	3	13	24	64.3
95	HUA-00-043	165055	8268536	-72.124	-15.639	Franja N°2	17	54	66.1	0.1	4	20	26	82



N°	Código de muestra	Este (UTM 19S)	Norte (UTM 19S)	Longitud	Latitud	Proyecto	As ppm	Cr ppm	Cu ppm	Hg ppm	Mo ppm	Ni ppm	Pb ppm	Zn ppm
96	ORC-00-036	165600	8310449	-72.113	-15.261	Franja N°2	5	28	24.1	0.1	1	14	29	80.5
97	ORC-00-045	166165	8304632	-72.108	-15.313	Franja N°2	2	45	54.1	0.1	1	31	15	85.7
98	ORC-00-051	176845	8298618	-72.010	-15.369	Franja N°2	5	75	24.4	0.1	1	18	20	83
99	ORC-00-040	171445	8309023	-72.059	-15.274	Franja N°2	12	38	44.9	0.1	3	25	26	62.1
100	chi - 00129	184075	8266306	-71.947	-15.662	Franja N°2	6	55	33.7	0.1	4	28	20	59.7
101	cai - 00042	189738	8305306	-71.889	-15.310	Franja N°2	4	40	34.4	0.28	4	10	19	34.2
102	cai - 00014	191525	8309915	-71.872	-15.269	Franja N°2	10	63	35	0.24	2	10	23	75.7
103	chi - 00117	197114	8270227	-71.825	-15.628	Franja N°2	4	36	28.3	0.1	2	18	26	49.2
104	chi - 00091	200664	8272720	-71.791	-15.606	Franja N°2	12	11	29	0.13	1	4	36	50.1
105	chi - 00092	200664	8272720	-71.791	-15.606	Franja N°2	7	30	32.5	0.35	3	9	25	82.2
106	32s-SGQ-504	197496	8275300	-71.821	-15.582	Cuenca Camaná-Majes-Colca	8.62	16.17	37	0.23	0.69	10.81	20.23	102.61
107	chi - 00105	209441	8272411	-71.710	-15.609	Franja N°2	12	23	78.3	0.56	1	10	39	74.2
108	chi - 00113	214200	8266005	-71.666	-15.668	Franja N°2	23	31	66.7	0.13	3	13	20	74.5
109	chi - 00115	218026	8267358	-71.630	-15.656	Franja N°2	4	20	37.6	0.14	2	8	22	59.1
110	cai - 00069	215660	8289417	-71.650	-15.457	Franja N°2	2	18	14.4	0.1	4	5	27	30.3
111	cai - 00026	215725	8338786	-71.644	-15.011	Franja N°2	2	40	47.9	0.11	6	12	17	40.5

N°	Código de muestra	Este (UTM 19S)	Norte (UTM 19S)	Longitud	Latitud	Proyecto	As ppm	Cr ppm	Cu ppm	Hg ppm	Mo ppm	Ni ppm	Pb ppm	Zn ppm
112	cal - 063	232370	8282770	-71.495	-15.518	Franja N°2	12	64	64.5	0.1	1	25	29	96
113	cai - 00076	227290	8285222	-71.542	-15.496	Franja N°2	17	18	28.9	0.28	1	11	25	66.8
114	cai - 00057	228715	8286213	-71.529	-15.487	Franja N°2	12	47	40.6	0.26	2	35	31	62.8
115	cai - 00060	231570	8309236	-71.499	-15.279	Franja N°2	2	50	25.5	0.14	1	4	11	21.1
116	cai - 00027	226419	8336922	-71.544	-15.029	Franja N°2	2	45	36.4	0.16	4	15	11	54.8
117	cal - 040	242395	8274085	-71.402	-15.598	Franja N°2	10	15	26	0.15	2	11	34	54.2
118	cal - 069	252656	8279033	-71.306	-15.554	Franja N°2	16	21	80.9	0.35	1	18	25	76.9
119	con - 017	252668	8334052	-71.301	-15.057	Franja N°2	14	65	22.2	0.23	1	9	223	167
120	con - 012	245264	8338223	-71.369	-15.019	Franja N°2	9	52	35.9	0.1	1	40	17	62.8
121	cal - 085	255047	8266845	-71.285	-15.665	Franja N°2	6	23	9.7	0.1	4	4	9	25
122	con - 010	257258	8335188	-71.258	-15.047	Franja N°2	4	22	77.1	0.1	2	10	11	40.8
123	ORC-00-047	164234	8301079	-72.127	-15.345	Franja N°2	16	18	26	0.1	2	8	31	177
124	ORC-00-035	164926	8310652	-72.119	-15.259	Franja N°2	4	34	29.5	0.1	2	17	38	113
125	HUA-00-054	169456	8254242	-72.085	-15.769	Franja N°2	7	93	17.8	0.1	3	13	17	61.6
126	HUA-00-049	174258	8272851	-72.037	-15.601	Franja N°2	14	26	53.8	0.1	6	23	53	160
127	HUA-00-050	174217	8273917	-72.038	-15.592	Franja N°2	122	31	161	0.14	28	42	286	554

N°	Código de muestra	Este (UTM 19S)	Norte (UTM 19S)	Longitud	Latitud	Proyecto	As ppm	Cr ppm	Cu ppm	Hg ppm	Mo ppm	Ni ppm	Pb ppm	Zn ppm
128	ORC-00-050	173390	8299205	-72.042	-15.363	Franja N°2	6	19	33.7	0.1	1	12	11	61.7
129	orc-00038C	174942	8310789	-72.026	-15.259	Franja N°2	7	43	28.5	0.1	1	15	30	59.2
130	32s-SGQ-517	195122	8275685	-71.843	-15.578	Cuenca Camaná-Majes-Colca	35.11	22.1	91	0.03	3.3	9.25	103.21	97.92
131	cai - 00008	198724	8329343	-71.803	-15.094	Franja N°2	22	37	66.5	0.33	23	49	65	426
132	cai - 00010	199750	8324296	-71.794	-15.140	Franja N°2	14	17	31.5	0.21	2	13	49	97.6
133	chi - 00094	211687	8268608	-71.689	-15.644	Franja N°2	12	22	28.8	0.13	1	11	35	92.2
134	chi - 00102	209456	8274664	-71.709	-15.589	Franja N°2	7	75	26	0.66	1	19	17	123
135	cai - 00048	211368	8329187	-71.685	-15.097	Franja N°2	49	26	13.2	0.32	3	10	34	82.5
136	cai - 00023	212673	8333010	-71.673	-15.063	Franja N°2	38	67	45.4	0.65	4	23	76	104
137	chi - 00100	217041	8274340	-71.639	-15.593	Franja N°2	4	30	28.9	0.13	2	14	25	61.1
138	cai - 00070	216580	8289285	-71.641	-15.458	Franja N°2	2	56	59.6	0.27	3	20	31	209
139	cai - 00034	219292	8316507	-71.613	-15.212	Franja N°2	7	128	49.2	0.13	1	30	38	90.7
140	chi - 00079	226066	8279276	-71.554	-15.549	Franja N°2	2	35	30.5	0.1	1	18	33	94.1
141	cai - 00053	230212	8291871	-71.514	-15.436	Franja N°2	2	73	57.1	0.16	1	24	22	59.1
142	cai - 00055	231474	8286387	-71.503	-15.486	Franja N°2	6	54	48.7	0.15	1	37	29	81.2
143	cai - 00066	225885	8303817	-71.553	-15.328	Franja N°2	14	26	58.6	0.14	2	22	40	210

N°	Código de muestra	Este (UTM 19S)	Norte (UTM 19S)	Longitud	Latitud	Proyecto	As ppm	Cr ppm	Cu ppm	Hg ppm	Mo ppm	Ni ppm	Pb ppm	Zn ppm
144	cai - 00031	230026	8294866	-71.515	-15.409	Franja N°2	2	97	30.9	0.15	1	7	7	26.6
145	cai - 00065	226770	8308059	-71.544	-15.289	Franja N°2	2	99	51.9	0.1	2	46	19	59.1
146	con - 048	234594	8305541	-71.472	-15.313	Franja N°2	8	130	38.3	0.1	1	34	21	70.8
147	cai - 00030	230280	8328776	-71.509	-15.103	Franja N°2	11	29	49.9	0.14	2	11	19	44.5
148	cal - 074	244356	8282234	-71.383	-15.525	Franja N°2	32	62	52.4	0.1	1	35	38	86
149	con - 053	236527	8293216	-71.455	-15.425	Franja N°2	31	47	77.1	0.1	2	25	80	197
150	con - 062	243447	8296191	-71.390	-15.398	Franja N°2	7	72	70	0.1	1	37	36	80.5
151	cal - 107	253526	8261470	-71.300	-15.713	Franja N°2	15	57	18.3	0.1	1	8	14	28.5
152	cal - 072	249435	8280768	-71.336	-15.538	Franja N°2	9	20	49.6	0.1	1	14	12	70.7
153	con - 035	250818	8301608	-71.321	-15.350	Franja N°2	7	82	48	0.1	1	25	10	65.2
154	con - 032	253421	8299346	-71.297	-15.371	Franja N°2	6	18	20.8	0.1	1	3	21	268
155	con - 016	251658	8334535	-71.310	-15.053	Franja N°2	2	34	25.8	0.1	3	11	19	91.3
156	cal - 078	254662	8266427	-71.289	-15.668	Franja N°2	13	40	23.3	0.24	5	11	47	139
157	HUA-00-041	164148	8264987	-72.133	-15.671	Franja N°2	15	84	40.4	0.1	7	19	24	91.9
158	ORC-00-046	165709	8303293	-72.113	-15.325	Franja N°2	6	62	62.8	0.1	1	35	23	85.3
159	ORC-00-033	166777	8315944	-72.101	-15.211	Franja N°2	2	15	13.7	0.1	1	8	24	46.5

N°	Código de muestra	Este (UTM 19S)	Norte (UTM 19S)	Longitud	Latitud	Proyecto	As ppm	Cr ppm	Cu ppm	Hg ppm	Mo ppm	Ni ppm	Pb ppm	Zn ppm
160	ORC-00-027	163389	8329200	-72.131	-15.091	Franja N°2	2	170	30.9	0.1	1	24	17	59
161	HUA-00-052	168879	8260640	-72.089	-15.711	Franja N°2	27	84	43.8	0.1	3	19	57	105
162	HUA-00-048	170536	8272587	-72.072	-15.603	Franja N°2	5	73	48.9	0.1	2	22	25	75.9
163	HUA-00-051	171489	8273784	-72.063	-15.592	Franja N°2	50	14	48.8	0.1	5	19	74	138
164	ORC-00-055	169445	8297135	-72.079	-15.381	Franja N°2	8	20	35.3	0.21	1	11	16	59.7
165	ORC-00-042	176065	8309018	-72.016	-15.275	Franja N°2	4	24	23.4	0.1	2	10	10	48.4
166	ORC-00-030	169098	8321364	-72.079	-15.163	Franja N°2	3	69	16.5	0.1	3	8	19	45.1
167	chi - 00130	183630	8267455	-71.951	-15.651	Franja N°2	7	40	28.7	0.1	4	17	32	69.7
168	cai - 00040	179991	8312339	-71.979	-15.245	Franja N°2	5	233	19.5	0.7	10	13	17	32.2
169	chi - 00119	193624	8270940	-71.857	-15.621	Franja N°2	4	30	35.8	0.6	2	18	23	60.8
170	32s-SGQ-512	195498	8273046	-71.839	-15.602	Cuenca Camaná-Majes-Colca	9.16	35.32	31.32	0.04	0.65	15.09	17.97	103.59
171	32s-SGQ-506	195886	8273000	-71.836	-15.603	Cuenca Camaná-Majes-Colca	9.77	40.44	30	0.01	0.62	15.46	17.42	72.48
172	32s-SGQ-503	195627	8276472	-71.838	-15.571	Cuenca Camaná-Majes-Colca	71.64	21.31	355.83	0.04	1.65	15.17	522	2374
173	chi - 00107	202681	8267190	-71.773	-15.656	Franja N°2	2	37	26.7	0.1	1	16	25	44.7
174	cai - 00017	200160	8304270	-71.792	-15.321	Franja N°2	2	87	67.2	0.27	1	14	14	77.2
175	cai - 00009	199096	8327930	-71.799	-15.107	Franja N°2	43	23	57.3	0.29	26	52	36	422

N°	Código de muestra	Este (UTM 19S)	Norte (UTM 19S)	Longitud	Latitud	Proyecto	As ppm	Cr ppm	Cu ppm	Hg ppm	Mo ppm	Ni ppm	Pb ppm	Zn ppm
176	cai - 00019	208856	8298145	-71.712	-15.377	Franja N°2	2	54	36.9	0.17	1	16	14	40.5
177	cai - 00022	212793	8332771	-71.671	-15.065	Franja N°2	7	94	44.1	0.18	3	33	77	77
178	cai - 00024	211235	8336535	-71.686	-15.031	Franja N°2	47	37	28.5	0.24	3	14	42	120
179	cai - 00025	211235	8337088	-71.685	-15.026	Franja N°2	10	78	45.5	0.28	5	28	95	328
180	cai - 00032	224497	8318288	-71.564	-15.197	Franja N°2	378	78	33.1	0.18	1	57	2506	623
181	cai - 00058	227225	8286283	-71.542	-15.486	Franja N°2	9	50	43	0.22	1	30	49	63.8
182	cai - 00050	225541	8298718	-71.557	-15.374	Franja N°2	2	15	113	0.21	3	6	19	58.1
183	cai - 00052	228082	8294867	-71.533	-15.409	Franja N°2	4	55	29.8	0.31	2	7	30	36.6
184	con - 029	243315	8285328	-71.393	-15.496	Franja N°2	13	46	36.7	0.1	1	29	109	150
185	con - 046	234613	8321331	-71.470	-15.170	Franja N°2	67	80	36.2	0.1	1	14	31	64.4
186	cal - 075	246122	8268008	-71.368	-15.653	Franja N°2	9	105	17.8	0.1	5	7	20	28.4
187	cal - 073	247867	8281483	-71.351	-15.532	Franja N°2	25	47	63.5	0.1	2	25	70	148
188	con - 030	245008	8285052	-71.377	-15.499	Franja N°2	18	37	40.5	0.1	1	24	186	284
189	con - 013	246886	8337867	-71.354	-15.022	Franja N°2	2	42	29.4	0.1	1	14	17	61.2
190	ORC-00-054	167878	8298064	-72.093	-15.373	Franja N°2	28	19	40.6	0.1	2	14	44	137
191	ORC-00-053	171445	8299820	-72.060	-15.357	Franja N°2	2	29	29.3	0.16	1	10	18	51.1

N°	Código de muestra	Este (UTM 19S)	Norte (UTM 19S)	Longitud	Latitud	Proyecto	As ppm	Cr ppm	Cu ppm	Hg ppm	Mo ppm	Ni ppm	Pb ppm	Zn ppm
192	ORC-00-032	170443	8322740	-72.066	-15.150	Franja N°2	2	52	32.3	0.1	2	22	14	81.8
193	ORC-00-052	177422	8296385	-72.005	-15.389	Franja N°2	2	76	22.5	0.1	2	9	16	44.9
194	cai - 00003	182568	8330852	-71.953	-15.079	Franja N°2	2	90	49	0.52	9	33	30	82.4
195	chi - 00118	196355	8271213	-71.832	-15.619	Franja N°2	8	24	41.2	0.4	2	17	20	60.6
196	32s-SGQ-502	195441	8274450	-71.840	-15.589	Cuenca Camaná-Majes-Colca	36.94	20.13	120.93	0.01	1.48	13.98	157.07	513.11
197	chi - 00106	200538	8266881	-71.793	-15.658	Franja N°2	2	39	20.5	0.1	1	12	28	38.6
198	cai - 00015	196376	8307770	-71.827	-15.289	Franja N°2	2	106	29.7	0.14	1	15	2	47.5
199	cai - 00006	199306	8330699	-71.797	-15.082	Franja N°2	4	27	33.8	0.24	2	15	38	101
200	cai - 00020	207929	8328858	-71.717	-15.100	Franja N°2	102	26	43.1	0.31	4	7	30	68.5
201	chi - 00086	222651	8264668	-71.587	-15.681	Franja N°2	10	20	28.8	0.15	1	13	20	44.2
202	chi - 00098	216337	8277062	-71.645	-15.568	Franja N°2	4	70	39.6	0.17	1	23	23	75.4
203	cai - 00067	224743	8301580	-71.564	-15.348	Franja N°2	39	30	65.7	0.17	2	33	34	67.3
204	cai - 00035	219417	8313387	-71.612	-15.241	Franja N°2	12	104	54.3	0.17	1	31	62	83.7
205	cai - 00044	216127	8331265	-71.641	-15.079	Franja N°2	8	79	53.7	0.19	2	74	28	56.1
206	chi - 00077	226674	8282173	-71.548	-15.523	Franja N°2	13	49	37.5	0.3	1	28	30	56.6
207	cai - 00059	227218	8286364	-71.542	-15.485	Franja N°2	6	56	42.3	0.24	1	33	27	165

N°	Código de muestra	Este (UTM 19S)	Norte (UTM 19S)	Longitud	Latitud	Proyecto	As ppm	Cr ppm	Cu ppm	Hg ppm	Mo ppm	Ni ppm	Pb ppm	Zn ppm
208	cai - 00054	233013	8287473	-71.488	-15.476	Franja N°2	22	22	42.9	0.21	1	9	36	67.6
209	cai - 00051	228003	8295136	-71.534	-15.406	Franja N°2	2	37	36.2	0.21	1	5	24	35.1
210	cai - 00064	226810	8308232	-71.544	-15.288	Franja N°2	2	112	58	0.17	3	44	28	62
211	cal - 080	241243	8262909	-71.414	-15.699	Franja N°2	13	22	25.6	0.16	1	8	22	44.4
212	cal - 079	242821	8261768	-71.400	-15.709	Franja N°2	4	132	31.9	0.1	3	27	24	65.9
213	con - 057	235679	8289905	-71.463	-15.454	Franja N°2	7	27	43	0.2	1	14	23	54.9
214	con - 054	237073	8292238	-71.450	-15.433	Franja N°2	16	40	54.4	0.13	2	22	120	136
215	con - 059	240250	8299213	-71.420	-15.371	Franja N°2	8	37	53.6	0.1	1	32	39	63.8
216	ORC-00-048	164441	8301342	-72.125	-15.343	Franja N°2	7	19	37.6	0.1	1	11	39	80.1
217	ORC-00-034	166831	8314997	-72.101	-15.220	Franja N°2	7	12	29.1	0.1	1	11	23	56
218	ORC-00-059	169302	8301983	-72.080	-15.338	Franja N°2	7	126	69.8	0.1	2	44	19	89.4
219	ORC-00-039	171935	8309163	-72.054	-15.273	Franja N°2	16	48	68	0.1	3	33	29	75.9
220	ORC-00-029	166866	8322946	-72.100	-15.148	Franja N°2	5	124	18.7	0.1	1	10	11	36.9
221	32s-SGQ-530	195838	8277633	-71.836	-15.561	Cuenca Camaná-Majes-Colca	51.95	22.77	308.85	0.05	2.41	20.67	174	2062
222	32s-SGQ-509	197024	8273983	-71.825	-15.594	Cuenca Camaná-Majes-Colca	19.73	31.87	71.34	0.14	1.59	18.86	87.63	153.71
223	cai - 00007	199442	8330579	-71.796	-15.083	Franja N°2	5	14	28.2	0.22	3	8	83	55.4



N°	Código de muestra	Este (UTM 19S)	Norte (UTM 19S)	Longitud	Latitud	Proyecto	As ppm	Cr ppm	Cu ppm	Hg ppm	Mo ppm	Ni ppm	Pb ppm	Zn ppm
224	chi - 00110	210868	8266687	-71.697	-15.661	Franja N°2	4	40	22.7	0.15	1	16	20	48.8
225	chi - 00095	211066	8268800	-71.695	-15.642	Franja N°2	9	18	66.6	0.27	1	6	36	122
226	chi - 00104	209745	8274432	-71.707	-15.591	Franja N°2	15	29	62.6	0.24	1	18	28	59.9
227	cai - 00021	211479	8327218	-71.684	-15.115	Franja N°2	31	41	36.6	0.1	4	14	17	58.9
228	chi - 00085	222569	8272180	-71.587	-15.613	Franja N°2	25	45	50.4	0.19	2	25	46	91.1
229	chi - 00090	223764	8265470	-71.577	-15.674	Franja N°2	6	60	43.1	0.19	1	21	29	61.9
230	cai - 00073	221319	8291255	-71.597	-15.441	Franja N°2	16	39	36.7	0.21	2	8	67	183
231	cai - 00074	222851	8289793	-71.583	-15.454	Franja N°2	8	22	42.3	0.19	1	18	23	692
232	cai - 00036	219682	8309153	-71.610	-15.279	Franja N°2	7	151	58.1	0.1	5	14	26	51.9
233	cai - 00033	223733	8318210	-71.571	-15.197	Franja N°2	2	101	44.2	0.13	1	25	23	59.9
234	cal - 112	234382	8251564	-71.480	-15.801	Franja N°2	7	50	19.6	0.1	1	10	16	35.4
235	cai - 00063	231150	8308635	-71.503	-15.285	Franja N°2	3	16	25.2	0.1	1	13	40	30.3
236	cai - 00028	227863	8335241	-71.531	-15.044	Franja N°2	2	109	55.5	0.15	3	33	19	75.3
237	cal - 109	242953	8254451	-71.399	-15.775	Franja N°2	4	113	25.9	0.1	1	19	1	56.8
238	cal - 081	240792	8262600	-71.419	-15.702	Franja N°2	14	77	40.5	0.1	2	18	28	69.5
239	cal - 042	239893	8272192	-71.426	-15.615	Franja N°2	46	64	42	0.16	1	16	46	104

N°	Código de muestra	Este (UTM 19S)	Norte (UTM 19S)	Longitud	Latitud	Proyecto	As ppm	Cr ppm	Cu ppm	Hg ppm	Mo ppm	Ni ppm	Pb ppm	Zn ppm
240	cal - 041	241403	8273745	-71.412	-15.601	Franja N°2	11	31	35.9	0.1	3	12	32	84.9
241	cal - 039	239196	8277387	-71.432	-15.568	Franja N°2	15	30	24.2	0.38	1	7	33	50.8
242	cal - 038	239455	8277774	-71.429	-15.564	Franja N°2	8	24	23.5	0.1	2	8	13	48.4
243	cal - 036	240610	8281961	-71.418	-15.527	Franja N°2	7	27	39.6	0.11	1	11	90	158
244	cal - 037	241639	8280336	-71.409	-15.541	Franja N°2	30	33	23.5	0.19	1	6	43	74.8
245	con - 051	236373	8294037	-71.456	-15.417	Franja N°2	36	33	54	0.1	2	23	182	450
246	cal - 077	251941	8268971	-71.314	-15.645	Franja N°2	6	60	39.5	0.1	3	5	11	30.7
247	cal - 083	248161	8277742	-71.348	-15.565	Franja N°2	5	16	16.5	0.1	1	3	17	39.9
248	cal - 071	250247	8280208	-71.329	-15.543	Franja N°2	19	24	56.2	0.12	1	16	27	76
249	con - 034	252273	8300184	-71.308	-15.363	Franja N°2	14	24	47.9	0.1	1	14	16	40.4
250	chi - 00122	185527	8277434	-71.932	-15.561	Franja N°2	22	42	33.4	0.14	2	13	33	82.8

Nota: Información extraída del portal Geocatmin del INGEMMET (<http://geocatmin.ingemmet.gob.pe/geocatmin/>)

*Anexo 2: Base de datos geoquímicos de las muestras de roca (litogeoquímica)*

<b>Código de muestra</b>	<b>Este (UTM 19S)</b>	<b>Norte (UTM 19S)</b>	<b>Latitud</b>	<b>Longitud</b>	<b>Litología</b>	<b>As ppm</b>	<b>Cr ppm</b>	<b>Cu ppm</b>	<b>Hg ppm</b>	<b>Mo ppm</b>	<b>Ni ppm</b>	<b>Pb ppm</b>	<b>Zn ppm</b>
GR38A-17-779	192696	8318850	-15.188	-71.860	Toba de ceniza con cristales	66.8	13	67.7	0.008	0.76	12.8	15.9	110
GR38A-17-780	192453	8319787	-15.180	-71.862	Subvolcánico dacítico	84.3	10	22.2	0.005	1.51	4.3	37.9	113
GR38A-17-781	192177	8319942	-15.178	-71.865	Toba de ceniza con cristales	139	31	46.9	0.01	0.24	25.4	59.8	99
GR38A-17-782	195844	8320061	-15.178	-71.831	Toba de ceniza de composición andesítica	47.1	21	559	0.005	0.25	24.2	113	2720
GR38A-17-783	194622	8320764	-15.171	-71.842	Alteración / cuerpo mineralizado	366	9	54.5	0.015	3.78	3.4	94.4	133
GR38A-17-784	192721	8316641	-15.208	-71.860	Brecha volcánica con fragmento lítico	8.7	10	38.7	0.005	0.22	8	15.7	77
GR38A-17-785	192732	8316640	-15.208	-71.860	Alteración hidrotermal	10.5	44	14.1	0.006	0.15	40.1	16.3	35
GR38A-17-786	193565	8316044	-15.214	-71.852	Toba de ceniza andesítica	11.8	75	37.2	0.005	0.3	42.9	17.8	84
GR38A-17-787	195887	8314589	-15.227	-71.831	Toba de ceniza de composición dacítica	3.4	2	2.1	0.005	1.55	1.8	22.2	29
GR38A-17-788	196385	8314048	-15.232	-71.826	Lava andesítica	0.6	64	51	0.008	1.15	52.5	11.5	81
GR38A-17-789	192581	8320131	-15.177	-71.861	Toba de ceniza con fragmentos líticos	36.7	72	23.4	0.005	0.13	78.5	5.7	96
GR38A-17-790	192820	8322303	-15.157	-71.858	Toba de ceniza de composición dacítica	2.2	1	3.5	0.009	0.93	3	20.8	71
GR38A-17-791	192858	8322542	-15.155	-71.858	Toba lítica de composición andesítica	4.9	17	12.4	0.005	0.37	20.5	11.7	98
GR38A-17-792	193115	8322072	-15.159	-71.856	Toba alterada	116	13	33.9	0.021	0.23	8.1	16.2	63
GR38A-17-793	193912	8320670	-15.172	-71.848	Toba de ceniza con composición andesítica	153.5	38	115	0.005	0.25	37.5	44.3	303

Código de muestra	Este (UTM 19S)	Norte (UTM 19S)	Latitud	Longitud	Litología	As ppm	Cr ppm	Cu ppm	Hg ppm	Mo ppm	Ni ppm	Pb ppm	Zn ppm
GR38A-17-794	196369	8317731	-15.199	-71.826	Lava andesítica	6.2	181	38.9	0.005	0.6	117.5	8.7	82
GR38A-17-795	194617	8317336	-15.202	-71.842	Toba de ceniza y cristales de composición andesítica	3.9	2	6.3	0.005	1.6	3	20.6	98
GR38A-17-796	194372	8317661	-15.199	-71.844	Toba de cristales	3.8	10	15.7	0.005	0.14	5.9	19.1	72
GR38A-17-798	196287	8317315	-15.202	-71.827	Tobas vítreas alteradas	5.7	1	1.7	0.006	2.53	0.7	25.8	37
GR38A-17-799	196114	8316286	-15.212	-71.828	Tobas vítreas	5.3	1	1.1	0.005	1.91	0.7	27.1	38
GR38A-17-885	197016	8315408	-15.220	-71.820	Tobas vítreas	5.6	3	1	0.005	2.08	0.8	25.4	37
GR38A-17-886	192669	8316940	-15.205	-71.860	Limolitas con sulfuros	9.4	18	6.6	0.005	0.35	6.2	5.1	9
GR38A-17-887	192274	8318474	-15.192	-71.864	Subvolcánico Andesítico	161	12	9.8	0.005	0.22	9.8	11.7	30
GR38A-17-888	192530	8318163	-15.194	-71.862	Arenisca	156	3	2.7	0.007	2.01	1.3	4.9	7
GR38A-17-889	199359	8330457	-15.084	-71.797	Toba lítica riolítica	24.6	5	5.9	0.005	1.37	6.3	11.9	59
GR38A-17-890	199362	8332007	-15.070	-71.796	Toba lítica de composición andesítica	12.2	21	22	0.012	0.94	15.5	21.3	86
GR38A-17-891	199152	8330289	-15.086	-71.799	Alteración argílica	5.4	2	1.2	0.015	0.46	0.8	22.8	9
GR38A-17-892	198877	8328636	-15.101	-71.801	Toba lítica de composición andesítica	7.2	43	146.5	0.005	0.9	22.9	48.9	143
GR38A-17-893	203288	8329547	-15.093	-71.760	Toba de cristales	3.9	5	12.2	0.006	3.65	3	10.2	59
GR38A-17-894	203288	8329547	-15.093	-71.760	Toba de cristales	4.3	6	8.4	0.005	1.67	2.2	8.8	52
GR38A-17-895	202498	8328694	-15.100	-71.768	Toba lítica de composición dacítica	3.3	6	24.2	0.005	0.27	5.2	18.3	114

Código de muestra	Este (UTM 19S)	Norte (UTM 19S)	Latitud	Longitud	Litología	As ppm	Cr ppm	Cu ppm	Hg ppm	Mo ppm	Ni ppm	Pb ppm	Zn ppm
GR38A-17-896	202550	8327893	-15.108	-71.767	Toba de ceniza de composición andesítica	4.8	10	61.1	0.005	0.51	10.5	15.2	139
GR38A-17-897	202765	8329548	-15.093	-71.765	Toba lítica de composición andesítica	8.5	7	6.2	0.005	0.84	6.4	24.8	54
GR38A-17-898	202926	8329683	-15.092	-71.764	Toba de ceniza de composición andesítica	5.2	8	32.9	0.012	0.8	7.5	7.6	85
GR38A-17-899	203251	8328890	-15.099	-71.761	Toba de ceniza de composición andesítica	2.4	2	3.2	0.005	0.08	2.2	17.2	40
GR38A-17-900	202602	8330257	-15.086	-71.766	Lava andesítica	1.1	1	1.3	0.005	1.42	1.6	16.2	100
GR38A-17-971	201515	8330525	-15.084	-71.777	Toba alterada	2.8	1	0.7	0.006	2.57	0.5	15.8	41
GR38A-17-972	199003	8328065	-15.106	-71.800	Toba lítica de composición andesítica	12.5	34	48.1	0.005	1.51	23.8	13.2	90
GR38A-17-973	199023	8326527	-15.120	-71.800	Toba lítica de composición andesítica	61.2	16	11.9	0.005	2.97	5.3	12.5	47
GR38A-17-974	199904	8323433	-15.148	-71.792	Toba de ceniza de composición andesítica	1.9	2	3.4	0.005	0.24	0.8	13.9	40
GR38A-17-975	199902	8323427	-15.148	-71.792	Toba lítica de composición andesítica	7.7	4	6.6	0.059	3.72	3.1	21	71
GR38A-17-976	211727	8330015	-15.090	-71.682	Toba de ceniza de composición andesítica	11.7	9	8.2	0.005	1.41	5.4	38.9	61
GR38A-17-977	211660	8329454	-15.095	-71.682	Toba de ceniza de composición andesítica	24.4	49	40.9	0.014	1.68	41.7	54.7	136
GR38A-17-978	210157	8328326	-15.105	-71.696	Toba de ceniza y líticos de composición dacítica	13.8	4	9.9	0.019	1.31	4.8	18.8	58
GR38A-17-979	210359	8328044	-15.107	-71.695	Toba de ceniza de composición traquítica	7.9	3	0.8	0.006	1.59	0.8	18	20
GR38A-17-980	211369	8326897	-15.118	-71.685	Alteración epidota	4.3	27	42.8	0.005	1.64	22	21.9	79
GR38A-17-981	211342	8326903	-15.118	-71.686	Toba lítica de composición andesítica	17.1	26	38.6	0.005	0.78	20.8	12.3	70

Código de muestra	Este (UTM 19S)	Norte (UTM 19S)	Latitud	Longitud	Litología	As ppm	Cr ppm	Cu ppm	Hg ppm	Mo ppm	Ni ppm	Pb ppm	Zn ppm
GR38A-17-982	208945	8327757	-15.110	-71.708	Toba de cristales de composición andesítica	1.8	3	2.4	0.005	0.67	0.9	14.7	47
GR38A-17-983	207202	8329873	-15.090	-71.724	Toba de ceniza de composición dacítica	52.2	9	45.2	0.005	0.33	15.5	8.8	81
GR38A-17-984	207272	8329894	-15.090	-71.723	Toba de ceniza andesítica	43.9	1	3.4	0.016	14.05	0.7	1.3	11
GR38A-17-985	206128	8322762	-15.154	-71.735	Toba de lítica de composición dacítica	13.3	9	11.5	0.014	0.42	6	18.1	54
GR38A-17-986	215251	8314537	-15.230	-71.651	Ceniza volcánica de composición dacítica	49.9	10	30.9	0.044	1.43	6.5	24.1	65
GR38A-17-987	214918	8315576	-15.220	-71.654	Flujo piroclástico de caliza retrabajadas	1.9	2	5.5	0.011	0.08	2.4	1.8	9
GR38A-17-988	214386	8315612	-15.220	-71.659	Lava andesítica	1	31	58.3	0.005	0.92	26.5	8.1	103
GR38A-17-989	213746	8313747	-15.237	-71.665	Lava andesítica	0.4	32	76.3	0.005	0.68	26.9	9.8	116
GR38A-17-990	212273	8311797	-15.254	-71.679	Ceniza riolítica	1.3	29	94.3	0.005	0.34	26.1	3.3	96
GR38A-17-991	210659	8310452	-15.266	-71.694	Lava andesítica - traquítica	0.6	27	52.9	0.005	0.44	23.1	11.2	94
GR38A-17-992	225910	8318347	-15.196	-71.551	Alteración hidrotermal	1.8	263	56.8	0.005	0.99	169.5	6.9	71
GR38A-17-993	225160	8318096	-15.199	-71.558	Toba de ceniza de composición dacítica	12.2	7	9.4	0.005	2.44	6.7	42.9	72
GR38A-17-994	225160	8318096	-15.199	-71.558	Toba de ceniza de composición dacítica	13.6	6	9	0.005	2.51	4.5	41.7	69
GR38A-17-995	224325	8317984	-15.200	-71.566	Toba de ceniza de composición andesítica	10.4	259	50.9	0.014	0.76	146	7.6	131
GR38A-17-996	222862	8318404	-15.196	-71.579	Toba de ceniza y líticos de composición dacítica	5.4	10	13.6	0.005	0.45	7.2	38.7	80
GR38A-17-997	221719	8318448	-15.195	-71.590	Lava andesítica	4.8	25	56.7	0.005	1.24	25.9	10.2	68

Código de muestra	Este (UTM 19S)	Norte (UTM 19S)	Latitud	Longitud	Litología	As ppm	Cr ppm	Cu ppm	Hg ppm	Mo ppm	Ni ppm	Pb ppm	Zn ppm
GR38A-17-998	220175	8318307	-15.196	-71.604	Subvolcánico Andesítico	8.8	7	61.1	0.005	1.89	25.6	12.4	80
GR38A-17-999	219234	8318647	-15.193	-71.613	Toba de ceniza y cristales de composición andesítica	11.5	67	87.6	0.047	1.52	39.7	89.9	143
GR38A-17-1000	218684	8318610	-15.193	-71.618	Arenisca de grano fino	7.4	22	20.4	0.041	1.28	14.6	18.4	56
GR38A-17-1001	217215	8320469	-15.176	-71.632	Toba de ceniza con líticos de composición dacítica	11.8	37	21.6	0.031	0.87	23.4	10.7	68
GR38A-17-1002	217989	8319508	-15.185	-71.625	Toba de lítica de composición andesítica	19	43	30.4	0.005	1.75	28.8	13.2	60
GR38A-17-1003	218985	8315991	-15.217	-71.616	Alteración de toba	132.5	66	61.5	0.013	2.26	5.3	10.4	15
GR38A-17-1014	190947	8306494	-15.300	-71.878	Toba de ceniza de composición andesítica	13.2	3	2.9	0.013	3.29	1.1	7.8	65
GR38A-17-1015	190900	8306425	-15.300	-71.878	Lava andesítica	8.2	3	3.1	0.008	2.94	0.9	13.2	82
GR38A-17-1016	190547	8306078	-15.303	-71.881	Toba de ceniza de composición dacítica	17.4	15	14.6	0.005	2.29	8.7	43	83
GR38A-17-1017	190791	8307744	-15.288	-71.879	Toba de ceniza y cristales de composición andesítica	6.3	3	8.1	0.007	2.3	1.3	20.2	71
GR38A-17-1018	190604	8310629	-15.262	-71.880	Toba lítica de composición riolítica	3.4	17	48.1	0.005	0.98	16.9	18.9	86
GR38A-17-1019	189954	8311326	-15.256	-71.886	Toba de ceniza de composición dacítica	0.7	53	48.3	0.005	0.56	56.6	8.2	90
GR38A-17-1020	189593	8313415	-15.237	-71.889	Toba de ceniza de composición dacítica	0.7	60	65.2	0.011	0.4	58	9.7	90
GR38A-17-1021	186311	8314711	-15.225	-71.920	Toba de ceniza de composición dacítica - sillar	3.5	9	10.6	0.01	0.22	5.5	40.4	71
GR38A-17-1022	186499	8314761	-15.224	-71.918	Lava andesítica	3.6	164	23.2	0.016	1.21	124.5	4	43
GR38A-17-1023	195616	8312881	-15.242	-71.833	Toba de ceniza y cristales de composición andesítica	4.4	38	48.5	0.021	0.22	47.8	21.9	132

Código de muestra	Este (UTM 19S)	Norte (UTM 19S)	Latitud	Longitud	Litología	As ppm	Cr ppm	Cu ppm	Hg ppm	Mo ppm	Ni ppm	Pb ppm	Zn ppm
GR38A-17-1024	195616	8312881	-15.242	-71.833	Toba de ceniza y cristales de composición andesítica	4.9	42	47	0.007	0.2	47.2	21.8	132
GR38A-17-1025	211256	8284209	-15.503	-71.691	Toba de cristales	2	6	9.2	0.005	1.61	3	18.3	80
GR38A-17-1026	211776	8284500	-15.501	-71.686	Lava andesítica	0.9	24	60	0.005	1.04	21.1	12.6	93
GR38A-17-1027	207472	8300246	-15.358	-71.725	Toba de ceniza y cristales de composición andesítica	0.6	20	44.6	0.005	0.8	18.7	10.8	95
GR38A-17-1028	204025	8303047	-15.332	-71.756	Toba de ceniza y cristales	0.6	30	43.9	0.009	0.8	21	10.7	98
GR38A-17-1029	203262	8302814	-15.334	-71.764	Toba de ceniza de composición dacítica	0.8	23	45	0.009	0.92	15.9	13.4	101
GR38A-17-1030	201812	8303036	-15.332	-71.777	Lava andesítica	1	35	54	0.01	1.27	16.8	12.9	104
GR38A-17-1031	199313	8304416	-15.319	-71.800	Lava andesítica	0.9	32	64.8	0.014	0.99	22.6	11.8	134
GR38A-17-1032	197145	8306654	-15.299	-71.820	Lava andesítica	0.6	36	57.4	0.017	0.75	29.4	10.2	129
GR38A-17-1033	196758	8306432	-15.301	-71.824	Pómez alterada	0.8	88	73.7	0.005	1.71	58.3	9.1	120
GR38A-17-1044	212210	8295326	-15.403	-71.681	Alteración - Oxidación	1.9	33	23.9	0.065	1.34	18.1	12.9	76
GR38A-17-1045	212829	8295128	-15.405	-71.675	Toba riolítica alterada	2.3	35	36.4	0.02	1.73	21.9	14.4	89
GR38A-17-1046	213027	8296461	-15.393	-71.673	Lava andesítica vesicular	0.9	20	57	0.02	0.87	17.5	12.4	123
GR38A-17-1047	213197	8296936	-15.388	-71.672	Lava andesítica	0.5	21	61.2	0.007	1	17.1	12.9	120
GR38A-17-1048	209584	8297360	-15.384	-71.705	Toba de ceniza de composición riolítica	0.7	242	82.3	0.007	0.41	123	6.6	112
GR38A-17-1049	209305	8302440	-15.338	-71.707	Lava andesítica vesicular	0.7	36	53.7	0.005	0.66	23.7	11.1	128



Código de muestra	Este (UTM 19S)	Norte (UTM 19S)	Latitud	Longitud	Litología	As ppm	Cr ppm	Cu ppm	Hg ppm	Mo ppm	Ni ppm	Pb ppm	Zn ppm
GR38A-17-1050	209115	8301940	-15.343	-71.709	Lava andesítica	1.2	23	56.1	0.005	1.11	22.4	11.5	113
GR38A-17-1051	209780	8301524	-15.347	-71.703	Toba de ceniza de composición riolítica - dacítica	0.8	21	60.6	0.005	0.61	20.5	11.3	119
GR38A-17-1052	209924	8300677	-15.354	-71.702	Pómez riolítica alterada	0.6	53	32.7	0.005	0.98	39.4	5.8	102
GR38A-17-1053	209618	8299846	-15.362	-71.705	Lava riolítica	0.3	101	76.3	0.005	0.67	72.1	8.8	111
GR38A-17-1054	209618	8299846	-15.362	-71.705	Lava riolítica	0.4	103	79.5	0.005	0.63	72.1	8.1	134
GR38A-17-1055	203956	8304335	-15.321	-71.757	Toba de cristales de composición riolítica	5.4	108	37.2	0.005	0.87	46.2	10.9	70
GR38A-17-1056	202766	8305533	-15.310	-71.768	Toba andesítica basáltica	3.3	160	29.9	0.005	1.2	52.1	10.7	75
GR38A-17-1057	201718	8307583	-15.291	-71.777	Lava andesítica	0.2	30	65.5	0.005	1.18	25	6.8	105
GR38A-17-1058	201561	8294726	-15.407	-71.780	Toba de ceniza de composición dacítica	3.2	4	3.8	0.005	0.24	1.3	31.1	38
GR38A-17-1059	201570	8294755	-15.407	-71.780	Toba de ceniza riolítica	5.7	3	2.3	0.005	0.86	0.9	17.5	31
GR38A-17-1060	223066	8302209	-15.342	-71.579	Cuarzoarenita de grano fino	1.8	19	5.4	0.005	0.19	1.8	3.9	2
GR38A-17-1061	223091	8302242	-15.342	-71.579	Cuarzoarenita de grano fino	7.4	14	8.9	0.008	0.28	2.3	3.4	6
GR38A-17-1062	223145	8302335	-15.341	-71.579	Cuarzoarenita de grano fino	1	12	5.1	0.009	0.17	1.9	2.6	6
GR38A-17-1063	223197	8302377	-15.340	-71.578	Cuarzoarenita de grano fino	2.1	16	8.2	0.009	0.25	6.4	3.5	6
GR38A-17-1064	223259	8302398	-15.340	-71.578	Cuarzoarenita de grano fino	1.1	13	5.2	0.01	0.17	9.7	3.4	28
GR38A-17-1065	223293	8302420	-15.340	-71.577	Cuarzoarenita de grano fino	8.2	15	5.9	0.005	0.38	2.8	3.2	8

Código de muestra	Este (UTM 19S)	Norte (UTM 19S)	Latitud	Longitud	Litología	As ppm	Cr ppm	Cu ppm	Hg ppm	Mo ppm	Ni ppm	Pb ppm	Zn ppm
GR38A-17-1066	223332	8302475	-15.340	-71.577	Cuarzoarenita de grano fino	1	12	10.2	0.005	0.16	5.1	5	7
GR38A-17-1067	223372	8302532	-15.339	-71.576	Cuarzoarenita de grano fino	1.4	14	12.6	0.02	0.16	3.4	2.9	9
GR38A-17-1068	223480	8302842	-15.336	-71.575	Arenisca feldespática de grano fino a medio	1.2	12	8.3	0.019	0.63	8.4	4.5	18
GR38A-17-1069	221870	8302279	-15.341	-71.590	Arenisca feldespática de grano fino	1.5	25	10.2	0.006	0.31	7.9	3.1	10
GR38A-17-1071	221244	8303393	-15.331	-71.596	Cuarzoarenita de grano fino	1.9	21	8	0.005	0.26	5.6	2.6	11
GR38A-17-1072	220546	8303982	-15.326	-71.603	Cuarzoarenita de grano fino a medio	2.1	20	8.5	0.005	0.3	10.4	2.4	8
GR38A-17-1073	220248	8304286	-15.323	-71.605	Limolita carbonosa	10.1	63	47.6	0.029	5.8	18	20.4	21
GR38A-17-1074	223902	8302752	-15.337	-71.572	Limolita	4.6	20	23.4	0.009	0.58	19.1	23.2	44
GR38A-17-1091	189172	8271999	-15.611	-71.899	Toba de cristales	4	26	27.4	0.005	2.56	17.6	19.8	72
GR38A-17-1092	216971	8271038	-15.623	-71.640	Lava andesítica	0.6	25	53.9	0.005	1.24	21.4	10.8	111
GR38A-17-1093	218448	8273618	-15.600	-71.626	Lava andesítica	1.4	29	55.6	0.005	1.27	21.8	11	110
GR38A-17-1094	217730	8272096	-15.613	-71.632	Lava riolítica	1.6	69	66.8	0.005	0.67	52.9	6.4	108
GR38A-17-1095	217756	8271906	-15.615	-71.632	Lava andesítica	1.1	76	55	0.005	0.98	52.6	6.6	102
GR38A-17-1096	217833	8271687	-15.617	-71.632	Toba de ceniza y cristales	0.2	37	58.9	0.005	0.8	36.1	9.7	93
GR38A-17-1097	216994	8270388	-15.629	-71.639	Toba de ceniza	6	48	32.9	0.013	1.36	22.4	28	78
GR38A-17-1098	220949	8260437	-15.719	-71.604	Toba de cristales y líticos	6.2	8	18.5	0.005	3.37	4.6	25	62

<b>Código de muestra</b>	<b>Este (UTM 19S)</b>	<b>Norte (UTM 19S)</b>	<b>Latitud</b>	<b>Longitud</b>	<b>Litología</b>	<b>As ppm</b>	<b>Cr ppm</b>	<b>Cu ppm</b>	<b>Hg ppm</b>	<b>Mo ppm</b>	<b>Ni ppm</b>	<b>Pb ppm</b>	<b>Zn ppm</b>
GR38A-17-1099	220944	8260440	-15.719	-71.604	Toba de ceniza y cristales	2.3	8	25.4	0.013	1.8	5.5	20.5	62
GR38A-17-1100	220975	8261957	-15.705	-71.603	Toba de ceniza y cristales	2.4	9	22.4	0.005	1.39	9.1	13.9	73
GR38A-17-1101	181808	8274368	-15.588	-71.967	Roca alterada	10.3	3	54.4	0.006	0.57	2.9	10.8	35
GR38A-17-1102	181561	8274258	-15.589	-71.969	Subvolcánico Andesítico	5	25	23.8	0.008	0.58	10.5	23	114
GR38A-17-1103	179781	8273931	-15.592	-71.986	Roca alterada	88.6	19	58.3	0.017	2.11	8.6	25.5	77
GR38A-17-1104	179289	8273765	-15.594	-71.990	Roca alterada	20.4	22	40.7	0.014	2.16	10.8	83.3	114
GR38A-17-1105	179134	8274117	-15.590	-71.992	Roca alterada	13.5	30	23.5	0.036	1.46	5.6	15.3	23
GR38A-17-1106	178729	8274617	-15.586	-71.995	Roca alterada	6.2	20	47.7	0.881	4.36	1.3	172	30
GR38A-17-1107	178706	8274594	-15.586	-71.996	Lava andesítica	5.8	22	21.8	0.005	0.28	13.1	6.2	93
GR38A-17-1108	177844	8274910	-15.583	-72.004	Roca alterada	23.4	20	22	0.005	4.02	8.3	17	78
GR38A-17-1109	177888	8274521	-15.587	-72.003	Lava andesítica	0.5	21	52.6	0.01	0.98	17.9	10.3	110
GR38A-17-1110	177903	8273633	-15.595	-72.003	Arcosa	1.5	24	8	0.005	0.32	4.6	18.6	89
GR38A-17-1111	178290	8273672	-15.594	-72.000	Toba de ceniza	12.4	1	1	0.015	0.05	0.6	0.5	2
GR38A-17-1112	178229	8273645	-15.595	-72.000	Subvolcánico Andesítico	11	12	3.6	0.024	0.4	4.9	8.9	97
GR38A-17-1113	176254	8271161	-15.617	-72.019	Diorita	4.2	38	5.5	0.005	0.52	6.4	5.3	31
GR38A-17-1114	176334	8270414	-15.623	-72.018	Toba de ceniza y cristales	2.5	18	50.3	0.005	2.04	17.4	13.8	92

<b>Código de muestra</b>	<b>Este (UTM 19S)</b>	<b>Norte (UTM 19S)</b>	<b>Latitud</b>	<b>Longitud</b>	<b>Litología</b>	<b>As ppm</b>	<b>Cr ppm</b>	<b>Cu ppm</b>	<b>Hg ppm</b>	<b>Mo ppm</b>	<b>Ni ppm</b>	<b>Pb ppm</b>	<b>Zn ppm</b>
GR38A-17-1115	178186	8269850	-15.629	-72.001	Lava andesítica	0.7	56	56.7	0.006	1	41.2	8.6	94
GR38A-17-1116	178289	8269782	-15.629	-72.000	Andesita	1.9	8	42.8	0.005	2.16	11.6	14.1	86
GR38A-17-1117	178289	8269782	-15.629	-72.000	Andesita	1	8	45.4	0.005	2.12	11.5	14.7	84
GR38A-17-1118	182349	8272058	-15.609	-71.962	Toba de cristales y ceniza	4.4	25	42.9	0.005	2.47	17.9	17.5	68
GR38A-17-1119	183650	8271894	-15.611	-71.950	Toba de cristales y ceniza	3.7	26	21.7	0.005	2.8	17.3	17.4	69
GR38A-17-1120	187005	8271666	-15.614	-71.919	Toba de cristales y ceniza	3.3	26	47.9	0.005	1.56	18.3	12.7	73
GR38A-17-1121	184882	8275394	-15.580	-71.938	Diorita	9.9	13	32.7	0.005	1.38	8.2	12.5	130
GR38A-17-1122	184102	8275199	-15.581	-71.945	Roca alterada	14	15	29.4	0.021	2.37	12.6	22.9	47
GR38A-17-1123	211300	8284218	-15.503	-71.691	Toba de cristales y ceniza	2	7	9.3	0.005	1.97	2.5	15.5	80
GR38A-17-1124	212072	8284750	-15.498	-71.684	Lava escoriácea	1.6	3	22.8	0.006	1.27	1.7	13.8	101
GR38A-17-1125	214771	8289842	-15.453	-71.658	Tobas de ceniza	10.6	8	10.3	0.005	1.39	5.5	39.9	79
GR38A-17-1126	215528	8289208	-15.458	-71.651	Lava andesítica	1	37	32.3	0.007	2.08	21.1	12.8	96
GR38A-17-1127	227173	8289766	-15.455	-71.542	Lava andesítica	3	170	60.4	0.005	1.05	88.3	13	71
GR38A-17-1128	227352	8289312	-15.459	-71.541	Lava andesítica	2.3	171	65.3	0.005	0.91	97.7	13.3	72
GR38A-17-1129	227306	8289150	-15.460	-71.541	Lava andesítica	2.5	173	57.8	0.005	1.3	98.6	13.6	77
GR38A-17-1130	227232	8289158	-15.460	-71.542	Roca alterada	341	315	60.4	0.111	12.95	132	18.1	56

Código de muestra	Este (UTM 19S)	Norte (UTM 19S)	Latitud	Longitud	Litología	As ppm	Cr ppm	Cu ppm	Hg ppm	Mo ppm	Ni ppm	Pb ppm	Zn ppm
GR38A-17-1131	227380	8288922	-15.462	-71.541	Lava andesítica	4	229	41.8	0.005	1.64	105.5	14.9	99
GR38A-17-1132	227871	8287849	-15.472	-71.536	Lava andesítica	2.2	189	57.7	0.005	1.09	97.7	12	73
GR38A-17-1133	227556	8287478	-15.475	-71.539	Roca alterada	431	19	30.4	0.202	11.9	37.4	20.1	93
GR38A-17-1134	227554	8287474	-15.475	-71.539	Sílice	1140	37	12.3	0.095	81.4	6.5	1.7	11
GR38A-17-1135	227733	8286495	-15.484	-71.538	Toba de ceniza	7.8	57	43.7	0.006	1.46	31.4	18.1	43
GR38A-17-1136	228469	8285269	-15.495	-71.531	Roca alterada	30.6	7	37.1	0.16	2.61	10.5	4.4	45
GR38A-17-1137	228763	8284948	-15.498	-71.528	Toba de ceniza	61.5	24	27.2	0.005	1.44	13.9	17.5	58
GR38A-17-1138	228750	8284680	-15.501	-71.528	Lava andesítica	4.6	180	86.6	0.005	0.88	72.8	10.5	64
GR38A-17-1139	229620	8287794	-15.473	-71.520	Lava andesítica	1.9	159	36.2	0.005	1.5	94	12	73
GR38A-17-1140	229741	8285139	-15.497	-71.519	Toba de ceniza	68.5	24	37.2	0.005	1.23	13.5	23.2	62
GR38A-17-1141	229573	8284758	-15.500	-71.521	Lava andesítica	3.1	148	62	0.005	1.58	86.7	11.9	74
GR38A-17-1142	225609	8280430	-15.539	-71.558	Subvolcánico Andesítico	9.5	4	8.2	0.005	1.5	2.5	23.2	87
GR38A-17-1143	220109	8273913	-15.597	-71.610	Subvolcánico Andesítico	1.4	23	50.7	0.005	1.11	20.5	11.1	113
GR38A-17-1144	224003	8273909	-15.598	-71.574	Cuarzoarenita	2.6	16	1.9	0.106	0.38	2.1	2.2	7
GR38A-17-1145	224020	8273622	-15.600	-71.574	Lutitas	1.2	40	3.1	0.01	0.57	26.7	6.6	37
GR38A-17-1146	223599	8273954	-15.597	-71.578	Cuarzoarenita	12.7	22	2	0.132	0.59	0.9	4.2	4

Código de muestra	Este (UTM 19S)	Norte (UTM 19S)	Latitud	Longitud	Litología	As ppm	Cr ppm	Cu ppm	Hg ppm	Mo ppm	Ni ppm	Pb ppm	Zn ppm
GR38A-17-1147	223599	8273954	-15.597	-71.578	Cuarzoarenita	11.4	24	2.2	0.104	1.01	1.4	3.6	3
GR38A-17-1148	223325	8273415	-15.602	-71.580	Cuarzoarenita	10.7	21	3.7	0.012	0.55	1.8	2.5	8
GR38A-17-1149	223275	8273387	-15.602	-71.581	Lutita	13.8	66	16.7	0.009	1.01	21.7	7.7	34
GR38A-17-1150	208121	8264808	-15.678	-71.723	Lava escoriácea	2.5	23	48.1	0.005	1.75	20.5	14.2	87
GR38A-17-1151	208816	8265200	-15.675	-71.716	Toba de ceniza	7.9	31	86.5	0.113	0.67	31.3	7.4	43
GR38A-17-1152	209413	8265700	-15.670	-71.711	Lava andesítica	3.6	22	49.3	0.005	1.76	20	14	80
GR38A-17-1153	209888	8266341	-15.664	-71.706	Arcosa	5.3	23	36.4	0.012	2.7	17.7	19.2	72
GR38A-17-1154	210026	8266423	-15.664	-71.705	Limolita	11.8	57	47.4	0.019	1.06	28.2	28.7	98
GR38A-17-1155	210118	8266096	-15.667	-71.704	Limolita	6.6	52	49.2	0.009	0.73	31.8	27.7	108
GR38A-17-1156	209561	8265027	-15.676	-71.709	Subvolcánico Andesítico	2.9	8	39	0.005	0.92	7.8	10.1	81
GR38A-17-1157	209573	8265043	-15.676	-71.709	Roca alterada	4.9	5	35.5	0.202	0.47	7.7	9.8	58
GR38A-17-1158	209740	8265386	-15.673	-71.708	Lava andesítica	4.9	7	29.6	0.008	0.8	7	11.4	86
GR38A-17-1159	209947	8265594	-15.671	-71.706	Roca alterada	6.5	8	19.4	0.301	0.67	1	11.4	31
GR38A-17-1160	212622	8264428	-15.682	-71.681	Tobas de cristales	14.4	8	17.9	0.011	5.28	8.8	27.9	71
GR38A-17-1161	208679	8263313	-15.692	-71.718	Toba lítica	3.9	8	29.3	0.005	1.53	9	17.6	65
GR38A-17-1162	208972	8263531	-15.690	-71.715	Roca alterada	12.9	11	80.5	1.205	1.01	2	10.6	30

<b>Código de muestra</b>	<b>Este (UTM 19S)</b>	<b>Norte (UTM 19S)</b>	<b>Latitud</b>	<b>Longitud</b>	<b>Litología</b>	<b>As ppm</b>	<b>Cr ppm</b>	<b>Cu ppm</b>	<b>Hg ppm</b>	<b>Mo ppm</b>	<b>Ni ppm</b>	<b>Pb ppm</b>	<b>Zn ppm</b>
GR38A-17-1163	209691	8264142	-15.684	-71.708	Lava andesítica	23.9	9	28.6	0.016	0.91	6.5	13.5	34
GR38A-17-1164	211297	8263384	-15.691	-71.693	Roca alterada	19.3	5	52.2	0.016	2.1	1.4	5.8	56
GR38A-17-1165	211204	8263573	-15.689	-71.694	Lava andesítica	0.6	14	57.4	0.024	0.88	11.2	6.6	88
GR38A-17-1166	211206	8263598	-15.689	-71.694	Roca alterada	6.8	16	113	0.876	0.69	4	6.5	32
GR38A-17-1167	211169	8263800	-15.687	-71.695	Roca alterada	3	8	52.6	0.027	4.46	8	21.7	50
GR38A-17-1168	211271	8263975	-15.686	-71.694	Toba de ceniza	4.2	18	41.1	0.031	1.65	15.3	19.4	72
GR38A-17-1169	211278	8264204	-15.684	-71.693	Brecha hidrotermal	7.2	9	54.9	0.15	1.96	4.1	61.2	56
GR38A-17-1170	213392	8263915	-15.687	-71.674	Roca alterada	58.5	3	18.7	0.902	5.95	0.8	14.7	29
GR38A-17-1171	213396	8263902	-15.687	-71.674	Lava andesítica	3.5	5	32.4	0.015	1.14	4.1	12.3	91
GR38A-17-1172	213396	8263911	-15.687	-71.674	Lava andesítica	1.8	2	27.1	0.02	0.7	3.6	9.4	93
GR38A-17-1173	212587	8264208	-15.684	-71.681	Roca alterada	1.5	5	26.7	0.079	0.33	6.1	13.7	85
GR38A-17-1174	211618	8263968	-15.686	-71.690	Roca alterada	36.5	26	41.3	0.538	0.57	10.3	11.6	71
GR38A-17-1175	214856	8263955	-15.686	-71.660	Andesita subvolcánica	11.7	2	11	0.012	0.77	2.1	15	82
GR38A-17-1176	214708	8264896	-15.678	-71.661	Andesita	1.4	9	18.2	0.005	0.76	5.5	20.3	48
GR38A-17-1177	214708	8264896	-15.678	-71.661	Andesita	2.1	10	16.4	0.008	0.84	4.4	19.3	48
GR38A-17-1178	216280	8265326	-15.674	-71.647	Brecha hidrotermal	227	3	2.8	0.122	1.06	0.7	45	24

<b>Código de muestra</b>	<b>Este (UTM 19S)</b>	<b>Norte (UTM 19S)</b>	<b>Latitud</b>	<b>Longitud</b>	<b>Litología</b>	<b>As ppm</b>	<b>Cr ppm</b>	<b>Cu ppm</b>	<b>Hg ppm</b>	<b>Mo ppm</b>	<b>Ni ppm</b>	<b>Pb ppm</b>	<b>Zn ppm</b>
GR38A-17-1179	216180	8265294	-15.675	-71.648	Andesita	5.8	6	12.6	0.005	1.72	9	17.8	85
GR38A-17-1180	205033	8268183	-15.647	-71.751	Toba de ceniza	6.4	59	42.2	0.025	1.02	29.3	25.8	99
GR38A-17-1181	206167	8265227	-15.674	-71.741	Conglomerado	7	66	39	0.005	1.03	34.6	16.1	108
GR38A-17-1182	206157	8265229	-15.674	-71.741	Toba de ceniza	6.5	25	70.5	0.021	0.6	31.3	22.7	147
GR38A-17-1183	205672	8266739	-15.660	-71.745	Andesita	1.4	52	62.4	0.005	1.88	32.4	12.3	105
GR38A-17-1184	205425	8266928	-15.659	-71.748	Toba de cenizas	3.2	52	69.8	0.005	3.32	21.7	12	97
GR38A-17-1185	205400	8266909	-15.659	-71.748	Toba de cristales	7.7	12	28.9	0.005	3.6	13.5	24.1	67
GR38A-17-1186	217818	8267208	-15.657	-71.632	Andesita	6	27	55.5	0.005	0.37	22.7	10.9	87
GR38A-17-1187	216545	8268091	-15.649	-71.644	Andesita	19.5	3	21	0.005	1.06	1.7	27.6	93
GR38A-17-1188	209775	8267134	-15.657	-71.707	Tobas de ceniza	5.5	3	26.8	0.022	1.94	2.6	21.4	42
GR38A-17-1189	209838	8267073	-15.658	-71.707	Andesita	3.7	25	47.1	0.005	1.79	17.8	14.6	87
GR38A-17-1190	205244	8267119	-15.657	-71.749	Andesita	1.9	4	46.9	0.006	1.1	10.8	12.2	89
GR38A-17-1191	204823	8267091	-15.657	-71.753	Andesita	3.3	4	45.7	0.006	1.16	9.3	13.4	81
GR38A-17-1192	200769	8267619	-15.652	-71.791	Andesita	1.9	36	69.7	0.005	1.7	30.5	10.9	96
GR38A-17-1193	197498	8274359	-15.590	-71.821	Arenisca	10.5	32	16.6	0.005	0.74	3.9	83	8
GR38A-17-1194	197548	8273987	-15.594	-71.820	Limolitas	6.5	47	34.7	0.005	1.3	15.1	53.8	64



<b>Código de muestra</b>	<b>Este (UTM 19S)</b>	<b>Norte (UTM 19S)</b>	<b>Latitud</b>	<b>Longitud</b>	<b>Litología</b>	<b>As ppm</b>	<b>Cr ppm</b>	<b>Cu ppm</b>	<b>Hg ppm</b>	<b>Mo ppm</b>	<b>Ni ppm</b>	<b>Pb ppm</b>	<b>Zn ppm</b>
GR38A-17-1195	197303	8274520	-15.589	-71.822	Arenisca	1.5	20	3.6	0.005	0.24	3.7	3.5	37
GR38A-17-1196	197498	8275249	-15.582	-71.821	Brecha de falla	28.9	12	59.4	0.268	2.71	1.2	16.2	19
GR38A-17-1197	197498	8275249	-15.582	-71.821	Brecha de falla	16	12	15.8	0.37	2.82	3.5	19.3	2
GR38A-17-1198	197373	8274728	-15.587	-71.822	Brecha de falla	77.1	4	7.5	0.035	4.41	0.8	26.1	2
GR38A-17-1199	196209	8274200	-15.592	-71.833	Diorita	1.8	8	32.3	0.005	0.37	6.5	11.4	135
GR38A-17-1200	195618	8274213	-15.592	-71.838	Arenisca	15	30	39	0.019	1.34	21.1	30.1	151
GR38A-17-1201	195275	8274437	-15.590	-71.841	Brecha hidrotermal	21.5	17	45	0.031	6.16	1.2	1490	27
GR38A-17-1202	195278	8274429	-15.590	-71.841	Roca alterada	38.8	20	142.5	0.038	4.92	5.5	787	73
GR38A-17-1203	196547	8273251	-15.600	-71.830	Lodolitas	7.9	30	47.4	0.033	0.77	23.8	28.2	101
GR38A-17-1204	197648	8272946	-15.603	-71.819	Arenisca	107.5	19	42.9	0.128	1.11	9	44.9	132
GR38A-17-1205	205265	8269486	-15.635	-71.749	Diorita	8.3	20	11.3	0.035	0.98	6.6	18.2	101
GR38A-17-1206	202011	8272702	-15.606	-71.779	Roca alterada	28.3	15	38.2	0.063	6.58	1.1	38.9	27
GR38A-17-1207	202011	8272702	-15.606	-71.779	Roca alterada	25.5	14	40.8	0.077	4.76	1	101.5	26
GR38A-17-1208	202047	8272482	-15.608	-71.779	Riolita	0.7	36	54.5	0.01	0.65	30.7	8.9	79
GR38A-17-1209	201591	8274550	-15.589	-71.783	Andesita	7.4	13	15.1	0.006	0.33	8.1	13.3	77
GR38A-17-1210	202766	8275182	-15.584	-71.772	Roca alterada	5.6	3	25.5	0.149	1.03	0.6	11	11

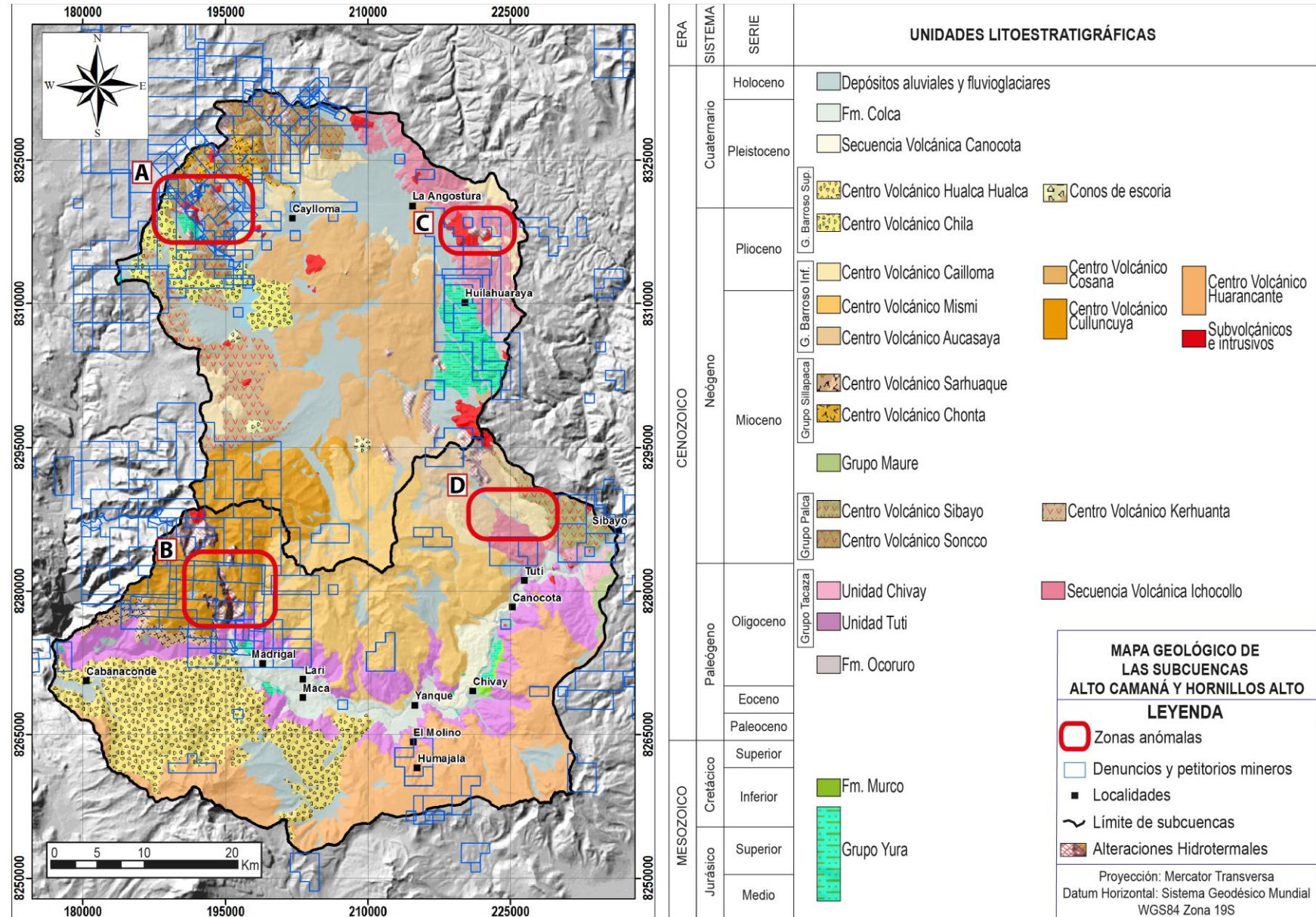
Código de muestra	Este (UTM 19S)	Norte (UTM 19S)	Latitud	Longitud	Litología	As ppm	Cr ppm	Cu ppm	Hg ppm	Mo ppm	Ni ppm	Pb ppm	Zn ppm
GR38A-17-1211	202594	8274987	-15.585	-71.773	Brecha	25.8	8	10.3	0.552	3.69	2.8	11.6	9
GR38A-17-1212	202594	8274987	-15.585	-71.773	Roca alterada	12.7	4	21.5	0.643	0.73	0.4	12.1	36
GR38A-17-1213	202949	8274469	-15.590	-71.770	Roca alterada	9	3	33.9	0.677	1.03	1.5	12.9	70
GR38A-17-1214	203150	8274304	-15.592	-71.768	Andesita	4	11	38.7	0.005	0.65	12.1	12.5	77
GR38A-17-1215	203947	8275146	-15.584	-71.761	Toba de cristales	3.6	6	11.5	0.007	0.4	4.8	34.4	41
GR38A-17-1216	204581	8281295	-15.529	-71.754	Tobas-Ignimbritas	5	3	1	0.005	1.75	0.8	22.1	36
GR38A-17-1217	221520	8261632	-15.708	-71.598	Toba de cristales	2.8	9	25.6	0.005	0.88	10.1	15.7	74
GR38A-17-1218	222676	8261055	-15.714	-71.588	Roca alterada	8.7	3	7.5	0.021	2.47	3.4	21.7	45
GR38A-17-1219	222034	8263666	-15.690	-71.593	Roca alterada	4.9	8	17.8	0.005	0.34	8.2	22.8	45
GR38A-17-1220	222377	8264193	-15.685	-71.590	Roca alterada	26.1	11	944	0.157	1.33	54.4	8.2	150
GR38A-17-1221	222573	8264871	-15.679	-71.588	Roca alterada	99.6	39	44.7	0.131	14.45	21.4	10.6	34
GR38A-17-1222	222573	8264871	-15.679	-71.588	Andesita	5.3	53	74.9	0.005	1	36.7	9	66
GR38A-17-1223	222079	8264972	-15.678	-71.593	Toba rica en cristales	2.2	5	18.9	0.006	0.43	3.7	21.1	43
GR38A-17-1224	221902	8265508	-15.673	-71.594	Roca alterada	31.3	60	90.7	0.006	1.43	43.3	10.4	105
GR38A-17-1225	221404	8266407	-15.665	-71.599	Andesita	6.9	4	25.4	0.005	1.14	3.1	16.3	74
GR38A-17-1226	221326	8266722	-15.662	-71.600	Roca alterada	5.3	2	79.3	0.005	0.64	5.6	14.1	80

Código de muestra	Este (UTM 19S)	Norte (UTM 19S)	Latitud	Longitud	Litología	As ppm	Cr ppm	Cu ppm	Hg ppm	Mo ppm	Ni ppm	Pb ppm	Zn ppm
GR38A-17-1227	221634	8266828	-15.661	-71.597	Roca alterada	5	3	1.2	0.005	1.08	0.5	20.8	69
GR38A-17-1228	221631	8266831	-15.661	-71.597	Andesita	13.6	6	1.5	0.005	1.81	0.7	22.2	81
GR38A-17-1229	222527	8271501	-15.619	-71.588	Arenisca	24.2	18	1.2	0.067	0.25	1	3.6	2
GR38A-17-1230	222524	8271503	-15.619	-71.588	Limolita	190.5	50	14.1	0.041	1.19	12.8	14.2	35
GR38A-17-1231	222133	8270644	-15.627	-71.592	Lutita	6.3	29	5.2	0.005	0.56	10.5	12.9	46
GR38A-17-1232	221288	8270045	-15.632	-71.600	Cuarzoarenita	22.6	24	1.7	0.048	1.24	1.2	6.6	7
GR38A-17-1233	221642	8269316	-15.639	-71.596	Lutita	5.3	56	51.1	0.013	0.73	31.1	27.7	38
GR38A-17-1234	221685	8269446	-15.638	-71.596	Lutita	4.5	34	3.8	0.005	1.45	27.5	10.5	61
GR38A-17-1235	221608	8269182	-15.640	-71.597	Lutita	6.6	33	8.7	0.005	1.06	20.6	9	41
GR38A-17-1236	224361	8287387	-15.476	-71.569	Roca alterada	7.4	63	63.9	0.005	0.74	58.4	14.7	71
GR38A-17-1237	224361	8287387	-15.476	-71.569	Roca alterada	6.1	66	65.5	0.005	0.79	52.9	16.4	65
GR38A-17-1238	224344	8287352	-15.476	-71.569	Lava andesítica	3.6	175	67.9	0.005	1.5	123	10.6	80
GR38A-17-1239	222929	8288358	-15.467	-71.582	Toba de ceniza y cristales	2.8	3	3	0.005	0.26	0.9	14.4	15
GR38A-17-1240	227215	8284990	-15.498	-71.543	Roca alterada	78.8	22	30	1.425	1.51	25.5	18.9	92
GR38A-17-1241	193167	8265053	-15.674	-71.862	Roca alterada	9.2	81	22.2	16.9	0.98	3.4	14.9	11
GR38A-17-1242	193187	8265075	-15.674	-71.862	Roca alterada	1.7	49	18.5	7.12	0.5	7.1	14.2	35

<b>Código de muestra</b>	<b>Este (UTM 19S)</b>	<b>Norte (UTM 19S)</b>	<b>Latitud</b>	<b>Longitud</b>	<b>Litología</b>	<b>As ppm</b>	<b>Cr ppm</b>	<b>Cu ppm</b>	<b>Hg ppm</b>	<b>Mo ppm</b>	<b>Ni ppm</b>	<b>Pb ppm</b>	<b>Zn ppm</b>
GR38A-17-1243	193554	8270704	-15.623	-71.858	Roca alterada	1.9	51	70.6	0.477	0.3	41.5	10.4	138
GR38A-17-1244	193410	8270465	-15.625	-71.859	Toba de líticos y cristales	1.8	9	31.1	0.015	0.89	10.3	16.4	61

Nota: Información extraída del portal Geocatmin del INGEMMET (<http://geocatmin.ingemmet.gob.pe/geocatmin/>)

Anexo 3: Mapa geológico de la zona de estudio señalando las zonas anómalas obtenidas del análisis fractal



Nota: Elaboración propia

*Anexo 4: Muestras de roca con valores anómalos en la zona C*

<b>Código de muestra</b>	<b>Este (UTM 19S)</b>	<b>Norte (UTM 19S)</b>	<b>Latitud</b>	<b>Longitud</b>	<b>Litología</b>	<b>Observaciones</b>	<b>Anomalía geoquímica en roca</b>
GR38A-17-992	225910	8318347	-15.196	-71.551	Alteración hidrotermal	Roca color gris violáceo. OXsFe (hematita, goethita), OXsMn, PGLs alteradas. Alteración pervasiva.	Cr, Ni
GR38A-17-993	225160	8318096	-15.199	-71.558	Toba de ceniza de composición dacítica	Roca gris blanquecina. Ceniza 92% (dacítica), líticos 5%, cuarzo 2%, biotita 3%	As, Ni, Pb
GR38A-17-995	224325	8317984	-15.200	-71.566	Toba de ceniza de composición andesítica	Roca roja violácea. Ceniza 78% (ceniza andesítica), PGLs 15%, biotita 3%, jaspe 4%	As, Cr, Zn
GR38A-17-996	222862	8318404	-15.196	-71.579	Toba de ceniza y líticos de composición dacítica	Roca beige. Ceniza 60% (cenizas dacíticas), líticos 35%, biotita 5%	Pb
GR38A-17-999	219234	8318647	-15.193	-71.613	Toba de ceniza y cristales de composición andesítica	Roca gris violácea. Ceniza 50% (ceniza andesítica), cuarzo 10%, PGLs 40 %	As, Pb, Zn
GR38A-17-1002	217989	8319508	-15.185	-71.625	Toba de lítica de composición andesítica	Roca violacea verdosa. Ceniza 35% (ceniza andesítica), líticos 50%, PGLs 8%, FPKs 3%, anfíbol 4%	As
GR38A-17-1003	218985	8315991	-15.217	-71.616	Alteración de toba	Roca parda blanquecina, textura granular. Alunita, OXsFe, biotita	As

*Anexo 5: Muestras de roca con valores anómalos en la zona D*

<b>Código de muestra</b>	<b>Este (UTM 19S)</b>	<b>Norte (UTM 19S)</b>	<b>Latitud</b>	<b>Longitud</b>	<b>Litología</b>	<b>Observaciones</b>	<b>Anomalía geoquímica en roca</b>
GR38A-17-1130	227232	8289158	-15.460	-71.542	Roca alterada	Roca color blanco. Textura Stockwork. Sericita y caolinita. Limonitas, venillas de goethita y hematita. Argilización débil a moderada. Posible protolito: Toba	As, Mo, Ni
GR38A-17-1131	227380	8288922	-15.462	-71.541	Lava andesítica	Roca color gris oscuro. Textura afanítica, 7% Sílice en oquedades, 5% PGLs, limonitas 3%	Cr, Ni
GR38A-17-1133	227556	8287478	-15.475	-71.539	Roca alterada	Roca color blanco. Cuarzo, sericita, limonitas. Pirita entre fracturas, finas venillas de sílice. Argilización fuerte. Protolito: Toba de Ceniza	As, Hg, Mo
GR38A-17-1134	227554	8287474	-15.475	-71.539	Sílice	Estructura de sílice masiva, color gris oscuro, oquerosidad rellena de Óxidos de hierro y Pirita	As, Mo
GR38A-17-1136	228469	8285269	-15.495	-71.531	Roca alterada	Ensamble Cuarzo-Sericita. Presencia de muscovita. Leve argilización. Protolito: Tobas	As
GR38A-17-1137	228763	8284948	-15.498	-71.528	Toba de ceniza	Roca color gris parduzco. 5% pómez. Vesículas rellenas con Arcillas y Sericita (15%). PGL reemplazadas por sericita. Finas venillas de OXsFe (3%)	As
GR38A-17-1140	229741	8285139	-15.497	-71.519	Toba de ceniza	100% ceniza. Venillas y pátinas de OXsFe, calcita en fracturas. En secuencia volcano-sedimentaria.	As
GR38A-17-1238	224344	8287352	-15.476	-71.569	Lava andesítica	Textura afanítica, color gris oscuro. Leve alteración supérgena, moderado fracturamiento	Ni
GR38A-17-1240	227215	8284990	-15.498	-71.543	Roca alterada	Roca color pardo. Fuerte presencia de OXsFe (Limonitas y goethita), arcillas y caolinita. Alteración Argílica.	As, Cr, Hg