



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

**INFLUENCIA DE LOS FACTORES NATURALES Y  
ANTROPOGÉNICOS EN LA GEOQUÍMICA DE  
SEDIMENTOS FLUVIALES DE LAS CUENCAS VÍTOR Y  
SAN JOSÉ DE AZAPA; XV REGIÓN DE ARICA Y  
PARINACOTA, CHILE**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGA

FRANCISCA PAZ ESPINOZA HABERLAND

PROFESOR GUÍA:  
JUAN PABLO LACASSIE REYES

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
KATJA DECKART  
FRANCISCO HERVÉ ALLAMAND

SANTIAGO DE CHILE  
MAYO 2013

## **RESUMEN**

En el presente trabajo se estudia la composición química y mineralógica de los sedimentos fluviales presentes en los cauces principales de las cuencas de los ríos Vítor y San José de Azapa (XV Región de Arica y Parinacota, Chile). El objetivo es determinar la influencia que tiene la actividad antropogénica y los factores naturales sobre la geoquímica de los sedimentos fluviales de estas cuencas. En adición, se busca determinar la calidad ambiental de los sedimentos en base a la abundancia de As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Zn y Pb.

Se analizó la fracción fina (<180 micrones) de 190 muestras de sedimentos fluviales distribuidas a lo largo de las cuencas. El análisis químico fue realizado mediante espectrometría de masa y la composición mineralógica fue determinada mediante difracción de Rayos-X.

Los resultados fueron estudiados mediante gráficos de variación geográfica y mapas de puntos.

Los resultados obtenidos indican que los factores naturales más relevantes en la zona son la litología, la presencia de zonas de alteración y las condiciones hidrodinámicas de las cuencas. Entre los factores antropogénicos destacan la intervención del cauce mediante obras civiles, los efectos generados por una planta de tratamiento de minerales y los efectos de la ciudad de Arica.

En general, se observan altas concentraciones de As en toda la zona de estudio, presentando concentraciones por sobre estándares internacionales en numerosos sectores. La ocurrencia de estas altas concentraciones se debe principalmente a factores naturales, destacando el aporte de este elemento proveniente de la alta cordillera, con una fuerte presencia de rocas volcánicas y zonas de alteración hidrotermal.

## **AGRADECIMIENTOS**

Son muchas las personas a las que quisiera agradecer tanto por su apoyo y compañía en mi etapa universitaria, como en la colaboración que presentaron en la realización de este trabajo. Lamentablemente, no es posible mencionarlos a todos.

Quisiera agradecer a mis padres por la educación que me dieron, sobre todo valórica. A mi hermana por recordarme las cosas verdaderamente importantes. A mi abuela Marlisa por ser una súper abuela.

A mi perra Luli, que me acompañó toda mi infancia, y que aún extraño.

Al Huguito y la Tami, por acompañarme desde hace tantos años. A Felipe, por hacerme recordar lo importante que es aprovechar la vida en cada momento. Al Manu, por bajarme siempre las revoluciones.

Les agradezco enormemente a mis amigas del colegio por ser las grandes culpables de que sea quien soy. A la Chinita por su muy valorada compañía en terreno, y a la Luna por todas esas tardes de domingo en que estuvimos memorizando mientras la gente afuera, disfrutaba del verano.

Al Elías, Tolvet y Chabe, por haber hecho tan agradable mi paso por el Plan Común. A Julio y Andrés, por su muy valorado apoyo en momentos difíciles. A la Babi, la Cony, el Estrella, el Palmera y al Carter por su tan agradable compañía en mis últimos años de estudio. Una mención especial a Pipe Gallardo por su solidaridad y por ser el autor de los mejores apuntes que ha visto y verá el departamento de geología. A la María Rosa, por su apoyo y cariño, siempre muy valorado. A la Nati, por todos esos jueves de vinito y copucha.

A mi profe guía, JP, por su paciencia y sus tan oportunos y asertivos consejos. Al Gustavo por esos tan valorados breaks para echar humito. A mis compañeros de oficina: Leito, los Felipes, Maira, Cata, Caro y Nicole por su apoyo y su buena disposición para ayudar, cada uno a su manera. Y por sobre todo, por hacer que la oficina sea un lugar tan agradable para trabajar.

A todas las lindas personas que conocí en terreno, que con su buena disposición aportaron tanto a este trabajo.

Finalmente, quiero agradecer al Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN) por financiar y brindar las condiciones para el buen desarrollo de esta memoria.

# TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	10
1.1 Fundamentación del problema .....	10
1.2 Objetivos.....	12
1.2.1 Objetivo general .....	12
1.2.2 Objetivos específicos .....	12
1.3 Hipótesis .....	12
1.4 Antecedentes de la zona.....	12
1.4.1 Ubicación y accesos.....	12
1.4.2 Actividad económica .....	13
1.4.3 Clima.....	13
1.4.2 Hidrografía .....	15
2. METODOLOGÍA.....	20
2.1 Terreno .....	20
2.2 Laboratorio .....	23
2.2.1 Preparación de muestras.....	23
2.2.2 Análisis geoquímico .....	23
2.2.3 Análisis mineralógico .....	23
2.3 Procesamiento de datos geoquímicos .....	25
2.3.1 Control de calidad de datos .....	25
2.3.2 Mapas Geoquímicos.....	30
2.3.3 Gráficos de variación geográfica.....	31
3. MARCO GEOLÓGICO .....	32
3.1 Unidades litoestratigráficas.....	32
3.1.1 Zona alta (Precordillera y parte del Altiplano) .....	32
3.1.2 Zona Media (Depresión intermedia).....	38
3.1.3 Zona Baja (Cordillera de la costa) .....	39
3.2 Geología Económica.....	41
3.2.1 Recursos metálicos.....	42
3.2.2 Faenas mineras abandonadas o paralizadas.....	47
4. RESULTADOS .....	48

4.1 Control de Calidad de Datos (QAQC).....	49
4.2 Mapas Geoquímicos de puntos .....	51
4.2.1 Zona Alta .....	52
4.2.2 Zona Media .....	56
4.2.3 Zona Baja .....	57
4.3 Gráficos de variación geográfica.....	60
4.3.1 Río Vítor .....	60
4.3.2 Río San José de Azapa .....	62
4.4 Ripios de Copaquilla.....	63
4.5 Análisis mineralógico .....	65
5. DISCUSIONES .....	66
5.1 Control de calidad de datos .....	66
5.2 Zona Alta .....	74
5.2.1 Putre Vilañuñumani .....	74
5.2.2 Belén-Tignamar .....	75
5.2.3 Cerro Marquez .....	77
5.2.4 Cerro Anocarire.....	78
5.3 Zona Media.....	78
5.3.1 Quebradas secas.....	78
5.3.2 Diferencias en las señales geoquímicas entre los ríos Vítor y San José de Azapa .....	79
5.3.3 Cuenca Río Vítor .....	80
5.3.4 Cuenca del Río San José de Azapa.....	84
5.4 Zona Baja.....	86
5.4.1 Arica .....	86
5.4.2 Caleta Vítor .....	86
5.5 Calidad ambiental de los sedimentos.....	87
5.5.1 Ripios de Copaquilla .....	88
6. CONCLUSIONES .....	92
6.1 Control de calidad de datos.....	92
6.2 Factores naturales .....	92

6.2.1 Zonas de alteración .....	93
6.2.2 Litología .....	93
6.2.3 Hidrodinámica .....	93
6.2.4 Escorrentía .....	93
6.3 Factores Antropogénicos. ....	94
6.3.1 Obras Civiles .....	94
6.3.2 Actividad minera .....	94
6.3.3 Centros poblados .....	94
6.4 Calidad ambiental de los sedimentos.....	95
6.5 Recomendaciones.....	95
6.5.1 Mejoras en el Control de Calidad .....	95
6.5.2 Extracción secuencial.....	95
6.5.3 Ripios de Copaquilla .....	96
7. REFERENCIAS .....	97
ANEXO A .....	103
ANEXO B .....	110
ANEXO C .....	125

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Rutas de acceso a la Cuenca Integrada Azapa - Vítor.....	14
Figura 2. Canal Lauca y Central Hidroeléctrica Chapiquiña. ....	18
Figura 3. Principales Drenajes de las Quebradas Vítor y Azapa .....	19
Figura 4 . Puntos de muestreo en la zona de estudio.....	21
Figura 5. Fotos de muestreo de sedimentos. ....	22
Figura 6. Preparación de muestras en el laboratorio.....	24
Figura 7. Gráfico de Dispersión para valores de As.....	29
Figura 8. Gráfico de diferencia relativa v/s porcentaje de datos. ....	29
Figura 9. Gráfico de cuantiles.....	30
Figura 10. Mapa geológico. ....	34
Figura 11. Leyenda mapa geológico. ....	35
Figura 12. Yacimientos minerales .....	46
Figura 13. Imagen del sector de Caleta Vítor.....	47
Figura 14. Ripios de lixiviación de Copaquilla.. ....	48
Figura 15. Concentraciones de As en la Cuenca Integrada Azapa-Vítor. ....	53
Figura 16. Distribución de las concentraciones de Cu, Au, Sb y Pb en la Zona Alta. ....	54
Figura 17. Distribución de las concentraciones de Se, Hg, Bi y Ag en la Zona Alta. ....	55
Figura 18. Distribución de las concentraciones de Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , V y Cu en las zonas Media y Baja.....	58
Figura 19. Distribución de las concentraciones de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , MgO y S en las zonas Media y Baja. ....	59
Figura 20. Gráficos de variación geográfica normalizados .....	61
Figura 21. Gráficos de variación geográfica normalizados para REE +Th ....	62
Figura 22 Imagen panorámica de los ripios de Copaquilla. ....	63
Figura 23 Ripios de lixiviación con cianuro .....	64
Figura 24. Imagen satelital de los ripios de Copaquilla y el nacimiento del Río San José de Azapa en la confluencia de los ríos Seco y Tignamar.. ....	64
Figura 25. Resultado análisis mineralógico.....	65
Figura 26. Resultado análisis mineralógico.....	66
Figura 27. Diferenciación de minerales densos por hidrodinámica .....	70
Figura 28. Comportamiento opuesto en señales geoquímicas. ....	73
Figura 29. Zonas de alteración hidrotermal del sector Putre-Vilañuñumani. ....	74
Figura 30. Concentraciones en ppm de Ag en Zona Belén -Tignamar.....	76
Figura 31. Zona de alteración Cerro Marquez. ....	77
Figura 32. Cambio en el comportamiento del Ba .....	81

Figura 33. Aumento de concentraciones de elementos presentes en minerales densos a la altura de la Confluencia Vítor-Apanza. ....	82
Figura 34. Gráfico de variación geográfica con concentraciones normalizadas de Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , TiO <sub>2</sub> , Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> y V para la quebrada Calizama.. ....	83
Figura 35. Contaminación en la ciudad de Arica.....	86
Figura 36. Fotos del Punto FE-98.....	88
Figura 37. Puntos de muestreo en los cuales las concentraciones de As exceden los valores del PEC. ....	90
Figura 38. Comparación de valores activos con muestras de sedimentos preindustriales. ....	91

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Concentraciones de arsénico para muestras duplicadas.....	27
Tabla 2. Cálculo de estadísticas .....	28
Tabla 3. Valores del Parámetro PEC .....	31
Tabla 4. Cálculo de variables estadísticas para duplicados de terreno. ....	49
Tabla 5. Cálculo de variables estadísticas para duplicados de laboratorio ...	50
Tabla 6. Concentraciones de Cu, Pb, Zn, As, Sb, Bi, Ag, Au y Hg para los ripios de Copaquilla. ....	63
Tabla 7. Valores de (LDD) de ACMELabs .....	67
Tabla 8. Comparación entre error total o de terreno y error de laboratorio.	69
Tabla 9. Cálculo del error de las primeras etapas del proceso.....	71
Tabla 10. Listado de yacimientos mineros en el sector de Tignamar. ....	76

# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1 Fundamentación del problema

La composición química de los sedimentos fluviales está determinada por factores naturales y antrópicos. Entre los factores naturales de mayor relevancia, se encuentran la litología del cauce, la topografía, el clima, la hidrodinámica del ambiente de depositación, etc.; mientras que entre los factores antrópicos destacan la minería, la industria, la agricultura y las zonas urbanas.

Esta fuerte relación entre la geoquímica de los sedimentos fluviales y los factores que la controlan, permite realizar un diagnóstico de las fuentes a partir del estudio de dichos sedimentos.

La utilidad de identificar las fuentes que afectan la geoquímica de un cauce es amplia. Por una parte, nos permite identificar zonas anómalas de interés económico (importante para el desarrollo de un país minero como Chile), y por otro lado, permite identificar agentes contaminantes originados por el hombre.

El estudio de la geoquímica de sedimentos permite determinar la calidad ambiental de estos, mediante comparación con estándares ambientales internacionales (McDonald, 2000).

Unos de los componentes químicos mas tóxicos son los metales pesados, tales como el As, Cd, Cu, Cr, Hg, Ni, Pb, Se, Sb y Zn.

Los metales pesados tienden a asociarse con sustancias minerales tales como carbonatos y sulfatos; y en mayor grado con sustancias orgánicas, mediante intercambio iónico, adsorción, quelación, formación de combinaciones químicas, etc., por lo que se acumulan en el medio ambiente principalmente en los sedimentos de ríos, lagos y océanos (Dekov et al., 1998). A diferencia de muchos contaminantes orgánicos, los metales pesados no se eliminan de los ecosistemas acuáticos por procesos naturales, debido a que no son biodegradables (Murray, 1996). Al contrario, tienen tiempos de residencia que van desde los cientos a miles de años (Macklin et al., 2006).

En general, los metales traza están asociados a la fracción fina de los sedimentos (Biksham et al., 1991). Esto se debe a que las partículas pequeñas tienen elevada área superficial con relación a su volumen y por lo

tanto, pueden retener altas concentraciones de metales en su superficie mediante adsorción, coprecipitación y complejización (Rosas, 2001). El área superficial específica de los sedimentos es dependiente de los parámetros granulométricos y la composición mineral (Singh et al., 1999).

Diversos estudios sobre contaminación y líneas base se han realizado en el mundo (Šajn et al., 2011; J. Bech et al., 2011; Bini et al., 2011; Guillén et al., 2011; FOREGS, 2005; Mrvić et al., 2011; Halamić et al., 2012).

En Chile, existen estudios geoquímicos de sedimentos en bahías como la de Antofagasta (Calderón y Valdés, 2012) y en cuencas de los ríos LLuta, Rapel, Limarí, Elqui entre otros (Astudillo, 2011; Baeza, 2010; Galleguillos, 2007; Lacassie, 2008; Oyarzún J. et al., 2003; Oyarzún J. et al., 2011; Oyarzún J. et al., 2012; Oyarzún R. et al., 2004; Oyarzún R. et al., 2006; Oyarzún R. et al., 2007; Oyarzún R. et al., 2010). Sin embargo, la información que se posee de la geoquímica de los sedimento del resto de los drenajes es escasa o casi nula. Esto hecho es preocupante considerando el fuerte desarrollo de la minería en el país.

En este trabajo se estudia la geoquímica de sedimentos fluviales de las cuencas de los ríos Vítor y San José de Azapa, ubicados en la XV Región de Arica y Parinacota, Chile.

En ambas cuencas se han descritos zonas de alteración hidrotermal (García et al., 2004) que podrían estar afectando de manera natural la calidad ambiental de los sedimentos fluviales. A su vez, existe en la zona un desarrollo de pequeña y mediana minería tanto metálica como no metálica, que ha presentado una reactivación en los últimos años debido al aumento en el precio de los metales.

Las quebradas de Vítor y Azapa, ambas drenajes principales de las cuencas en estudio, son quebradas pobladas con un intenso desarrollo agrícola que abastece de vegetales a toda la región.

Por todos estos motivos, se hace indispensable realizar un estudio geoquímico para estas cuencas, que permita establecer una línea de base para los sedimentos fluviales de los cauces principales. Esto permitirá una mayor comprensión de los factores que controlan la geoquímica de los sedimentos de estas cuencas y un mayor conocimiento de la calidad ambiental de sus sedimentos.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo general**

Determinar la influencia que tiene la actividad antropogénica (minería, agricultura, industria, centros poblados, etc.) y los factores naturales (geología, hidrodinámica, topografía, etc.) sobre la geoquímica de los sedimentos fluviales de las cuencas adyacentes Vítor y Azapa.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

- Establecer una línea de base geoquímica para estas cuencas e identificar sectores con concentraciones elementales superiores a los estándares ambientales internacionales.
- Identificar tipos de anomalías geoquímicas en estas cuencas y su posible origen.

## **1.3 Hipótesis**

La composición química de los sedimentos fluviales (en la fracción < 180  $\mu\text{m}$ ), además de estar fuertemente vinculada a la composición litológica del basamento, también está influenciada por cambios en el régimen hidrodinámico y factores antrópicos en la cuenca integrada de Vítor y Azapa. Los factores antrópicos se relacionarían a centros urbanos, actividad agrícola y minera, entre otros.

## **1.4 Antecedentes de la zona**

### **1.4.1 Ubicación y accesos**

Las cuencas de los ríos Vítor y San José de Azapa se ubican en la XV Región de Arica y Parinacota, entre los paralelos 18°16' y 19° de latitud sur.

Se define la Cuenca integrada Azapa-Vítor (CIAV) como el área comprendida por las cuencas de los Ríos Vítor y San José de Azapa (Figura 1).

La CIAV limita con la cuenca del río Lluta por el norte, con la cuenca del río Camarones por el sur, al este con la Alta Cordillera y al oeste con el Océano Pacífico.

El acceso a la Quebrada Vítor se encuentra a 45 Km al sur de Arica por la Ruta 5 norte. Allí se debe tomar la ruta A-35 a Codpa, a lo largo de la cual se puede recorrer gran parte de la cuenca.

Para acceder al Valle de San José de Azapa se debe tomar la ruta A-27 desde la ciudad de Arica. El acceso a la parte alta de esta cuenca se hace a través de la ruta internacional CH-11, tomando el desvío a la ruta A-225, en la localidad de Zapahuira.

## **1.4.2 Actividad económica**

### **1.4.2.1 Agricultura**

La actividad agrícola de la Región de Arica y Parinacota se desarrolla en pequeñas quebradas y valles costeros, sumando a nivel regional, 10.926,47 ha de suelo cultivado<sup>1</sup>. Destacan por su actividad agrícola el Valle de Azapa y el Valle de Lluta. Estos valles poseen condiciones climáticas similares pero niveles de producción muy diferentes debido a las diferencias en su salinidad. Mientras que el río Lluta posee una alta salinidad (concentraciones de boro superiores a 11 ppm), el río Azapa presenta aguas de mejor calidad, con concentraciones de boro inferiores a 1ppm (Torres y Acevedo, 2008).

En el Valle de Azapa se desarrolla una agricultura de riego intensiva, cultivándose principalmente olivo y en menor grado mango, palto, tomate, morrón, maíz híbrido y poroto (Torres y Acevedo, 2012).

En el caso de la quebrada Vítor, las aguas presentan aceptables condiciones químicas según normas internacionales y muy buenas en comparación a las aguas del Lluta o del San José. Sin embargo, es la escasez del recurso lo que no permite un desarrollo considerable de la agricultura en el sector (DGA, 2010).

### **1.4.3 Clima**

La Región de Arica y Parinacota, se caracteriza por un clima árido a hiperárido, normal o marginal de altitud. La temperatura media varía entre 20-15°C, existiendo variaciones de temperatura entre el día y la noche de manera local (García et al., 2004).

---

<sup>1</sup> Ministerio de Agricultura. Agricultura en la región de Arica y Parinacota [En línea]: [http://arica.minagri.gob.cl/?page\\_id=1744](http://arica.minagri.gob.cl/?page_id=1744) [consulta: 17 diciembre 2012]

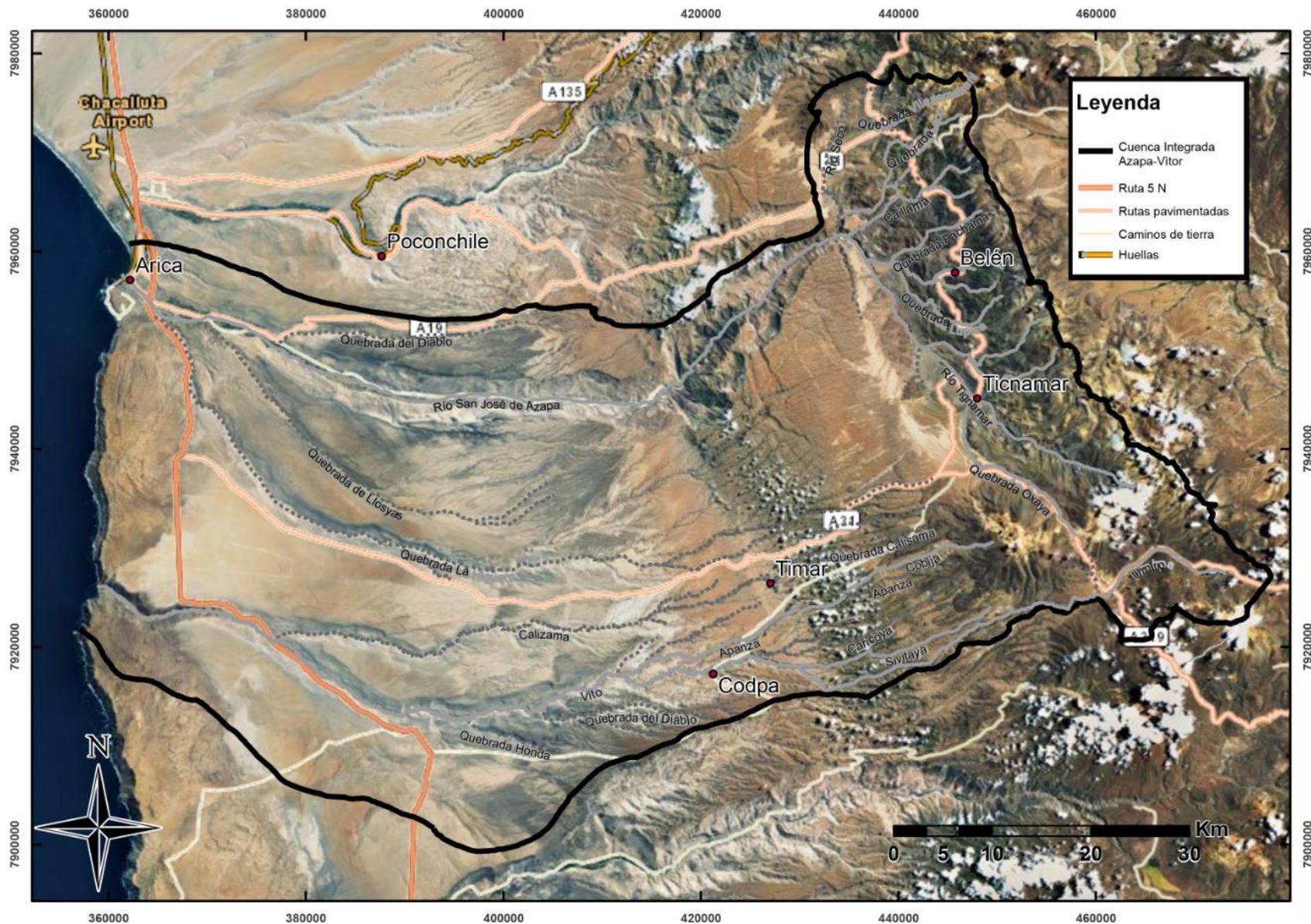


Figura 1. Rutas de acceso a la Cuenca Integrada Azapa - Vitor.

Debido a la presencia del Invierno Altiplánico, posee un régimen de precipitaciones de lluvias estivales entre los meses de Diciembre a Marzo, producto del Invierno Altiplánico, registrándose en esta época del año cerca del 80% de la precipitación anual de la región (DGA 2010).

En la parte occidental de la Depresión Central, tanto en la zona costera como en el fondo de valles, se observa abundante nubosidad y alta humedad relativa del aire provenientes del Océano Pacífico (García et al., 2004).

En la Alta Cordillera, el clima es húmedo, de estepa de altitud. La temperatura media varía entre 0 a 9°C, y las precipitaciones de 100 a 400 mm/año.

### **1.4.2 Hidrografía**

En la región de Arica y Parinacota, se distinguen dos sistemas de drenaje principales: uno oriental y otro occidental. Éstos están separados por las cimas del Cordón Belén y, hacia el norte y sur de éste, por edificios volcánicos neógenos. El sistema oriental es de tipo endorreico intracordillerano y el sistema occidental es exorreico. El primero comprende la cuenca cerrada centrípeta del Salar de Surire y las cuencas dendríticas de los ríos Lauca y Caquena-Cosapilla, que desaguan hacia el Altiplano; mientras que el segundo comprende las cuencas de los ríos mayores Lluta, Azapa, Vítor y Camarones y las quebradas menores Escritos y Gallinazos, que drenan el borde Oeste de la Alta Cordillera y desaguan al Océano Pacífico (García et al., 2004).

A continuación se detallan las características de los principales afluentes de las cuencas en estudio.

#### **1.4.4.1 Cuenca del río San José de Azapa**

La Cuenca está comprendida entre los paralelos 18°29' y 18°37' de Latitud Sur y los meridianos 70°19 y 69°21' de Longitud Oeste. Se desarrolla inmediatamente al sur de la Hoya del Lluta y drena una extensión de 3.060 km<sup>2</sup>. Se considera una cuenca preandina puesto que carece de cabeceras en la cordillera alta (DGA, 1991).

#### **1.4.4.1.1 Quebrada de Azapa**

El río San José o Azapa tiene su origen en la confluencia de dos tributarios principales, los ríos Seco y Tignamar (Figura 3). Tiene un desarrollo de 83 km en un cañón de más de 1000 m de altura. En su curso superior presenta un cauce muy estrecho, mientras que en el sector de Ansípar, la caja del río se ensancha gradualmente hasta alcanzar un ancho superior a los dos kilómetros en su desembocadura.

Al este de Arica confluyen la Quebrada de Azapa con la Quebrada de Acha o La Higuera, habitualmente seca, cuyas nacientes están en la falda occidental de la Sierra de Guailillas. Esta quebrada recorre 95 km, en forma casi paralela a la quebrada de Azapa (DGA, 1991).

El escurrimiento del río San José o Azapa, tiene carácter permanente solo hasta Livilcar, a 10 Km de su nacimiento, y efímero de ahí hasta el mar. Sólo con lluvias estivales crece de vez en cuando hasta su desembocadura, fenómeno que suele durar de 20 a 30 días (DGA, 1991).

En el curso inferior del Valle de Azapa existen vertientes naturales, producto del afloramiento de agua subterránea que escurre en el relleno aluvial y que se origina en infiltraciones directas del río San José (DGA, 1991).

Desde la década del 60 se trasvasan aguas altiplánicas para el regadío del Valle de Azapa, reemplazando en gran medida los recursos que se extraían mediante pozos de napas freáticas. Estas aguas son captadas del río Lauca a su salida de la laguna de Parinacota y son conducidas a lo largo del Canal Lauca (Figura 3) por 37 km hasta el pie oriental de la Cordillera. En este lugar las aguas son conducidas por túneles, atravesando las altas cumbres, y luego por largas cañerías con más de 1000 m de desnivel hasta la Central hidroeléctrica de Chapiquiña, que abastece de energía eléctrica a la ciudad de Arica. La descarga, que en promedio histórico es de 600 l/s (DGA, 2010), corre en un cauce natural de los tributarios del río San José de Azapa y es tomada finalmente cerca de Ansípar por el Canal Azapa que distribuye el recurso a lo largo del Valle. El aporte en este lugar alcanza un promedio anual de 0,87 m<sup>3</sup>/s de los cuales ingresa al Canal Azapa en bocatoma un caudal promedio de 0,650 m<sup>3</sup>/s (Torres y Acevedo 2008). Sólo cuando las precipitaciones estivales son abundantes, el río sobrepasa el valle y el excedente ingresa al Océano Pacífico en la ciudad de Arica, descargando al

litoral abundante sedimento, materia orgánica y basura arrastrada a su paso (DGA, 2010)

#### **1.4.4.1.2 Río Seco**

El Río Seco nace en las proximidades de Zapahuira a 3.500 msnm en el faldeo norte del cerro Vilasami (4.460 m). Tiene un desarrollo de 25 km; escurre primero a nivel de la Pampa Quipa para luego profundizar un cañón al final del cual se ensancha formando el Valle de Copaquilla. Posteriormente el cauce se estrecha en una garganta-desfiladero de ancho no superior a 15 m, hasta su junta con el río Tignamar (DGA, 1991).

#### **1.4.4.1.3 Río Tignamar**

El río Tignamar nace al pie del cerro Orcotunco (5.078 m) y después de un desarrollo de 45 km en dirección al noroeste, da origen al río San José de Azapa. En las proximidades del pueblo de Tignamar, este río recibe por su ribera izquierda la quebrada de Oxaya, y poco más abajo por la ribera derecha, la quebrada de Saxámar. En su curso inferior, en el sector de Caragua, recibe los aportes de tres quebradas importantes: Pachama, Belén y Lupica, provenientes de la vertiente occidental de la Cordillera Central o de Chapiquiña (DGA, 1991).

#### **1.4.4.2 Cuenca Quebrada Vítor o Codpa**

La cuenca queda comprendida entre los paralelos 18°42' y 18°55' de Latitud Sur. Y los meridianos 70°22' y 69°15' de Longitud Oeste (DGA, 1991).

El río Codpa, quebrada Vítor o de Chaca, posee una hoya hidrográfica de 1.660 km<sup>2</sup>. Nace en la angostura de Umirpa, del río homónimo cuyas fuentes están en el portezuelo Orcotunco, ubicado entre los volcanes Orcotunco y Anocarire. A partir de Umirpa la quebrada desciende por un estrecho cajón cordillerano hasta alcanzar el pueblo de Codpa. Continúa en un profundo cajón, atravesando las pampas de Chaca y Camarones, hasta vaciarse en el mar, en Caleta Vítor, después de un desarrollo de 110 km (DGA, 1991).

Su principal tributario es la quebrada de Garza o Calisama cuyo origen está en el borde oeste de la Pampa Oxaya, cercana al pueblo de Timar. Tiene un cauce profundo, y un desarrollo de 38 km desde sus nacientes hasta la Quebrada de Chaca por la ribera norte. Es permanentemente seca (DGA, 1991).



Figura 2. a) Río Lauca y Canal Lauca a los pies del volcán Paríncota, b) piscinas de acumulación de la Central Hidroeléctrica Chapiquiña, c) descarga del canal Lauca a alfuente del Río Tignamar.

Otros tributarios prácticamente secos son la quebrada de Apanza, que nace en el Cerro Marquez; y la quebrada del Diablo, que se junta por la ribera sur, aguas arriba de la localidad de Pintatane, con la quebrada Vítor.

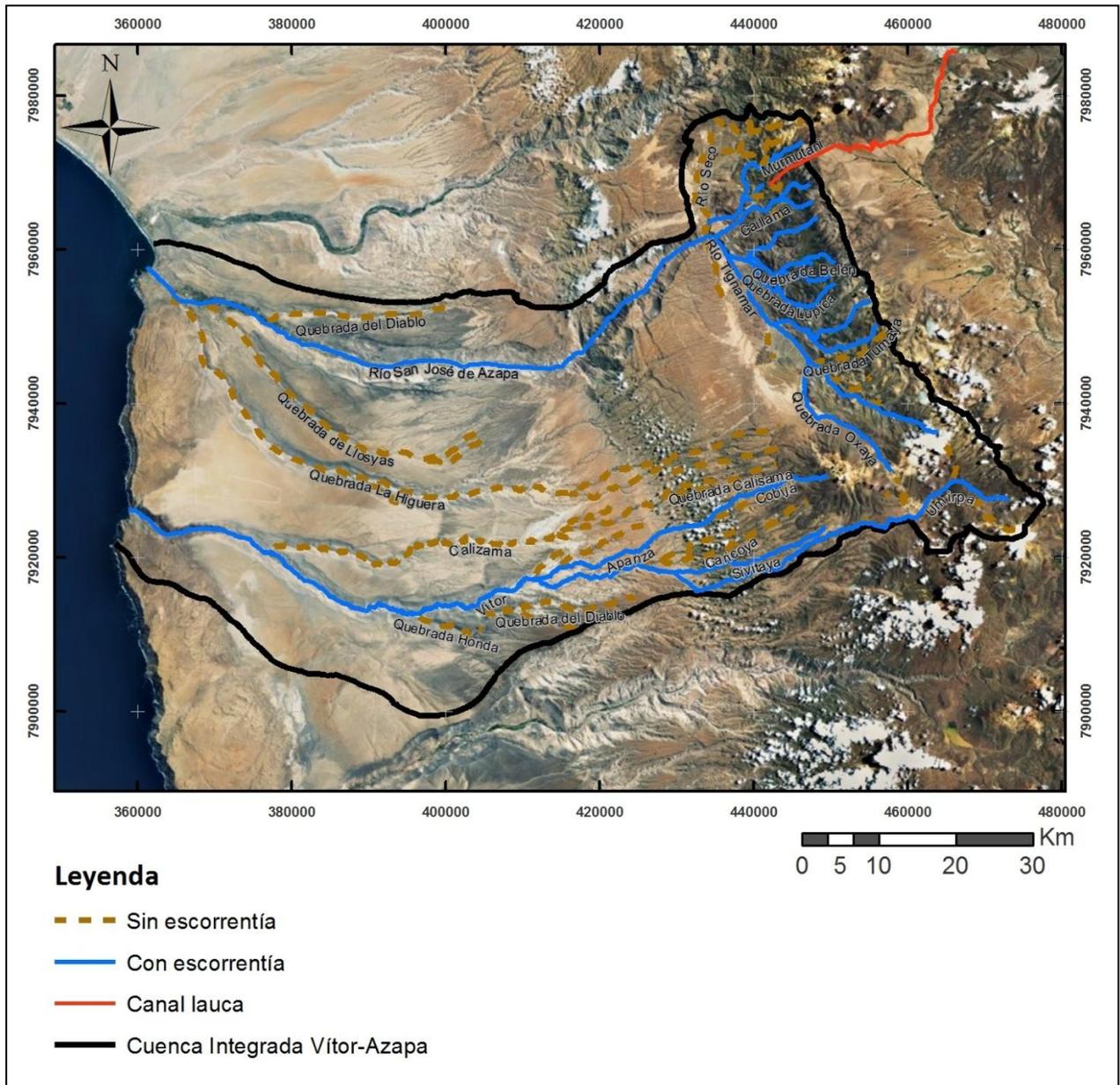


Figura 3. Cuenca Integrada de Vitor-Azapa (negro) con los principales drenajes de las quebradas Vitor y Azapa. Además se observa el recorrido del Canal Lauca, desde el nacimiento del Río Lauca hasta la Central Chapiquiña.

Los escurrimientos superficiales son de pequeña magnitud, desde 300 l/s en época lluviosa a no más de 40 l/s el resto del año. Cuando baja la escorrentía, las aguas llegan sólo hasta Codpa y en ocasiones hasta el sector de Ofrajía. La condición de cuenca preandina sin aportes de lluvias y deshielos de altura, explican los escasos y variables caudales comparados con el tamaño de su cauce (DGA, 1991).

Esta cuenca, presenta un gran desnivel, variando su altura entre los 5.050 msnm, en los cerros de Anocarire, hasta su desembocadura al mar en Caleta Vítor.

## **2. METODOLOGÍA**

### **2.1 Terreno**

Se recolectaron 190 muestras de sedimentos en los principales afluentes de los ríos Vítor y San José de Azapa, con un espaciamiento aproximado de 4 km sujeto a la accesibilidad del sector (Figura 4). La recolección se llevó a cabo por el grupo de Cartografía Geoquímica del Sernageomin entre Noviembre del 2011 y Agosto del 2012.

Del total de las muestras recolectadas, 76 muestras corresponden a sedimentos fluviales activos, 72 a sedimentos fluviales recientes, 15 a sedimentos de drenaje, 17 a sedimentos fluviales preindustriales, 7 a sedimentos de planicies de inundación y una muestra a rípios de lixiviación.

Las muestras de sedimentos activos corresponden a compósitos de 3 a 5 kg recolectados en tramos de 20 a 50 metros a lo largo del canal, con una profundidad máxima de 5 cm en el lecho del mismo. La recolección se realizó, dentro de lo posible, en ambos lados del canal y se utilizó para ésta una pala de PVC y una bolsa de polietileno transparente (Figura 5).

Las muestras de sedimentos recientes son similares a las de sedimentos activos con la diferencia de que se recolectan en canales secos (Figura 4).

Las muestras de sedimentos de drenaje se recolectan en sectores donde ya no escurre agua, sin embargo, se observan morfologías de antiguos drenajes o paleocanales. La metodología de muestreo es similar a las anteriores, con la excepción de que producto de la naturaleza del lugar, es necesario evitar el sedimento eólico.

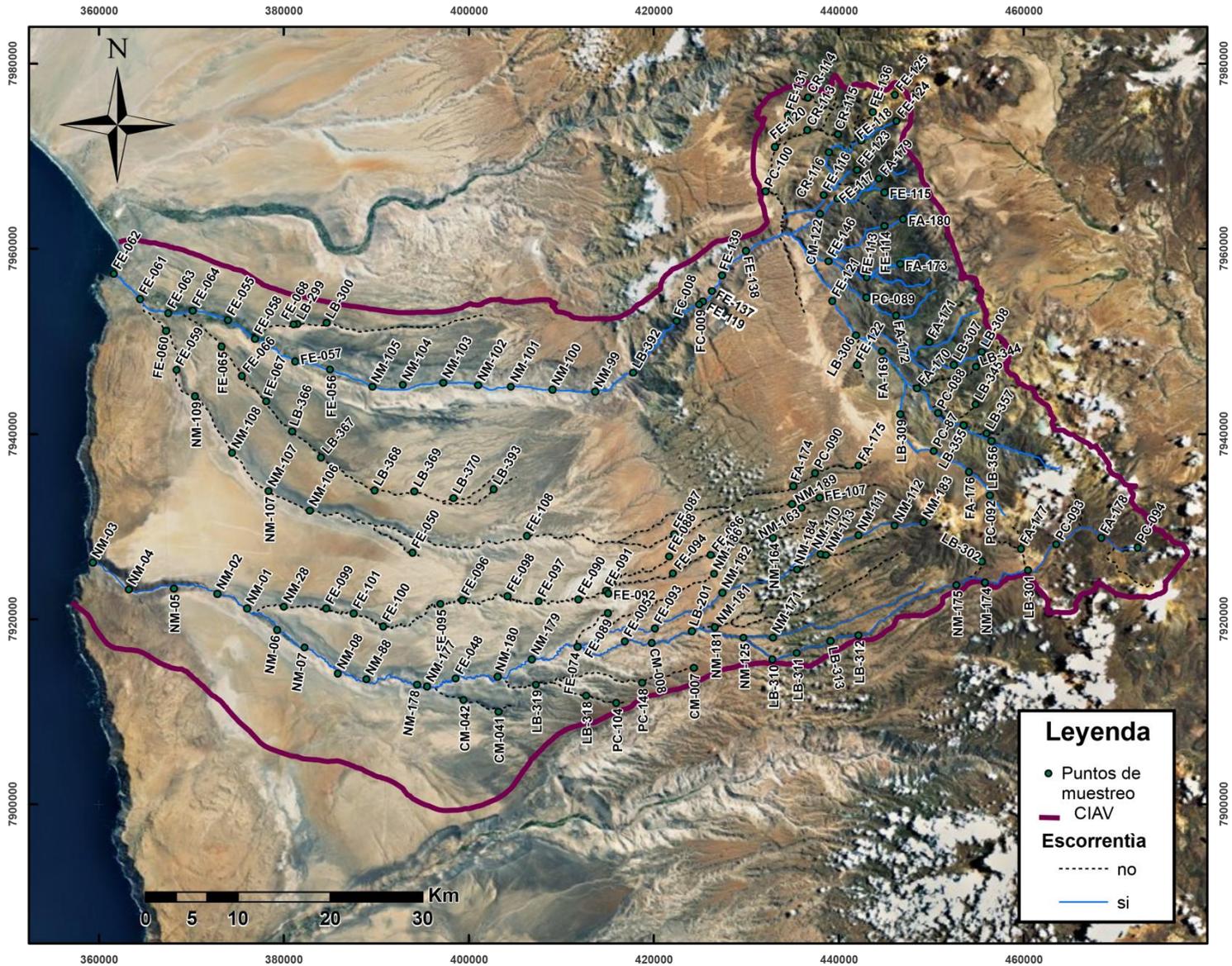


Figura 4 . Puntos de muestreo en la zona de estudio.



Figura 5. Fotos de muestreo de sedimentos. A) y B) Recolección muestra de sedimentos fluviales activos. C) Recolección muestra de sedimento fluvial preindustrial. D) y E) Recolección sedimento fluvial reciente. F) Quebrada Laco con cauce activo.

Las muestras de sedimentos fluviales pre-industriales corresponden a compósitos de 3 a 5 Kg que se recolectan a lo largo del perfil de antiguas terrazas fluviales presentes en los principales cauces de la zona de estudio.

Las muestras de sedimentos fluviales de planicies de inundación son compósitos de 3 a 5 Kg recolectados en zonas de desborde del río, representando sedimento transportado en las crecidas.

La muestra de rípos de lixiviación corresponde a un compósito de 3 a 5 Kg que se recolectó a lo largo del perfil de una acumulación de rípos de lixiviación con cianuro en un sector cercano al Río San José.

## **2.2 Laboratorio**

### **2.2.1 Preparación de muestras**

La preparación de muestras se llevó a cabo en el laboratorio del Servicio Nacional de Geología y Minería (Sernageomin), donde las muestras son secadas en un periodo de 3 a 5 días en un horno a 27°C. Luego se procede al tamizaje en mallas de acero inoxidable (malla #80) con el fin de separar la fracción 180µm. De esta fracción se recuperan 30 gr aproximadamente que son pulverizados con un mortero de ágata durante 3 minutos. Este material fino se almacena en frascos transparentes estériles (Figura 6).

### **2.2.2 Análisis geoquímico**

Los frascos con las muestras preparadas (tamizadas y pulverizadas) se enviaron a AcmeLabs (laboratorio canadiense con certificación internacional) para determinar la abundancia total de óxidos principales mediante espectrometría de emisión ICP-ES y la abundancia de elementos traza mediante espectrometría de masa ICP-MS.

Para los análisis por ICP-ES, se toman muestras de 0,2 gramos descompuestas mediante una digestión por ácido nítrico y fusión con metaborato-tetraborato de litio (AcmeLabs, 2009).

Para el caso de los análisis por ICP-MS, se preparan 2 tipos de muestras: 1) Para análisis de tierras raras y algunos elementos traza donde se usa la misma preparación que para el ICP-ES; 2) Para análisis de metales preciosos y metales base donde se toman muestras de 0,5 gramos, las cuales son digeridas en Agua Regia (AcmeLabs, 2009).

### **2.2.3 Análisis mineralógico**

Para este análisis se eligieron 20 muestras distribuidas por toda la zona de estudio. Estas muestras (previamente tamizadas a malla 80) fueron pulverizadas bajo 200 mallas con un mortero de ágata.

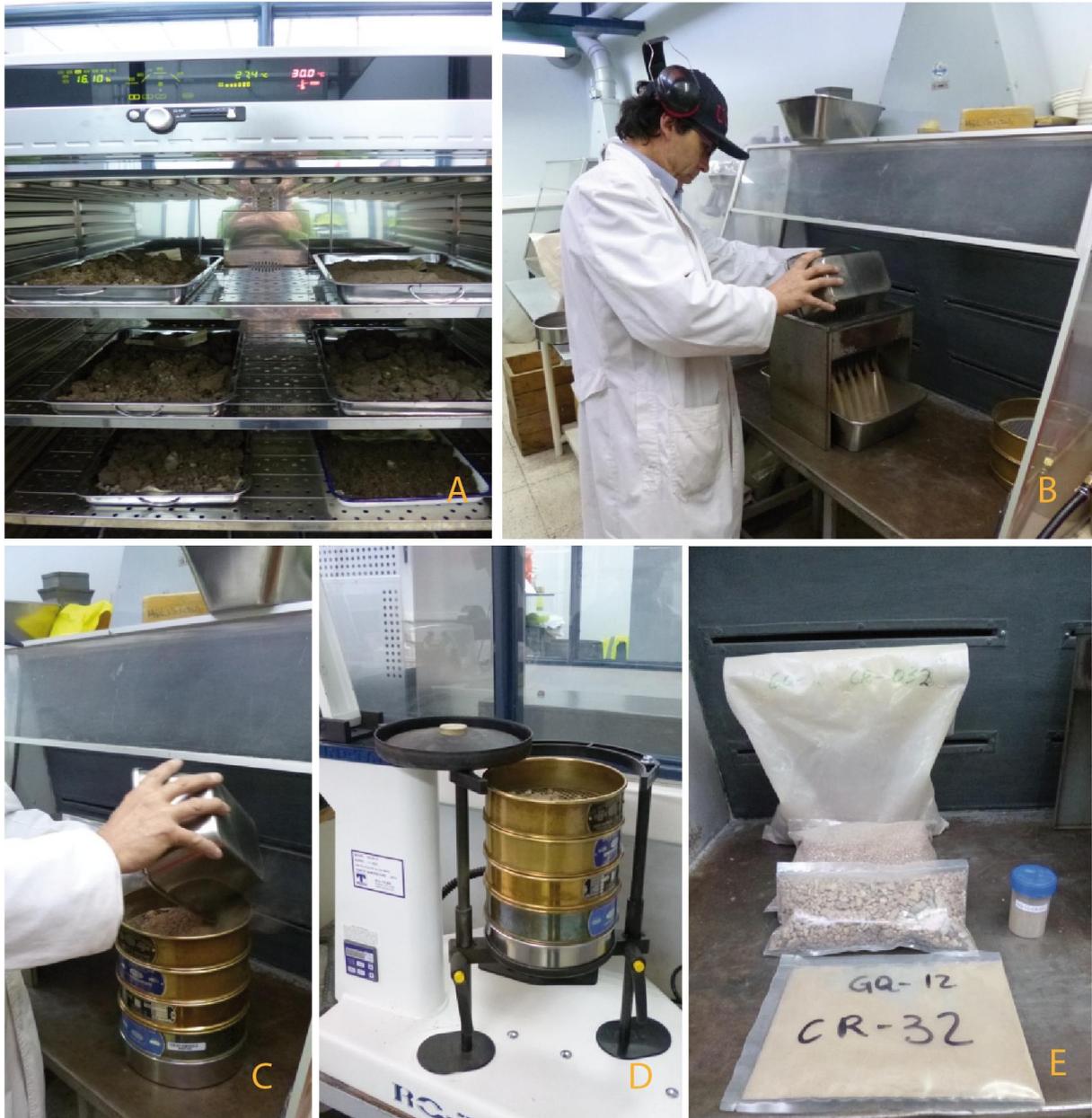


Figura 6. Preparación de muestras en el laboratorio del SERNAGEOMIN. a) Secado de muestras en horno a 27-30°C. b) División de la muestra en partes iguales c) tamizaje de muestras d) tamiz vibratorio ROTAP e) Resultado de la preparación: en bolsas la muestra original, fracción gruesa, fracción fina y fracción fina molida que finalmente se envía a análisis.

Luego fueron analizadas en un equipo de Difracción de Rayos X (Panalytical, X`Pert PRO), utilizando el programa de interpretación High Score Plus.

## **2.3 Procesamiento de datos geoquímicos**

El procesamiento de los datos geoquímicos se realiza en tres etapas. La primera consiste en la realización de un control de calidad de los resultados entregados por AcmeLabs. La segunda, en la generación de Mapas de puntos para cada elemento. Y la tercera, en el procesamiento de los resultados mediante gráficos de variación geográfica de las concentraciones elementales.

### **2.3.1 Control de calidad de datos**

Debido a que este trabajo forma parte del trabajo del Grupo de Cartografía Geoquímica del Sernageomin, el control de calidad se realiza con la totalidad de muestras del Mapa Geoquímico de la Hoja Arica (en edición).

Con el fin de determinar los distintos errores asociados a las muestras utilizadas en este trabajo, se realiza un análisis de muestras duplicadas.

#### **2.3.1.1 Análisis de Duplicados**

Se utilizaron dos tipos de duplicados en este trabajo: duplicados de terreno (22 pares de muestras), y duplicados de laboratorio (41 pares de muestras).

Los duplicados de terreno consisten en pares de muestras sacadas en el mismo lugar, el mismo día y por la misma persona. A estas muestras se le asignan códigos diferentes y siguen el resto del proceso de preparación y análisis de laboratorio de igual manera que el descrito anteriormente en la sección 2.2. El objetivo de estos duplicados es determinar el error total asociado a todo el proceso.

Los duplicados de laboratorio consisten en duplicados realizados por ACME Labs, para determinar el nivel de precisión de los equipos. Como este proceso lo realiza el laboratorio, las muestras duplicadas de laboratorio no necesariamente coinciden con las muestras duplicadas de terreno.

A continuación se presenta el procedimiento realizado para determinar los distintos errores asociados a las muestras analizadas. Se describe para el caso del As, sin embargo, fue realizado para los 59 elementos estudiados en este trabajo (ANEXO C).

En la Tabla 1 se muestran los resultados de las mediciones de As para muestras duplicadas de terreno. Además, para cada par de muestras (A,B) se calcula la diferencia, la varianza relativa, el promedio y la diferencia relativa.

$$Diferencia = A - B$$

$$Varianza Relativa = 2 \times \frac{(A - B)^2}{(A + B)^2}$$

$$Promedio = \frac{A + B}{2}$$

$$Diferencia Relativa [\%] = 200 \times \left[ \frac{A - B}{A + B} \right]$$

A partir de estos datos, se procede a calcular para cada variable, estadísticas estándar (mínimo, máximo, media, varianza, desviación estándar), sus diferencias y las varianzas relativas. Además, se calcula el error relativo y el test de Student (t) (Tabla 2). Este último, permite detectar si existe sesgo entre las muestras duplicadas. El criterio utilizado para determinar si no existe sesgo entre las muestras, para más de 30 pares, es un valor de t dentro del intervalo [-1.96, 1.96].<sup>2</sup>

$$Desviación estándar = \sqrt{\frac{\sum(\bar{x} - x)^2}{n}}$$

$$Test de Student \quad t = \text{Media de la Diferencia} \times \sqrt{\frac{\text{Número de pares}}{\text{Varianza de la Diferencia}}}$$

$$Error relativo [\%] = 100 \times \sqrt{\text{Promedio de la Varianza relativa}}$$

---

<sup>2</sup> Magri Consultores Ltda. Curso "Muestreo y control de calidad para exploración y minería" [diapositivas] enero 2012.

Punto de muestreo	Original	Duplicado	Diferencia	Varianza Relativa	Promedio	Diferencia Relativa
PC-091	22,8	23,2	-0,4	0,00015	23,0	-1,7
LB-206	14,6	13,1	1,5	0,00586	13,9	10,8
PC-102	9,7	10,2	-0,5	0,00126	10,0	-5,0
FA-181	12,4	11,2	1,2	0,00517	11,8	10,2
FA-174	15,5	15,6	-0,1	0,00002	15,6	-0,6
NM-107	25,3	17,7	7,6	0,06248	21,5	35,3
CM-020	9,4	6,9	2,5	0,04705	8,2	30,7
CM-038	15,5	14,8	0,7	0,00107	15,2	4,6
FE-019	3,7	3,9	-0,2	0,00139	3,8	-5,3
FE-039	24,9	24,4	0,5	0,00021	24,7	2,0
LB-308	31,3	31	0,3	0,00005	31,2	1,0
FE-067	35,9	33,7	2,2	0,00200	34,8	6,3
FE-089	11,2	12,1	-0,9	0,00298	11,7	-7,7
LB-291	13,8	12,2	1,6	0,00757	13,0	12,3
FE-070	40,7	44,6	-3,9	0,00418	42,7	-9,1
NM-161	13,6	12	1,6	0,00781	12,8	12,5
FE-128	9,1	8,6	0,5	0,00160	8,9	5,6
FE-115	20,2	15,8	4,4	0,02988	18,0	24,4
CM-110	17,2	17,8	-0,6	0,00059	17,5	-3,4
CR-0124	7,9	7,8	0,1	0,00008	7,9	1,3
FC-054	10	11,9	-1,9	0,01505	11,0	-17,4
NM-237	5,8	4,5	1,3	0,03186	5,2	25,2

Tabla 1. Concentraciones de arsénico para muestras originales y duplicadas de terreno y cálculo de variables estadísticas.

	Original	Duplicado	Diferencia	Varianza relativa
Número	22,0	22,0	22,0	22,0
Mínimo	3,7	3,9	-3,9	0,0
Máximo	40,7	44,6	7,6	0,1
Promedio	16,8	16,0	0,8	0,0
Desviación estándar	9,7	10,0	2,3	
Test de Student			1,7	
Error Relativo				10,2

Tabla 2. Cuadro resumen del cálculo de estadísticas para cada variable, test de Student y error relativo para el caso del arsénico. Los valores son con respecto al total de pares original-duplicado. Por ejemplo, de un total de 22 pares de muestras utilizadas en el cálculo, se obtiene una concentración mínima de 3,7 ppm y una concentración máxima de 44,6 ppm. La diferencia más grande entre una muestra original y su duplicado fue de 7,6 ppm, pero en promedio, la diferencia fue cercana a los 0,8 ppm.

Para distinguir con mayor claridad el comportamiento estadístico de los datos, se construyen los gráficos de las Figuras 7,8 y 9.

El gráfico de dispersión de duplicados (Figura 7) permite ver la correlación que existe entre muestras originales y duplicadas. Mientras más cerca estén los puntos de la recta  $y=x$  (en color rojo), mayor será la correlación entre ellos. En este gráfico se muestra además, la línea de tendencia en color verde (regresión lineal), asociada al set de puntos.

El gráfico de diferencia relativa v/s porcentaje (Figura 8) permite identificar la porción del total de muestras que presenta diferencias relativas mayores al 20 %.

Finalmente, el gráfico Q-Q o de cuantiles (Figura 9) permite observar las diferencias en las distribuciones de las muestras originales versus las duplicadas, mostrando en color violeta la línea de tendencia de la población de datos y en color rojo la recta  $y=x$  como referencia. Este tipo de gráficos se utiliza para detectar posibles errores en la metodología utilizada para sacar la muestra duplicada. De existir algún error en esta etapa, se ve reflejado por una diferencia en las distribuciones.

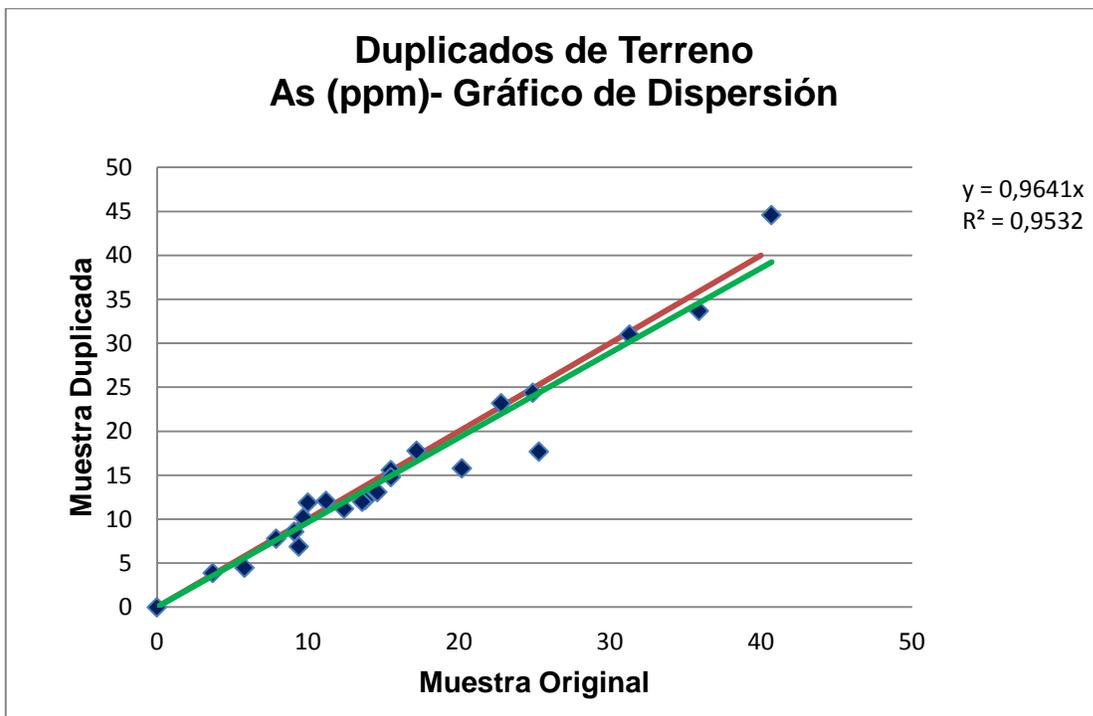


Figura 7. Gráfico de Dispersión para valores de As en muestras duplicadas de terreno. En rojo, la recta  $y=x$ ; en verde la línea de tendencia asociada a los datos, que para este caso corresponde a  $y=0,9641x$

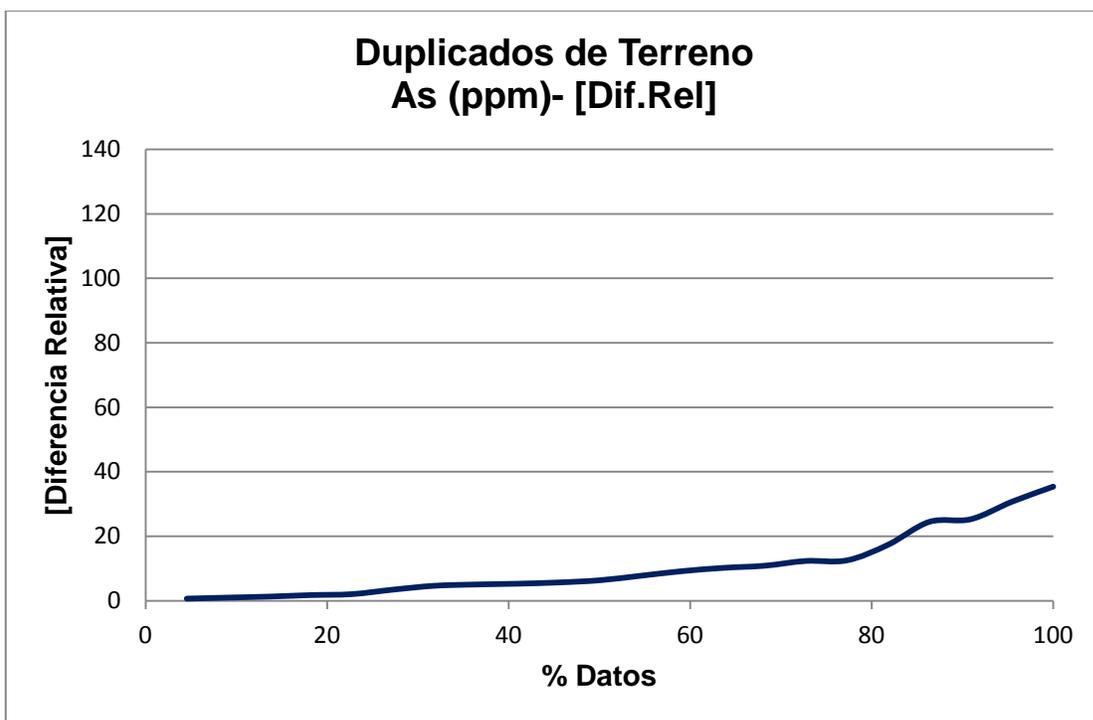


Figura 8. Gráfico de diferencia relativa v/s porcentaje de datos.

Esta metodología se repite para los duplicados analíticos de laboratorio, obteniéndose el valor del error relativo asociado a la medición.

Esto permite hacer una comparación entre ambos errores (de terreno y de laboratorio) e identificar en que parte del proceso se acumula la mayor parte del error.

Para el caso del As, el error relativo de laboratorio es de 2,46%, mientras que el error de terreno, o error total, es de 10,2%. Esto permite concluir que aproximadamente el 75% del error asociado al As recae en las primeras etapas del proceso.

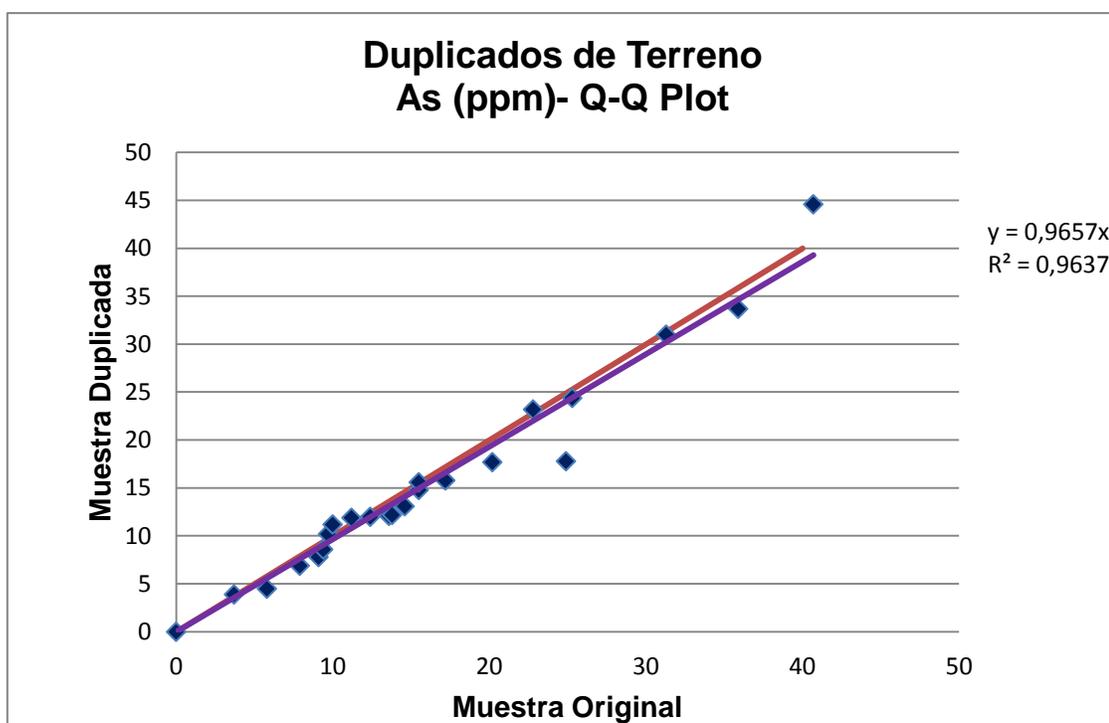


Figura 9. Gráfico de cuantiles.

### 2.3.2 Mapas Geoquímicos

Con el objetivo de visualizar de manera espacial y a nivel regional, la variación de las concentraciones elementales de los sedimentos fluviales activos, se realizan mapas de puntos en el programa Arcgis 10.

Estos mapas permiten ver la ubicación exacta del punto de muestreo además de su concentración relativa con respecto al total de las muestras estudiadas.

El tipo de clasificación utilizado para determinar los rangos de tamaños es el de cortes naturales. En esta clasificación, las clases están basadas en las agrupaciones naturales inherentes a los datos. Los cortes de clase se caracterizan porque agrupan mejor los valores similares y maximizan las diferencias entre clases. Las entidades se dividen en clases cuyos límites quedan establecidos donde hay diferencias considerables entre los valores de los datos (Jenks 1967, citado por De Marco, 2012).

### 2.3.3 Gráficos de variación geográfica

Con el fin de identificar variaciones locales de la composición química de los sedimentos, se grafica la concentración de cada uno de los elementos en función de su posición geográfica a lo largo de los cauces principales Vitor y San José de Azapa.

En estos gráficos, se presenta la información tanto de los sedimentos activos, como de los sedimentos preindustriales y de planicies de inundación. Se incluyen además, las muestras de los cauces tributarios ubicadas justo antes de la confluencia con el cauce principal.

Para identificar aquellas muestras con concentraciones preocupantes desde el punto de vista medioambiental, se agregan los valores del parámetro PEC (Tabla 3) (Probable Effect Concentration, McDonald et al, 2000). Este parámetro, definido para el As, Cd, Cr, Cu, Pb, Hg, Ni y Zn, señala el contenido máximo de estos elementos que pueden tener los sedimentos sin afectar la biota que los rodea. Es decir, cuando existen concentraciones superiores a estos valores máximos, existe una alta probabilidad de observar efectos adversos sobre los organismos circundantes.

Elemento	As	Cd	Cr	Cu	Pb	Hg	Ni	Zn
PEC (ppm)	33	4,98	111	149	128	1,06	48,6	459

Tabla 3. Valores del Parámetro PEC (Probable Effect Concentration, McDonald et al, 2000)

Por último, con el fin de comparar el comportamiento de los distintos elementos estudiados, se agrupan en gráficos de variación geográfica con

valores normalizados, aquellos elementos que presentan señales geoquímicas similares.

Para normalizar estos valores, se utiliza la siguiente fórmula:

$$\text{Valor normalizado} = \frac{x - \text{promedio}(x)}{\text{desviación estándar}(x)}$$

con  $x$  = concentración del elemento  $X$

### 3. MARCO GEOLÓGICO

#### 3.1 Unidades litoestratigráficas

En este ítem, se describen las formaciones geológicas afectadas por la cuenca integrada de Vítor-Azapa según su distribución geográfica de E a W. Para este efecto, se divide la zona de estudio en tres grandes zonas delimitadas por cambios en la morfología regional (Zona alta, Zona media y Zona Baja), que en este caso, coinciden con cambios en las formaciones aflorantes (Figura 10).

##### 3.1.1 Zona alta (Precordillera y parte del Altiplano)

###### 3.1.1.1 Proterozoico superior –Paleozoico

###### *Complejo Metamórfico de Belén*

Este Complejo Metamórfico se puede dividir en dos unidades principales:

**Esquistos, anfibolitas y gneises PPb(a)**, que se presentan intercalados y en contacto tectónico y comprenden proporciones menores de filitas, serpentinitas, diques y filones-manto tanto máficos como félsicos además de cuarcitas y migmatitas. Esta unidad es cortada por la Quebrada Belén, afluyente de Azapa.

**Ortogneis de Saitoco PPb (b)**, que aflora en el bloque Belén, entre Pachama y Belén y es cortado por afluentes de la Quebrada Belén.

### *Estratos Quichoco CPq*

Sucesión sedimentaria, principalmente detrítica que aflora al este y noreste de Belén, cerca de Quichoco. Compuesta principalmente de areniscas y conglomerados y en menor grado de calizas, limolitas y brechas. Esta sucesión presenta grados variables de alteración hidrotermal propilítica y oxidación. Esta cortada por afluentes de la Quebrada Belén.

#### **3.1.1.2 Jurásico-Cretácico**

##### *Formación Livilcar*

Sucesión sedimentaria clástica y carbonatada de ambiente marino-continental que fue dividida por Muñoz et al. (1988) en un Miembro Inferior clástico terrígeno y un Miembro Superior calcáreo y evaporítico. Ambos miembros se exponen ampliamente en el sector de Livilcar en el curso superior del Valle de Azapa, mientras que el Miembro Superior también aflora en las cercanías de Chapiquiña, donde es cortado por afluentes de la quebrada Cailama.

Esta formación se encuentra intruida por los intrusivos de Lluta (66-54 Ma) que han generado grados variables de alteración hidrotermal (propilítica o argílica), silicificación, metamorfismo de contacto y localmente, mineralización de cobre.

#### **3.1.1.3 Cretácico superior-Paleoceno**

Intrusivos del Cretácico Superior-Paleoceno (65-54 Ma)

*Intrusivos de Lluta (66-54 Ma)* que corresponden a dioritas, granodioritas, granitos y filones de microgranito y de cuarzo-turmalina que en la zona de estudio afloran en la quebrada de Azapa.

Estas rocas están instruidas por cuerpos hipoabisales andesíticos y aplíticos que parecen estar relacionados a brechas de cuarzo-turmalina y zonas de alteración y mineralización, principalmente vetiforme de Cu y Au-Ag.

#### **3.1.1.4 Oligoceno- Holoceno**

##### *Formación Oxaya (Oligoceno superior- Mioceno inferior)*

Sucesión volcánica continental compuesta por mantos de tobas ignimbríticas con intercalaciones de areniscas, conglomerados, calizas y lavas andesíticas y dacíticas. Los mantos de tobas son 7 y corresponden a depósitos de flujo piroclástico, vítreos y cristalinos con fragmentos de pómez y líticos y composiciones dacíticas a riolíticas. Se reconoce en esta formación una

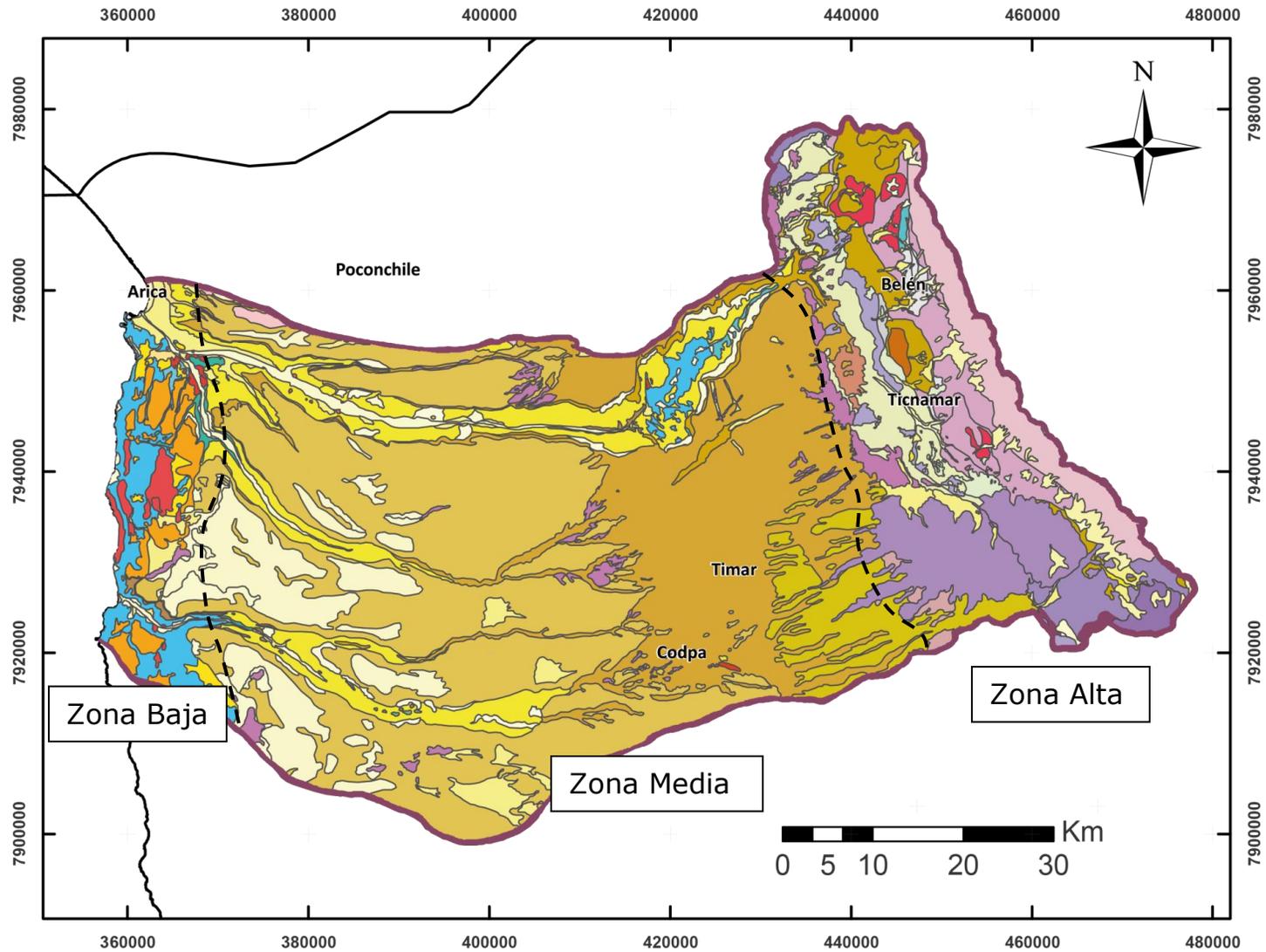


Figura 10. Mapa geológico. Adaptado de la Hoja Arica 1:250.000 del SERNAGEOMIN (García et al 2004).

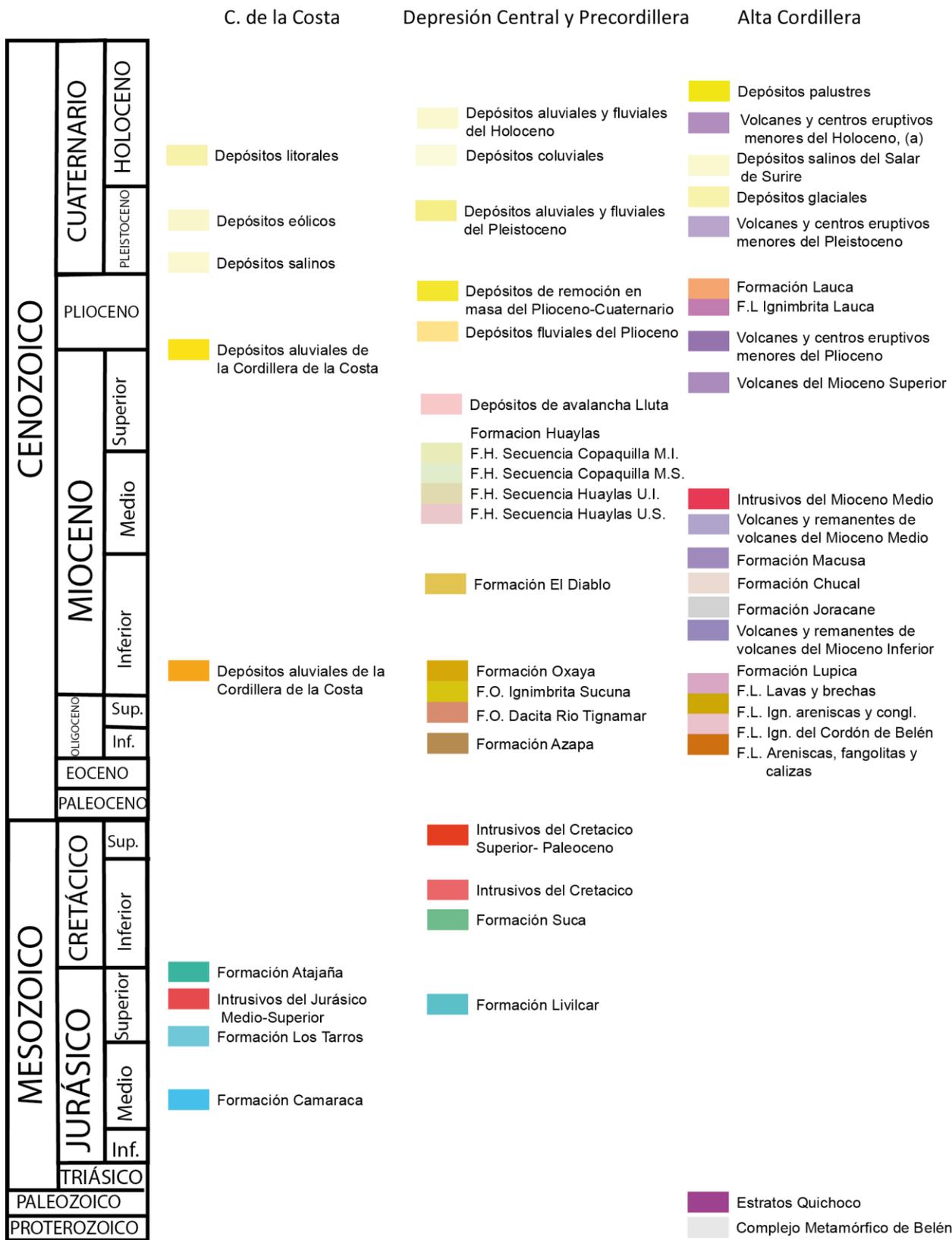


Figura 11. Leyenda mapa geológico. Adaptado de la Hoja Arica 1:250.000 del SERNAGEOMIN (García et al 2004).

asociación de facies de Ignimbritas y rocas sedimentarias de la parte inferior-media y cinco estratos volcánicos individuales: Andesita Socoroma, Ignimbrita Oxaya, Ignimbrita Sucuna, Dacita Río Tignamar e Ignimbrita Aico. Esta Formación se distribuye ampliamente en la Precordillera (sierra Huaylillas, pampa Oxaya y Pampa Sucuna) y Depresión Central por lo que es cortada ampliamente por las dos cuencas en estudio.

#### *Formación Lupica (Oligoceno superior-Mioceno inferior)*

Sucesión volcánica y sedimentaria continental de amplia distribución en la Alta Cordillera. Está constituida por lavas andesíticas y dacíticas, brechas y tobas ignimbriticas, dacíticas a riolíticas, con intercalaciones de rocas sedimentarias. Dentro de la Cuenca Integrada de Víctor- Azapa, aflora en el Cordón de Belén, entre Putre y Tignamar incluyendo la localidad de Lupilca.

Las rocas de esta formación presentan diversos grados de metamorfismo de contacto, alteración hidrotermal y mineralización producto del emplazamiento de los intrusivos del Mioceno. Así también, se hospedan en esta formación numerosas vetas polimetálicas de Ag, Pb, Zn, Cu, Sb y Sn, en la Franja Metalogénica de la Alta Cordillera.

#### *Formación Joracane (Mioceno inferior alto)*

Sucesión sedimentaria detrítica con intercalaciones volcánicas menores que aflora restringidamente en la quebrada Joracane, afluente de la quebrada de Belén. Las rocas de esta formación se encuentran levemente afectadas por alteración hidrotermal propilítica.

#### *Volcanes y remanentes de volcanes del Mioceno medio (16-11 Ma)*

Conjunto de rocas de edificios volcánicos, bien a medianamente conservados, y remanentes de estratovolcanes constituidos en gran parte por lavas andesíticas a dacíticas.

En la zona de estudio afloran en el sector de la Precordillera al E de la quebrada Lupilca, siendo cortado por sus afluentes, y en algunos sectores de la quebrada Tignamar.

#### *Intrusivos del Mioceno medio (16-12 Ma)*

Conjunto de cuerpos plutónicos e hipoabisales de extensión restringida, hasta 15 km<sup>2</sup>. cada uno, que se distribuyen en la zona de estudio, en el sector de la Precordillera en los alrededores de la quebrada Cailama y al sudeste de Tignamar.

### *Formación Huaylas (Mioceno superior)*

Sucesión sedimentaria detrítica expuesta en las depresiones de Huaylas y de Copaquilla. Se divide en las cuencas de Huaylas y Copaquilla, estando esta última dentro de la zona de estudio.

La cuenca Copaquilla está constituida por hasta 350 m de ripios de grano fino a muy grueso, gravas y arenas semiconsolidadas. Mientras que en su miembro inferior los clastos son de tobas ignimbríticas, y pómez de la formación Oxaya, en su miembro superior los clastos son de rocas volcánicas (andesíticas a riolíticas), sedimentarias (en parte calcáreas) y metamórficas.

### *Volcanes del Mioceno Superior (11-5 Ma)*

Conjunto de rocas pertenecientes a estratovolcanes compuestos, bien a medianamente conservados de dimensiones medianas a grandes, 70 a 150 km<sup>2</sup> de superficie cada uno. Corresponden a coladas de lavas de composiciones andesíticas a dacíticas principalmente y se distribuyen, dentro de la cuenca integrada Vítor-Azapa, en la parte suroriental de la Precordillera (volcanes Márquez y Familiani) donde nacen las quebradas Achacagua, Vítor, Sivitaya, Cobija y Garza, afluentes de la Cuenca Vítor, y las quebradas afluentes de la quebrada Tignamar, afluente de la Cuenca de Azapa.

### *Volcanes y centro eruptivos menores del Plioceno (5-2 Ma)*

Corresponden a estratovolcanes y remanentes de volcanes menores, de los cuales el volcán Anocarire se encuentra dentro de la zona de estudio, ubicado donde nace la Quebrada de Acachagua, afluente de Vítor. Este volcán presenta una forma cónica irregular, de superficie aproximada de 70 km<sup>2</sup>. Esta formado principalmente por lavas andesítico-silíceas y dacíticas de biotita y hornblenda.

### *Ignimbrita Lauca (Plioceno Superior)*

Corresponde a un depósito de flujo piroclástico, de colores rosado, gris y pardo de gran extensión areal en la Alta Cordillera, Precordillera y Depresión Central. La toba es leve a moderadamente soldada, vítrea, de cristales, pómez y líticos. En la zona se encuentra de manera elongada al oeste de la quebrada Tignamar y en la depresión central, siendo cortada por las quebradas de Llosyas, La Higuera, Garza y Vítor.

### *Depósitos Glaciales*

En la zona de estudio se exponen en los flancos del Cordón de Belén y corresponden esencialmente a morrenas laterales y/o frontales y a mantos estratificados.

### *Depósitos aluviales del Pleistoceno*

Los depósitos aluviales del Pleistoceno corresponden a gravas y brechas semiconsolidadas con intercalaciones de arenas, limos y arcillas. Y afloran, en el área de estudio, en depresiones y quebradas anchas de la Precordillera, como Tignamar.

## **3.1.2 Zona Media (Depresión intermedia)**

### **3.1.2.1 Jurásico-Cretácico**

#### *Formación Suca (Cretácico Inferior alto)*

Sucesión volcánica continental que en la zona de estudio está representada por lavas porfídicas, andesíticas y basálticas, y filones dioríticos y andesíticos de dos piroxenos y olivino, que afloran de manera dispersa y restringida en la quebrada Vítor.

### **3.1.2.2 Cretácico Superior-Paleoceno**

#### *Intrusivos de Esquiña (67-60 Ma)*

Monzodioritas cuarcíferas, monzodioritas y monzonitas cuarcíferas distribuidas de manera muy acotada, aflorando dentro de la zona de estudio en la quebrada Vítor.

### **3.1.2.3 Oligoceno-Holoceno**

#### *Formación Azapa (Oligoceno-Mioceno)*

Sucesión sedimentaria subhorizontal de conglomerados continentales, medianamente consolidados que en el área de estudio aflora en la quebrada homónima en los alrededores de Ausipar y también en la parte baja de la quebrada Vítor.

#### *Formación El Diablo (Mioceno inferior- Mioceno superior bajo)*

Sucesión sedimentaria continental predominantemente clástica, expuesta en la confluencia de las quebradas El Diablo y Azapa, y distribuida ampliamente en la Depresión Central, formando gran parte de la cobertura de la Zona Media.

Se compone de un Miembro inferior y un Miembro superior, donde el primero está caracterizado por areniscas, areniscas conglomerádicas, limolitas y calizas, con clastos principalmente de tobas riolíticas mientras que el segundo se caracteriza por presencia de ripios de grano fino a grueso y gravas con clastos principalmente andesíticos y basalto andesíticos.

#### *Formación Macusa (Mioceno medio-superior)*

Sucesión volcánica y sedimentaria continental, que en la Zona de estudio aflora al Oeste del Volcán Anocarire, donde nace la quebrada de Achacagua, afluente de la quebrada Vítor.

Está constituida por hasta 500 m de espesor de tobas y areniscas con intercalaciones de conglomerados, brechas sedimentarias, limolitas, arcillolitas, calizas y lavas.

#### *Depósitos de remoción en masa del Plioceno-Cuaternario*

Corresponden a depósitos de deslizamientos y avalanchas gravitacionales de variadas dimensiones, expuestos principalmente en bordes de laderas y escarpes abruptos y en quebradas profundas. Estos depósitos afectan a tobas riolíticas y rocas sedimentarias de las formaciones Azapa, Oxaya y el Diablo y se presenta a lo largo de casi todas las quebradas de la cuenca integrada en estudio.

#### *Depósitos salinos de la Depresión Central*

Corresponden a mantos subhorizontales de sales, limos salinos y costras salinas, de espesor centimétrico a métrico los cuales se distribuyen en la parte occidental de la Depresión Central.

Los depósitos incluyen principalmente boratos y subordinadamente, yeso, carbonatos, sulfatos y cloruros de magnesio, potasio sodio y litio.

#### *Depósitos eólicos*

Arenas finas a gruesas, bien seleccionadas, no consolidadas que se distribuyen extensamente en la parte occidental de la Depresión Central.

#### *Depósitos coluviales*

Depósitos caóticos no consolidados de origen gravitacional que forman conos o abanicos en partes aluviales, en quebradas cortas de gran pendiente o mantos alargados en taludes abruptos.

### **3.1.3 Zona Baja (Cordillera de la costa)**

#### **3.1.3.1 Jurásico-Cretácico**

##### *Formación Camaraca (Bajociano Superior- Caloviano)*

Sucesión volcánica que aflora ampliamente en la Cordillera de la Costa, al sur de Arica. Constituida por 4000 m de espesor mínimo de lavas principalmente andesíticas y en parte, basálticas intercaladas con lavas basálticas y daciandesíticas, tobas y rocas sedimentarias (areniscas, brechas, calizas, lutitas y conglomerados).

Esta formación se encuentra cortada por la Quebrada Vítor en el sector cercano a su desembocadura.

#### *Formación Los Tarros (Oxfordiano)*

Sucesión sedimentaria marina que aflora restringidamente en la Quebrada Los Tarros, Cordillera de la Costa. Está constituida por hasta 500 m de espesor de areniscas y lutitas con intercalaciones de calizas y lavas andesíticas. Presenta alteración hidrotermal propilítica y/o metamorfismo de muy bajo grado (o de carga). Si bien esta Formación se encuentra dentro de la cuenca integrada de Vítor-Azapa, difícilmente aporta sedimentos a las cuencas estudiadas.

#### *Intrusivos del Jurásico medio-superior*

Corresponden a cuerpos plutónicos e hipoabisales de variadas formas, dimensión y composición que intruyen en la Formación Camaraca en la Cordillera de la Costa, dentro de los cuales se encuentra el Intrusivo Mal Paso (monzodiorita cuarcífera), el Intrusivo Lombriz (gabros) y una serie de intrusivos indiferenciados. En los sectores periféricos de los cuerpos intrusivos se encuentran numerosos depósitos vetiformes de cobre que constituyen la Franja Metalogénica de la Cordillera de la Costa.

#### *Formación Atajaña (Kimmeridgiano-Neocomiano)*

Sucesión sedimentaria clástica continental que en el área de estudio aflora en las quebradas de Azapa, Vítor y Acha (o La Higuera). Está constituida principalmente por conglomerados de grano fino a grueso, areniscas y limolitas. Las rocas de esta formación presentan grados variables de alteración hidrotermal propilítica (cloritización, epidotización, calcitización y argilización).

#### *Intrusivos del Cretácico (99-93 Ma)*

Corresponden a cuerpos plutónicos e hipoabisales que afloran restringidamente y de manera dispersa en el curso inferior de las quebradas de Azapa y Acha (o La Higuera). Los Intrusivos de Azapa afloran exclusivamente en la quebrada homónima y corresponden predominantemente a dioritas cuarcíferas y monzodioritas cuarcíferas. Por otro lado, los Intrusivos de Acha afloran tanto en la quebrada de Acha como en la de Azapa y corresponden principalmente a pórfidos granodioríticos y granodioritas porfídicas.

Todos estos intrusivos presentan alteración hidrotermal propilítica en distintos grados.

### **3.1.3.2 Oligoceno- Holoceno**

#### *Formación Azapa (Oligoceno-Mioceno)*

Sucesión sedimentaria subhorizontal de conglomerados continentales, medianamente consolidados que en el área de estudio aflora en la quebrada homónima en los alrededores de Ausipar y también en la parte baja de la quebrada Vítor.

#### *Depósitos aluviales de la Cordillera de la Costa (Oligoceno- Mioceno medio)*

Corresponden a depósitos sedimentarios continentales subhorizontales, principalmente detríticos que rellenan depresiones aisladas en la Cordillera de la Costa.

#### *Depósitos aluviales de la Cordillera de la Costa (Mioceno superior- Plioceno)*

Depósitos continentales detríticos, subhorizontales, que se encuentran relleno paleo depresiones formadas en las rocas de las Formaciones Camaraca, los Tarros y Atajaña.

Están formados por arenas, gravas y limos semi-consolidados. Los clastos de esta formación son de rocas volcánicas, plutónicas y sedimentarias, jurásicas.

#### *Depósitos fluviales del Pleistoceno*

Corresponden a ripios y gravas clasto soportados semi-consolidados con intercalaciones de arenas limos y localmente, diatomitas. Se distribuyen a lo largo de los cauces mayores, en este caso Vítor y Azapa y forman terrazas colgadas.

## **3.2 Geología Económica**

En la Figura 12 se presentan los yacimientos metálicos y no metálicos de la zona de estudio, con una numeración que permite acceder a la información de cada uno en el Anexo A. Esta numeración también será mencionada en este ítem cada vez que se mencione algún yacimiento en particular.

En la región existen recursos minerales tanto metálicos como de rocas y minerales industriales. Actual e históricamente han sido los minerales industriales los más relevantes, siendo incluso en largos periodos de tiempo los únicos en explotación (García et al., 2004). Sin embargo, en los últimos años se ha reiniciado la producción de muchos de los yacimientos metalíferos, como es el caso de la mina de oro, plata y cobre, Choquelimpie

(75) (Sernageomin, Unidad de Recursos Minerales, 2012). Entre los minerales industriales de mayor importancia económica están los boratos, diatomita, bentonita y alumbres. Con respecto a los depósitos minerales metálicos, el más relevante es Choquelimpie seguido de vetas y mantos polimetálicos de Ag, Cu, Au, Pb, Zn, Mo, Sn, y Sb, y mantos de manganeso que son reducidos en tamaño e importancia económica (García et. al, 2004).

Existen también en la zona, yacimientos de U principalmente en las zonas de la Cordillera de la Costa y Depresión Intermedia, asociados a niveles de diatomitas y limo-arcillosos de la Formación el Diablo. (Ordoñez y Rivera, 2004)

Por último, existen también en la zona otros recursos naturales, tales como agua subterránea, fuentes geotérmicas y petróleo. (García et. al, 2004)

### **3.2.1 Recursos metálicos**

Los recursos minerales metálicos de la zona se distribuyen en 3 franjas metalogénicas longitudinales, de edad bien definida y coincidentes con las unidades fisiográficas de la región. Por esta razón, se presentan según las zonas definidas en la sección 2.1.

Las tres franjas metalogénicas corresponden al Jurásico-Cretácico inferior en la Cordillera de la Costa, Cretácico Superior-Paleoceno en la Precordillera y al Mioceno-Plioceno en la Alta Cordillera. Los eventos mineralizadores están relacionados tanto espacial como temporalmente con sistemas de arcos magmáticos predominantemente calcoalcalinos, asociados en parte a cuencas volcano-sedimentarias de intraarco, y con una migración progresiva hacia el este (García et al., 2004).

#### **3.2.1.1 Zona Alta (Franja metalogénica de la Alta Cordillera)**

También llamada Franja Polimetálica del Mioceno Inferior-Plioceno, está asociada a depósitos ubicados en la Alta Cordillera, sobre los 3500 m de altura. Se reconocen en esta zona, depósitos vetiformes, y en menor cantidad, estratoligados y de rellenos de fractura; con minerales de Cu, Ag-Pb, Au-Ag-Cu, Sb y Mn. Además, se han descrito prospectos de Cu, Au y polimetálicos en zonas de alteración asociadas a complejos volcánicos, principalmente de edad miocena (Ordoñez y Rivera, 2004).

En la región de Arica y Parinacota, se distinguen tres sub provincias metálicas, donde predominan: un yacimiento de Au-Ag (Yacimiento Choquelimpie), depósitos polimetálicos de Ag, Pb, Zn, Cu, Sb, y Sn (Subprovincia de Tignamar-Belén) y mantos de manganeso (Subprovincia de

Taapaca). Además se reconocen extensas zonas de rocas afectadas por alteración hidrotermal tales como la Zona de Alteración Hidrotermal Putre-Vilañuñumani, Cerro Márquez (García et al., 2004) y Cerro Anocarire.

Para el caso de este estudio, las de mayor interés son la Sub Provincia de Tignamar-Belén y la Zonas de Alteración Hidrotermal Putre-Vilañuñumani, Cerro Márquez y Anocarire.

### **3.2.1.1.1 Subprovincia de Tignamar-Belén**

La Subprovincia de Tignamar-Belén corresponde a un sector de 36 km de largo por 10 km de ancho ubicado en el cordón montañoso que se extiende entre las localidades de Belén y Tignamar. Esta faja contiene un amplio número de depósitos de bajo tonelaje, con mineralización de cobre, cobre-plata, plata-plomo-cobre y antimonio. La mineralización se hospeda principalmente en secuencias volcano sedimentarias compuestas por lavas basálticas a dacíticas, rocas piroclásticas y epiclásticas de la Formación Lupica (Oligoceno Superior-Mioceno Inferior) y, en un caso, esquistos precámbricos a silúricos (Ordoñez y Rivera, 2004).

Los depósitos de cobre se presentan principalmente como vetas de rumbo variable, aunque existen algunos estratoligados. Los minerales de mena reconocidos son crisocola, malaquita, calcosina, calcopirita, bornita y cantidades menores de galena y esfalerita, acompañados de cuarzo, pirita y hematita como ganga. La alteración está representada por clorita-epidota, sericita y caolinita. Entre los más importantes se encuentran Putagua (94), Guanaco (78) y Churicala Sur (97) (Ordoñez y Rivera, 2004).

Para el caso de los depósitos de Ag, todos son vetiformes con rumbos variables y presentan plomo, cobre y cinc como menas secundarias. Los más importantes de este tipo en la zona son Chivatune (98) y Santa Rosa (92). Los minerales de mena más comunes son galena, blenda, calcopirita, argentita, estibina y minerales oxidados de cobre; y los de ganga son cuarzo, calcita, baritina, pirita y hematita. Los minerales de alteración asociados son sericita, caolinita, sílice y clorita-epidota (Ordoñez y Rivera, 2004).

Los depósitos de antimonio corresponden a dos vetas de pequeño tamaño: Apacheta y Ociel (88 y 100, respectivamente).

Por último, se ha descrito un prospecto de pórfido de Cu-Mo de tamaño mediano denominado Tignamar (95), que se ubica a pocos kilómetros al este del pueblo del mismo nombre (Pacci, 1977). Cubre un área de 36 Km<sup>2</sup>. y

está emplazado en rocas de la Formación Lupica y en cuerpos tonalíticos y pórfidos cuarcíferos miocenos.

### **3.2.1.1.2 Zonas de Alteración Hidrotermal**

Existen en esta franja, zonas con alteración hidrotermal que han sido definidas como prospectos en el pasado. En la mayoría se ha efectuado trabajos de exploración geoquímica y sólo en algunos prospectos se ha llegado a la etapa de sondajes, ya que muchas fueron descartadas por no presentar resultados interesantes. Todas estas zonas se asocian a rocas volcánicas del Oligoceno y Mioceno, aunque se reconoce un caso en rocas pliocenas. Los prospectos más interesantes corresponden a Putre Norte-Putre Sur (54 y 55) que se encuentran al norte del límite de la Figura 12, Churigualla (80) al este de la Figura 3.3, Cerro Márquez (101) y Mulluri-Sora Sora (134).

Los prospectos de Cu-Mo de Putre Norte y Putre Sur, también llamados zona de alteración Putre-Vilañuñumani, se ubican en el margen suroccidental de los Nevados de Putre, bastante cerca de la localidad del mismo nombre. Consisten en zonas de 13 y 60 Km<sup>2</sup>. con alteración sericítica, silíceo, argílica y propilítica, que afecta a rocas andesíticas de la Formación Lupica y cuerpos intrusivos con texturas de pórfido.

El prospecto argentífero de Cerro Márquez se ubica en el volcán homónimo, de edad miocena superior. En el lugar se observan rocas lixiviadas, piritización-cloritización en las partes centrales del cono volcánico y algo de silicificación. Existen labores antiguas asociadas a una falla mineralizada vertical de rumbo NW, desde donde se extraía plata. Además, estudios geoquímicos de sedimentos de drenaje en zonas con abundante limonita indicaron una pequeña anomalía de molibdeno (Reyes, 1972; citado por Ordoñez y Rivera, 2004).

### **3.2.1.2 Zona Media (Franja metalogénica de la Precordillera)**

Corresponde a una franja discontinua formada por un número reducido de yacimientos y prospectos de cobre, cobre-molibdeno y cobre-oro-plata.

Hay en esta zona, depósitos de tipo stockwork como Campani (72) y Dos Hermanos (70), un pórfido cuprífero llamado Camarones (132), una chimenea de brecha en Campani (72) y depósitos vetiformes: Eva II (61),

Rosario (69), Jamiralla (68), Halcones (67) y Santuario (86) (García et al., 2004).

En general poseen leyes de hasta 18% de cobre, con contenidos interesantes de oro, plata y molibdeno. La mena es principalmente minerales oxidados de cobre (crisocola, malaquita y atacamita), almagre, calcosina, cuprita, molibdenita y, localmente, oro nativo. Cuarzo, hematita y turmalina (asociada a las chimeneas de brecha) son los minerales de ganga más comunes (Ordoñez y Rivera, 2004).

Cabe resaltar que Santuario (86) es el único yacimiento de los antes mencionados que se encuentra en la zona de estudio.

Los depósitos están asociados a los Intrusivos de Lluta y Esquiña, del Cretácico Superior-Paleoceno, ubicados en el fondo y laderas de las quebradas Lluta, Cardones, Azapa y Camarones.

### **3.2.1.3 Zona Baja (Franja metalogénica de la Cordillera de la Costa)**

Corresponde a una faja de menos de 10 km de ancho en la zona de estudio, que posee un número importante de depósitos minerales de Cu, vetiformes y muy subordinadamente mantiformes.

Al sur de Arica se han reconocido al menos 3 vetas cupríferas: Fortuna, Santa Isabel y Soledad (85,82 y 83, respectivamente). La primera está emplazada en rocas sedimentarias de la Formación Atajaña del Cretácico Inferior y las otras en metandesíticas de la Formación Camaraca del Jurásico. Los minerales de mena consisten principalmente en crisocola, atacamita y malaquita, con chalcantita y calcosina subordinadas, mientras que los minerales de ganga están representados por cuarzo, óxidos de hierro, halita y arcillas. Además, se ha reconocido un depósito de relleno de fracturas, Cutipa (81), con características mineralógicas similares a los depósitos anteriores que se encuentra emplazado en lavas andesíticas de la Formación Camaraca (Ordoñez y Rivera, 2004).

En la Quebrada Vítor y sus alrededores se encuentra una gran cantidad de depósitos vetiformes, de rumbos NS y NW principalmente, conocidos como Distrito Caleta Vítor; cuya explotación fue posible hasta hace unos pocos años gracias a la existencia en la zona de una planta de beneficio que permitía el tratamiento de los recursos del sector. Entre estos se encuentran San José (116), Neverman (113), Julia (114), Guacolda (112), Santo

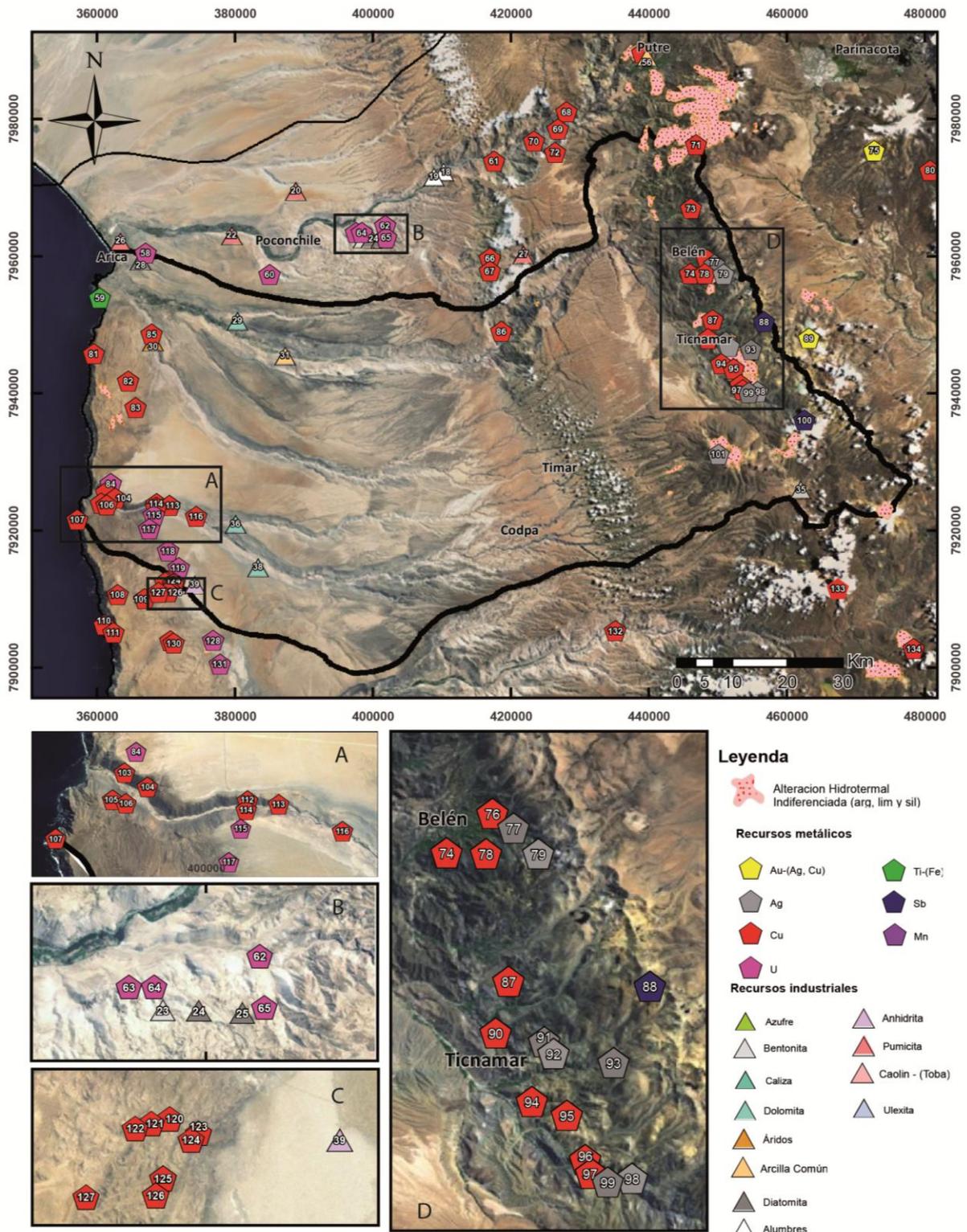


Figura 12. Yacimientos minerales ubicados en la zona de estudio y alrededores. Los números indican la ubicación del yacimiento en la Lista de yacimientos minerales en el Anexo A (SERNAGEOMIN. Unidad de Recursos Minerales, 2012).

Domingo (104), Gina Norte (103), Noruega (105) y Punta Chaca (107), todos hospedados en rocas andesíticas de la Formación Camaraca, excepto San José que está emplazado en rocas sedimentarias de la Formación Atajaña (Cretácico Inferior).

### **3.2.2 Faenas mineras abandonadas o paralizadas.**

Existen en la zona de estudio dos casos de faenas mineras abandonadas o paralizadas que podrían estar afectando la geoquímica de los sedimentos fluviales de las cuencas en estudio.

#### **3.2.2.1 Planta de refinamiento de cobre San Carlos, Caleta Vítor.**

Esta Planta de refinamiento de Cu, propiedad de ENAMI (Empresa Nacional de Minería), se ubica a un costado del Río Vítor en su desembocadura al océano Pacífico. Funcionó hasta hace algunos años como planta de beneficio para la pequeña minería ubicada en el sector (García et al., 2004).

Actualmente se encuentra abandonada y catalogada como pasivo ambiental minero por el Servicio Nacional de Geología y Minería (Sernageomin, 2010).



Figura 13. Imagen del sector de Caleta Vítor. Se observa el Río Vítor en su desembocadura al mar y a un costado, la Planta de refinamiento de Cu San Carlos. Fuente: Google Earth.

### **3.2.2.1 Rípios de lixiviación de Copaquilla**

Ubicados a 80 km aprox. al noreste de Arica, se encuentran los rípios de lixiviación con cianuro de la mina Choquilimpie, dejados en este sector por la empresa PROMEL el año 1998.

Estos rípios se encuentran colindantes con el Río Seco y el Río San José de Azapa, en las cercanías de la localidad de Copaquilla (Figura 14). Cabe señalar que SERNAGEOMIN realizó el año 2009 una evaluación de riesgos simplificada, que determinó que estos acopios no corresponden a un pasivo ambiental minero.

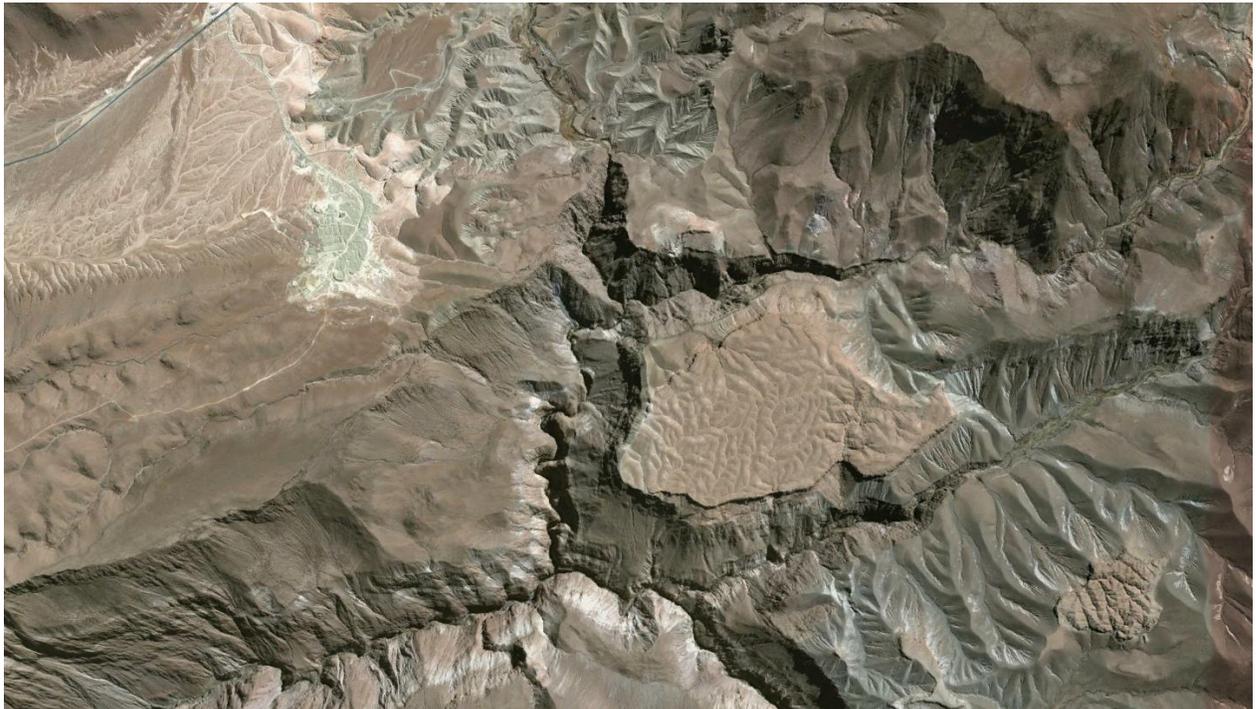


Figura 14. Imagen satelital del Río San José de Azapa en la confluencia de los ríos Seco, y Tignamar. En la esquina superior izquierda se observan los rípios de lixiviación de Copaquilla. Fuente: Google Earth.

## **4. RESULTADOS**

Los datos geoquímico utilizados en este trabajo, forman parte de la Carta Geológica de Chile, Serie Arica, N°2, "Geoquímica de sedimentos de la Hoja Arica, Región de Arica y Parinacota. Escala 1:250.000" del Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN), actualmente en edición. Esta carta será publicada a fines del año 2013, por lo que no es posible publicar los datos en este trabajo.

## 4.1 Control de Calidad de Datos (QAQC)

Se calcularon variables estadísticas para los 59 elementos contenidos en los duplicados de terreno (ver Tabla 4) con un total de 22 pares de muestras.

Además se realizaron gráficos de dispersión, diferencia relativa absoluta y de cuantiles (ver Anexo C).

Elemento	Promedio			Error Relativo de terreno	Elemento	Promedio			Error Relativo de terreno
	Promedio Diferencia	Varianza Relativa	Test de Student			Promedio Diferencia	Varianza Relativa	Test de Student	
Be (ppm)	-0,70	0,38	-2,04	61,49	Dy (ppm)	0,04	0,01	0,57	9,75
Au (ppb)	-0,26	0,31	-1,04	55,86	MnO %	0,00	0,01	-0,50	9,70
Hg (ppm)	-0,01	0,20	-1,45	45,12	Lu (ppm)	0,01	0,01	1,59	9,52
Sn (ppm)	0,11	0,14	0,60	38,07	Th (ppm)	-0,27	0,01	-1,02	9,46
W (ppm)	0,10	0,12	0,88	34,92	Ta (ppm)	0,01	0,01	0,42	9,16
Cd (ppm)	0,01	0,08	0,58	28,29	Yb (ppm)	0,01	0,01	0,33	9,14
TOTAL S %	-0,17	0,06	-1,79	24,52	Ho (ppm)	0,00	0,01	-0,32	8,47
Sb (ppm)	0,02	0,06	0,79	24,25	Pr (ppm)	-0,25	0,01	-1,46	8,26
Cr2O3 %	0,00	0,05	-1,53	23,15	P2O5 %	0,00	0,01	-1,31	8,20
Bi (ppm)	0,01	0,05	1,16	22,65	Cs (ppm)	-0,01	0,01	-0,05	8,08
Mo (ppm)	0,06	0,05	1,27	21,73	Sc (ppm)	0,09	0,01	0,32	7,77
Tl (ppm)	0,00	0,04	0,21	20,83	Nd (ppm)	-0,76	0,01	-1,29	7,70
TOTAL C %	0,00	0,04	0,08	19,86	U (ppm)	0,06	0,01	1,06	7,35
V (ppm)	3,73	0,03	0,18	18,55	Sr (ppm)	-15,04	0,01	-1,36	7,09
Cu (ppm)	0,28	0,03	0,16	16,81	Tm (ppm)	0,00	0,00	1,17	6,70
Hf (ppm)	0,35	0,02	0,90	15,43	Eu (ppm)	0,01	0,00	0,52	6,55
Zr (ppm)	8,53	0,02	0,55	14,46	Rb (ppm)	1,03	0,00	0,85	6,53
Ag (ppm)	0,00	0,02	-1,45	14,21	Na2O %	0,03	0,00	0,52	6,47
Fe2O3 %	0,05	0,02	0,06	13,93	Tb (ppm)	0,00	0,00	-0,33	6,31
TiO2 %	-0,02	0,02	-0,22	13,15	Y (ppm)	-0,45	0,00	-2,01	6,25
Se (ppm)	-0,35	0,02	-1,51	13,04	K2O %	0,04	0,00	1,05	6,21
Pb (ppm)	0,73	0,02	1,84	12,88	Sm (ppm)	-0,01	0,00	-0,10	5,82
Zn (ppm)	-0,32	0,02	-0,13	12,71	Ga (ppm)	-0,12	0,00	-0,28	5,59
Ni (ppm)	0,19	0,01	0,40	12,19	Gd (ppm)	-0,01	0,00	-0,12	5,54
Co (ppm)	-0,20	0,01	-0,19	11,17	CaO %	-0,26	0,00	-1,82	5,20
Nb (ppm)	-0,64	0,01	-1,55	11,17	Ba (ppm)	1,59	0,00	0,15	4,80
La (ppm)	-1,18	0,01	-1,09	10,75	SiO2 %	0,34	0,00	0,57	4,69
Ce (ppm)	-2,78	0,01	-1,57	10,19	Al2O3 %	0,10	0,00	0,67	4,37
As (ppm)	0,80	0,01	1,66	10,19	MgO %	-0,06	0,00	-1,74	4,17
Er (ppm)	-0,01	0,01	-0,42	9,80					

Tabla 4. Cálculo de variables estadísticas para duplicados de terreno en orden decreciente según error relativo. En rojo claro las muestras con errores relativos de terreno mayores al 20%. En rojo, aquellas muestras que presentan valores de Test de Student fuera del rango  $[-1.96, 1.96]$ , es decir, que presentan sesgo.

Elemento	Promedio		Test de Student	Error Relativo de laboratorio	Elemento	Promedio		Test de Student	Error Relativo de laboratorio
	Promedio Diferencia	Varianza Relativa				Promedio Diferencia	Varianza Relativa		
Be (ppm)	0,013	0,359	0,05	59,92	Cs (ppm)	0,04	0,002	0,42	4,52
Au (ppb)	0,019	0,267	0,1	51,67	Sc (ppm)	0,15	0,002	1,78	4,36
Hg (ppm)	0,002	0,089	0,99	29,88	Ni (ppm)	-0,113	0,002	-1	4,31
Cd (ppm)	0,005	0,088	0,5	29,67	Gd (ppm)	-0,027	0,002	-0,75	4,28
Sn (ppm)	0,088	0,087	0,75	29,45	Ce (ppm)	-0,655	0,002	-1,16	4,1
Tl (ppm)	-0,009	0,07	-0,98	26,42	Co (ppm)	-0,063	0,002	-0,46	4,06
W (ppm)	-0,01	0,061	-0,14	24,72	TOTAL C %	-0,001	0,002	-0,97	3,91
TOTAL S %	0,002	0,042	0,25	20,45	Y (ppm)	-0,12	0,001	-0,94	3,84
Se (ppm)	-0,021	0,04	-0,8	19,96	Sm (ppm)	-0,052	0,001	-1,28	3,83
Bi (ppm)	-0,014	0,037	-1,68	19,35	Eu (ppm)	-0,004	0,001	-0,47	3,61
Ta (ppm)	0,013	0,031	0,53	17,66	Tb (ppm)	-0,004	0,001	-1,28	3,26
Cr2O3 %	0	0,026	0,14	16,07	V (ppm)	0,15	0,001	0,15	3,19
Mo (ppm)	-0,033	0,023	-1,28	15,26	Pr (ppm)	-0,04	0,001	-0,81	3,04
Ag (ppm)	-0,005	0,017	-1,28	13,08	Ga (ppm)	-0,173	0,001	-1,53	2,9
Sb (ppm)	0,013	0,016	0,8	12,47	As (ppm)	-0,121	0,001	-0,68	2,46
Th (ppm)	-0,153	0,009	-0,74	9,73	Cu (ppm)	-0,759	0,001	-0,95	2,29
Hf (ppm)	-0,015	0,007	-0,11	8,21	Zn (ppm)	-0,538	0,001	-1,52	2,28
U (ppm)	-0,018	0,006	-0,41	7,62	MnO %	0,001	0	1,14	2,19
Er (ppm)	-0,013	0,005	-0,55	6,97	Ba (ppm)	-1,1	0	-0,31	1,95
Zr (ppm)	-0,593	0,004	-0,16	6,62	Sr (ppm)	-2,055	0	-1,12	1,71
Lu (ppm)	-0,004	0,004	-0,89	6,44	TiO2 %	-0,003	0	-0,94	1,21
Ho (ppm)	-0,01	0,004	-1,25	6,24	Rb (ppm)	-0,453	0	-2,14	1,18
Yb (ppm)	-0,013	0,004	-0,56	6,18	Fe2O3 %	0,013	0	0,84	1,08
Nd (ppm)	0,28	0,004	0,73	5,98	MgO %	-0,002	0	-0,46	0,82
P2O5 %	-0,003	0,003	-1,64	5,86	Na2O %	0	0	0	0,73
Tm (ppm)	-0,005	0,003	-1,44	5,73	CaO %	0,01	0	0,43	0,73
Pb (ppm)	-0,267	0,003	-1,79	5,71	K2O %	0	0	-0,07	0,71
Dy (ppm)	-0,026	0,003	-0,72	5,36	Al2O3 %	-0,034	0	-1,81	0,68
Nb (ppm)	0,143	0,003	1,33	5,32	SiO2 %	0,119	0	2,91	0,51
La (ppm)	-0,303	0,003	-0,89	5,01					

Tabla 5. Cálculo de variables estadísticas para duplicados de Laboratorio en orden decreciente según error relativo. En color verde destacadas las muestras con errores relativos de laboratorio mayores al 20%. En rojo, aquellas muestras que presentan valores de Test de Student fuera del rango  $[-1.96, 1.96]$ , es decir, que presentan sesgo.

Los elementos analizados fueron ordenados en orden decreciente según el error relativo de terreno. Como el error relativo de terreno refleja todas las

etapas del proceso, desde la toma de muestras en terreno hasta el análisis de los datos, se considera equivalente al error total.

Se observa que el 20% de los elementos analizados presentan errores relativos de terreno mayores al 20%.

Se realiza el mismo cálculo para 41 pares de muestras duplicadas de laboratorio, realizadas por ACMELabs (ver Tabla 5). Al igual que en el caso anterior, los elementos son ordenados en orden decreciente según su error relativo de laboratorio.

En este caso, el 13,5 % de los elementos estudiados presentan errores mayores al 20%. Destacan el Be, Au, Hg, Sn, W, Cd, S y Tl por encontrarse sobre el 20 % de error para ambos casos.

## **4.2 Mapas Geoquímicos de puntos**

Se realizan 59 mapas de puntos para los 59 elementos estudiados en este trabajo. (Ver PDF interactivo)

En general, se observa que las distribuciones cambian para cada elemento. Mientras que algunos elementos destacan por presentar altas concentraciones en lugares específicos (Se, Mo, Ag, etc.), otros elementos destacan por su ausencia en ciertos sectores (Y, U, Th, Rb, Na<sub>2</sub>O, REE, etc.). Entre los factores que suelen coincidir con estas diferencias en las concentraciones, se encuentra el carácter de paleocanal y/o quebrada seca versus quebradas con esorrentía la mayor parte del año. También coinciden en algunos casos con cercanía a zonas de alteración, obras civiles, zonas agrícolas, cambios en la hidrodinámica de los cauces, etc.

Diferencias a gran escala se presentan entre las dos cuencas en estudio para el caso de algunos elementos. Por ejemplo, mientras que las concentraciones de Cd y Ag están mayoritariamente bajo el límite de detección en la Cuenca del Río Vitor, éstas aumentan considerablemente en la Cuenca de San José de Azapa. Concentraciones más altas también de U, SiO<sub>2</sub> y K<sub>2</sub>O se observan en esta cuenca, aumentando además el contenido de SiO<sub>2</sub> a partir de la depresión intermedia hasta su desembocadura; e incluyendo a la Quebrada Calizama para el caso de K<sub>2</sub>O.

Además de estas diferencias a gran escala, es posible identificar zonas específicas en la zona de estudio que presentan concentraciones anómalas

en relación al total de muestras, o bien, concentraciones anómalas con respecto a las muestras que se encuentran cercanas geográficamente.

A continuación se presentan los resultados para las Zonas Alta, Media y Baja.

#### **4.2.1 Zona Alta**

Esta zona está representada casi en su totalidad por la parte alta de la cuenca de Azapa. En general, presenta la mayores concentraciones de Cu, As, Se (entre otros) de la zona de estudio ( Figura 15).

Se describen a continuación, tres zonas con distintos patrones de concentraciones, asociadas a sectores de pequeña minería o zonas de alteración. Ejemplos de las variaciones en las concentraciones de elementos en esta zona se presentan en Figura 16 y Figura 17.

#### **Zona de alteración Putre-Vilañuñumani**

Esta zona definida por las Quebradas Caillama, Murmutani y Río Seco, presenta las mayores concentraciones de Se y Mo de la zona de estudio, y altas concentraciones relativas de Sb, W, U, Tl, TiO<sub>2</sub>, Th, Sc, Rb, Sn, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, SiO<sub>2</sub>, Hg, Ag, Au, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Bi y REE.

#### **Zona circundante al Cerro Márquez**

Esta zona es definida por las quebradas que drenan al Cerro Márquez, como son Caillama, Umirpa y las nacientes de Oxaya.

Se presentan en estas quebradas, las mayores concentraciones de Hg, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, Sn, Sr de la zona de estudio, además de altas concentraciones relativas de Se y S.

Por otro lado, esta zona destaca por tener las más bajas concentraciones de Y, W, U, Th, Rb, Na<sub>2</sub>O y REE de la cuenca integrada.

#### **Tignamar**

Definida por las Quebradas Tamaya y nacientes del río Tignamar cercanas al pueblo homónimo, presenta las mayores concentraciones de Sb, Zn, Ba, Cd, Ag, y Pb de la zona de estudio. Además presenta altos valores relativos en las concentraciones de W, Nd, SiO<sub>2</sub>, La, K<sub>2</sub>O, Bi y Au.

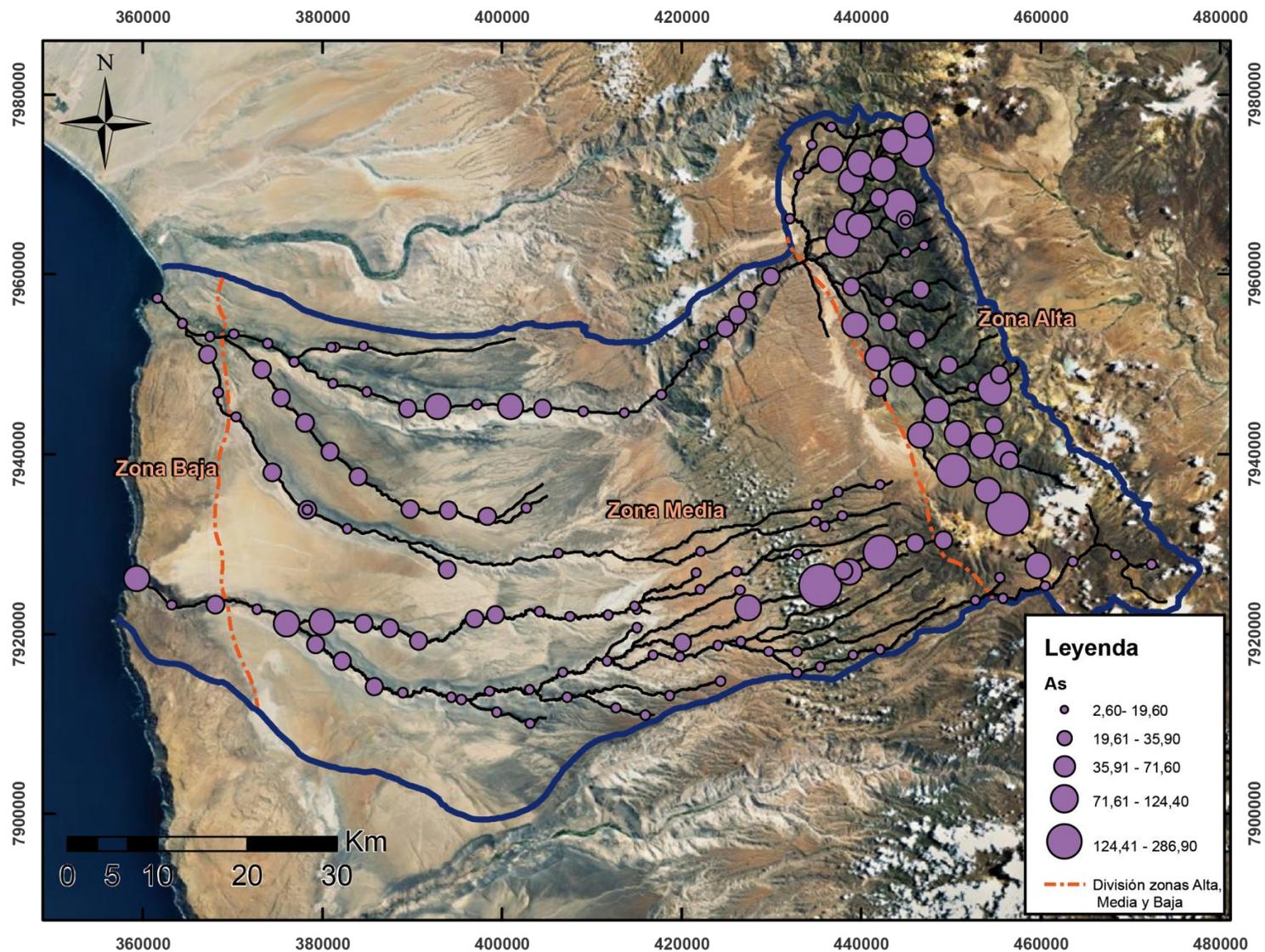


Figura 15. Concentraciones de As en la Cuenca Integrada Azapa-Vítor. Se observa que las mayores concentraciones están ubicadas en la Zona Alta.

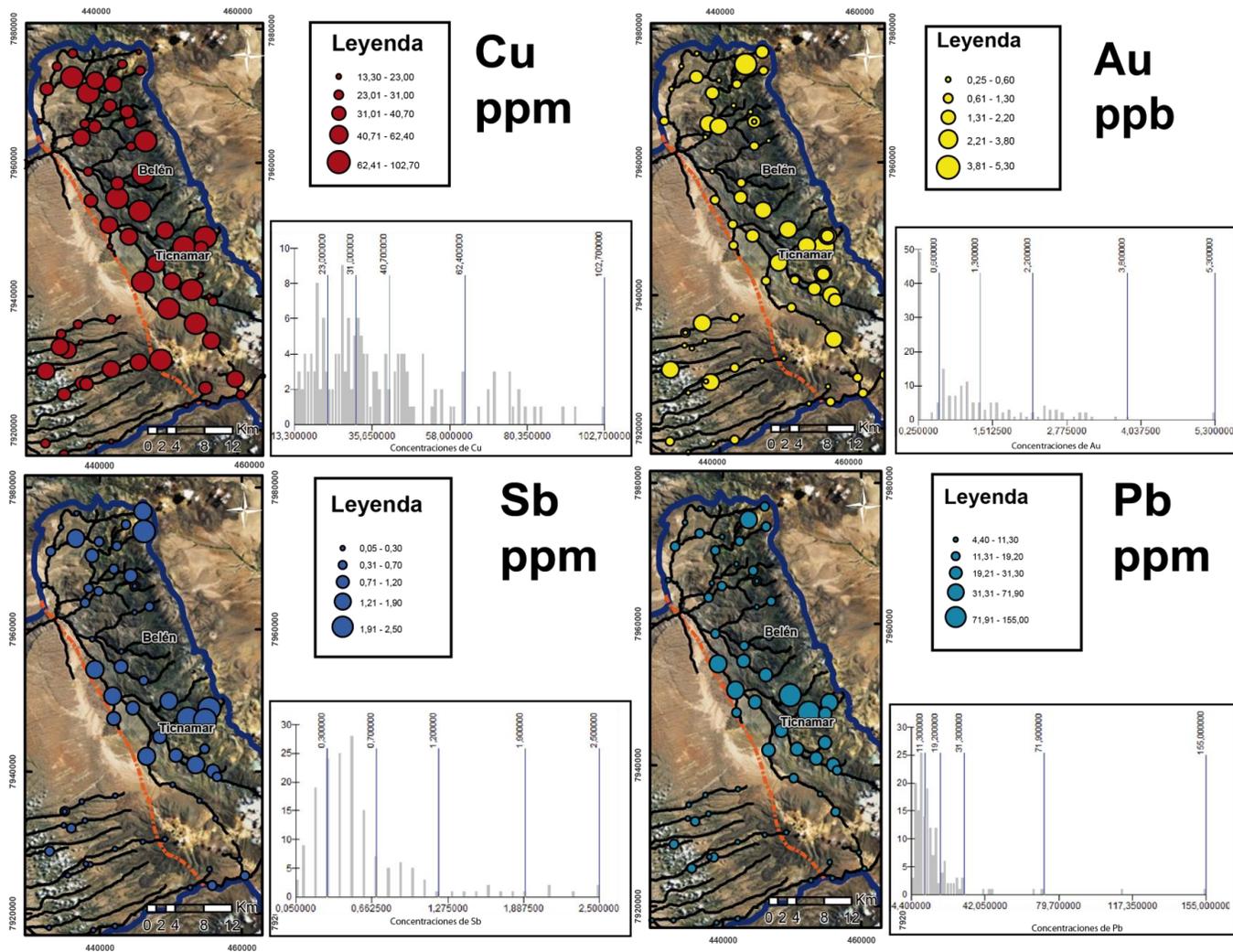


Figura 16. Distribución de las concentraciones de Cu, Au, Sb y Pb en la Zona Alta. Los gráficos muestran la distribución de la población de muestras para cada elemento, donde en el eje vertical se muestra la cantidad de muestras y en el horizontal las concentraciones en porcentaje, ppm o ppb según corresponda.

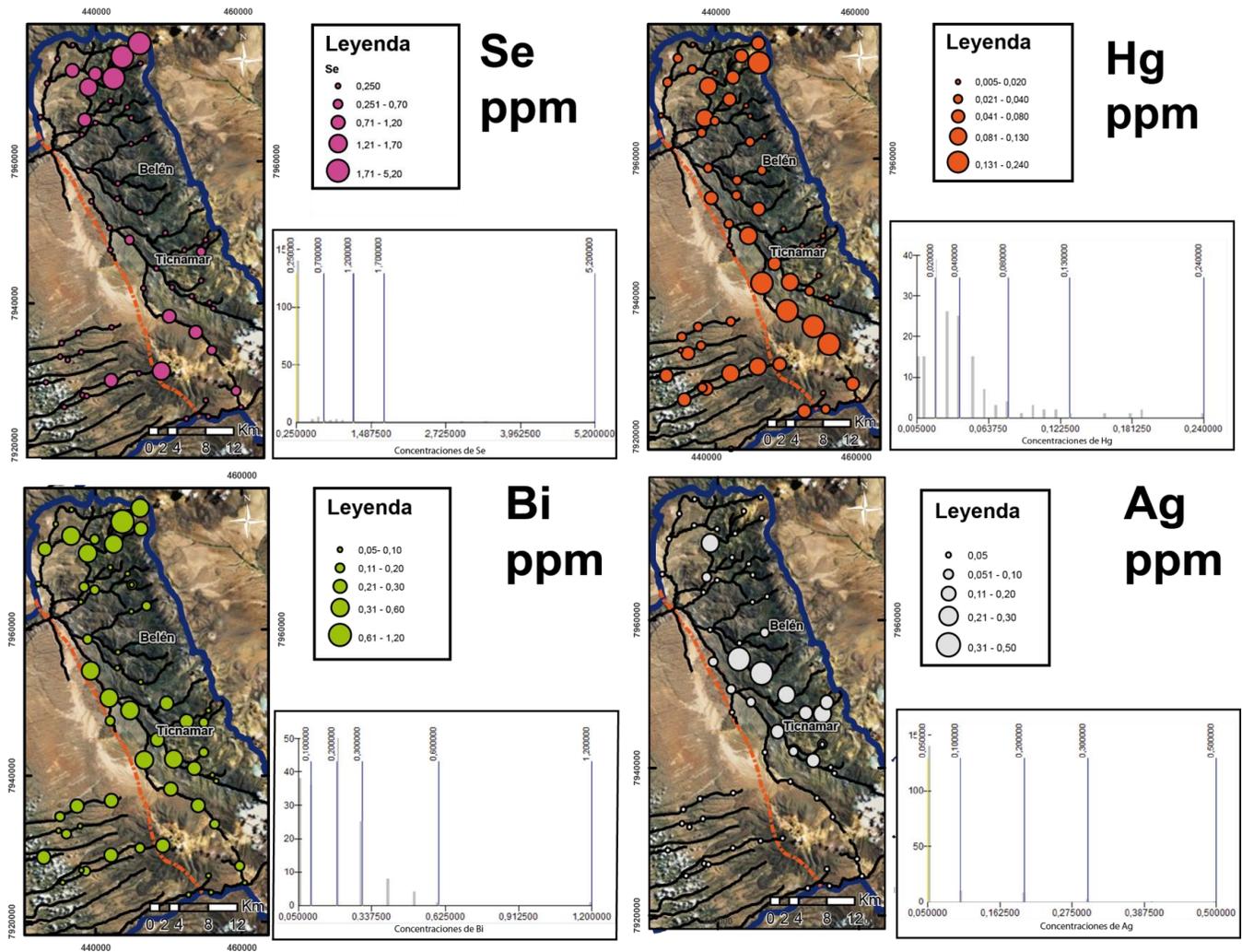


Figura 17. Distribución de las concentraciones de Se, Hg, Bi y Ag en la Zona Alta. Los gráficos muestran la distribución de la población de muestras para cada elemento, donde en el eje vertical se muestra la cantidad de muestras y en el horizontal las concentraciones en porcentaje, ppm o ppb según corresponda.

## **4.2.2 Zona Media**

Esta zona, delimitada por la Precordillera al este y por la Cordillera de la Costa al oeste, comprende las mayores extensiones de los ríos Vítor y San José de Azapa. Incluye además, una serie de quebradas tributarias, la mayoría secas permanentemente.

En particular, para el caso de las quebradas secas (La Higuera, Calizama) o paleocanales (Quebrada Llyosas, Quebrada del Diablo en Azapa y en Vítor, y Quebrada Honda), se observa un aumento en las concentraciones de Cs, CaO, Tl y Sc. Lo mismo ocurre para el caso de MgO, con la singularidad de que sólo aumenta sus concentraciones en los paleocanales (ver Figura 18 y Figura 19).

Se observan grandes diferencias entre los dos cauces principales, tanto en las concentraciones de elementos que presentan como en el comportamiento de éstos. Por esta razón se describen de manera separada a continuación.

### **4.2.2.1 Cuenca del Río San José de Azapa**

En general, esta cuenca presenta mayores concentraciones de Cd y Ag (elementos que se encuentran en su mayoría, bajo el límite de detección en la cuenca del Río Vítor). También presenta mayores concentraciones de SiO<sub>2</sub>, K<sub>2</sub>O y U.

#### **4.2.2.1.1 Río San José de Azapa**

Las concentraciones de elementos presentan patrones estables a lo largo de la quebrada, con peaks locales bien definidos en la muestra FC-008 y en la bocatoma del Canal Azapa.

##### **Punto FC-008**

Este punto de muestreo, ubicado aguas abajo de Livircar, presenta altas concentraciones relativas de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Co, Zr, V, Ce, TiO<sub>2</sub>, Th, Ga, Hf, S y Au; y un aumento en las concentraciones de U, Tb, Ta, Pr, Nb, Nd y MnO.

##### **Bocatoma canal Azapa**

Ubicada en la quebrada de Azapa a la altura de la muestra NM-101 se encuentra la bocatoma del canal Azapa. Desde aquí el agua es canalizada para el regadío agrícola hasta volver a su cauce natural cercano a la ciudad de Arica. En periodo de invierno boliviano, el cauce del Río San José es alto, por lo que alcanza para abastecer de agua al canal y para seguir su cauce

natural. Sin embargo, el resto del año, el cauce baja considerablemente, siendo traspasadas la totalidad de las aguas al canal de Azapa. Esto implica que en este sector el cauce está seco gran parte del año. Las muestras afectadas por esta situación son: NM-101, NM-102, NM-103, NM-104 y NM-105.

Se observan en esta zona concentraciones altas de Tl, Tb, Rb, Ni, Mo, Total C, Cu, Ag, Cd, As, Au, Be, Bi, Cs, Hg, y concentraciones mayores de manera local de S, MgO, Se, Sn, Zn.

#### **4.2.2.1.2 Quebrada Llyosas**

Este paleocanal, ubicado al sur de la Quebrada de Azapa, presenta altas concentraciones relativas al total de muestras de S, MgO, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, Zn, Tl, Tb, Sc, Ni, Cu, CaO.

#### **4.2.2.1 Cuenca del Río Vítor**

##### **Río Vítor**

Se observan a lo largo de esta quebrada, una mayoría de altas concentraciones relativas de V, Zr, TiO<sub>2</sub>, Sr, Sc, Nb, MnO, MgO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Ga, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y Co.

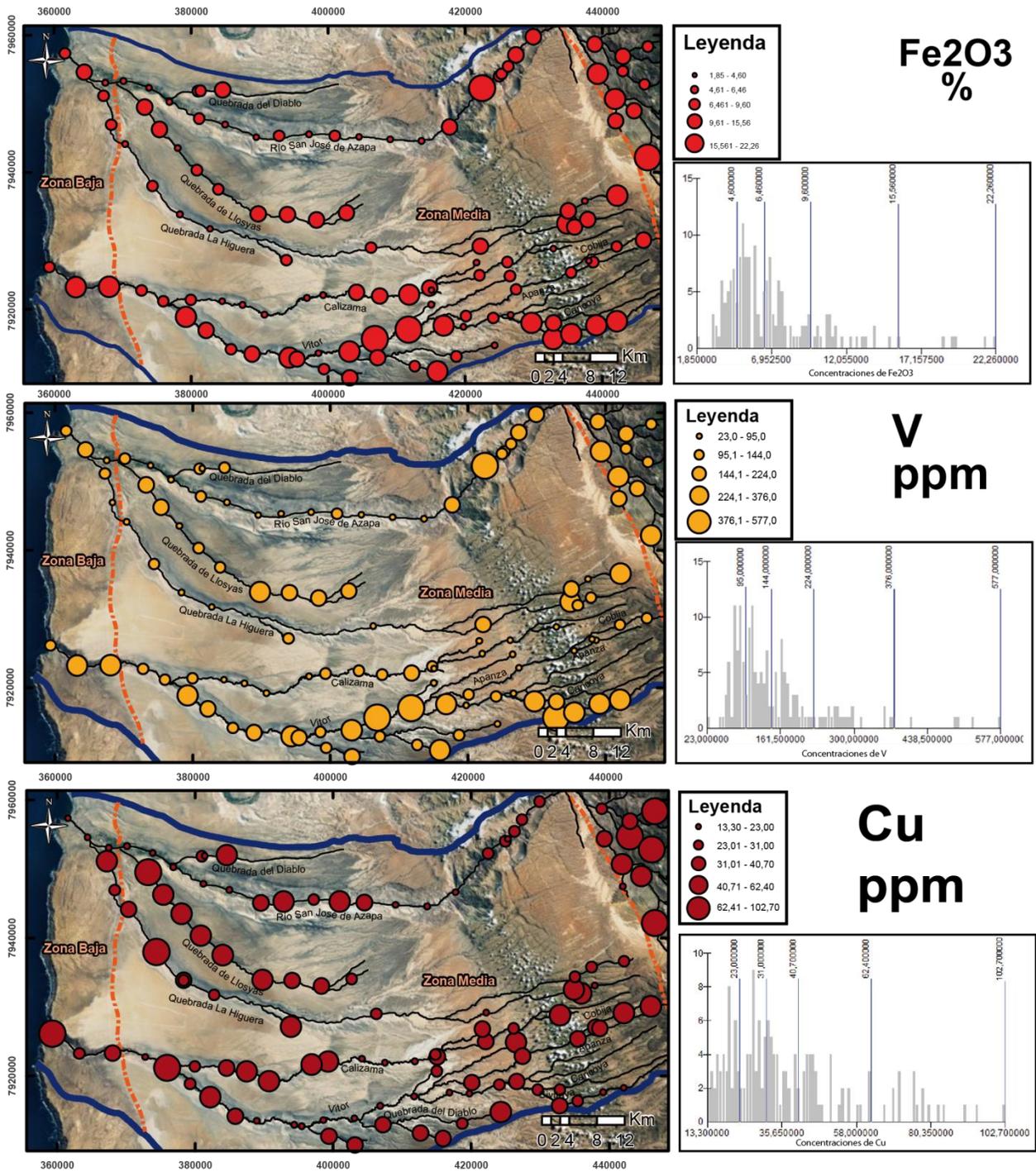
Se observa en esta quebrada un cambio en el comportamiento de las concentraciones a partir del punto NM-88 hasta el punto NM-01 donde suelen bajar las concentraciones de estos elementos antes mencionados, y aumentar las concentraciones de Mo, S, Au, Bi, Cd, Cs, As, Cu, Hg, C total y Tl.

#### **4.2.3 Zona Baja**

Esta zona, definida por la cordillera de la costa, muestra las concentraciones de elementos justo antes de llegar a las desembocaduras en el Océano Pacífico. Por ser un área pequeña en comparación a la zona de estudio, se muestra junto a la Zona Media en la Figura 18 y Figura 19.

##### **Arica**

Este sector está compuesto por dos muestras sacadas al interior de la ciudad de Arica. Presenta aumento en las concentraciones de TiO<sub>2</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Co, Ce, Sb, Zr, Pb, Hf, Yb, Th, Pr, Nd, La, Eu y Dy.



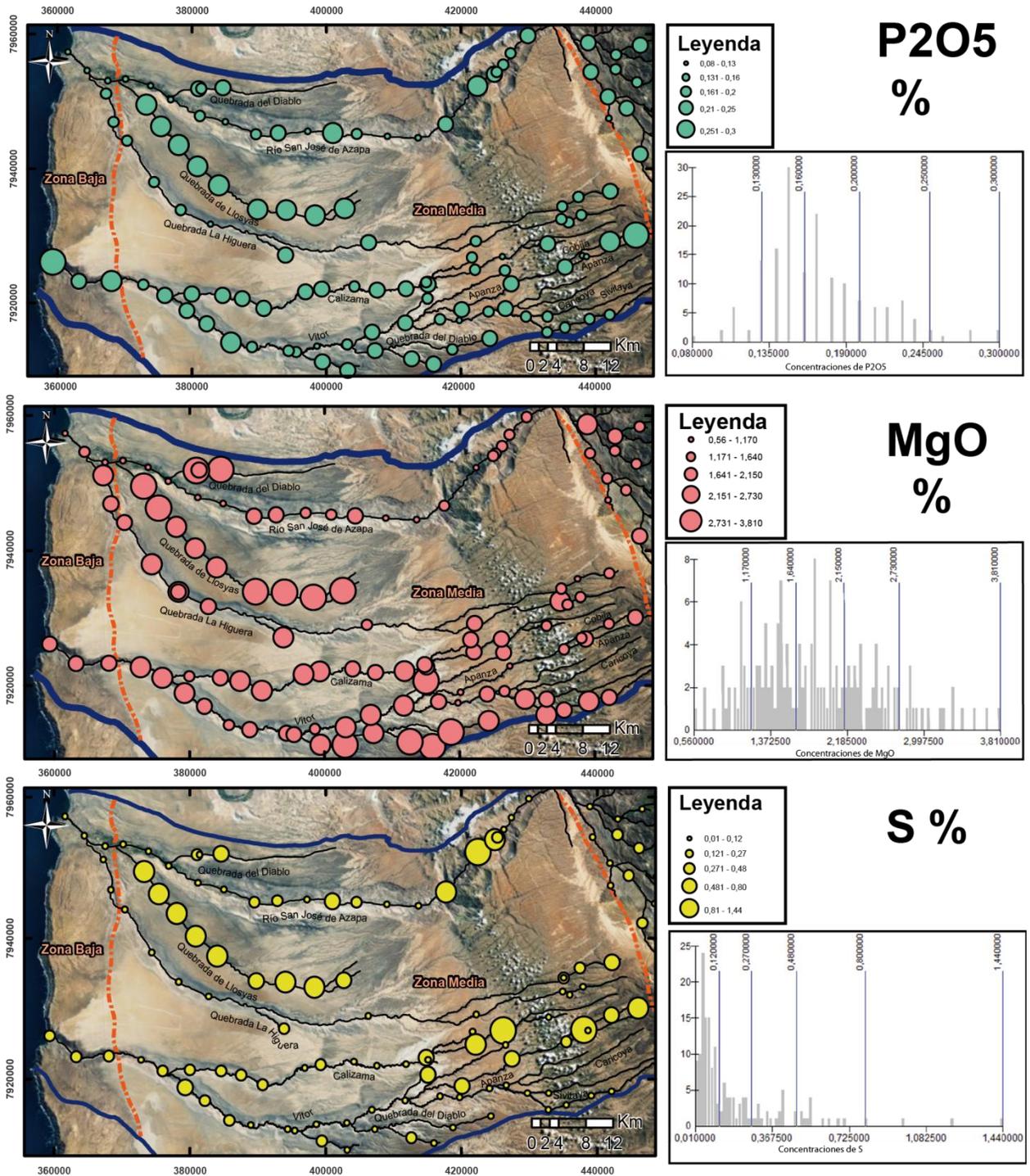


Figura 19. Distribución de las concentraciones de P2O5, MgO y S en las zonas Media y Baja.

## **Caleta Vítor**

Ubicado en la desembocadura del Río Vítor al océano Pacífico, y cercano a la Planta de tratamiento de minerales de Cu "Caleta Vítor", este sector destaca por presentar altas concentraciones relativas de Be, As, Cu, Hg, Total C, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, Pb, Se y Tl.

### **4.3 Gráficos de variación geográfica**

Se obtienen gráficos de variación geográfica para las concentraciones de los 59 elementos estudiados en los ríos Vítor y San José de Azapa (ver Anexo B).

#### **4.3.1 Río Vítor**

A lo largo de la quebrada se observan patrones de zigzag en las señales geoquímicas de la mayoría de los elementos analizados.

Se distinguen grupos de elementos con similares comportamientos a lo largo del cauce. Éstos son detallados a continuación y presentados en gráficos de variación geográfica con valores normalizados en la Figura 20.

**Grupo 1:** Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub>, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, V, Ga, y Co.

**Grupo 2:** Zr, Hf, Sn y Nb.

**Grupo 3:** MnO, Zn y Ni.

**Grupo 4:** SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y K<sub>2</sub>O.

En general, los grupos 1, 2 y 3 presentan comportamientos similares e inversos a los presentados en el grupo 4 (Figura 20).

Además, se observan claras diferencias en las señales geoquímicas de las tierras raras (REE). Se distingue un comportamiento general para las tierras raras livianas (LREE), uno distinto para las tierras raras pesadas (HREE-Eu), y otro distinto para el Eu (Figura 21).

Además, se observa un aumento en las concentraciones de C, S, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> y metales pesados como el Cu, As, Mo, y Pb a partir del punto de muestreo NM-088.

Por último, destaca un aumento en la concentración de (Hg, Tl, Be, W, Au, Cu, As, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, Mo y Pb) en el sector de Caleta Vítor (Punto de muestreo NM-003).

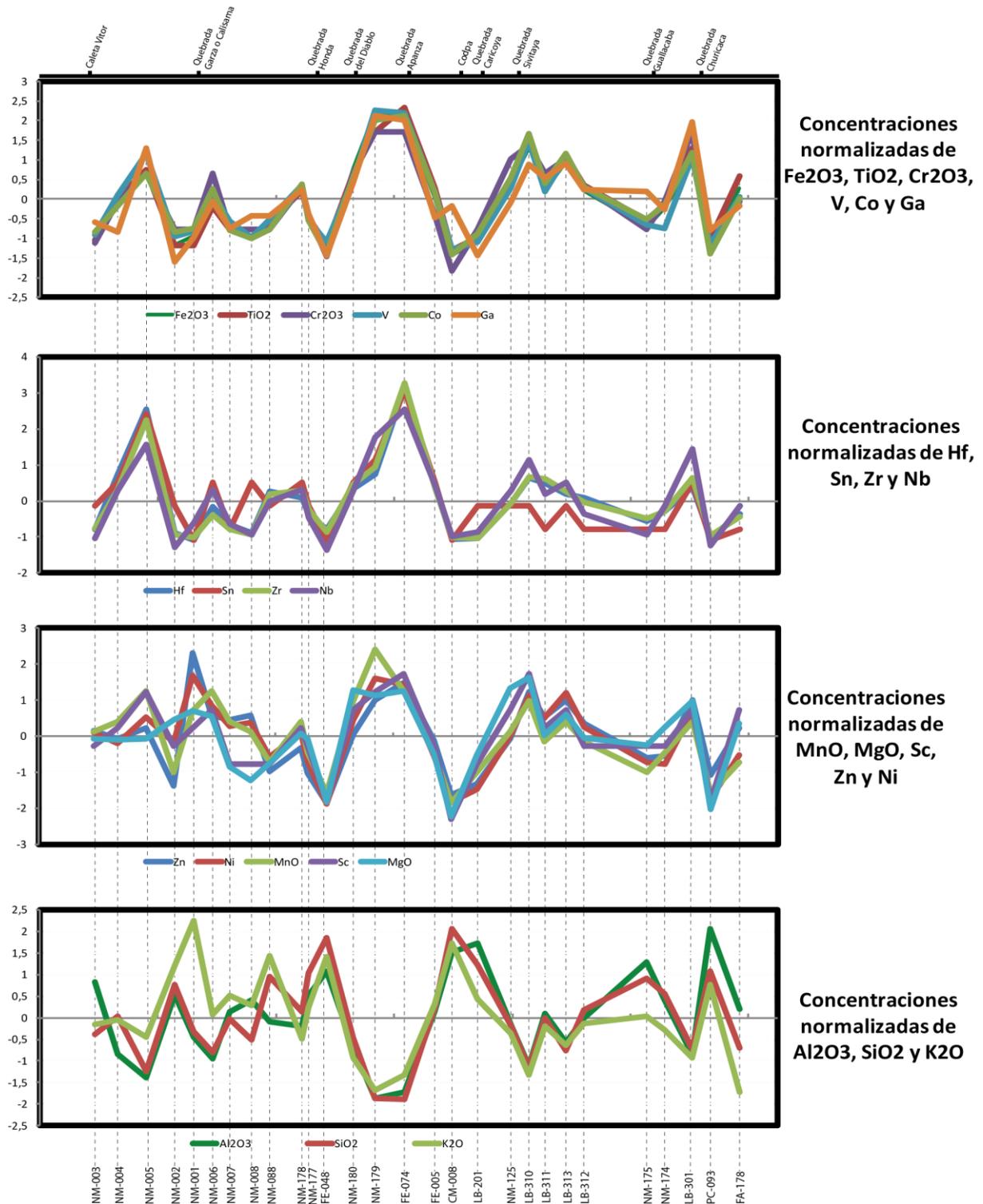


Figura 20. Gráficos de variación geográfica este-oeste con valores normalizados para grupos de elementos que presentan similares señales geoquímicas a lo largo del cauce del Río Vitor. En la parte superior, se señalan los puntos donde se ubican sitios de interés y confluencias con las quebradas tributarias

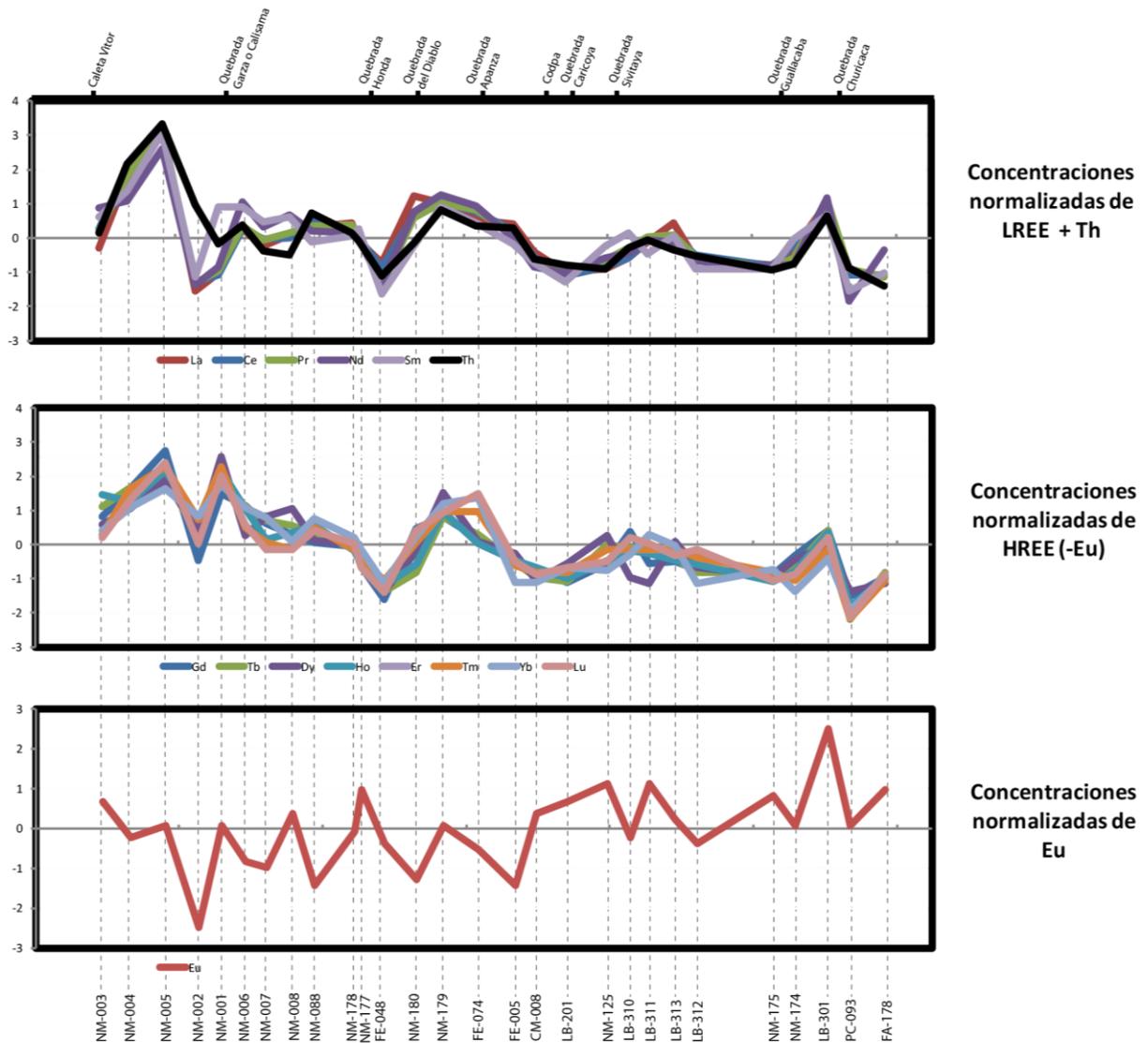


Figura 21. Gráficos de variación geográfica este-oeste con valores normalizados para REE +Th a lo largo del Río Vitor. En la parte superior, se señalan los puntos donde se ubican sitios de interés y confluencias con las quebradas tributarias.

#### 4.3.2 Río San José de Azapa

El Río San José de Azapa nace de las confluencias de los ríos Tignamar y Seco y es el cauce principal que drena las aguas de la cuenca homónima hasta el mar.

Presenta señales geoquímicas más estables que el Río Vitor, mostrando peaks locales tanto en el punto FC-008 como en el sector de bocatoma del Canal de Azapa (Ver Anexo B).

#### 4.4 Rípios de Copaquilla

Se tomaron muestras tanto de los rípios de lixiviación (Figura 23) como de un pequeño drenaje que transporta el sedimento de estos rípios al Río San José de Azapa (Figura 22). La ubicación de los puntos de muestreo se detalla en la Figura 24. Imagen satelital de los rípios de Copaquilla y el nacimiento del Río San José de Azapa en la confluencia de los ríos Seco y Tignamar. En naranja la ubicación de las muestras de rípio y drenaje señaladas en la

Los resultados obtenidos se muestran a continuación en la Tabla 6, para los siguientes elementos:

	Cu [ppm]	Pb [ppm]	Zn [ppm]	As [ppm]	Sb [ppm]	Bi [ppm]	Ag [ppm]	Au [ppb]	Hg [ppm]
Rípios de lixiviación	865	821	564	487	158	76,2	69,1	493	0,59
Drenaje	50,3	53,7	90	469	24,4	22,7	3,4	73,3	0,09

Tabla 6. Concentraciones de Cu, Pb, Zn, As, Sb, Bi, Ag, Au y Hg para los rípios de lixiviación con cianuro y para el pequeño drenaje que transporta estos sedimentos al río San José de Azapa.

Se observan que en los rípios son muy altas las concentraciones de Cu, Pb, Zn, As, Sb, Bi, Ag, Au y Hg en comparación a cualquier muestra tomada en sedimentos fluviales. Sin embargo, no todas estas altas concentraciones se ven reflejadas en el drenaje que transporta parte de estos sedimentos a la Quebrada de Azapa.



Figura 22 Imagen panorámica de los rípios de Copaquilla. En la parte inferior izquierda se observa el drenaje que transporta los sedimentos al Río San José de Azapa.



Figura 23 Ripios de lixiviación con cianuro dejados por la empresa PROMEL en el sector de Copaquilla en 1991.

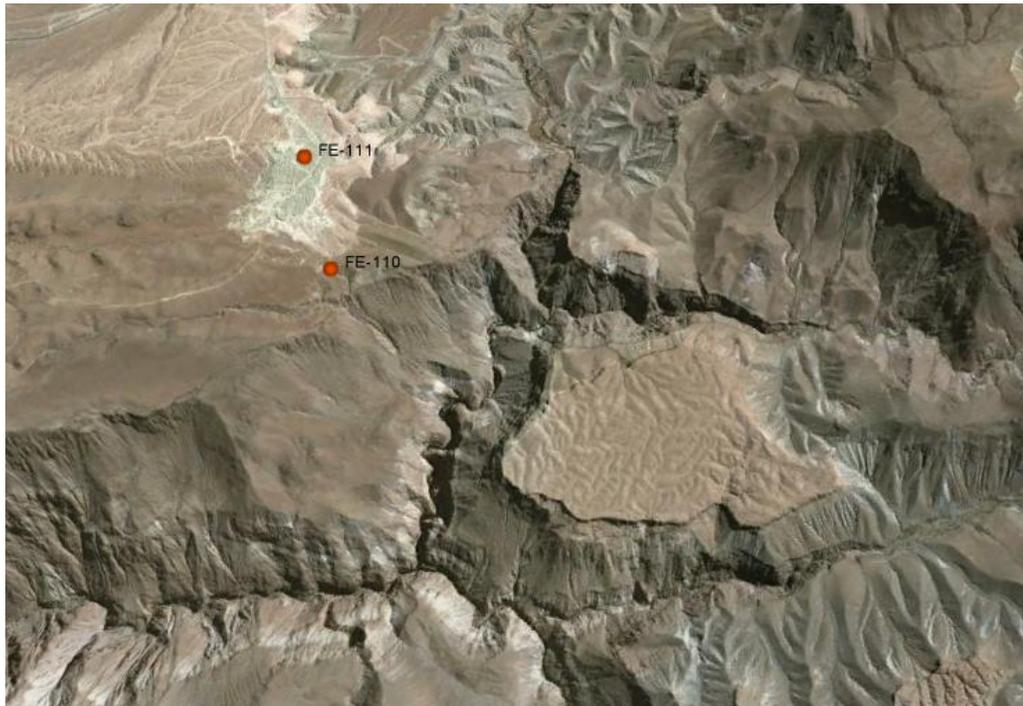


Figura 24. Imagen satelital de los ripios de Copaquilla y el nacimiento del Río San José de Azapa en la confluencia de los ríos Seco y Tignamar. En naranja la ubicación de las muestras de ripio y drenaje señaladas en la Tabla 6.

## 4.5 Análisis mineralógico

A continuación, se presentan los resultados del análisis mineralógico realizado a 20 muestras de la Cuenca Integrada Vítor-Azapa.

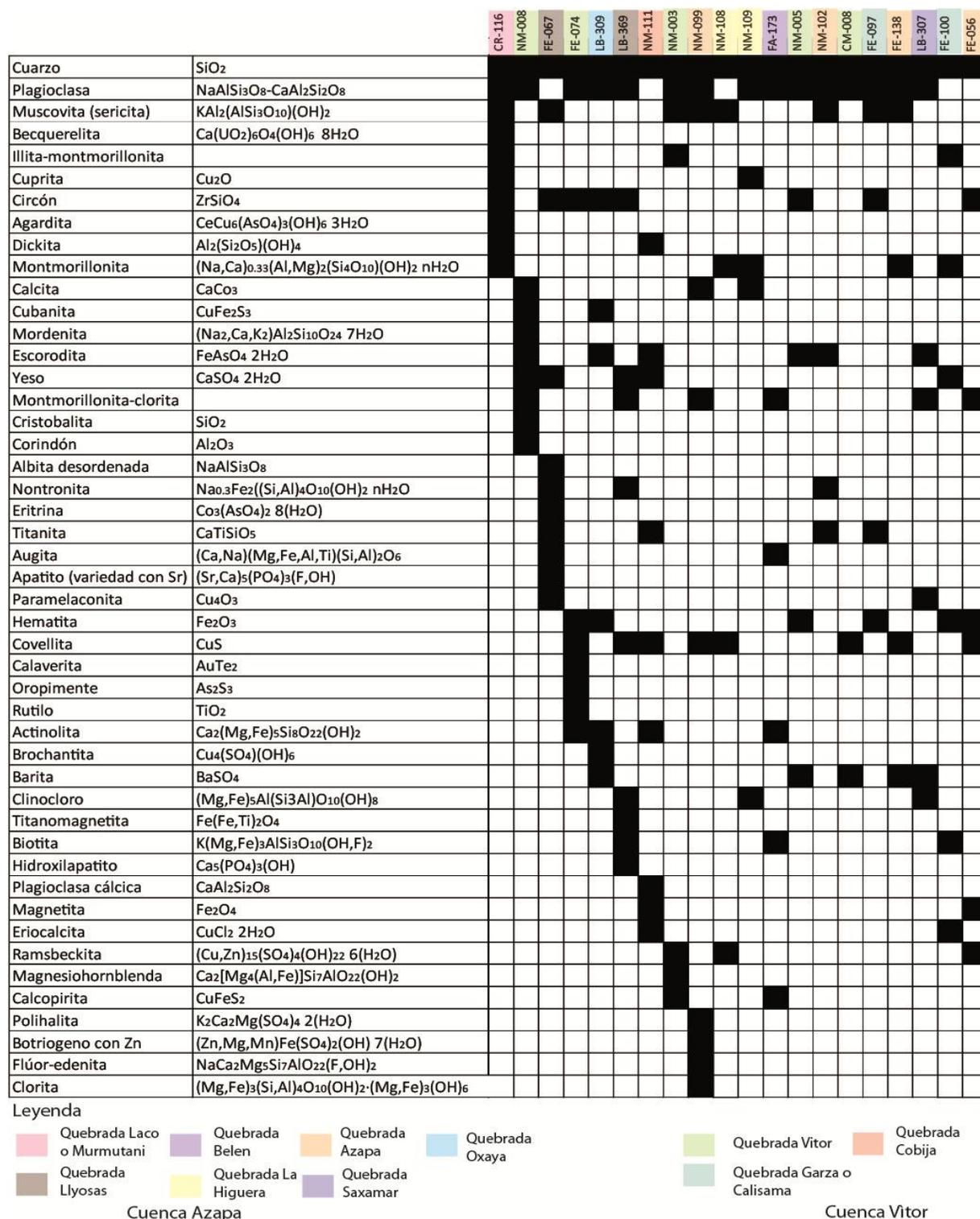


Figura 25. Resultado análisis mineralógico.

		CR-116	NM-008	FE-067	FE-074	LB-309	LB-369	NM-111	NM-003	NM-099	NM-108	NM-109	FA-173	NM-005	NM-102	CM-008	FE-097	FE-138	LB-307	FE-100	FE-056		
Anortita	CaAl <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>8</sub>																						
Caolinita	Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub>																						
Calomelano variedad de B	Hg <sub>2</sub> (Br,Cl) <sub>2</sub>																						
Anortoclasa	(Na,K)AlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>																						
Illita	(K,H <sub>3</sub> O)(Al,Mg,Fe) <sub>2</sub> (Si,Al) <sub>4</sub> O <sub>10</sub> [(OH) <sub>2</sub> ,(H <sub>2</sub> O)]																						
Despujolsita	Ca <sub>3</sub> Mn(SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>6</sub> • <sub>3</sub> (H <sub>2</sub> O)																						
Anglesita	PbSO <sub>4</sub>																						
Roselita	Ca <sub>2</sub> (Co,Mg)(AsO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> •2(H <sub>2</sub> O)																						
Goethita	FeO(OH)																						
Estilbita cálcica	NaCa <sub>4</sub> [Al <sub>8</sub> Si <sub>28</sub> O <sub>72</sub> ]•n(H <sub>2</sub> O)																						
Sanidina	(K,Na)(Si,Al) <sub>4</sub> O <sub>8</sub>																						
Tamaruguita	NaAl(SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> •6(H <sub>2</sub> O)																						
Proustita	Ag <sub>3</sub> AsS <sub>3</sub>																						
Magnesianiebeckita	Na <sub>2</sub> (Fe <sup>2+</sup> ,Mg) <sub>3</sub> Fe <sub>23</sub> +Si <sub>8</sub> O <sub>22</sub> (OH) <sub>2</sub>																						
Baritocalcita	BaCa(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>																						
Ramdohrite con Bi	Ag <sub>x</sub> Pb <sub>3-x</sub> (Sb,Bi) <sub>2x</sub> S <sub>6</sub>																						
Ferroactinolita	Ca <sub>2</sub> Fe <sub>5</sub> Si <sub>8</sub> O <sub>22</sub> (OH) <sub>2</sub>																						
Tetraedrita	(Cu,Fe) <sub>12</sub> Sb <sub>4</sub> S <sub>13</sub>																						
Diópsido	MgCaSi <sub>2</sub> O <sub>6</sub>																						
Ankerita	Ca(Fe,Mg,Mn)(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>																						
Ortoclasa	KAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>																						
Analcima	Na(Si <sub>2</sub> Al)O <sub>6</sub> •H <sub>2</sub> O																						
Nantokita	CuCl																						
Apatito	Ca <sub>5</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> (OH,F,Cl)																						
Riebeckita	Na <sub>2</sub> Fe <sub>5</sub> Si <sub>8</sub> O <sub>22</sub> (OH) <sub>2</sub>																						
Anhidrita	CaSO <sub>4</sub>																						

Leyenda



Figura 26. Resultado análisis mineralógico.

## 5. DISCUSIONES

### 5.1 Control de calidad de datos

Mediante el control de calidad de datos realizado en la sección 4.1, se obtuvo el error total y el error de laboratorio para cada elemento.

El análisis de duplicados de laboratorio arrojó un 25% de elementos con errores de laboratorio sobre el 10 %. Sin embargo, esto se puede explicar

Elemento	LDD	Min	Max	Promedio Diferencia	Error de Laboratorio
Be (ppm)	1,00	0,50	5,00	1,26	59,92
Au (ppb)	0,50	0,60	79,90	0,71	51,67
Hg (ppm)	0,01	0,01	0,37	0,01	29,88
Cd (ppm)	0,10	0,10	2,20	0,04	29,67
Sn (ppm)	1,00	1,00	6,00	0,46	29,45
Tl (ppm)	0,10	0,10	0,50	0,03	26,42
W (ppm)	0,50	0,60	6,10	0,32	24,72
TOTAL S %	0,02	0,01	6,55	0,02	20,45
Se (ppm)	0,50	0,50	13,60	0,08	19,96
Bi (ppm)	0,10	0,10	1,00	0,02	19,35
Ta (ppm)	0,10	0,10	1,60	0,10	17,66
Cr2O3 %	0,00	0,00	0,01	0,00	16,07
Mo (ppm)	0,10	0,10	4,30	0,13	15,26
Ag (ppm)	0,10	0,10	2,30	0,01	13,08
Sb (ppm)	0,10	0,10	3,80	0,06	12,47
Th (ppm)	0,20	3,90	43,20	0,87	9,73
Hf (ppm)	0,10	2,20	18,20	0,65	8,21
U (ppm)	0,10	1,10	5,10	0,19	7,62
Er (ppm)	0,03	0,81	2,47	0,11	6,97
Zr (ppm)	0,10	81,30	694	16,35	6,62
Lu (ppm)	0,01	0,11	0,39	0,01	6,44
Ho (ppm)	0,02	0,23	0,93	0,04	6,24
Yb (ppm)	0,05	0,90	2,75	0,12	6,18
Nd (ppm)	0,30	11,70	63,10	1,80	5,98
P2O5 %	0,01	0,10	0,68	0,01	5,86
Tm (ppm)	0,01	0,11	0,40	0,01	5,73
Pb (ppm)	0,10	4,30	33,30	0,44	5,71
Dy (ppm)	0,05	1,64	4,38	0,19	5,36
Nb (ppm)	0,10	3,90	25,30	0,54	5,32
La (ppm)	0,10	12,70	106	1,69	5,01

Elemento	LDD	Min	Max	Promedio Diferencia	Error de Laboratorio
Cs (ppm)	0,10	3,00	81,40	0,39	4,52
Sc (ppm)	1,00	4,00	25,00	0,30	4,36
Ni (ppm)	0,10	4,80	25,60	0,40	4,31
Gd (ppm)	0,05	1,78	5,46	0,17	4,28
Ce (ppm)	0,10	27,60	185,50	2,75	4,10
Co (ppm)	0,20	3,60	31,20	0,68	4,06
TOTAL C %	0,01	0,02	1,43	0,01	3,91
Y (ppm)	0,10	9,00	23,30	0,69	3,84
Sm (ppm)	0,05	1,99	7,72	0,21	3,83
Eu (ppm)	0,02	0,50	1,41	0,04	3,61
Tb (ppm)	0,01	0,25	0,77	0,02	3,26
V (ppm)	8,00	29,00	407,00	4,95	3,19
Pr (ppm)	0,02	3,04	18,70	0,23	3,04
Ga (ppm)	0,50	7,70	22,30	0,54	2,90
As (ppm)	0,50	4,00	240,00	0,72	2,46
Cu (ppm)	0,10	11,50	1271,30	1,67	2,29
Zn (ppm)	1,00	30,00	672,00	1,46	2,28
MnO %	0,01	0,05	0,43	0,00	2,19
Ba (ppm)	5,00	357	1226,00	15,95	1,95
Sr (ppm)	0,50	271,7	1039,70	9,48	1,71
TiO2 %	0,01	0,32	2,05	0,01	1,21
Rb (ppm)	0,10	44,40	138,20	1,09	1,18
Fe2O3 %	0,04	2,26	16,12	0,07	1,08
MgO %	0,01	0,47	5,40	0,02	0,82
Na2O %	0,01	2,11	4,72	0,02	0,73
CaO %	0,01	1,24	20,83	0,05	0,73
K2O %	0,01	1,57	3,66	0,02	0,71
Al2O3 %	0,01	7,16	17,29	0,10	0,68
SiO2 %	0,01	31,90	68,11	0,19	0,51

Tabla 7. Valores de límites de detección (LDD) entregados por ACMELabs para cada elemento. Además se incluyen los valores mínimos y máximos, el promedio de la diferencia y el error relativo para cada elemento, en orden decreciente según este último. Se destaca en rojo aquellos elementos que presentan más de un 10% de error de laboratorio.

por la existencia de valores muy bajos, cercanos al límite de detección en todos estos elementos.

Por ejemplo, pares de duplicados con valores de 0,1 ppm de Cd en la muestra original y 0,2 ppm de Cd en la muestra duplicada, presentarían un error del 50%, aún siendo la diferencia muy pequeña y muy cercana al límite de detección (0,1 ppm).

En la Tabla 7 se muestran los límites de detección inferiores para los 59 elementos estudiados, los valores mínimos y máximos de la población de muestras duplicadas, el promedio de la diferencia y el error de laboratorio obtenido.

Se puede observar en esta tabla que los valores mínimos para los elementos que presentan errores mayores al 10%, se encuentran muy cerca de los límites de detección. Esto provoca un cálculo de error de laboratorio muy alto, que no necesariamente refleja el error asociado a estos elementos cuando sus concentraciones son elevadas. Para calcular el error efectivo de laboratorio asociado a estas muestras cuando se encuentran en medianas a altas concentraciones, habría que eliminar de la población de muestras duplicadas todas aquellas con valores bajo el límite de detección, o cercanas a éste.

Por otra parte, se realiza una comparación de los errores totales y de laboratorio, obtenidos para los 59 elementos, con el fin de determinar en qué momento del proceso se produce el mayor error para cada caso.

Esta comparación se debe realizar con duplicados de terreno y de laboratorio extraídos de la misma muestra para asegurar resultados confiables. Sin embargo, a falta de duplicados con estas características, se realiza la comparación de todas formas, a modo de aproximación.

Mientras que el error de laboratorio representa sólo el error que puedan tener los instrumentos de medición utilizados en ACMELabs, el error total o de terreno representa el conjunto de errores del proceso, incluyendo el error fundamental intrínseco a la zona de muestreo, el error de muestreo, el error de preparación de muestra y el error de laboratorio, entre otros. Es decir, se espera en todos los casos un error total mayor al error de laboratorio.

Sin embargo, esto último no se cumple en este análisis tal como se puede ver en la Tabla 8 La diferencia entre ambos errores resulta positiva en la mayoría de los casos, destacándose en naranja y violeta aquellos en que esto no se cumple.

Para el caso del Sm, Nd, Be, Gd, Ag, Tm, U, Th y Cd, se consideran iguales ambos errores. Esto porque ambos errores fueron calculados con distintas poblaciones de muestras duplicadas, lo que podría explicar las pequeñas diferencias obtenidas. Se asume para este caso un error de laboratorio similar al error total, que en la mayoría de los casos se explica por las bajas concentraciones obtenidas para estos elementos en la zona.

Elemento	Error total o de terreno	Error Laboratorio	Diferencia errores
TOTAL C %	19,86	3,91	15,95
V [ppm]	18,55	3,19	15,35
Hg [ppm]	45,12	29,88	15,24
Cu [ppm]	16,81	2,29	14,51
Fe2O3 %	13,93	1,08	12,84
TiO2 %	13,15	1,21	11,94
Sb [ppm]	24,25	12,47	11,78
Zn [ppm]	12,71	2,28	10,43
W [ppm]	34,92	24,72	10,21
Sn [ppm]	38,07	29,45	8,62
Ni [ppm]	12,19	4,31	7,88
Zr [ppm]	14,46	6,62	7,83
As [ppm]	10,19	2,46	7,73
MnO %	9,70	2,19	7,51
Hf [ppm]	15,43	8,21	7,22
Pb [ppm]	12,88	5,71	7,17
Co [ppm]	11,17	4,06	7,12
Cr2O3 %	23,15	16,07	7,07
Mo [ppm]	21,73	15,26	6,47
Ce [ppm]	10,19	4,10	6,09
Nb [ppm]	11,17	5,32	5,85
La [ppm]	10,75	5,01	5,74
Na2O %	6,47	0,73	5,74
K2O %	6,21	0,71	5,51
Sr [ppm]	7,09	1,71	5,38
Rb [ppm]	6,53	1,18	5,35
Pr [ppm]	8,26	3,04	5,22
CaO %	5,20	0,73	4,47
Dy [ppm]	9,75	5,36	4,39
Au [ppb]	55,86	51,67	4,19

Elemento	Error total o de terreno	Error Laboratorio	Diferencia errores
SiO2 %	4,69	0,51	4,19
TOTAL S %	24,52	20,45	4,08
Al2O3 %	4,37	0,68	3,69
Cs [ppm]	8,08	4,52	3,56
Sc [ppm]	7,77	4,36	3,41
MgO %	4,17	0,82	3,35
Bi [ppm]	22,65	19,35	3,31
Lu [ppm]	9,52	6,44	3,09
Tb [ppm]	6,31	3,26	3,05
Yb [ppm]	9,14	6,18	2,96
Eu [ppm]	6,55	3,61	2,94
Ba [ppm]	4,80	1,95	2,85
Er [ppm]	9,80	6,97	2,83
Ga [ppm]	5,59	2,90	2,69
Y [ppm]	6,25	3,84	2,41
P2O5 %	8,20	5,86	2,35
Ho [ppm]	8,47	6,24	2,23
Sm [ppm]	5,82	3,83	1,99
Nd [ppm]	7,70	5,98	1,71
Be [ppm]	61,49	59,92	1,57
Gd [ppm]	5,54	4,28	1,27
Ag [ppm]	14,21	13,08	1,13
Tm [ppm]	6,70	5,73	0,97
U [ppm]	7,35	7,62	-0,26
Th [ppm]	9,46	9,73	-0,27
Cd [ppm]	28,29	29,67	-1,38
Tl [ppm]	20,83	26,42	-5,60
Se [ppm]	13,04	19,96	-6,92
Ta [ppm]	9,16	17,66	-8,50

Tabla 8. Comparación entre error total o de terreno y error de laboratorio, ordenados decrecientemente según su diferencia.

Para el caso del TI, Se y Ta, la diferencia es mayor. Sin embargo tanto en el caso del TI como del Se esta diferencia se debe a que más de un 50% de los duplicados de laboratorio utilizados en el cálculo del error, presentaban concentraciones bajo el límite de detección.

### **5.1.1 Implicancias de la Hidrodinámica en el error fundamental.**

Tal como se comentó en el punto anterior, el error total calculado para las muestras de este estudio incluye diversos errores asociados a las diferentes etapas del proceso, desde el muestreo en terreno, traslados, tamizaje y molienda, hasta el análisis en el laboratorio. Sin embargo, también incluye el llamado error fundamental.

El error fundamental asociado a una muestra hace referencia a la heterogeneidad intrínseca de la roca, o en este caso, a la heterogeneidad del cauce que se quiere muestrear.

Para este tipo de muestras que involucran sedimentos fluviales provenientes de diversas fuentes, y que pueden recorrer distancias muy extensas, el gran factor que determina esta heterogeneidad es la hidrodinámica de depositación. Minerales con alta densidad (magnetita, hematita, zircón, rutilo, apatito, titanita) pueden depositarse aún cuando el sistema fluvial tiene alta energía, mientras que los minerales menos densos (cuarzo, plagioclasa, feldespatos) tenderán a depositarse en tramos de baja energía. Esto provoca diferencias a lo largo del cauce y también dentro de un mismo sector de éste.

En la Figura 27 se observa un ejemplo de diferenciación de minerales densos (magnetita) en sedimentos fluviales recientes.



Figura 27. Diferenciación de minerales densos por efectos de hidrodinámica de sedimentos fluviales. Ambas imágenes son de la quebrada Calizama.

Para determinar el error fundamental para cada elemento sería necesario determinar los errores asociados a cada etapa del proceso, es decir, determinar el error de muestreo, el error de preparación de muestra, error

Elemento	Error total	Error Lab.	Diferencia errores	% error 1ªetapa proceso
Ta [ppm]	9,16	17,66	-8,50	-
Fe2O3 %	13,93	1,08	12,84	92,21
TiO2 %	13,15	1,21	11,94	90,82
SiO2 %	4,69	0,51	4,19	89,22
Na2O %	6,47	0,73	5,74	88,73
K2O %	6,21	0,71	5,51	88,65
Cu [ppm]	16,81	2,29	14,51	86,35
CaO %	5,20	0,73	4,47	86,02
Al2O3 %	4,37	0,68	3,69	84,44
V [ppm]	18,55	3,19	15,35	82,79
Zn [ppm]	12,71	2,28	10,43	82,04
Rb [ppm]	6,53	1,18	5,35	81,98
MgO %	4,17	0,82	3,35	80,35
TOTAL C %	19,86	3,91	15,95	80,33
MnO %	9,70	2,19	7,51	77,43
Sr [ppm]	7,09	1,71	5,38	75,90
As [ppm]	10,19	2,46	7,73	75,87
Ni [ppm]	12,19	4,31	7,88	64,67
Co [ppm]	11,17	4,06	7,12	63,69
Pr [ppm]	8,26	3,04	5,22	63,18
Ce [ppm]	10,19	4,10	6,09	59,79
Ba [ppm]	4,80	1,95	2,85	59,39
Pb [ppm]	12,88	5,71	7,17	55,68
Zr [ppm]	14,46	6,62	7,83	54,18
La [ppm]	10,75	5,01	5,74	53,40
Se [ppm]	13,04	19,96	-6,92	-
Nb [ppm]	11,17	5,32	5,85	52,37
Sb [ppm]	24,25	12,47	11,78	48,59
Tb [ppm]	6,31	3,26	3,05	48,28
Ga [ppm]	5,59	2,90	2,69	48,09

Elemento	Error total	Error Lab.	Diferencia errores	% error 1ªetapa proceso
Hf [ppm]	15,43	8,21	7,22	46,79
Dy [ppm]	9,75	5,36	4,39	45,00
Eu [ppm]	6,55	3,61	2,94	44,90
Cs [ppm]	8,08	4,52	3,56	44,03
Sc [ppm]	7,77	4,36	3,41	43,91
Y [ppm]	6,25	3,84	2,41	38,58
Sm [ppm]	5,82	3,83	1,99	34,21
Hg [ppm]	45,12	29,88	15,24	33,77
Lu [ppm]	9,52	6,44	3,09	32,40
Yb [ppm]	9,14	6,18	2,96	32,39
Cr2O3 %	23,15	16,07	7,07	30,56
Mo [ppm]	21,73	15,26	6,47	29,76
W [ppm]	34,92	24,72	10,21	29,23
Er [ppm]	9,80	6,97	2,83	28,86
P2O5 %	8,20	5,86	2,35	28,62
Tl [ppm]	20,83	26,42	-5,60	26,87
Ho [ppm]	8,47	6,24	2,23	26,29
Gd [ppm]	5,54	4,28	1,27	22,90
Sn [ppm]	38,07	29,45	8,62	22,63
Nd [ppm]	7,70	5,98	1,71	22,27
TOTAL S %	24,52	20,45	4,08	16,63
Bi [ppm]	22,65	19,35	3,31	14,59
Tm [ppm]	6,70	5,73	0,97	14,46
Ag [ppm]	14,21	13,08	1,13	7,95
Au [ppb]	55,86	51,67	4,19	7,50
Cd [ppm]	28,29	29,67	-1,38	4,86
U [ppm]	7,35	7,62	-0,26	3,60
Th [ppm]	9,46	9,73	-0,27	2,80
Be [ppm]	61,49	59,92	1,57	2,55

Tabla 9. Cálculo del error de las primeras etapas del proceso de muestreo y análisis. Destacados en rojo los elementos asociados a minerales de alta densidad, en celeste aquellos elementos asociados a minerales de menor densidad y en violeta aquellos elementos fuera del análisis por presentar errores de laboratorio mayor al error total.

de traslado y error analítico de Acme. Estos errores, restados del error total, permitirían obtener un valor para el error fundamental.

Sin embargo, para efectos de este estudio, solo se cuenta con duplicados de terreno (error total) y duplicados analíticos de laboratorio (error de laboratorio ACMELabs); por lo que sólo se puede determinar el error asociado a las primeras etapas del proceso.

Para determinar el error de las primeras etapas del proceso, se calcula el porcentaje que representa la diferencia entre el error total y el error del laboratorio, con respecto al error total, como se muestra a continuación:

$$\frac{(Error\ total - Error\ Laboratorio) \times 100}{Error\ Total} = Error\ 1^{a}\ etapa\ del\ proceso$$

En la Tabla 9 se muestran: el error total, el de laboratorio, la diferencia entre éstos y el error de las primeras etapas del proceso, en orden decreciente según este último.

Se observa en esta tabla, que el 46% de los elementos estudiados presenta más de un 50% de error en las primeras etapas del proceso. Dentro de estos elementos, se observan dos grandes grupos:

Grupo 1: Aquellos elementos asociados a minerales densos (magnetita, hematita, circón, rutilo) tales como el Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub>, V, Zn, MgO, MnO, Ni, Co, Ce, Pb, Zr, La, Nb (destacados en rojo en Tabla 9).

Grupo 2: Aquellos elementos asociados a minerales de baja densidad (cuarzo, plagioclasas, feldespatos) tales como el SiO<sub>2</sub>, Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O, CaO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Rb, Sr, Pr, Ba (destacados en celeste en Tabla 9).

Estos altos valores de error en la primera etapa del proceso, reflejados en elementos presentes en minerales de alta densidad, o de baja densidad, permiten suponer un alto efecto del factor hidrodinámico en el error fundamental.

En efecto, al comparar con los gráficos de variación geográfica normalizados del Río Vitor (sección 4.3), se observa un comportamiento inverso de los elementos asociados a minerales de alta densidad (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub>, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, V, Co,

Ga) versus aquellos asociados a minerales livianos ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ) (ver Figura 28).

El efecto hidrodinámico que estaría afectando la diferenciación en la depositación de minerales del Río Vitor, podría ser la causa de los patrones tipo zigzag de las señales geoquímicas que aquí se presentan.

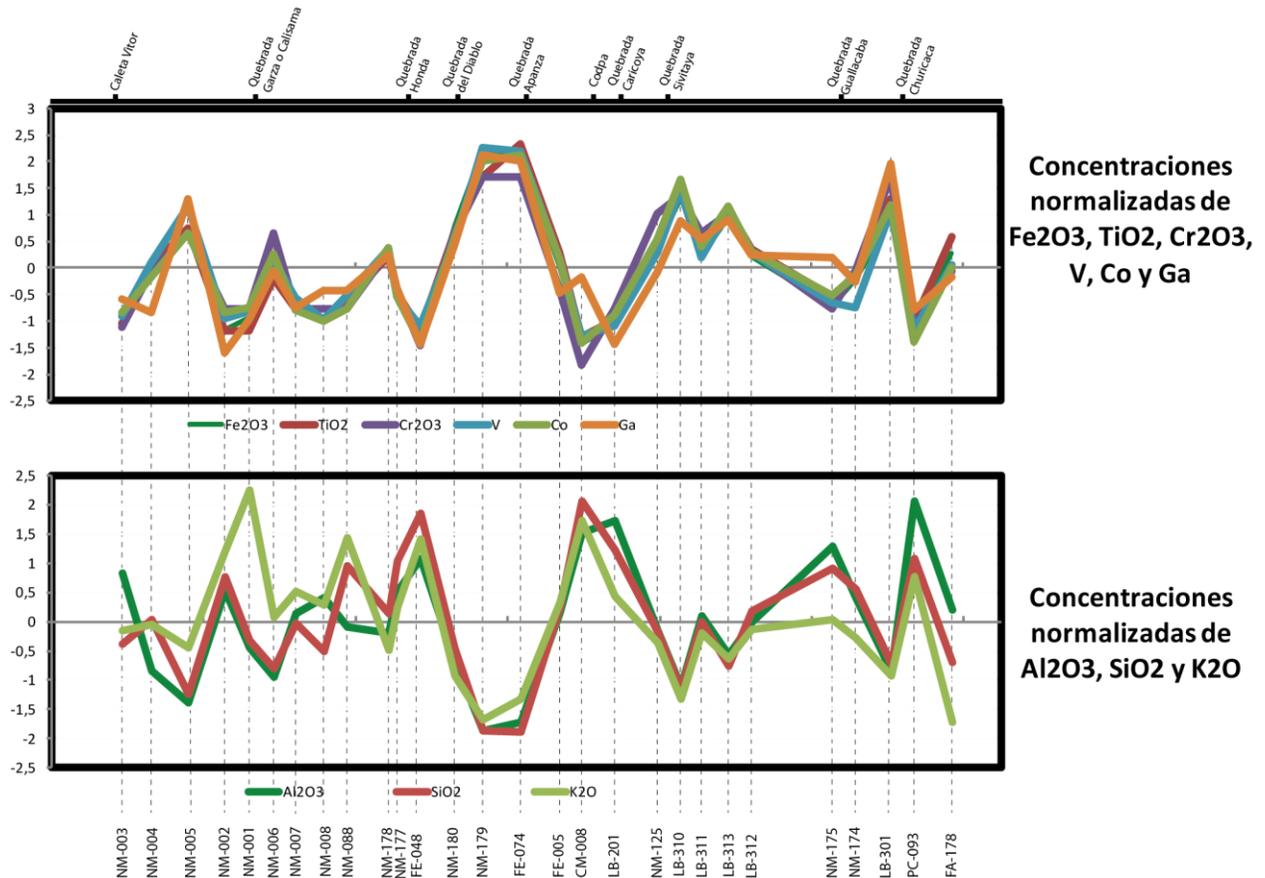


Figura 28. Comportamiento opuesto entre elementos formadores de minerales pesados ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ , V, Co y Ga) versus aquellos formadores de minerales livianos ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$ , y  $\text{K}_2\text{O}$ ).

Como ejemplo de esta diferenciación mineralógica, se presentan a continuación la mineralogía de los puntos FE-074 y CM-008, ambos ubicados a menos de 8 Km de distancia y con señales geoquímicas opuestas.

FE-074: cuarzo, plagioclasa, circón, hematita, covellita, calaverita, oropimente, rutilo, actinolita.

CM-008: cuarzo, plagioclasa, covellita, barita, baritocalcita, Ferroactinolita.

## 5.2 Zona Alta

A continuación se mencionan los puntos más importantes de la zona alta de la CIAV.

### 5.2.1 Putre Vilañuñumani

Tal como se menciona en la sección 4.2.1, esta zona presenta las mayores concentraciones de Se, Mo y U de la zona de estudio, y altas concentraciones relativas de Sb, W, Tl,  $TiO_2$ , Th, Sc, Rb, Sn,  $P_2O_5$ ,  $SiO_2$ , Hg, Ag, Au, Cu,  $Al_2O_3$ , Bi y REE. Se observan medianas concentraciones también de Ce, Cr, Cs, Ni, Sr y V.

Esta zona, compuesta por remanentes de volcanes del Mioceno medio y parte de la Formación Lupica, con lavas andesíticas y dacíticas, presenta alteración sericítica, sílica, argílica y propilítica (García et al., 2004) (Figura 29).

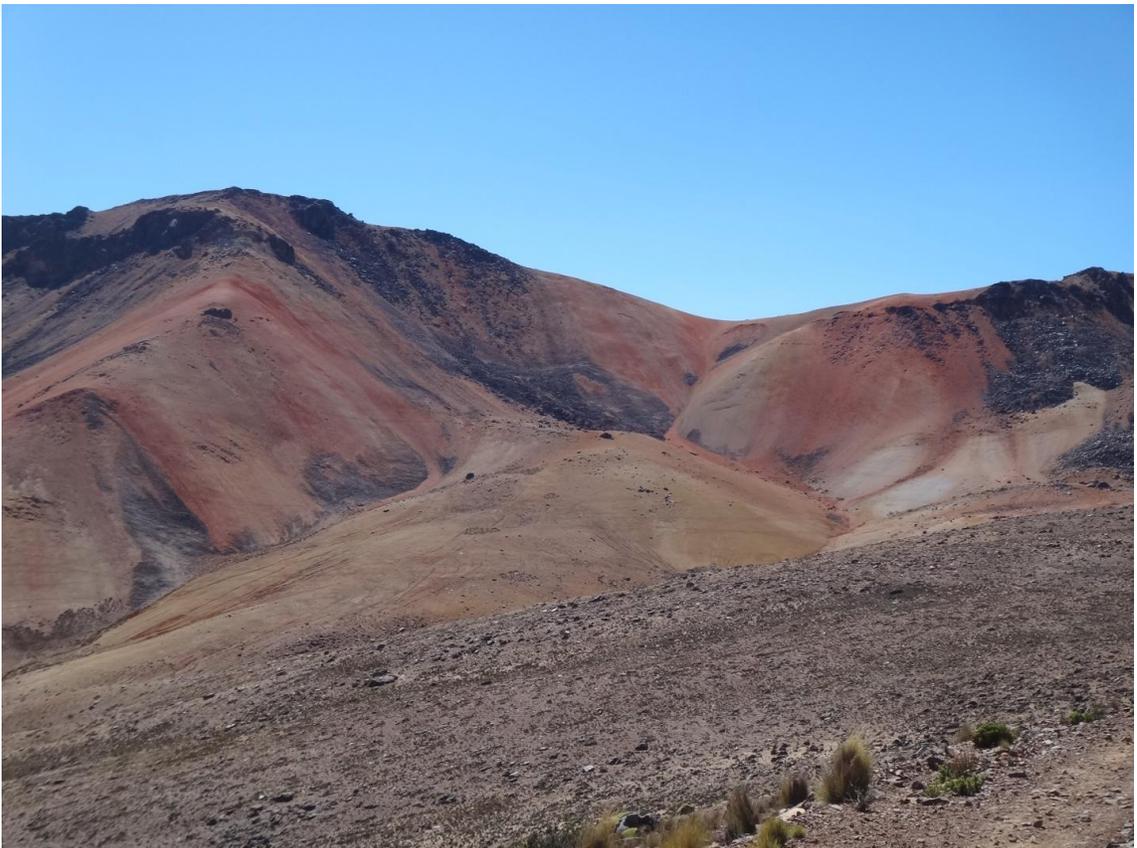


Figura 29. Zonas de alteración hidrotermal del sector Putre-Vilañuñumani.

En los prospectos Putre Norte y Putre Sur, que forman parte de esta zona de alteración, se ha reconocido mineralización en vetillas y diseminada consistente en crisocola, copper wad, molibdenita, pirita y hematita (Ordoñez y Rivera, 2004).

El estudio mineralógico de la muestra CR-116 (ubicada en la Quebrada Murmutani, que drena la zona de alteración), muestra minerales de alteración: cuarzo, plagioclasa, muscovita (sericita), illita-montmorillonita dickita y montmorillonita. Además presenta minerales de becquerlita (óxido de U con Ca) cuprita ( $\text{Cu}_2\text{O}$ ), agardita ( $\text{Cu}_6\text{Ce}(\text{AsO}_4)_3(\text{OH})_6 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ) y circón.

En general, concentraciones altas de U no son extrañas en rocas volcánicas de composición andesíticas a dacíticas, observándose concentraciones de 4 a 10 ppm en rocas con fondo alto y mayores a 10 ppm en rocas mineralizadas (Ordoñez y Rivera, 2004).

Según Wenrich, 1985 (citado por Ordoñez y Rivera, 2004), se observa en general, una relación directa entre el contenido de U y  $\text{SiO}_2$ , y también con elementos como Th, Ag, As, B, Ce, Cr, Cs, Cu, Mo, Ni, Sr y V en rocas donde el enriquecimiento de uranio no es magmático, sino que relacionadas a los procesos hidrotermales que ocurren en los depósitos epitermales de oro y plata. Si bien, no existen concentraciones de Au y Ag lo suficientemente altas para hablar de un depósito hidrotermal de estas características, si existe la posibilidad de que la mineralización en esta zona se deba a procesos epitermales.

### **5.2.2 Belén-Tignamar**

Esta zona, definida por las quebradas Belén, Lupica, Saxamar, Tumaya y Tignamar, presenta las mayores concentraciones de Sb, Zn, Ba, Cd, Ag y Pb de la zona de estudio, lo que coincide con el tipo de yacimientos ubicado en el sector. (Tabla 10)

En general, la geoquímica de los sedimentos obtenidos en las quebradas donde existen registros de yacimientos mineros (Belén, Saxamar, Tumaya y Tignamar) presentan una fuerte relación con las menas de dichas minas.

Destaca en esta zona la Quebrada Lupica, que presenta las mayores concentraciones de Ag ( Figura 30) y altas concentraciones relativas de Au, Cu, Zn y Sb del sector. En esta quebrada, no existen registros de actividad minera, lo que la convierte en posible sector de interés económico.

Yacimiento	Mena
Torpedo	Ag-(Cu, Pb, Zn)
Santa Rosa	Ag-(Pb, Zn)
Chulpa	Ag-(Pb, Zn, Au)
Putagua	Cu-(Pb)
Prospecto Tignamar	Cu-(Mo)
Churicala Norte	Cu-(Ag)
Churicala Sur	Cu-(Ag)
Chivatune	Ag-(Pb, Zn, Cu)
Capitana	Ag-(Cu, Pb, Zn)
Ociel	Sb-(Pb)

Tabla 10. Listado de yacimientos mineros en el sector de Tignamar. Base de datos SERNAGEOMIN.

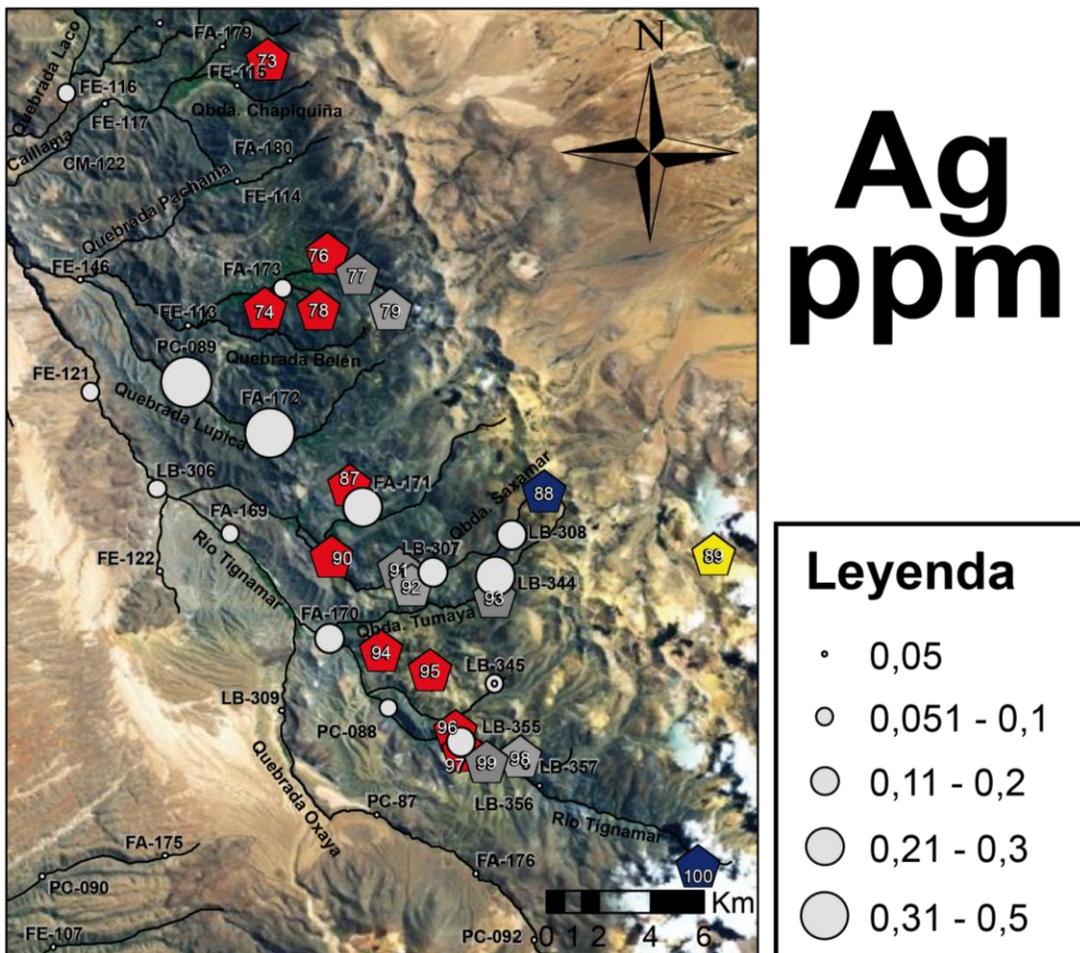


Figura 30. Concentraciones en ppm de Ag en Zona Belén -Tignamar. En Anexo A un listado detallado de los yacimientos según el número asignado.



Figura 31. Zona de alteración Cerro Marquez.

### 5.2.3 Cerro Marquez

Este cerro, descrito como un estrato volcán erodado, presenta una fuerte alteración hidrotermal de tipo argílica y propilítica, con abundante pirita oxidada a limonita y yeso. (Figura 31). Se observan sulfuros nativos y alunita, además de un dique de cuarzo porfídico donde los feldespatos están alterados a sericita. Tanto el tamaño como el tipo de alteración hidrotermal que presenta sugiere un efecto de fluidos hidrotermales emanados de un pórfido cuprífero en profundidad (Sillitoe, 1973). Además, existen en este cerro labores antiguas asociadas a una falla mineralizada vertical de rumbo NW, desde donde se extraía plata (Ordoñez y Rivera, 2004).

La geoquímica de los sedimentos fluviales presentes en las quebradas que lo drenan (Caillama, Umirpa y las nacientes de Oxaya), es consistente con lo descrito anteriormente. Se observan altas concentraciones de Cu, As, S, Se, Hg, Sn que pueden ser relacionadas con las zonas de mineralización descritas.

En general, las quebradas que drenan el cerro Márquez poseen señales muy fuertes de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ , Co, Cs, Ga, V,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  Sr y en menor medida, de  $\text{P}_2\text{O}_5$ . Los primeros se relacionan a la litología del estrato volcán, que está constituido por lavas andesíticas y dacíticas. La presencia del  $\text{P}_2\text{O}_5$  puede estar indicando depositación de apatito, mineral accesorio de este tipo de rocas.

La mineralogía descrita en una de las muestras de la quebrada Oxa o Oxaya, que drena este cerro, incluye cuarzo, plagioclasa, circones, cubanita ( $\text{CuFe}_2\text{S}_3$ ), escorodita ( $\text{FeAsO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), hematita, actinolita, brochantita ( $\text{Cu}_4(\text{SO}_4)(\text{OH})_6$ ) y barita.

#### **5.2.4 Cerro Anocarire**

Las variaciones locales en el nacimiento de esta quebrada de elementos como el S, Cu,  $\text{P}_2\text{O}_5$ , en las faldas del Cerro Anocarire, podrían estar reflejando la zona de alteración argílica y posible depósito epitermal de alta sulfuración que se encuentra en el Cerro Anocarire<sup>3</sup>.

### **5.3 Zona Media**

#### **5.3.1 Quebradas secas**

En el sector de la Depresión Intermedia, existen varias quebradas sin escorrentía superficial. Entre estas se encuentran aquellas que tienen escorrentía solo en escasos periodos del año o en sectores puntuales por afloramiento de aguas subterráneas, como es el caso de Quebrada La Higuera y Quebrada Calizama; y aquellas que representan paleocanales, donde ya no hay escorrentía alguna, como Quebrada Llyosas, Quebrada del Diablo en Azapa y en Vítor, y Quebrada Honda.

En todas se observa un aumento en las concentraciones de Cs, CaO, Tl y Sc.

El Cs suele aferrarse fuertemente a los sedimentos, siendo muy difícil de remover.<sup>4</sup> Lo mismo sucede con el Tl cuando es incorporado en arcillas (Shand et al., 1998). Tanto el Tl como el Sc se asocian a sedimentos

---

<sup>3</sup> (<http://www.atacamapacific.com/projects/anocarire.html>)

<sup>4</sup> (<http://www.lenntech.com/periodic/elements/cs.html>)

residuales (Bernal y Railsback, 2008). Es posible que las concentraciones de CaO se deban a la producción de sales en este tipo de quebradas.

Por otra parte, se observa un aumento en las concentraciones de MgO en aquellas quebradas descritas como paleocanales.

En particular, destaca el caso de la Quebrada Llyosas, paleocanal ubicado al sur de la Quebrada de Azapa, que presenta altas concentraciones relativas al total de muestras de S, MgO, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, Zn, Tl, Tb, Sc, Ni, Cu y CaO (ver Figura 19, sección 4.2).

En esta quebrada se observa un cambio en las concentraciones de V y Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, siendo mayores en el tramo superior de la quebrada.

Los resultados mineralógicos para la muestra LB-369, ubicada en el tramo superior muestran presencia de cuarzo plagioclasa, circón yeso, nontronita, montmorillonita-clorita, covellita (CuS), clinocloro, titanio magnetita, biotita e hidroxilapatito.

Mientras que en la muestra FE-067, ubicada en el tramo inferior, se observa en los resultados mineralógicos presencia cuarzo, muscovita sericita, circón, yeso, albita desordenada, nontronita, eritrina, titanita, augita, apatito, paramelaconita.

En general se observa una alta concentración de minerales densos en estas quebradas, producto de la deflación que provocan los vientos, transportando los sedimentos más livianos y concentrando aquellas partículas de mayor peso en estos sectores que representan bajos topográficos.

Además, se observa una fuerte presencia de sales en estas quebradas, formadas probablemente en escasos periodos de escorrentía, favorecidas tanto por el alto transporte de sales en este tipo de cauces además de las fuertes tasas de evaporación características de climas áridos a hiperáridos.

### **5.3.2 Diferencias en las señales geoquímicas entre los ríos Vítor y San José de Azapa**

En general, se observa una gran diferencia en el comportamiento de las señales geoquímicas de ambos ríos (ver Anexo B). Mientras que el Río San José de Azapa presenta señales estables con anomalías puntuales, el Río Vítor presenta patrones de zigzag en sus señales geoquímicas.

Esto se debe a que estos sistemas fluviales poseen sinuosidades muy distintas. Mientras el Río San José de Azapa es principalmente recto, el Río

Vítor es principalmente meándrico. Esta diferencia es de gran importancia, puesto que la sinuosidad de un cauce genera diferencias en las velocidades de las corrientes a lo ancho de un río, con sectores de alta energía en las partes internas de los meandros (que favorecen la erosión) y sectores de menor energía en las partes externas de éstos (que favorecen la sedimentación). Esto permite una segmentación por densidad en la depositación de los sedimentos, logrando una acumulación de minerales densos en sectores de baja energía (Jackson, 1978).

### **5.3.3 Cuenca Río Vítor**

#### **5.3.3.1 Variaciones aguas abajo de confluencia Vítor- Apanza.**

Se observan cambios en el comportamiento de algunos elementos aguas abajo de la confluencia de Vítor con la Quebrada Apanza, a partir de la muestra FE-074.

Un ejemplo es el Ba, como se muestra en la Figura 32.

Desde el comienzo de la quebrada, hasta antes de la confluencia, este elemento presenta una fuerte correlación con el  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  y  $\text{K}_2\text{O}$ , en especial con este último. Esta relación podría indicar un control de feldespatos en este tramo del río, minerales donde el Ba suele reemplazar al K como catión en las cavidades de la estructura mineral (Klein y Hurlbut, 2003).

Sin embargo, tal como se aprecia en la Figura 32, a partir del punto de muestreo FE-074, el Ba cambia radicalmente su comportamiento, asemejándose al de los elementos asociados a minerales de alta densidad. Esto podría indicar una mayor depositación de Ba en este sector en forma de Baritina.

Si bien aguas arriba de este punto se detectó barita y baritocalcita en el análisis mineralógico (ver muestra CM-088 en sección 4.4), esto no necesariamente indica una predominancia de este mineral en ese tramo del río (análisis de Rayos X es sólo cualitativo, no cuantitativo).

En general, los sedimentos de este sector presentan mayores concentraciones de elementos asociados a minerales pesados ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ , V, Ga, Co, etc.) tal como se aprecia en la Figura 32.

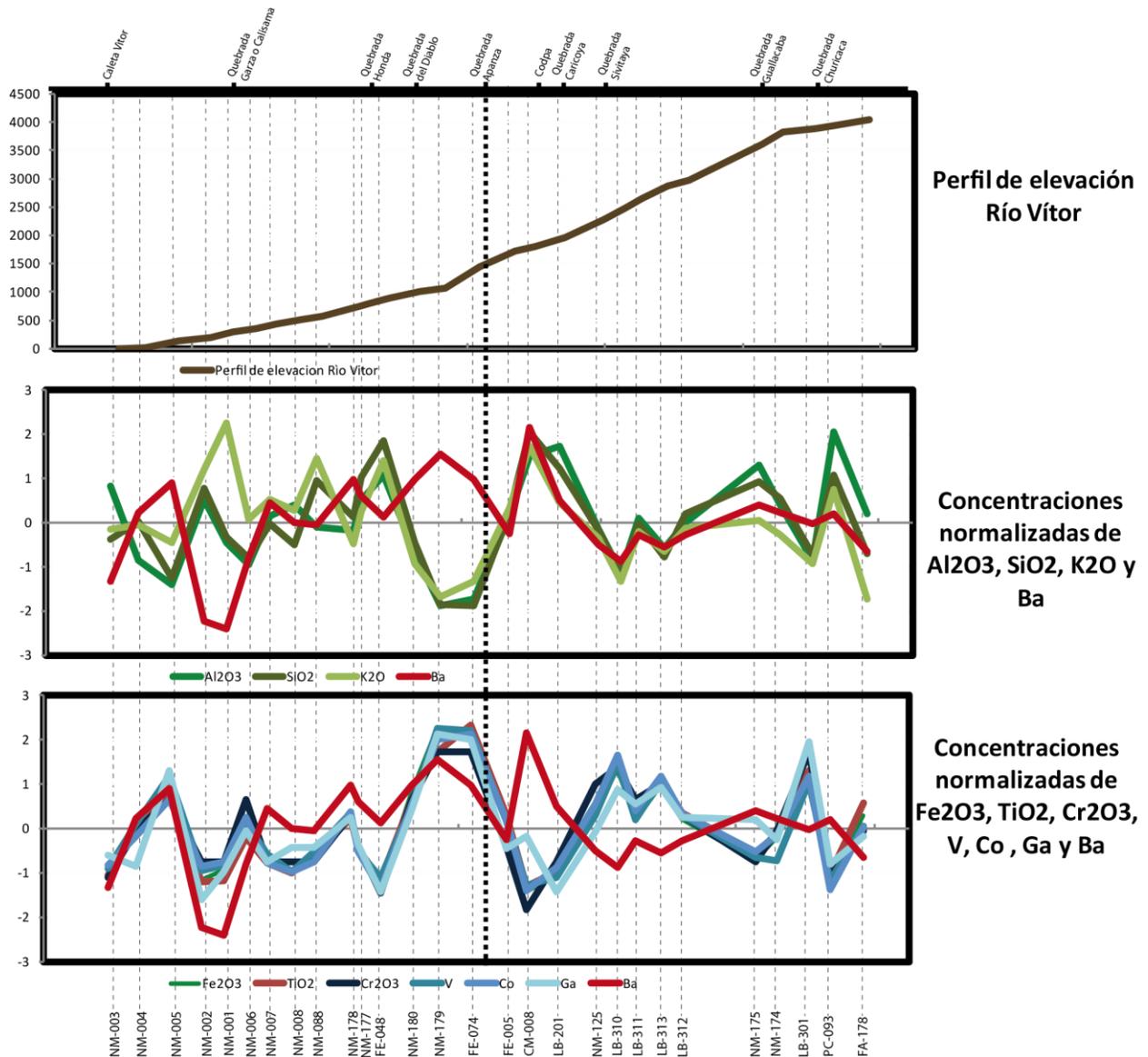


Figura 32. Gráficos de variación geográfica normalizados para elementos constituyentes de minerales livianos ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  y Ba) y para elementos constituyentes de minerales pesados ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ , V, Co, Ga y Ba) en el Río Vitor. Se observa un cambio en el comportamiento del Ba a partir de la confluencia con la Quebrada Apanza. En la parte superior se muestra un perfil de elevación del cauce.

Por otra parte, si ampliamos la zona en cuestión, se observa que patrones similares ocurren en la quebrada Calizama, justo al norte de la Quebrada Vitor (ver Figura 33).

Esta quebrada, seca la mayor parte del año, también presenta concentraciones elevadas de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  y V en los puntos de muestreo FE-90, FE-91, FE-97 y FE-98, tal como se muestra en la Figura 33

Este comportamiento se observa con más detalles en gráficos de variación geográfica normalizados de la Quebrada Calizama (ver Figura 34).

Una de las posibles hipótesis que se proponen para explicar este cambio de comportamiento es un posible cambio litológico (de potencia menor a aquellas descritas en el mapa geológico 1:25000 citado en sección 3) que pudiera estar aportando concentraciones altas en estos elementos ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ , Ba, etc.). Sin embargo, no existen descripciones en terreno de litologías que podrían explicar este cambio en la geoquímica de los

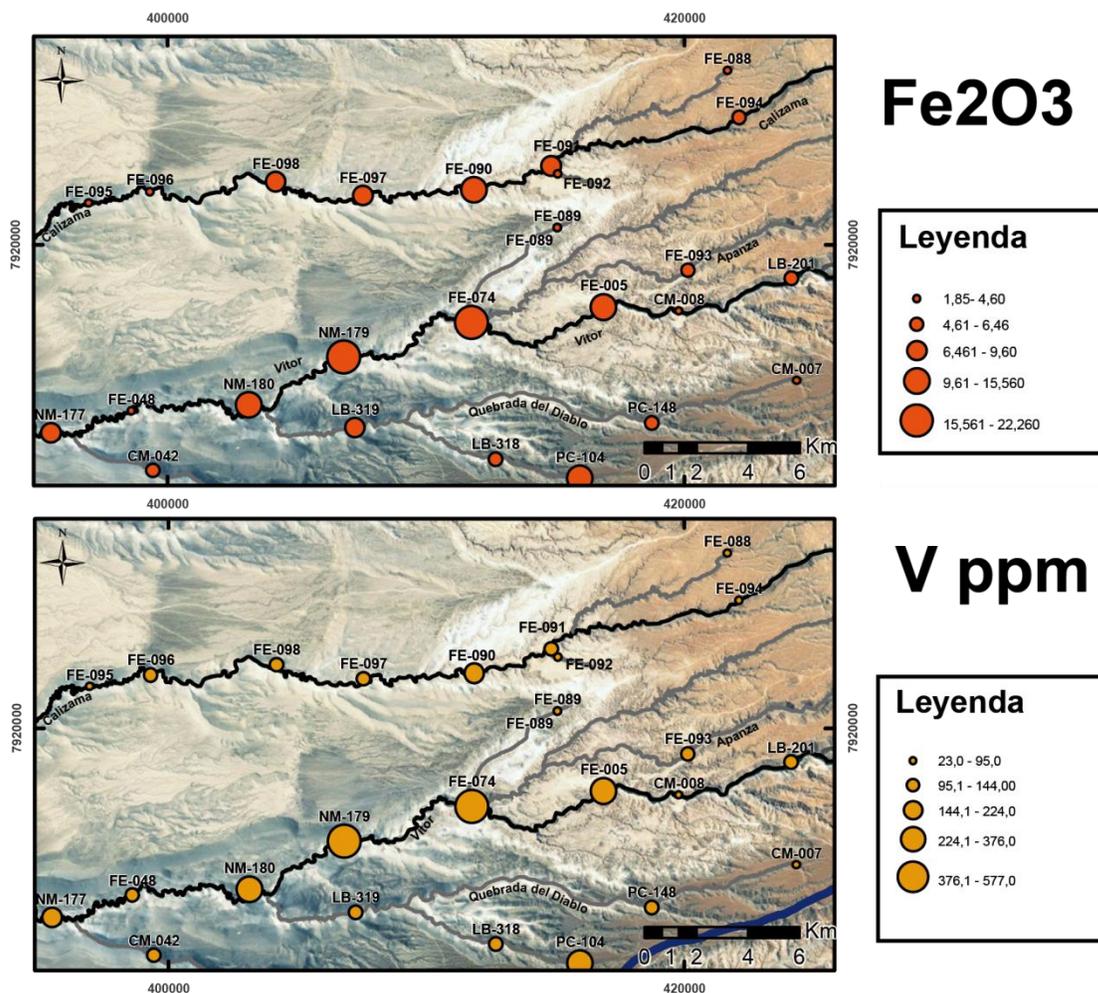


Figura 33. Ejemplo del  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  y V, para el aumento de concentraciones de elementos presentes en minerales pesados a la altura de la Confluencia Vitor-Apanza. Se observa mismo patrón en menor medida en la Quebrada Calizama.

sedimentos. Al contrario, se describen tobas cristalinas en las laderas de la Quebrada Calizama, lo que coincidiría con el afloramiento de la Ignimbrita Oxaya descrita en la sección 3.1 (García 2004).

Una hipótesis más probable es que exista en este sector un cambio de pendiente que favorezca la depositación de minerales pesados. Esta variación de pendiente se presentaría en ambas quebradas tal como se puede apreciar en los perfiles de elevación presentados para cada quebrada en la Figura 32 y en la Figura 34.

En efecto, se observa un cambio en la sinuosidad de ambos cauces, lo que podría estar facilitando la acumulación de minerales densos.

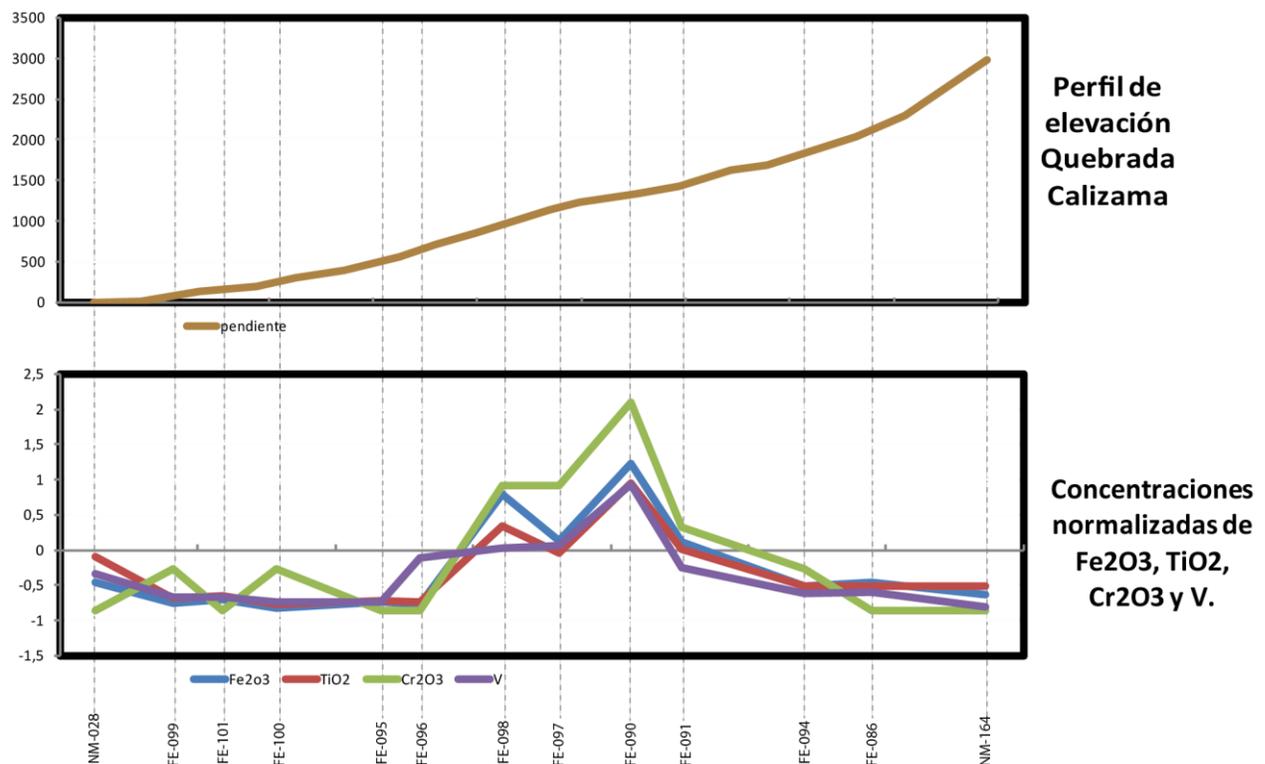


Figura 34. Gráfico de variación geográfica con concentraciones normalizadas de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub>, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y V para la quebrada Calizama. En la parte superior se muestra la variación de la pendiente en este tramo de la quebrada.

### 5.3.3.2 Efecto de dolomitas en cauce Vítor.

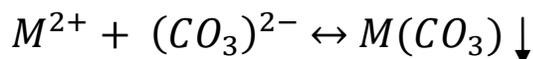
Se observa un aumento en las concentraciones de C total, S, Cu, As, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, Hg y Tl en la quebrada Vítor a partir de la muestra NM-88, aguas abajo de

Pintatane. Este aumento también se observa en las muestras justo al norte en la quebrada Calizama (ver Figura 18, sección 4.2.2).

Este aumento en las concentraciones, podría estar relacionado con la presencia de dolomitas en el sector. En efecto, se han descrito depósitos de dolomita asociadas espacial y genéticamente a intercalaciones sedimentarias lacustres de la Formación Oxaya (Oligoceno superior-Mioceno inferior) en las Quebradas Azapa Vítor y Calizama (García et al., 2004; Gajardo et al., 2004).

Esta relación estaría dada por el alto contenido de carbonato y materia orgánica presente en las dolomitas ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ).

Los carbonatos son frecuentemente utilizados para neutralizar soluciones a través de la precipitación de metales pesados (Blais et al. 2008; Guillard and Lewis 2002; McAnally et al. 1984;). Esta neutralización se debe a la reacción entre los iones divalentes de metales y los carbonatos, como se detalla a continuación:



Al estudiar los resultados del análisis mineralógico de la muestra NM-008, presente en este sector, se observa presencia de calcita, cubanita, mordenita, escorodita, yeso, montmorillonita, cristobalita y corindón. Lo que reafirma la hipótesis de un alto contenido de carbonato en este sector.

### **5.3.4 Cuenca del Río San José de Azapa**

#### **5.3.4.1 Punto de muestreo FC-008**

En este punto de muestreo, aguas abajo del pueblo de Livilcar, aumentan las concentraciones de S,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , MnO,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ , Co, REE, Hf, Nb, Zr, V, Th, CaO Ta, U, Rb, Sc, Pb, Zn, Ni, Mo, Sn, Sb, Ga y  $\text{P}_2\text{O}_5$ .

En este lugar coinciden tres situaciones de interés: 1) Se encuentra aguas abajo de antiguos piques de mármol (CaO), 2) afloran grandes mantos de yeso en el sector (S, CaO), y 3) según información de los pobladores del sector, es una zona de extracción artesanal de oro (Zn, Pb, Sb, Mo, Sn, MnO).

#### **5.3.4.2 Bocatoma Canal Azapa**

Esta zona está representada por 5 muestras (NM-101, NM- 102, NM-103, NM-104 y NM-105) sacadas en Noviembre 2011. En esta fecha el cauce del río disminuye bastante, por lo que la totalidad de las aguas son desviadas al canal de Azapa, quedando seco el cauce del río en esta época. Aquí se acumula abundante basura doméstica y existe una fuerte actividad agrícola.

La descripción mineralógica arroja una fuerte señal en el sector, de material amorfo correspondiente a materia orgánica, además de presencia de cuarzo, plagioclasas, escorodita ( $\text{FeAsO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), titanita ( $\text{CaTiSiO}_5$ ), illita, nontronita y ramdhorita con Bi ( $\text{Ag}_x\text{Pb}_{3-x}(\text{Sb},\text{Bi})_2\text{S}_6$ ).

Se observan en esta zona concentraciones altas de Tl, Tb, Rb, Ni, Mo, Total C, Cu, Ag, Cd, As, Au, Be, Bi, Cs, Hg, y concentraciones mayores de manera local de S, MgO, Se, Sn, Zn.

En general, los elementos que aumentan sus concentraciones en este sector, también tienen altas concentraciones en las zonas de alteración descritas en la parte alta de la cuenca. Esto, sumado a que no existen cambios litológicos importantes en la zona, permite suponer la posibilidad de que la señal geoquímica de este sector esté reflejando las altas concentraciones de estos elementos en la alta cordillera. En particular, se observa una aún más fuerte relación con la zona de alteración Putre-Vilañuñumani.

Sobre este último punto, importante es recordar que las aguas trasvasadas desde el río Lauca a través del canal Lauca son utilizadas en la Central Hidroeléctrica de Paso de Chapiquiña, y que a su vez, ésta descarga un flujo constante durante todo el año. Esto permitiría suponer que gran parte del aporte al cauce en época de lluvias, que permite el aumento de éste y por lo tanto, flujo de agua en este sector de la quebrada, viene de los altos sectores de la cordillera, como son la zona de Vilañuñumani y Tignamar.

Además, las condiciones de la zona permiten en este sector una acumulación considerable de materia orgánica, que suele alterar la distribución de los metales pesados. En general, la materia orgánica produce una disminución de los niveles disueltos y un aumento en la concentración de metales en forma coloidal y en suspensión. Muchas sustancias orgánicas son capaces de retener metales, aunque sea de manera temporal (Lee et al., 1997).

Por todas estas razones es posible determinar que la fuerte de presencia de materia orgánica en este tramo del cauce está favoreciendo una retención de

metales pesados provenientes de las partes altas de la cuenca, lo que explicaría las anomalías relativas detectadas en este sector.

## 5.4 Zona Baja

### 5.4.1 Arica

Se observa un aumento de Bi, Tl, Be y Au en la ciudad de Arica. Esto se debe a la alta cantidad de desechos humanos que presenta el Río San José de Azapa en este tramo (ver Figura 35).

Estos elementos suelen estar presentes en distintos productos utilizados por el hombre. Mientras que el Bi es ampliamente ocupado en productos farmacéuticos y cosméticos, el Tl es usado en rodenticidas (veneno para ratones) e insecticidas. También para la manufacturación de lentes ópticos e



Figura 35. Contaminación del el Río San José de Azapa en la ciudad de Arica.

imagenología médica. La principal fuente antropogénica de Be, son las emisiones de la combustión de carbón y petróleo. Finalmente el Au, es utilizado en múltiples productos, desde fotografía, conexiones eléctricas, electrodomésticos, amalgamas, cremas, antiinflamatorios e incluso, medicamentos contra el cáncer.

### 5.4.2 Caleta Vítor

Finalmente, las altas concentraciones justo antes de la desembocadura de C, S, Cu, As, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, Mo, Pb, Hg, Tl y Be pueden estar relacionadas a la existencia en ese lugar de una planta de refinamiento de Cu que permitía el

tratamiento de los recursos del sector hasta hace algunos años. Esta planta de tratamiento, llamada Planta San Carlos, ha sido catalogada como un pasivo ambiental por el SERNAGEOMIN el año 2010.

Los minerales descritos en la muestra NM-003, ubicada en este sector, son cuarzo, plagioclasa, illita-montmorillonita, Ramsbeckita (sulfuro de Cu y Zn), magnesio-hornblenda, y calcopirita (sulfuro de cobre). Además, se observa mucho ruido en la señal de rayos X asociada a elementos que se encuentran sueltos y no formando parte de estructuras cristalinas. Este hecho es preocupante, puesto que es generalmente aceptado que los iones libres de metales pesados son considerados más tóxicos para la biota en comparación a cuando se encuentran precipitados. Dentro de los factores que controlan la biodisponibilidad de los metales están el pH, el potencial redox, la alcalinidad, la dureza, la adsorción en sedimentos en suspensión (Kong et al., 1995; Bitton et al., 2005).

## **5.5 Calidad ambiental de los sedimentos.**

Se comparan los resultados obtenidos con el parámetro PEC, descrito en la sección 2.3.3, para 8 elementos de interés ambiental.

Las concentraciones de estos elementos (Cr, Cu, Pb, Zn, Ni, As, Cd, Hg) resultan menores al PEC con excepción del As.

Del total de las muestras de sedimentos fluviales activos, 40 resultaron sobre el valor del PEC para el caso del As (ver Figura 37). La mayoría de estas muestras se ubican en la Alta Cordillera, cercanas a la zona de alteración Putre-Vilañuñumani, Tignamar y circundantes al Cerro Marquez. El resto de las muestras se ubican en el sector de la bocatoma del Canal Azapa, en la Quebrada Llyosas, cercanas a la confluencia de las Quebradas Vítor y Calizama y en el sector de Caleta Vítor.

Al hacer el mismo ejercicio para las muestras de sedimento preindustrial, se observan 4 puntos donde las concentraciones de As también están sobre el PEC (ver Figura 38). Tres de estas muestras se encuentran en la zona de alta cordillera, dos cercanas a la zona de alteración de Putre-Vilañuñumani y una cercana al Cerro Márquez. Esto podría significar que estas zonas han presentado históricamente concentraciones altas en As, por lo que se deberían a concentraciones naturales propias del lugar. Las fuentes naturales responsables de estas altas concentraciones de As, serían los centros

eruptivos y rocas volcánicas del mioceno al cuaternario, presentes a lo largo de la alta cordillera. (García et al., 2004)

Existe el caso del Punto FE-93, ubicado en la quebrada de Apanza, donde las concentraciones de As en la muestra preindustrial están muy por sobre los valores en la muestra de sedimento activo. La terraza fluvial preindustrial en cuestión, tiene la particularidad de encontrarse sobre un estrato de ignimbritas (Ignimbrita Lauca), la que posiblemente haya influido en su proceso de sedimentación, pudiendo afectar los valores de As en este punto en particular. Esto porque las concentraciones de As en rocas volcánicas suelen ser bastante altas (Bundschuh et al., 2004, Banning et al., 2012) (ver Figura 36).



Figura 36. Fotos del Punto FE-98. En la segunda foto es posible apreciar el estrato de ignimbrita bajo la secuencia de conglomerados. Este estrato se evitó en el muestreo de sedimento preindustrial, pero podría haber influido en la etapa de sedimentación, aumentando las concentraciones de As.

### 5.5.1 Ripios de Copaquilla

Tal como se menciona en la sección 4.4, las concentraciones de Cu, As, Pb, Zn, Sb, Bi, Ag, Au y Hg presentes en los ripios de lixiviación de Copaquilla resultaron muy elevadas. Sin embargo, esto no se refleja fuertemente en las concentraciones obtenidas en el drenaje que transporta estos sedimentos al Río San José de Azapa, salvo para el caso del As (ver Tabla 6).

Esto puede deberse a múltiples razones. Por un lado, la composición de los ripios no es homogénea, por lo que no necesariamente el segmento ubicado más cercano al drenaje tenga composición similar a la muestra que se sacó en el centro del acopio. Por otra parte, se desconoce la mineralogía en que

estos elementos se encuentran contenidos, por lo que su movilidad al reaccionar con aguas de lluvia no puede ser precisada. Lo que si es posible suponer, es que el As se comporta de manera diferente con respecto a los otros elementos analizados en cuanto a su movilidad, dado su alto contenido en los sedimentos del drenaje colindante a los rípios.

Es posible que al reaccionar con el agua de lluvia, estos metales formen soluciones hidratadas que son facilmente transportadas sin ser posible determinar el lugar donde se depositan, siendo el As la excepción, ya que podría estar transportandose de manera mecánica, y por lo tanto, depositandose a lo largo del drenaje que colinda con los rípios.

Al analizar los datos de las muestras ubicadas aguas abajo de este sector en el cauce del Río San José, no es posible observar variaciones significativas que permitan suponer un efecto de los rípios en la geoquímica de los sedimentos fluviales del cauce. Sin embargo, es evidente que existe un transporte de sedimentos desde los rípios al cauce en época lluviosa, por lo que se hace necesario un estudio mas detallado, preferentemente de geoquímica de aguas, para analizar el efecto en épocas de mayor pluviosidad.

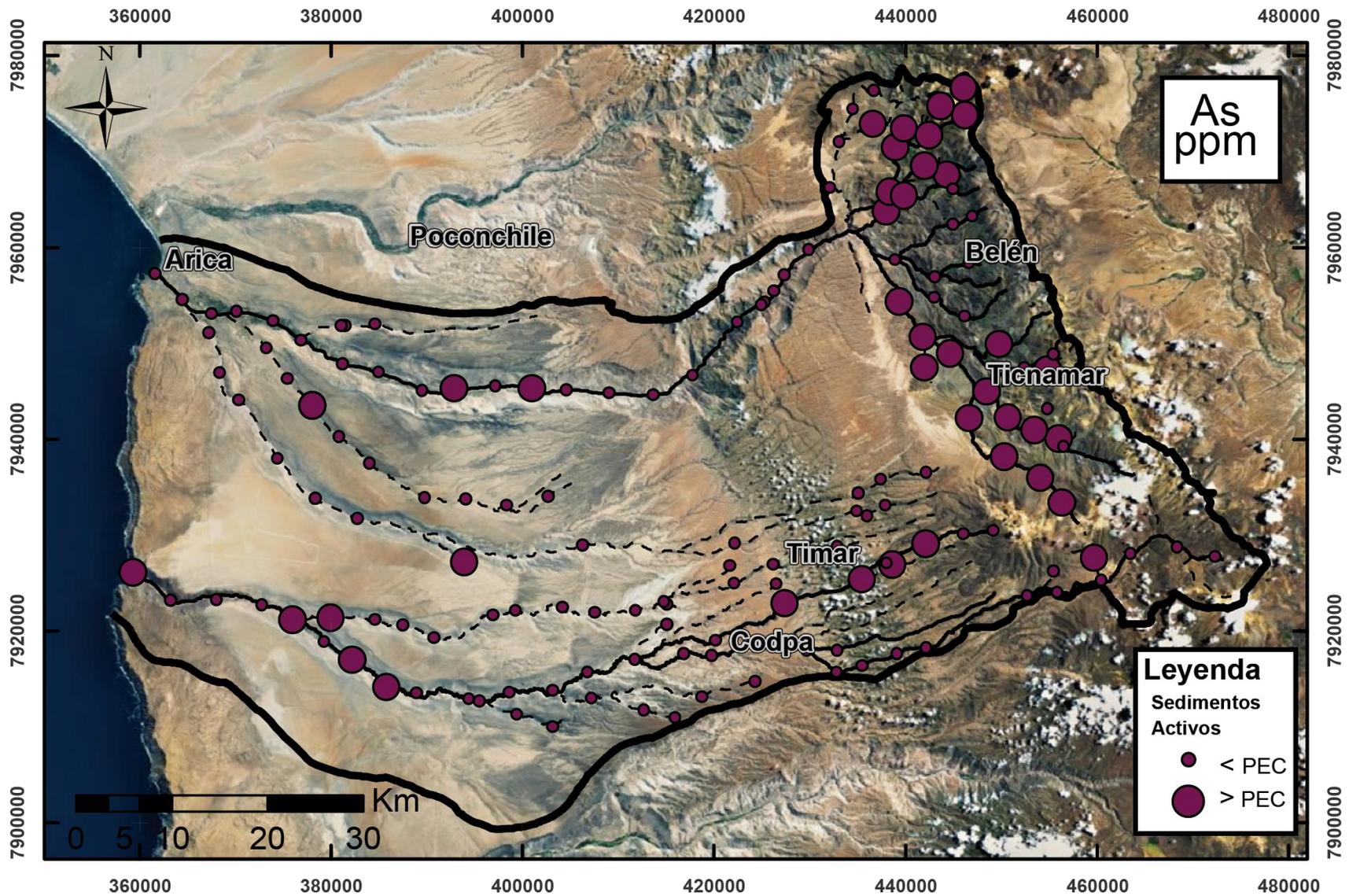


Figura 37. Mapa de la zona de estudio donde se observan los puntos de muestreo en los cuales las concentraciones de As exceden los valores del PEC (MacDonald 2000).

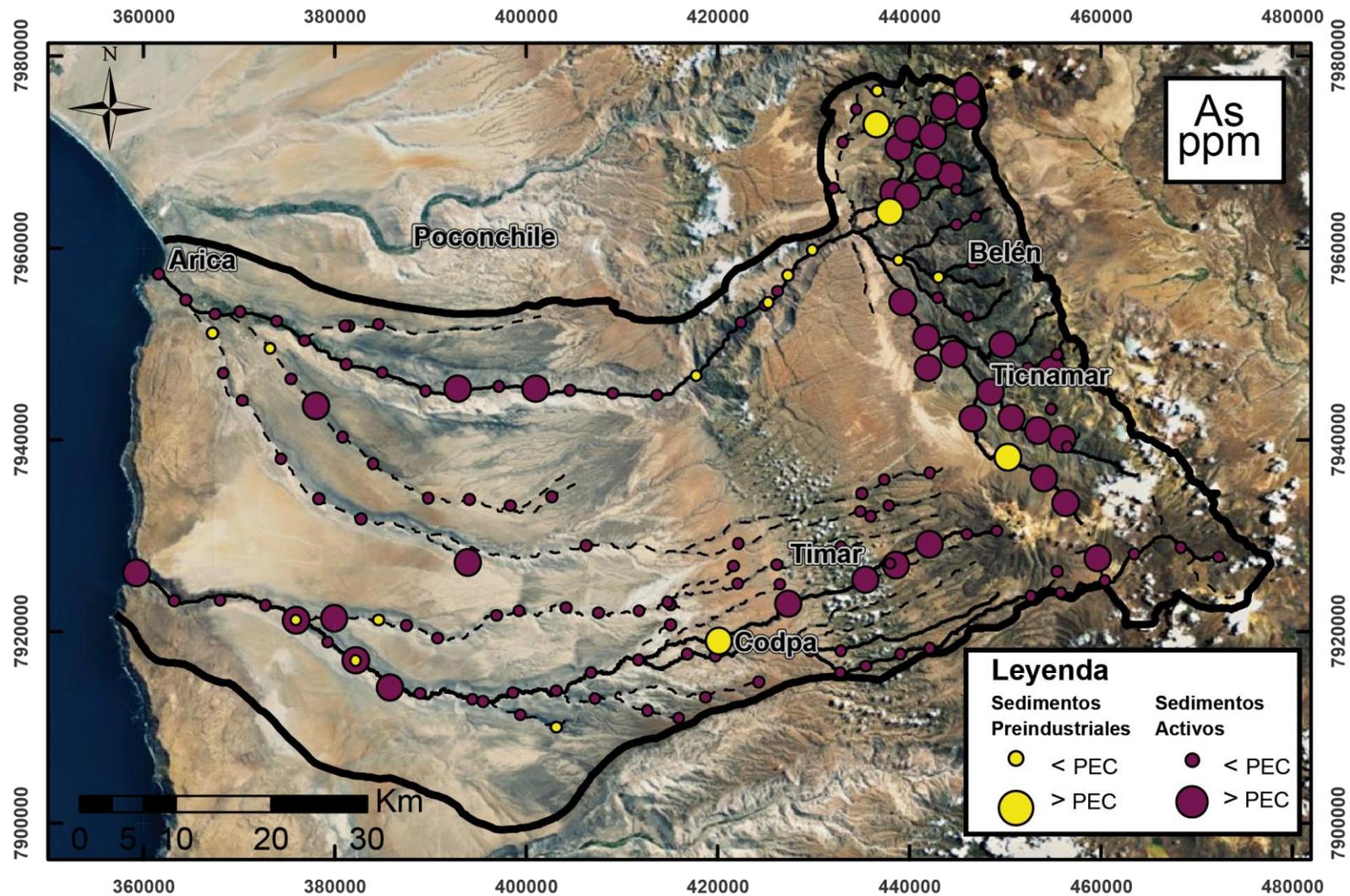


Figura 38. Comparación de valores activos (morados) con muestras de sedimentos preindustriales (amarillos). Al igual que en la Figura 37, estos puntos son destacados cuando sus concentraciones de As exceden los valores del PEC (MacDonald 200)

## **6. CONCLUSIONES**

A través de los resultados de los análisis químicos y mineralógicos se estableció una línea de base para los sedimentos fluviales activos de los cauces más importantes de la CIAV (Cuenca Integrada Azapa-Vítor).

Esto permitió comprobar que los sedimentos finos (<180 micrones) reflejan los distintos factores, tanto naturales como antrópicos, que afectan a las quebradas estudiadas.

Los factores naturales más importantes que se detectaron fueron la presencia de zonas de alteración, cambios litológicos, escorrentía y efectos de la topografía en la hidrodinámica de depositación.

Los factores antropogénicos más importantes que se detectaron fueron las obras civiles realizadas en el cauce del Río San José de Azapa, y la contaminación tanto por la actividad minera (Caleta Vítor), como de los centros poblados (Arica).

### **6.1 Control de calidad de datos**

El error total asociado a los elementos que presentan bajas concentraciones en la CIAV, como es el caso del Be, Sn, Ta, Ag, Tl, Hg y Se, puede verse afectado por la presencia de valores muy cercanos a los límites de detección.

Existen elementos que presentan un alto error asociado al error fundamental intrínseco de los cauces, originado por los efectos de la hidrodinámica en la sedimentación. Esto afecta principalmente a los elementos formadores de minerales de alta densidad o baja densidad que tienden a depositarse de manera diferenciada en el cauce.

Entre los elementos que se asocian a minerales densos (magnetita, hematita, circón, rutilo) están el  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ , V, Zn, MgO, MnO, Ni, Co, Ce, Pb, Zr, La, Nb. En cambio, Entre los elementos asociados a minerales de baja densidad (cuarzo, plagioclasas, feldespatos) están el  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ , CaO,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , Rb, Sr, Pr, Ba.

### **6.2 Factores naturales**

Dentro de los factores naturales más importantes que inciden en la geoquímica de los sedimentos fluviales estudiados están las zonas de

alteración, los cambios litológicos, y efectos de la topografía en la hidrodinámica de depositación.

### **6.2.1 Zonas de alteración**

Se observa una fuerte relación entre la geoquímica de sedimentos y las zonas de alteración presentes en la zona de estudio (Putre-Vilañuñumani, Tignamar y Cerro Marquez). El efecto de estas zonas sobre los sedimentos puede ser muy extenso, detectándose influencia en sedimentos muy alejados de las fuentes.

En general, la mayor concentración de metales pesados que ocurren en la CIAV se relaciona con este tipo de fuentes naturales, convirtiéndose en el factor más importante en lo que a calidad ambiental de los sedimentos respecta.

### **6.2.2 Litología**

La litología del cauce también es un muy relevante factor que afecta la geoquímica de los sedimentos. La influencia puede ser tanto por los minerales que aporta al cauce por medio de la erosión, como por los efectos que puede producir en los sedimentos al reaccionar con estos. Un ejemplo del primer caso es la alta concentración de As que aportan las rocas volcánicas de la alta cordillera. Para el segundo caso, destaca la presencia de dolomitas en las quebradas Vítor y Azapa, que provoca la depositación de metales por medio de la reacción con carbonatos.

### **6.2.3 Hidrodinámica**

La hidrodinámica de depositación de los sedimentos ha demostrado ser un factor relevante en la las señales geoquímicas observadas en este trabajo.

Tanto la pendiente del cauce, como la sinuosidad de este afectan la depositación de los sedimentos, provocando una diferenciación de los minerales según su densidad.

Este factor provoca una heterogeneidad en los cauces que afecta al error fundamental.

### **6.2.4 Escorrentía**

En general se observa una alta concentración de minerales densos en quebradas secas o paleocanales, producto de la deflación que provocan los vientos, transportando los sedimentos más livianos y concentrando aquellas partículas de mayor peso en estos sectores que representan bajos topográficos.

Además, se observa una fuerte presencia de sales en estas quebradas, formadas probablemente en escasos periodos de escorrentía, favorecidas tanto por el alto transporte de sales en este tipo de cauces además de las fuertes tasas de evaporación características de climas áridos a hiperáridos.

### **6.3 Factores Antropogénicos.**

Los factores antropogénicos mas importantes que se detectaron fueron las obras civiles realizadas en el cauce del Río San José de Azapa, y la contaminación tanto por la actividad minera (Caleta Vítor), como de los centros poblados (Arica).

#### **6.3.1 Obras Civiles**

El Canal de Azapa, que canaliza parte del agua del Río San José de Azapa para el regadío agrícola, provoca que ciertos sectores del cauce se sequen entre los meses de marzo a noviembre. Esto favorece la acumulación de materia orgánica en el sector, que capta los metales pesados, provocando un enriquecimiento de éstos en el sector.

#### **6.3.2 Actividad minera**

En general, se observa que no existe un aporte considerable proveniente de la pequeña y mediana minería presente en el sector.

Si existe un efecto importante en los sedimentos cercanos a la planta de refinamiento de minerales de Cu, San Carlos, ubicada en el sector de Caleta Vítor. Los sedimentos presentes en este lugar muestran un alto porcentaje de metales pesados disueltos en el sedimento, sin formar parte de estructuras cristalinas. Esto se interpreta como contaminación producto de la refinación de minerales en esta planta, que pueden presentar efectos negativos en la biota tanto por sus altas concentraciones, como por la especiación que presentan.

#### **6.3.3 Centros poblados**

En general, los centros poblados ubicados en las quebradas de la CIAV son escasos y de baja densidad de población, no afectando de manera relevante la composición química de los sedimentos.

La excepción a esto es la ciudad de Arica, que presenta altos contenidos de Bi, Tl, Au y Be. Todos estos elementos se relacionan con desechos humanos propios de sectores urbanizados.

## **6.4 Calidad ambiental de los sedimentos**

Se realiza una comparación de las concentraciones obtenidas en los sedimentos de la CIAV para los elementos tóxicos, con el estándar internacional PEC (MacDonald, 2000).

Las concentraciones de estos elementos (Cr, Cu, Pb, Zn, Ni, As, Cd, Hg) resultan menores al PEC con excepción del As.

La comparación arroja 40 muestras con concentraciones preocupantes de As, de las 190 utilizadas en este estudio. Estas se encuentran principalmente en la alta cordillera, cercanas a las zonas de alteración Putre Vilañuñumani, Tignamar y Cerro Marquez.

Mediante la comparación de sedimentos fluviales activos con sedimentos preindustriales extraídos en los mismos puntos, se concluye que las altas concentraciones de As se deben a fuentes naturales asociadas principalmente, al cordón volcánico en la alta cordillera, y a zonas de alteración hidrotermal asociadas a éste. La excepción a esto último podría ser Caleta Vítor, donde es probable que estas altas concentraciones se deban a la presencia de la Planta refinadora de Cu, San Carlos.

## **6.5 Recomendaciones**

### **6.5.1 Mejoras en el Control de Calidad**

Se recomienda realizar un plan de control de calidad donde se planifique las muestras a las que se les realizaran duplicados para así poder comparar de manera efectiva aquellos errores que resultan de las distintas etapas del proceso. La cantidad de muestra para estos casos, debe ser suficiente para poder extraer duplicados en cada etapa del proceso.

### **6.5.2 Extracción secuencial**

De la concentración total de metal, solo ciertas formas químicas son tóxicas para los organismos, estas incluyen iones libres y metales liposolubles (Chen et al., 1997)

En consecuencia, y dadas las altas concentraciones de As observadas en la CIAV, se hace necesario un estudio de extracción secuencial para ver la biodisponibilidad de este metal, y en definitiva, el efecto que pueda estar produciendo en la biota.

### **6.5.3 Ripios de Copaquilla**

Se recomienda un estudio más detallado de los Ripios de Copaquilla, que incluya mineralogía y geoquímica de aguas en temporada de lluvias. De esta manera caracterizar de mejor forma el transporte de estos metales y su eventual efecto para el medio ambiente.

## 7. REFERENCIAS

**Acme Labs, Acme Analytical Laboratories (Vancouver) Ltd.**, Price Brochure 2009.

**Andrienko, G., Andrienko, N., Savinov, A.** Choropleth Maps: Classification revisited. URL: <http://ais.gmd.de/KD/>.

**Banning, A.; Cardona, A.; Rde, T.R. 2012.** Uranium and arsenic dynamics in volcano sedimentary basins - an exemplary study in north-central Mexico. *Applied Geochemistry* 27 (11): 2160-2172.

**Bech, J.; Reverter, F.; Tume, P.I.; Sanchez, P.; Longan, L.; Oliver, T. 2011.** Pedogeochemical mapping of Al, Ba, Pb, Ti and V in surface soils of Barcelona Province (Catalonia, NE Spain): Relationships with soil physicochemical properties. *Journal of Geochemical Exploration* 109: 26–37.

**Bernal, J.P.; Railsback L.B. 2008.** Introducci3n a la Tabla Peri3dica de los Elementos y sus Iones para Ciencias de la Tierra. *Revista Mexicana de Ciencias Geol3gicas*. V25, p 236-246.

**Biksham, G.; Subramanian, V.; Griken, R. 1991.** Heavy metal distribution in the Godavari river basin. *Environment Geology Water Science* 17: 117-126.

**Bini, B.; Sartori, G.; Wahsha, M.; Fontana, S. 2011.** Background levels of trace elements and soil geochemistry at regional level in NE Italy. *Journal of Geochemical Exploration* 109: 125–133.

**Bitton, G.; Ward, M.; Dagan, R. 2005.** Determination of the heavy metal binding capacity (HMBC) of environmental samples. *Small-scale Freshwater Toxicity Investigations*, Vol. 2, 215-131.

**Blais, J. F.; Djedidi, Z., R. Ben Cheikh; R. D. Tyagi; and G. Mercier** Practice periodical of hazardous, toxic and Radiactive waste. ASCE 2008: 135.

**Bove, M.A.; Ayuso, R.A.; De Vivo, B.; Lima, A.; Albanese, S. 2011.** Geochemical and isotopic study of soils and waters from an Italian contaminated site: Agro Aversano (Campania). *Journal of Geochemical Exploration* 109: 38–50.

**Bundschuh, J.; Farias, B.; Martin, R.; Storniolo, A.; Bhattacharya, P.; Cortes, J.; Bonorino, G.; Albouy, R. 2004.** Groundwater arsenic in the

Chaco - Pampean Plain, Argentina: case study from Robles county, Santiago del Estero Province. *Applied Geochemistry* 19: 231-243.

**Calderón, C.; Valdés, J. 2012.** Contenido de metales en sedimentos y organismos bentónicos de la bahía San Jorge, Antofagasta, Chile. *Revista de Biología Marina y Oceanografía* 47 (1): 121-133.

**Chen, W.; Tan, S.K.; Tay, J.H. 1996.** Distribution fractional composition and release of sediments-bound heavy metals in tropical reservoirs. *Water, Air, and Soil Pollution* 92, 273-287.

**De Marco, M.; Te'eni, D.; Albano, V.; Za, S. 2012.** Information Systems: Crossroads for Organization, Management, Accounting and Engineering. Physica-Verlag.

**FOREGS. 2005.** Forum of European Geological Surveys, URL: <http://weppi.gtk.fi/publ/foregsatlas/>

**Gajardo, A., Mendoza, J., Carrasco, R., López, M. 2004.** Yacimientos de Rocas y Minerales Industriales de la I Región de Tarapacá. Carta geológica de Chile escala 1:500.000, Serie de recursos minerales y Energéticos N°8, SERNAGEOMIN.

**Galleguillos, G.; Maturana, H.; Oyarzún, J. 2007.** Efectos del Plan de Cierre de la Mina de Cu-Au-As de el Indio y de la construcción del tranque Puclaro en la calidad de las aguas del Río Elqui (IV REGION). [www.aulados.net](http://www.aulados.net) Temas Ambientales.

**García, M.; Gardeweg, M.; Clavero, J.; Hérail, G. 2004.** Hoja Arica, Región de Tarapacá 1:250.000. SERNAGEOMIN, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica, No.84, 150 p.

**Garau, M. 2009.** Control de la calidad de aguas y sedimentos para el estudio del impacto por metales en la cuenca con actividad minera del Jequetepeque, Perú. *Proyecto Final de Carrera*. Universidad Politécnica de Cataluña. 28 p.

**Guillard, D.; Lewis, A.E. 2002.** Optimization of nickel hydroxycarbonate precipitation using a laboratory pellet reactor. *Industrial and Engineering Chemistry Research* 41 (13): 3110-3114.

**Guillén, M.T.; Delgado, J.; Albanese, S.; Nieto, J.M.; Lima, A.; De Vivo, B. 2011.** Environmental geochemical mapping of Huelva municipality soils (SW Spain) as a tool to determine background and baseline values. *Journal of Geochemical Exploration* 109: 59–69.

**Gobierno Regional de Arica y Parinacota. 2009.** Programa maestro de intervención zonas con presencia de polimetales en Arica.

**Halamić, J.; Peh, Z.; Miko, S.; Galović, L.; Šorša A. 2012.** Geochemical Atlas of Croatia: Environmental implications and geodynamical thread. *Journal of Geochemical Exploration* 115: 36–46.

**Hellyer, G. 2008.** Ten Mile River Watershed-Massachusetts: An Assessment of Sediment Chemistry and Ecotoxicity. US Environmental Protection Agency Report2000; URL: <http://www.epagov/Region1/lab/reportsdocuments/tenmile/WatershedEcotoxicityReportpdf>.

**Jackson, R. G. 1978.** Preliminary evaluation of lithofacies models for meandering alluvial streams. In: Miall, A D. (ed.) *Fluvial sedimentology*. Canadian Society of Petroleum Geologists Memoir, 5, 543-576.

**Jenks, G.F. 1967.** The Data Model Concept in Statistical Mapping. *International Yearbook of Cartography* 7: 186-190.

**Jenks, G.F. 1977.** Optimal data classification for choropleth maps: Occasional Paper No. 2, Dept. Geography, Univ. Kansas, 24 p.

**Klein, C.; Hurlbut, C. 2003.** Manual de mineralogía, 4ªEdición. *Editorial Reverte*: 590 p.

**Kong, I.C.; Bitton, G., Koopman; B. Jung, K.H. 1995.** Heavy metal toxicity testing in environmental samples, *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology* 142, 119-147.

**Lacassie, J.P. 2008.** Estudio mineralógico y geoquímico y del sistema fluvial del Río Rapel, VI Región, Chile. SERNAGEOMIN.

**Lee, P.; Baillif, P.; Touray, J.C. 1997.** Geochemical behavior and relative mobility of metals (Mn, Cd, Zn and Pb) in recent sediments of a retention pond along the A-71 motorway in Solohne, France. *Environmental Geology* 32 (2): 142-152.

**McAnally, S.; Benefield, T.; Reed, R.B. 1984.** Nickel removal from a synthetic nickel-plating waste water using sulphide and carbonate for precipitation and coprecipitation. *Sep. Sci. Technol*: 191–217.

**Magri Consultores Ltda. 2012.** Curso: Muestreo y control de calidad para exploración y minería [diapositivas].

**MacDonald, D.; Ingersoll, C.; Berger, T. 2000.** Development and evaluation of consensus based sediment quality guidelines for freshwater ecosystems Archives of Environmental. *Contamination and Toxicology* 3:20–21.

**Macklin, M.G.; Brewer, P.A.; Hudson-Edwards, K.A.; Bird, G.; Coulthard, T.J.; Dennis, I.A.; Lechler, P.J.; Miller, J.R.; Turner, J.N. 2006.** A geomorphological approach to the management of rivers contaminated by metal mining. *Geomorphology* 7: 423–447.

**Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, Departamento de Estudios. 1991.** Estudio de síntesis de catastros de usuarios de agua e infraestructuras de aprovechamiento.

**Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, Departamento de Estudios. 2010.** Plan de Acción estratégico para el desarrollo hídrico de la región de Arica y Parinacota.

**Ministerio de Agricultura.** Agricultura en la región de Arica y Parinacota [En línea]: [http://arica.minagri.gob.cl/?page\\_id=1744](http://arica.minagri.gob.cl/?page_id=1744) [consulta: 17 diciembre 2012]

**Murray, K.S. 1996.** Statistical comparisons of heavy metals concentration in River sediments. *Environmental Geology* 27: 54-58.

**Ordóñez, A.; Rivera, R. 2004.** Mapa metalogénico de la I región de Tarapacá, Escala 1:500.000. SERNAGEOMIN; GEODATOS.

**Oyarzún, J.; Maturana, H.; Paulo, A.; Pasiieczna, A. 2003.** Heavy Metals in stream sediments from the Coquimbo Region (Chile): effects of sustained mining and natural processes in a semi-arid Andean basin. *Mine Water Environ* 2:155-161.

**Oyarzún, R.; Lillo, J.; Higuera, P.; Oyarzún, J.; Maturana, H. 2004.** Strong arsenic enrichment in sediments from the Elqui watershed, Northern

Chile: industrial (gold mining at El Indio – Tambo district) vs Geologic processes. *Journal of Geochemical Exploration* 8:53-64.

**Oyarzún, R.; Oyarzún, J.; Lillo, J.; Maturana, H.; Higuera, P. 2006.** Strong Metal Anomalies in Stream Sediments from Semiarid Watersheds in Northern Chile: When Geological and Structural Analyses Contribute to Understanding Environmental Disturbances. *International Geology Review* 48: 1133-1144.

**Oyarzún, R.; Oyarzún, J.; Lillo, J.; Maturana, H.; Higuera, P. 2007.** Mineral deposits and Cu–Zn–As dispersion–contamination in stream sediments from the semiarid Coquimbo Region, Chile. *Environmental Geology*: 5:283-294.

**Oyarzún, R. 2010.** Estudio de caso: Cuenca del Limarí, Región de Coquimbo, CHILE. Compilación Resumida de Antecedentes Centro de Estudios Avanzados en Zonas Áridas. Universidad de la Serena (CEAZA-ULS).

**Oyarzún, J.; Maturana, H.; Oyarzún, R. 2011.** Geoquímica del drenaje en las tres cuencas áridas de la región agrícola-minera de Coquimbo (Chile): Balance de una década de estudios, 2000-2010. *Secheresse* 22: 244-52. doi: 10.1684/sec.2011.0326

**Oyarzún, J.; Castillo, D.; Maturana, H.; Kretschmer, N.; Soto, G. Amezaga, Rötting, Younger, Oyarzún R. 2012.** Abandoned tailings deposits, acid drainage and alluvial sediments geochemistry, in the arid Elqui River Basin, North-Central Chile. *Journal of Geochemical Exploration* 115: 47–58.

**Pacci, D. 1977.** Estudios realizados en la zona de alteración hidrotermal Ticnamar, Provincia de Arica. Instituto de Investigaciones Geológicas.

**Rosas, H. 2001.** Estudio de la contaminación por metales pesados en la Cuenca del Llobregat. Tesis de Doctorado. Universidad Politécnica de Cataluña.

**Šajn, R.; Halamić, J.; Peh, Z.; Galović, L.; Alijagić, J. 2011.** Assessment of the natural and anthropogenic sources of chemical elements in alluvial soils from the Drava River using multivariate statistical methods. *Journal of Geochemical Exploration* 110: 278–289.

**SERNAGEOMIN Comisión Especial Investigadora sobre la situación en que se encuentran los depósitos de relaves mineros existentes en el país. 2010.** Oficio 00264 N° 5/10. De fecha 14 de diciembre de 2010.

**SERNAGEOMIN. Unidad de Recursos Minerales. 2012.** Base de Datos de Yacimientos Minerales de Chile. Proyecto INNOVA-CORFO Información Geocientífica para el Fomento de la Exploración Minera en Chile, No. 07CN13IMM-87. (Información inédita)

**Shand, P.; Edmunds, W.M.; Ellis, J. 1998.** The hydrogeochemistry of thalium in natural waters. *Water-Rock Interaction*.

**Wu, S.; Zhou, S.; Li, X. 2011.** Determining the anthropogenic contribution of heavy metal accumulations around a typical industrial town: Xushe, China. *Journal of Geochemical Exploration* 110: 92–97.

**Sillitoe, R H. 1973.** The Tops and Bottoms of the Porphyry Copper Deposits. *Economic Geology* 68: 799-815.

**Singh, A.K.; Hasnain, S.I.; Banerjee, D.K. 1999.** Grain Size and geochemical partitioning of heavy metals in sediments of the Damodar River, a tributary of the lower Ganga, India. *Environmental Geology* 39 (1): 90-98.

**Torres, A.; Acevedo, E. 2008.** El problema de la salinidad en los recursos suelo y agua que afectan el riego y cultivos en los valles de Lluta y Azapa en el norte de Chile. *IDESIA (Chile)* 26 (3): 31-44.

**Mrvić, V.; Kostić-Kravljjanac, L.; Čakmak, D.; Sikirić, B.; Brebanović, B.; Perović, V.; Nikoloski, M. 2011.** Pedogeochemical mapping and background limit of trace elements in soils of Branicevo Province (Serbia). *Journal of Geochemical Exploration* 109: 18–25.

**Wenrich, K.J. 1985.** Geochemical characteristics of uranium-enriched volcanic rocks. In: *Uranium Deposits in Volcanic Rocks*, International Atomic Energy Agency (IAEA): 29-51. Viena.

# **ANEXO A**

Tabla A1. Yacimientos no metálicos de la región de Arica y Parinacota. (SERNAGEOMIN. Unidad de Recursos Minerales. 2012).

Nº	Nombre	Recursos	UTM Este	UTM Norte	Tamaño del Yacimiento	Actividad
1	Visviri	Diatomita	444150	8053102		Con mina
2	Chapiquiña	Azufre	417045	8045387	Muy Grande	Con mina
3	Tacora	Azufre	416795	8043388	Grande	Con mina
4	Caracarani	Azufre	432651	8036974		Con mina
5	Chuquiananta	Azufre	448568	8031489		Con mina
6	Jaruma o Jaroma	Azufre	445045	8027791		Con mina
7	Humapalca	Caliza	427631	8022440		Con mina
8	Chapuma	Bentonita	436111	8017346	Pequeño	En exploración
9	Cosapilla	Azufre	457432	8016758		Con mina
10	Salar Colpitas	Ulexita	455119	8014106		Con mina
11	Quebrada Allane 1	Bentonita	432508	8009629	Mediano	En exploración
12	Quebrada Allane 2	Caolin - (Toba)	433773	8009027	Grande	Con mina
13	Quebrada Allane 3	Diatomita - (Pumicita)	433766	8009015	Mediano	En exploración
14	Macarena	Diatomita - (Bentonita)	429511	8002205	Mediano	Con mina
15	Tarapaca	Azufre	445127	7998287	Mediano	Con mina
16	Pomerape	Azufre	485688	7996515		Con mina
17	Llancona	Azufre	448654	7994638		Con mina
18	Sausine	Alumbres	410199	7972464		Con mina
19	Millune	Alumbres	408789	7971761		Con mina
20	Pampa Colorada	Perlita	388811	7969723	Grande	En exploración
21	Guallatire	Azufre	492752	7965171	Mediano	Con mina
22	Quebrada Lluta	Pumicita	379489	7963223	Grande	En exploración
23	San Eduardo	Bentonita	398599	7962751		Con mina
24	Casualidad	Diatomita	399768	7962739		Con mina
25	Caracolito	Diatomita	401180	7962664		Con mina
26	Ch - 5	Pumicita	363376	7962336	Pequeño	En exploración
27	Quebrada Cardones	Pumicita	421814	7960465	Mediano	En exploración

Nº	Nombre	Recursos	UTM Este	UTM Norte	Tamaño del Yacimiento	Actividad
28	Neverman	Diatomita	366318	7959554		Con mina
29	Las Riveras	Dolomita	380344	7950787	Mediano	Con mina
30	Quebrada Acha	Áridos	368086	7947774	Mediano	Con mina
31	Casas Grandes	Arcilla Común	387240	7945687		Con mina
32	Río Lauca	Bentonita	483100	7944860		En exploración
33	Puquintica	Azufre	501551	7928291	Mediano	Con mina
34	Arintica	Azufre	494523	7926447		Con mina
35	Camino a Umirpa	Caolin-(Bentonita)	462028	7926143		En exploración
36	Quebrada Garzas	Dolomita	380028	7921140		En exploración
37	Salar de Surire	Ulexita	489194	7915840	Grande	Con mina
38	Quebrada Vítor	Dolomita	383307	7914823		En exploración
39	Salar Cototos	Anhidrita	374113	7912294	Muy Pequeño	En exploración
40	Chiguane	Azufre	498039	7906163	Mediano	Con mina

Tabla A2. Yacimientos metálicos de la región de Arica y Parinacota. (SERNAGEOMIN. Unidad de Recursos Minerales. 2012).

Nº	Nombre	Recursos	UTM Este	UTM Norte	Actividad
41	Sicuni	Mn	432639	8040663	En exploración
42	Quiullere	Mn	433172	8039742	En exploración
43	Prospecto Cerro Colorado Norte	Cu	418595	8028038	En exploración
44	Prospecto Colina B	Cu-(Zn)	424795	8014238	En exploración
45	Pascual	Mn	449817	8011663	En exploración
46	Sin Nombre	Mn	432887	8010779	En exploración
47	Navidad Este	Mn	435355	8010054	En exploración
48	San Sebastián	Fe	427931	8009916	En exploración
49	Navidad	Mn	433757	8009806	Con mina
50	Prospecto Lexone	No especificado	448969	8025550	En exploración
51	Locura o Colpita o Copacagua	Ag-(Pb, Zn)	459598	8012458	Con mina
52	Huachipato	Mn	432439	8003779	Con mina
53	Kilómetro 130	Mn	428662	8003568	En exploración
54	Prospecto Putre Norte	Cu-(Mo)	439395	7996238	En exploración
55	Prospecto Putre Sur	Cu-(Mo, Au)	439047	7989756	En exploración
56	Prospecto Larancagua	Al-(Mg)	439695	7989238	En exploración
57	Mónica	Mn	474824	7998465	Con mina
58	Neverman	U	366996	7960589	Con mina
59	Arenillas Negras	Ti-(Fe)	360402	7954054	En exploración
60	Poconchile	U	384996	7957439	Con mina
61	Eva II o Chironta	Cu	417513	7974002	Con mina
62	T-1	U	401746	7964589	En exploración
63	Manuel Jesús	U	397496	7963539	En exploración
64	Boca Negra	U	398326	7963539	Con mina
65	La Oreja	U	401896	7962839	Con mina
66	Lucita	Cu-(Ag, Au)	416958	7959811	Con mina
67	Halcones	Cu-(Au, Ag)	416905	7957936	Con mina

Nº	Nombre	Recursos	UTM Este	UTM Norte	Actividad
68	Jamiralla	Cu-(Au, Ag)	428063	7981167	Con mina
69	Rosario	Cu-(Au)	426795	7978639	Con mina
70	Dos Hermanos	Cu-(Mo)	423335	7976879	Con mina
71	Prospecto San Francisco	Cu-(Mo)	446857	7976369	En exploración
72	Campanani	Cu-(U)	426386	7975252	Con mina
73	Prospecto San Sabino	Cu	446070	7967104	En exploración
74	El Milagro	Cu	445975	7957580	Con mina
75	Choquelimpie	Au-(Ag, Cu)	472674	7975539	Con mina
76	El Tranque	Cu	448399	7959656	Con mina
77	San Lorenzo	Ag-(Cu, Pb, Zn)	449524	7958890	Con mina
78	Guanaco	Cu	448058	7957542	Con mina
79	Patiño	Ag-(Pb, Zn, Cu)	450827	7957531	Con mina
80	Prospecto Churigualla	Cu	480794	7972639	En exploración
81	Cutipa	Cu	359464	7945894	Con mina
82	Santa Isabel	Cu	364526	7941919	Con mina
83	Soledad o Silva	Cu	365596	7938039	Con mina
84	Caleta Vítor	U	361946	7926939	En exploración
85	Fortuna	Cu	367917	7948743	Con mina
86	Santuario	Cu-(Pb, Zn, Mo, Ag)	418595	7949139	Con mina
87	Sabinaya	Cu	449243	7950797	Con mina
88	Apacheta	Sb	456695	7950539	Con mina
89	Prospecto Catanave	Au-Cu	463195	7948139	En exploración
90	Pumane o Mina Verde	Cu	448553	7948060	Con mina
91	Torpedo	Ag-(Cu, Pb, Zn)	451125	7947595	Con mina
92	Santa Rosa	Ag-(Pb, Zn)	451619	7946963	Con mina
93	Chulpa	Ag-(Pb, Zn, Au)	454785	7946505	Con mina
94	Putagua	Cu-(Pb)	450465	7944443	Con mina
95	Prospecto Ticnámar	Cu-(Mo)	452316	7943723	En exploración
96	Churicala Norte	Cu-(Ag)	453294	7941383	Con mina

Nº	Nombre	Recursos	UTM Este	UTM Norte	Actividad
97	Churicala Sur	Cu-(Ag)	453595	7940639	Con mina
98	Chivatune	Ag-(Pb, Zn, Cu)	455770	7940378	Con mina
99	Capitana	Ag-(Cu, Pb, Zn)	454471	7940191	Con mina
100	Ociel	Sb-(Pb)	462565	7936199	Con mina
101	Prospecto Cerro Marquez	Ag	450071	7931246	En exploración
102	Prospecto Pairumane	No especificado	496794	7945839	En exploración
103	Gina Norte	Cu	361271	7925697	Con mina
104	Santo Domingo	Cu	362640	7924834	Con mina
105	Noruega o Dominga I	Cu	360536	7924061	Con mina
106	Sin Nombre	Cu	361352	7923847	Con mina
107	Punta Chaca	Cu	357124	7921718	Con mina
108	San Javier	Cu	362957	7910771	Con mina
109	Sin Nombre	Cu	366866	7910131	Con mina
110	Argolla	Cu	360993	7906345	Con mina
111	Casa Chica	Cu	362328	7905247	Con mina
112	Guacolda	Cu	368639	7924000	Con mina
113	Neverman	Cu	370514	7923780	Con mina
114	Julia	Cu	368557	7923458	Con mina
115	Pampa Camarones Norte-1	U	368246	7922340	En exploración
116	San José	Cu	374358	7922173	Con mina
117	Pampa Camarones Norte-2	U	367546	7920340	En exploración
118	Pampa Camarones Norte-3	U	370296	7917140	En exploración
119	Pampa Camarones Norte-4	U	371796	7914640	En exploración
120	Sin Nombre	Cu	370575	7912743	Con mina
121	Sin Nombre	Cu	370194	7912645	Con mina
122	Sin Nombre	Cu	369869	7912542	Con mina
123	Sin Nombre	Cu	371183	7912447	Con mina
124	Sin Nombre	Cu	371025	7912300	Con mina
125	El Salar	Cu-(Ag)	370441	7911481	Con mina

Nº	Nombre	Recursos	UTM Este	UTM Norte	Actividad
126	Chacota	Cu-(Ag)	370288	7911132	Con mina
127	Sin Nombre	Cu	368848	7911102	Con mina
128	Pampa Camarones Centro-1	U	376796	7904040	En exploración
129	Manto Verde	Cu	370599	7904021	Con mina
130	Sin Nombre	Cu	371095	7903678	Con mina
131	Pampa Camarones Centro-2	U	377796	7900640	En exploración
132	Chilpe o Camarones	Cu	435139	7905458	Con mina
133	Prospecto Vilacollo	No especificado	467394	7911640	En exploración
134	Prospecto Sora Sora	Cu-(Pb)	478385	7902867	En exploración

# **ANEXO B**

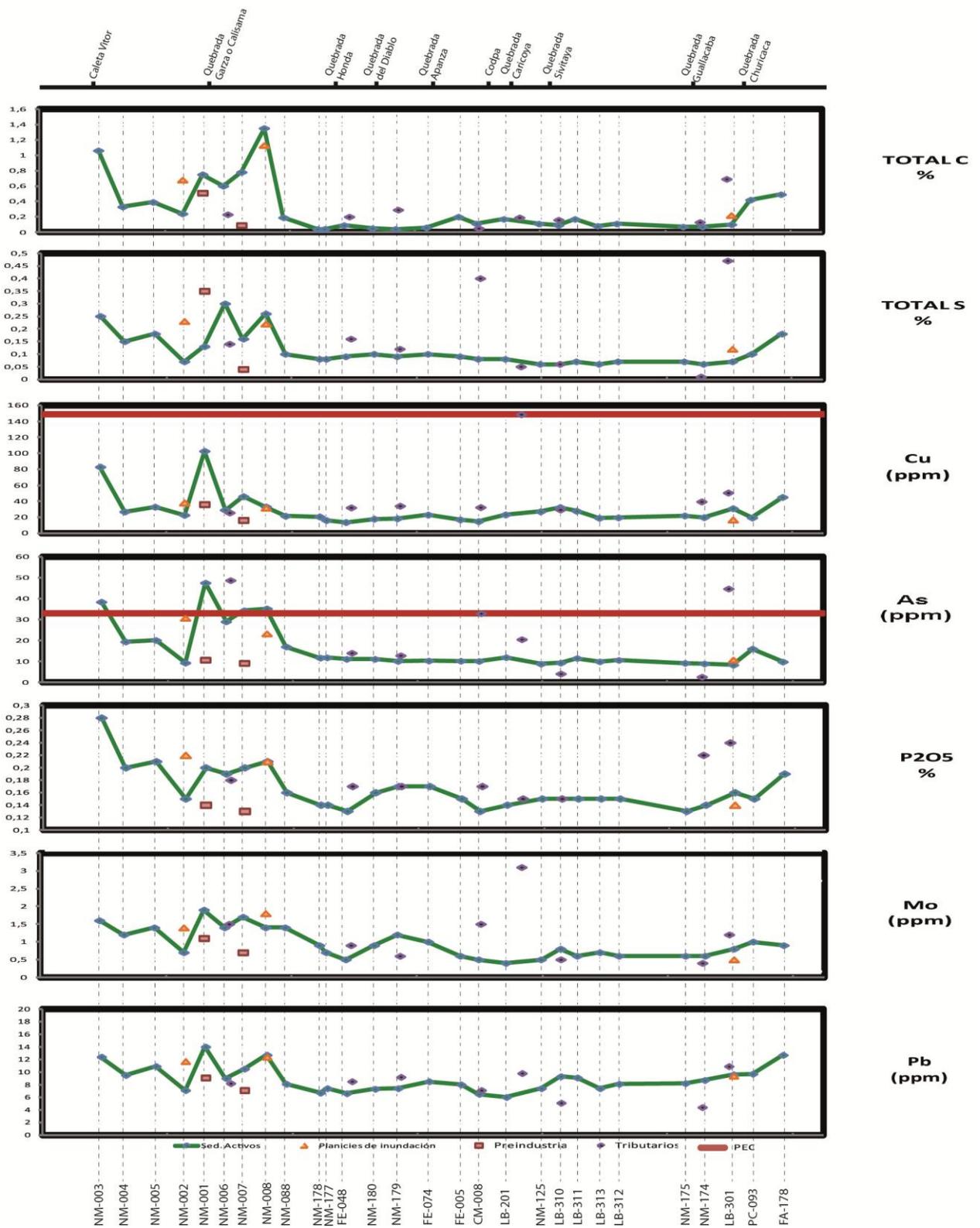


Figura B1. Gráficos de variación geográfica Río Vitor. En la parte superior se ubican las localidades y quebradas tributarias.

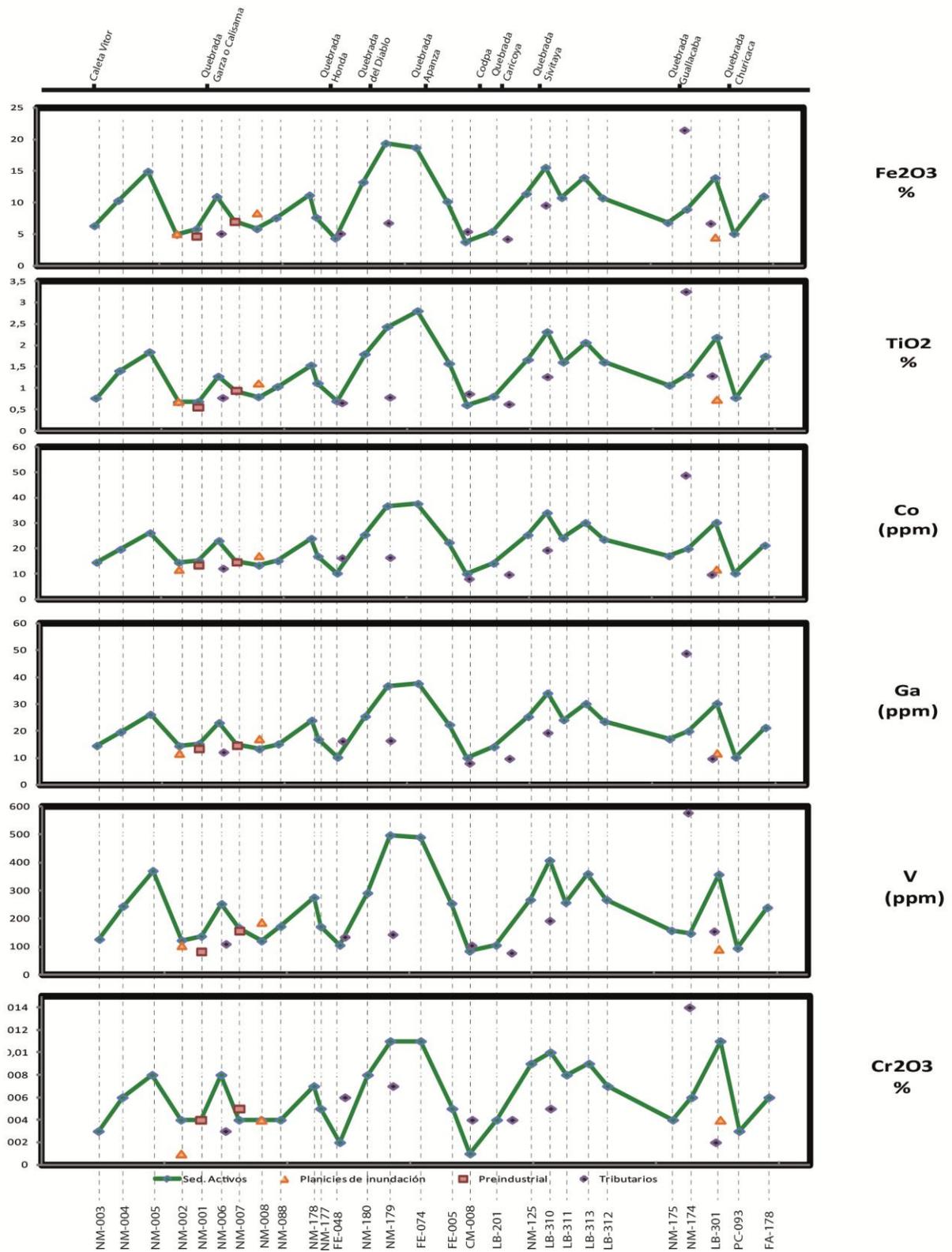


Figura B2. Gráficos de variación geográfica Río Vitor. En la parte superior se ubican las localidades y quebradas tributarias.

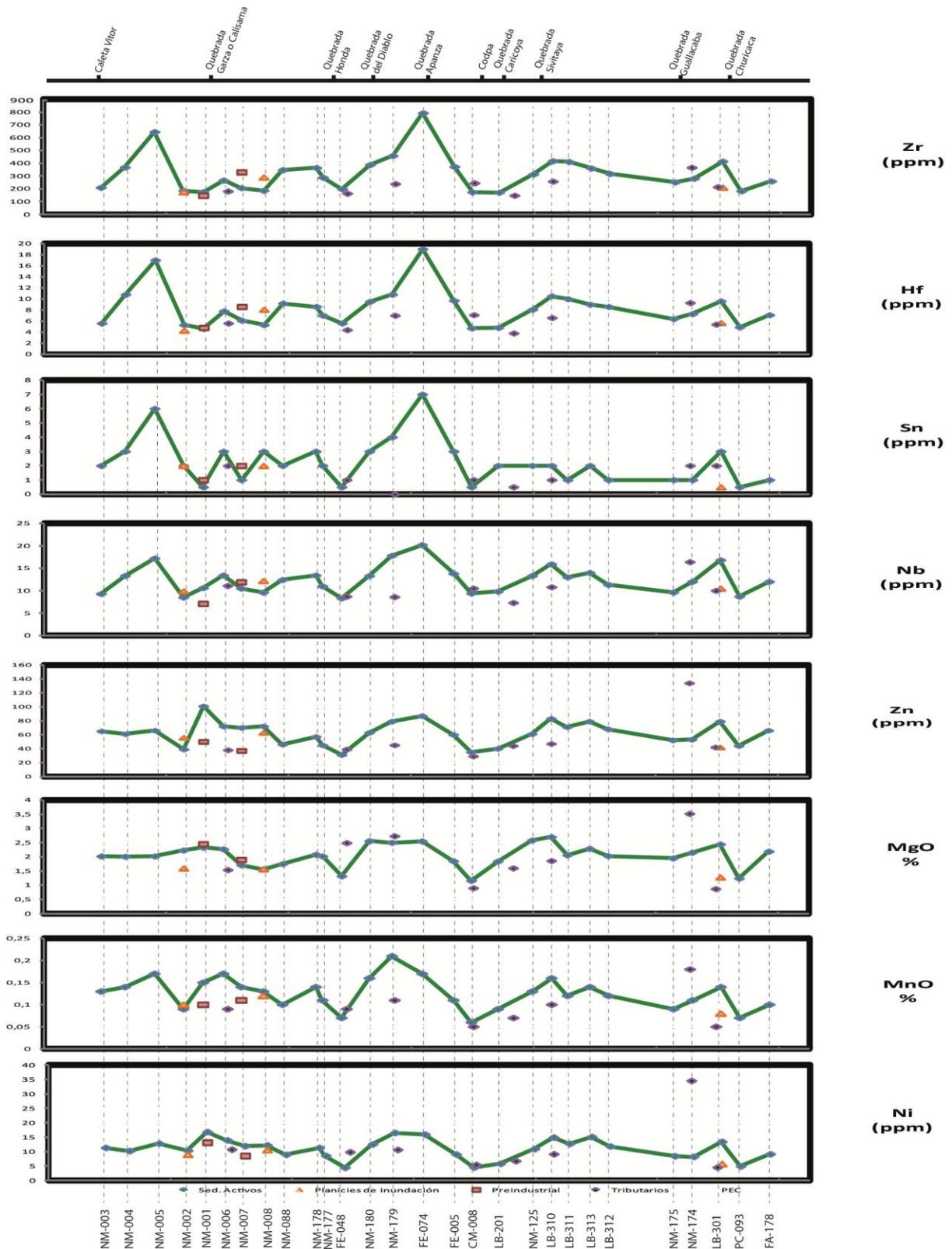


Figura B3. Gráficos de variación geográfica Río Vítor. En la parte superior se ubican las localidades y quebradas tributarias.

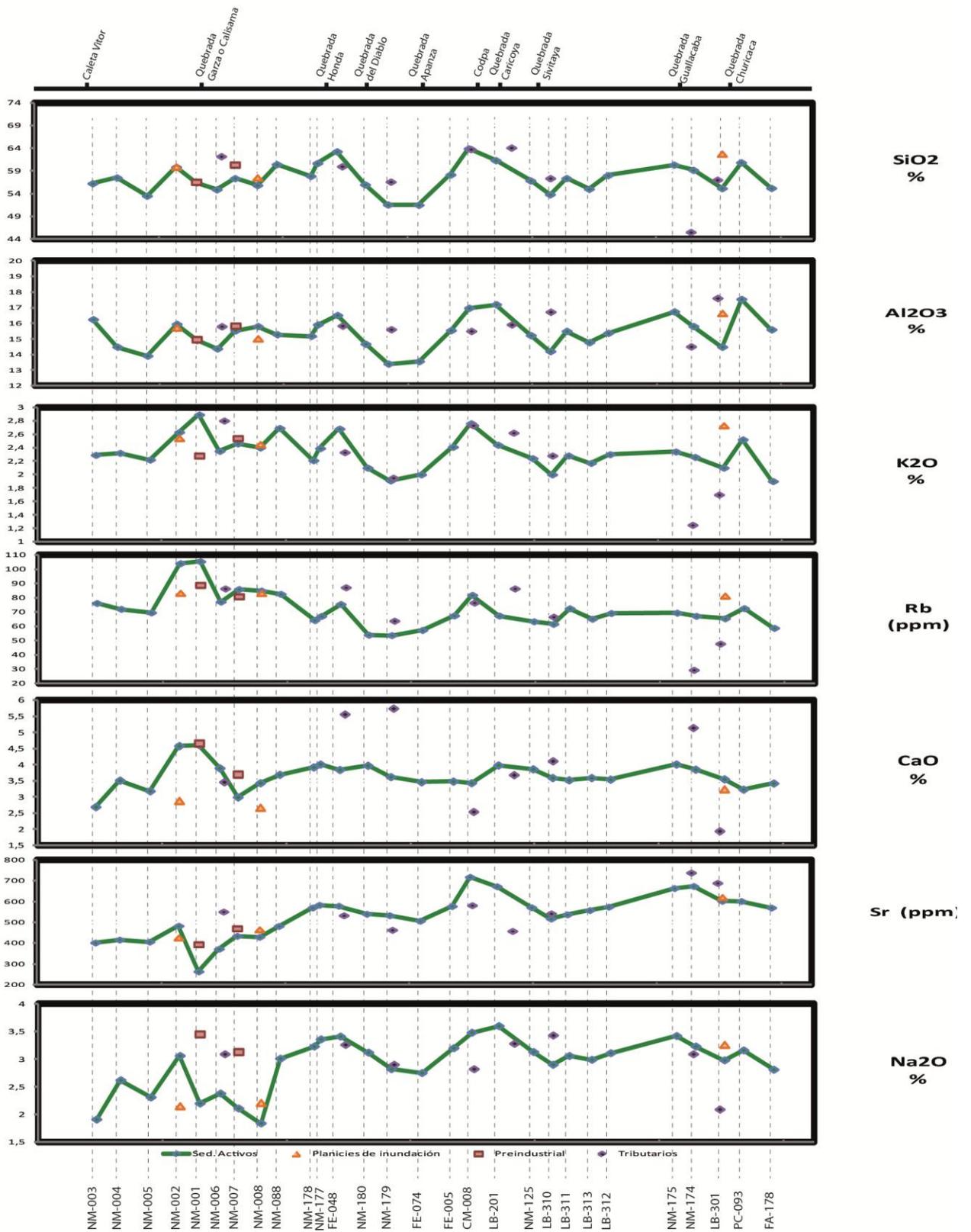


Figura B4. Gráficos de variación geográfica Río Vitor. En la parte superior se ubican las localidades y quebradas tributarias.

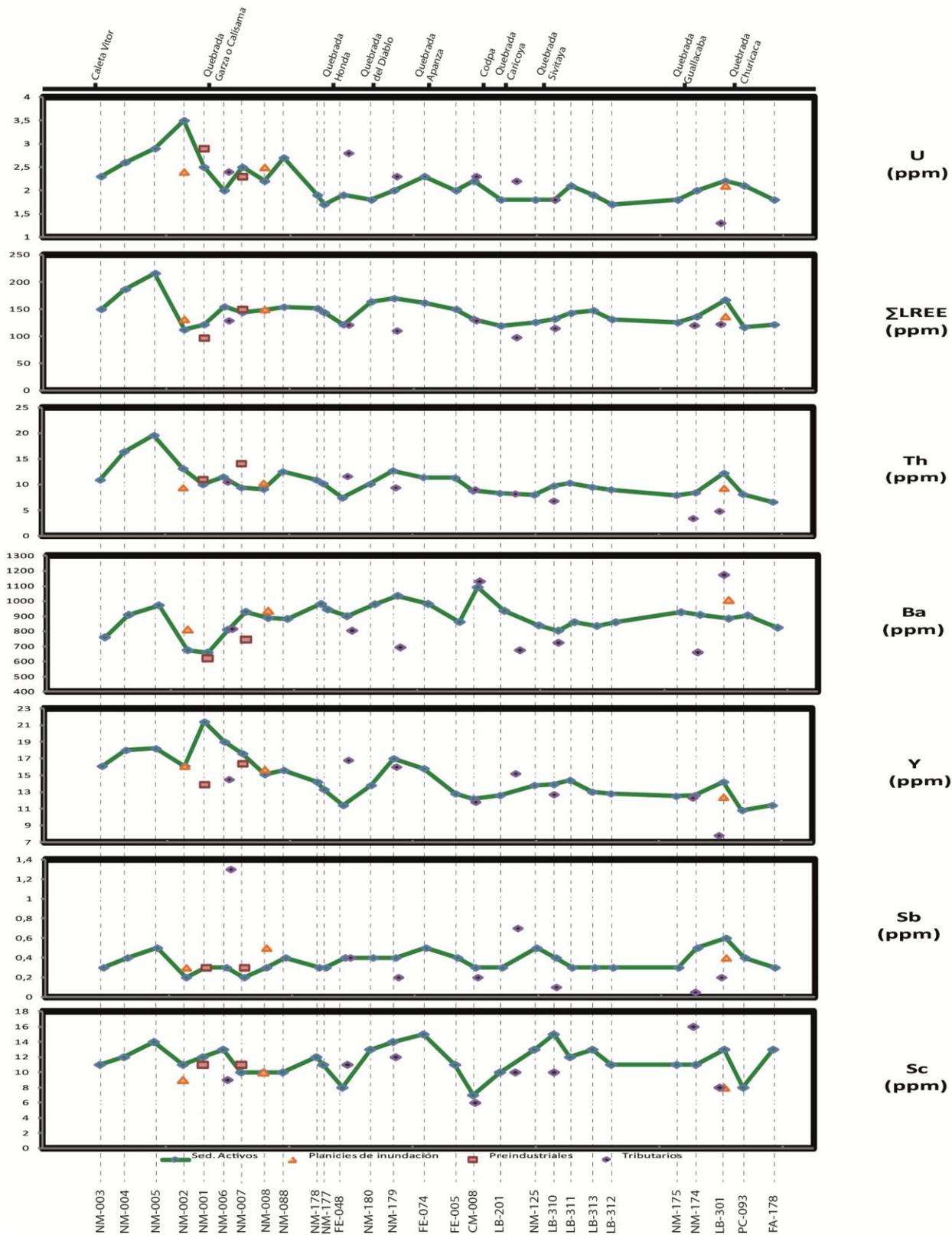


Figura B5. Gráficos de variación geográfica Río Vitor. En la parte superior se ubican las localidades y quebradas tributarias.

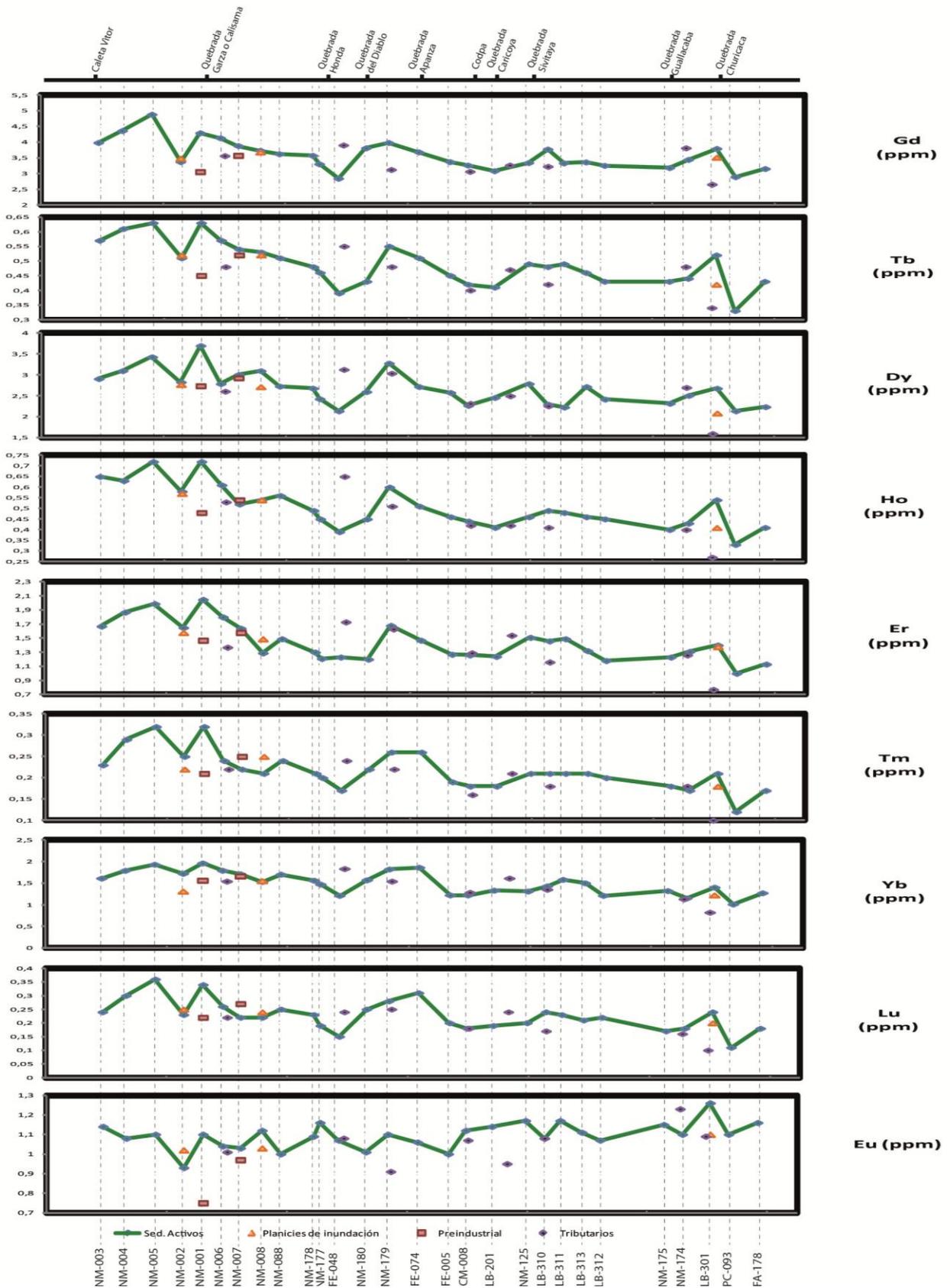


Figura B6. Gráficos de variación geográfica Río Vitor. En la parte superior se ubican las localidades y quebradas tributarias.

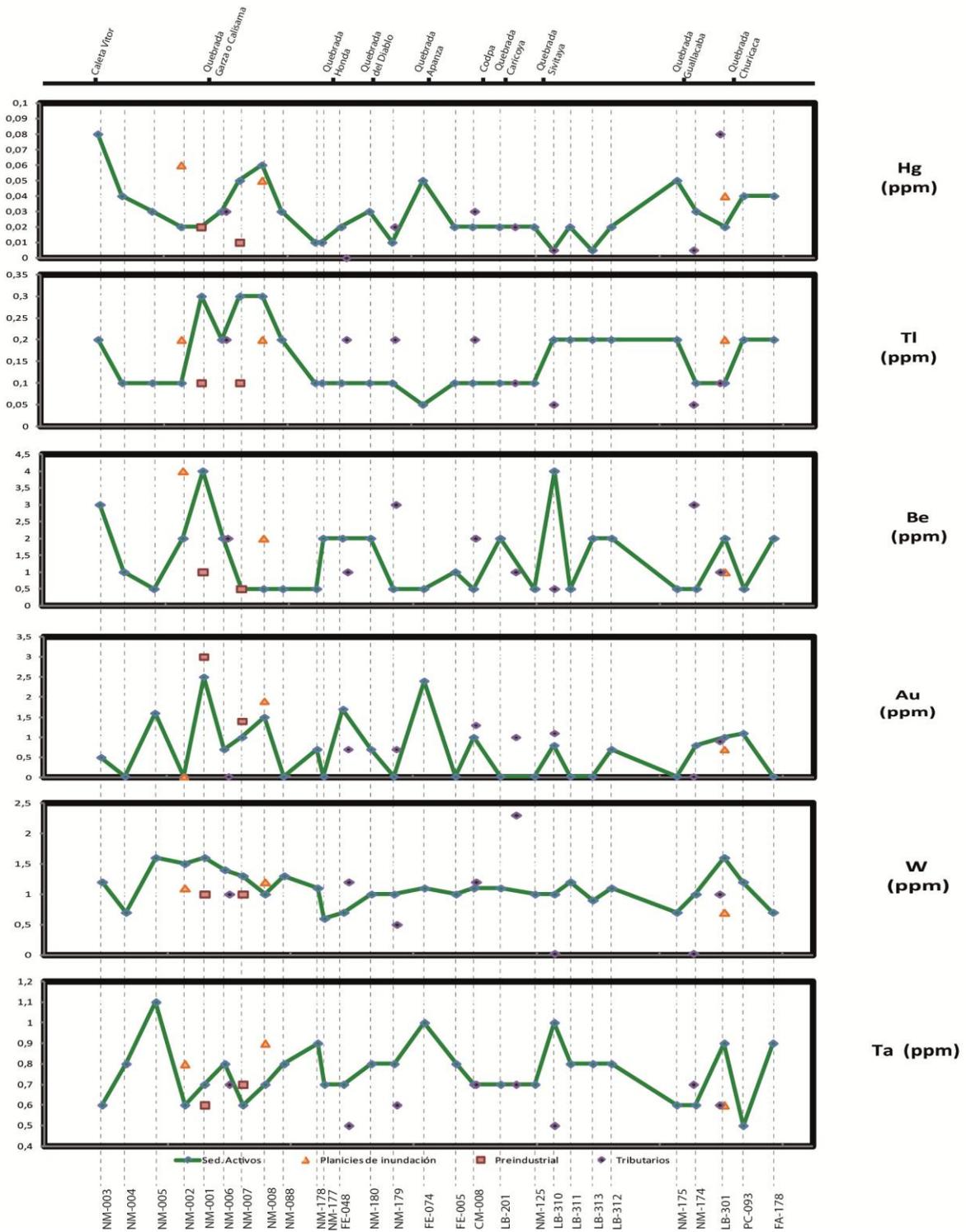


Figura B7. Gráficos de variación geográfica Río Vitor. En la parte superior se ubican las localidades y quebradas tributarias.

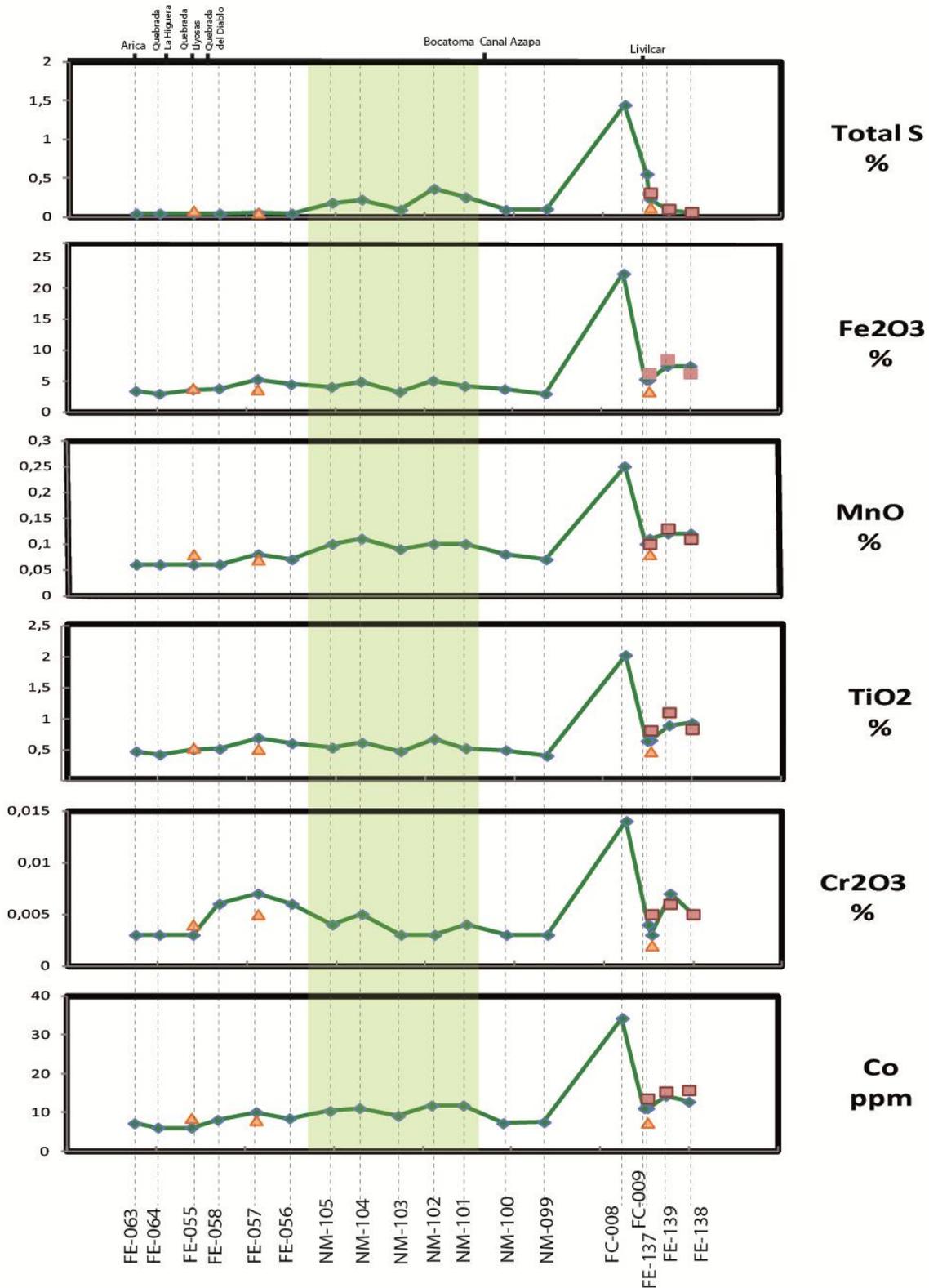


Figura B8. Gráficos de variación geográfica Río San José de Azapa. En la parte superior se ubican las localidades y quebradas tributarias.

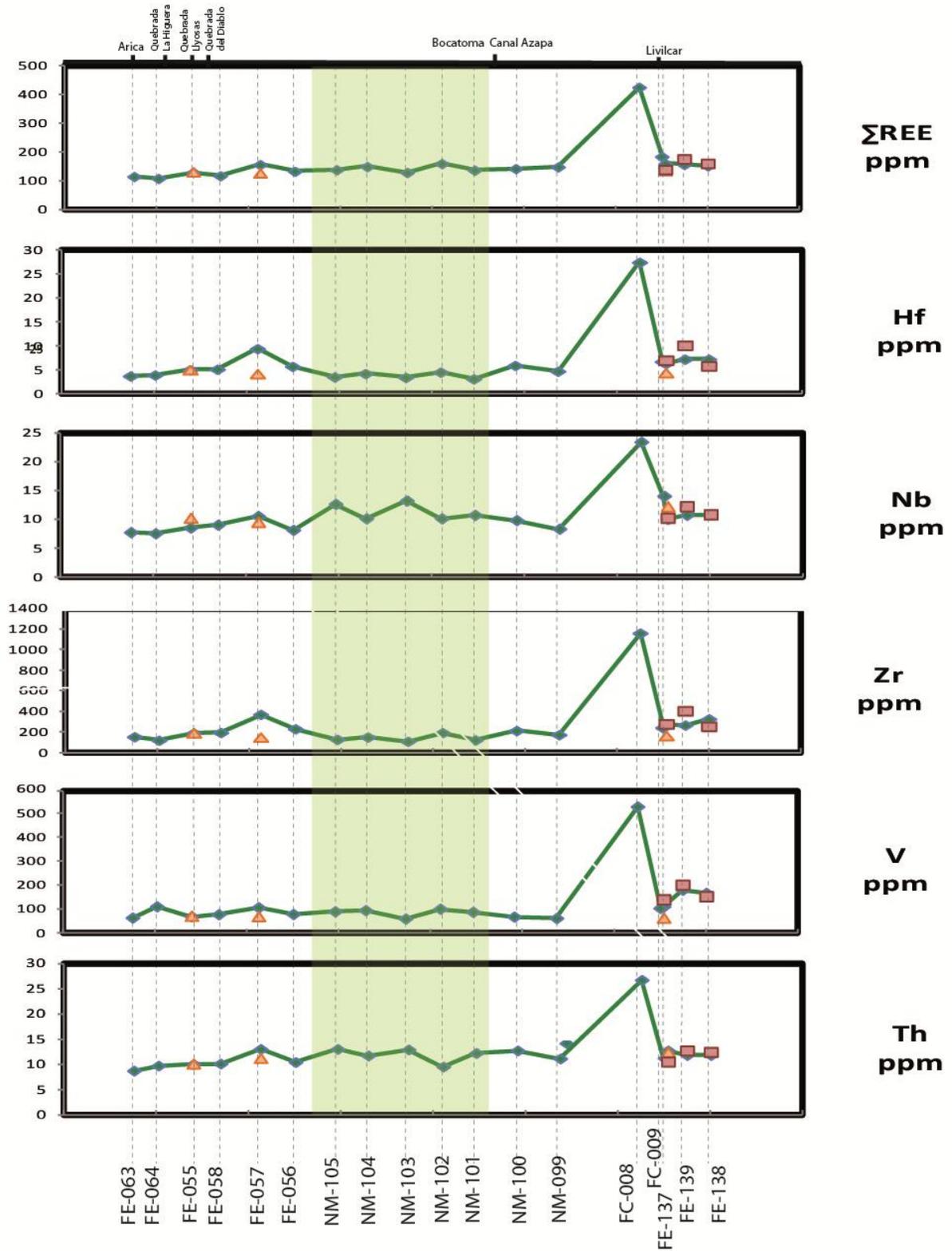


Figura B9. Gráficos de variación geográfica Río San José de Azapa. En la parte superior se ubican las localidades y quebradas tributarias.

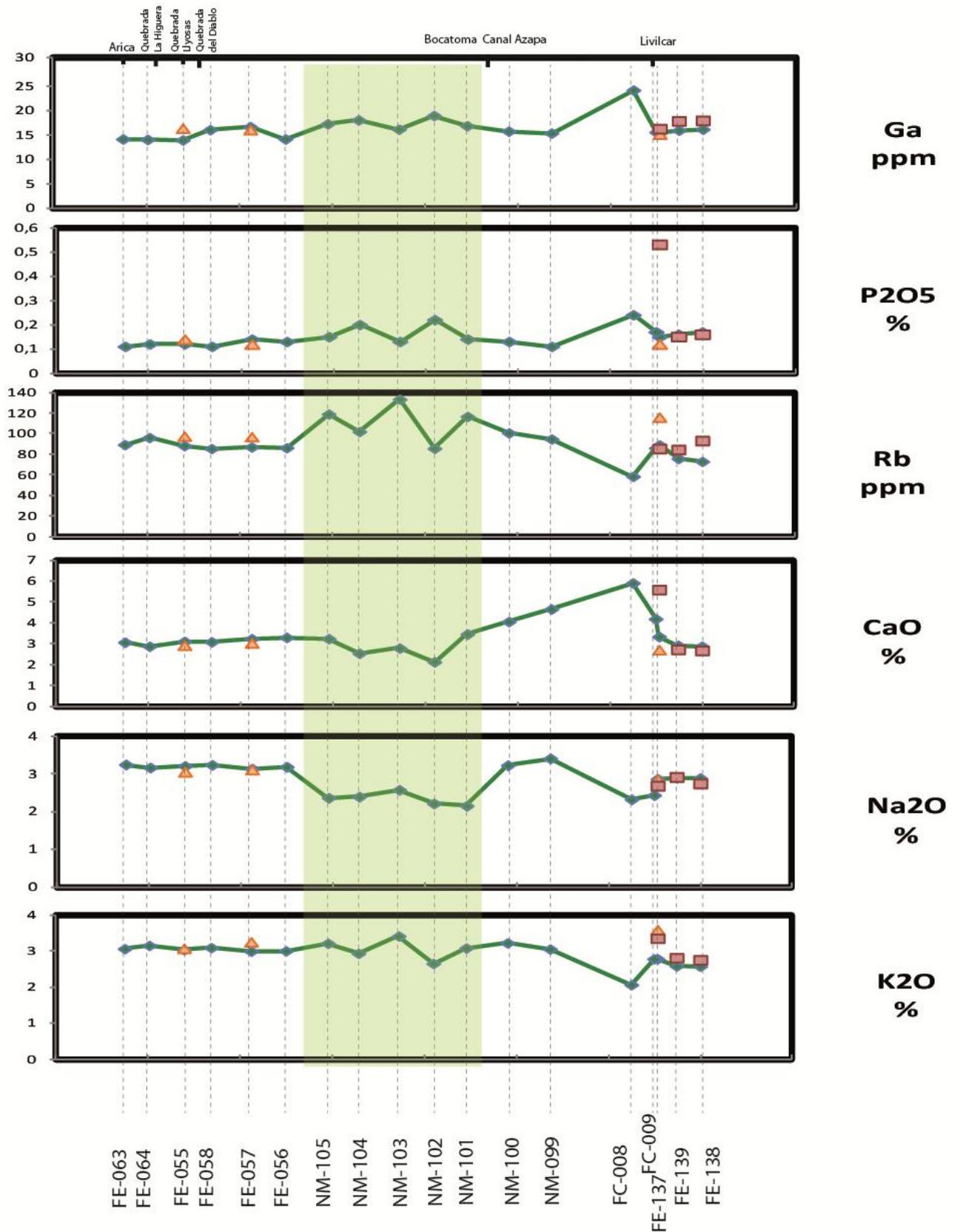


Figura B10. Gráficos de variación geográfica Río San José de Azapa. En la parte superior se ubican las localidades y quebradas tributarias.

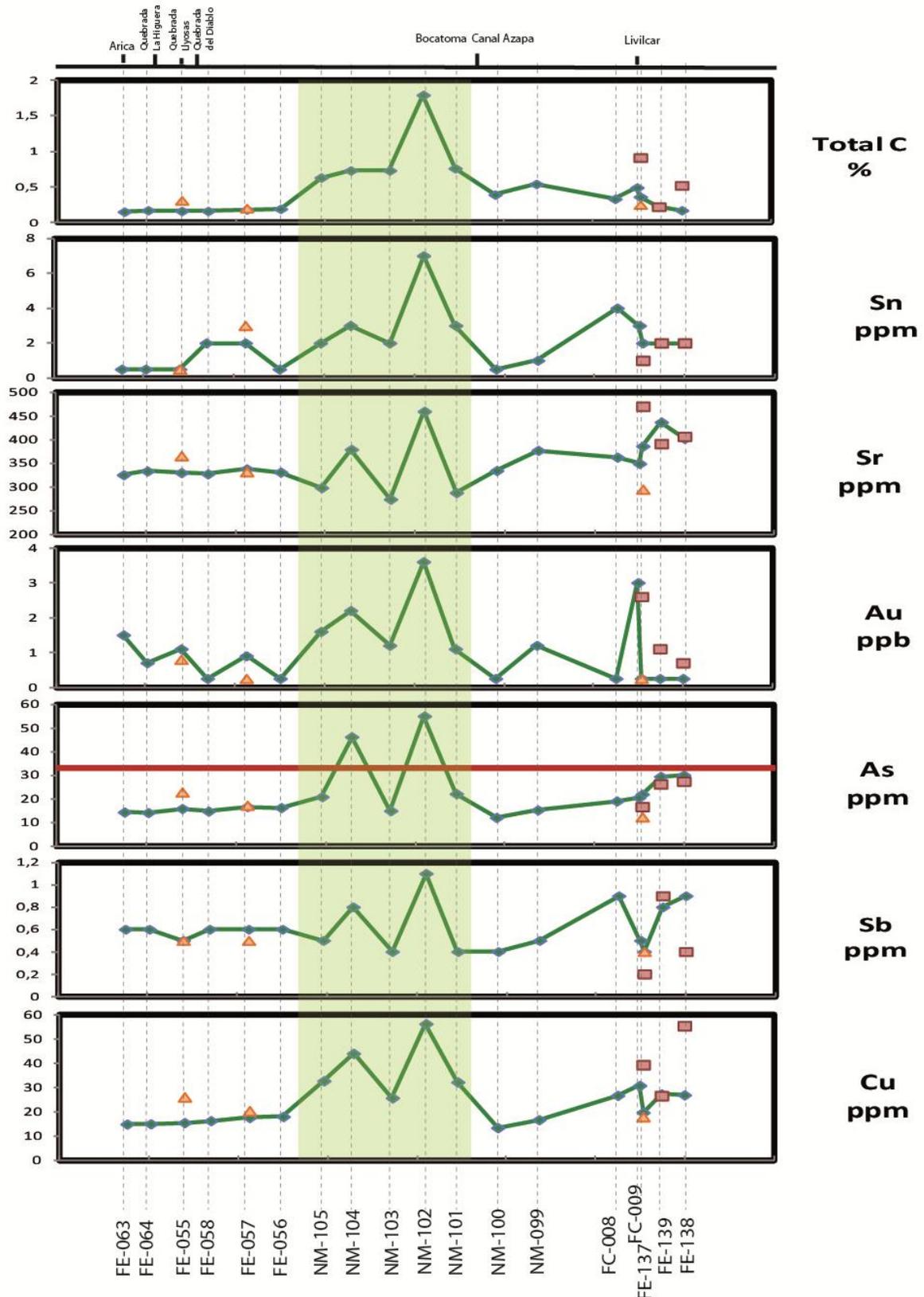


Figura B11. Gráficos de variación geográfica Río San José de Azapa. En la parte superior se ubican las localidades y quebradas tributarias.

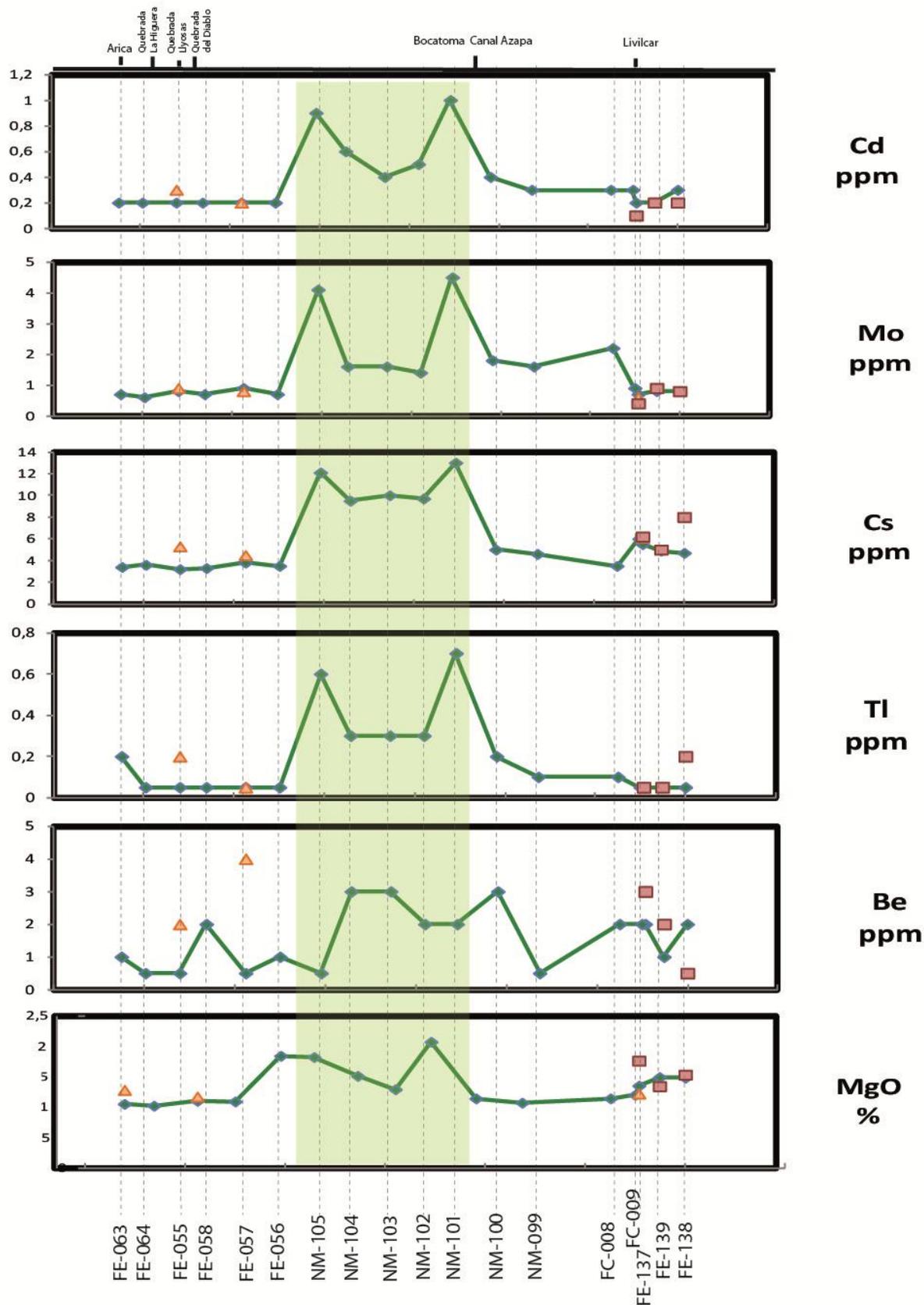


Figura B12. Gráficos de variación geográfica Río San José de Azapa. En la parte superior se ubican las localidades y quebradas tributarias.

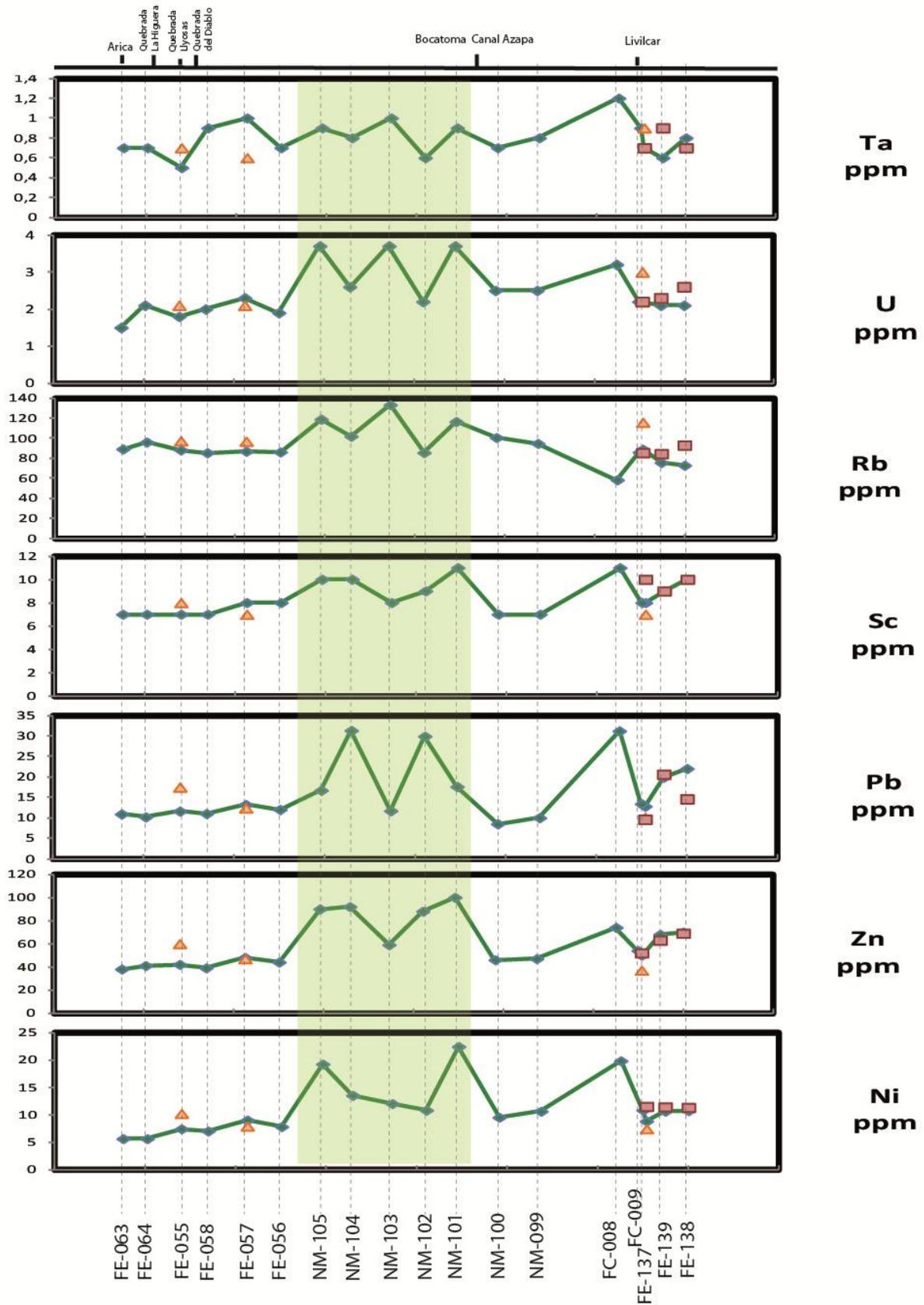


Figura B13. Gráficos de variación geográfica Río San José de Azapa. En la parte superior se ubican las localidades y quebradas tributarias.

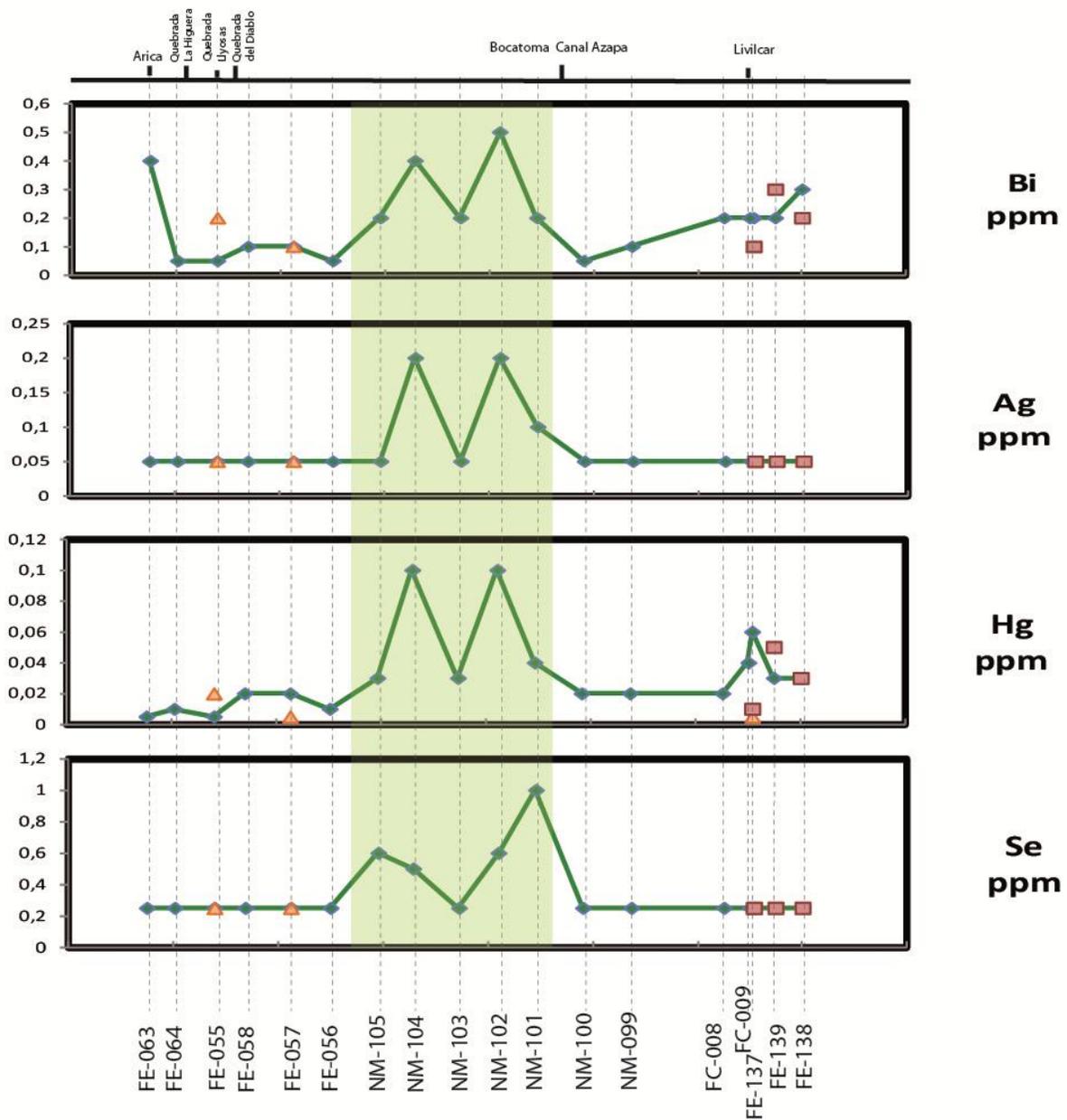


Figura B14. Gráficos de variación geográfica Río San José de Azapa. En la parte superior se ubican las localidades y quebradas tributarias.

# **ANEXO C**

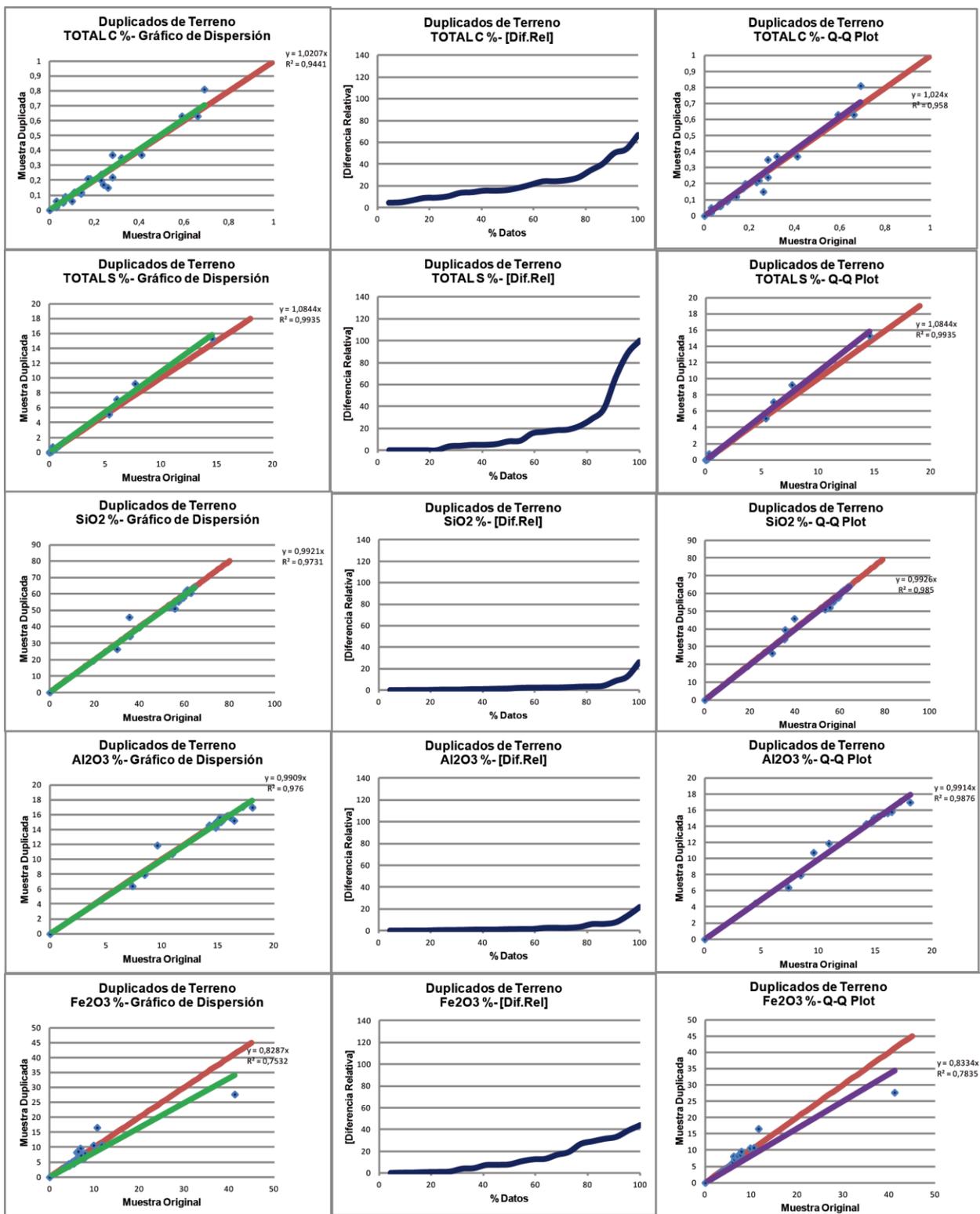


Figura C1. Gráficos control de calidad. De izquierda a derecha: Gráficos de dispersión, gráficos de diferencia absoluta y gráficos de cuantiles.

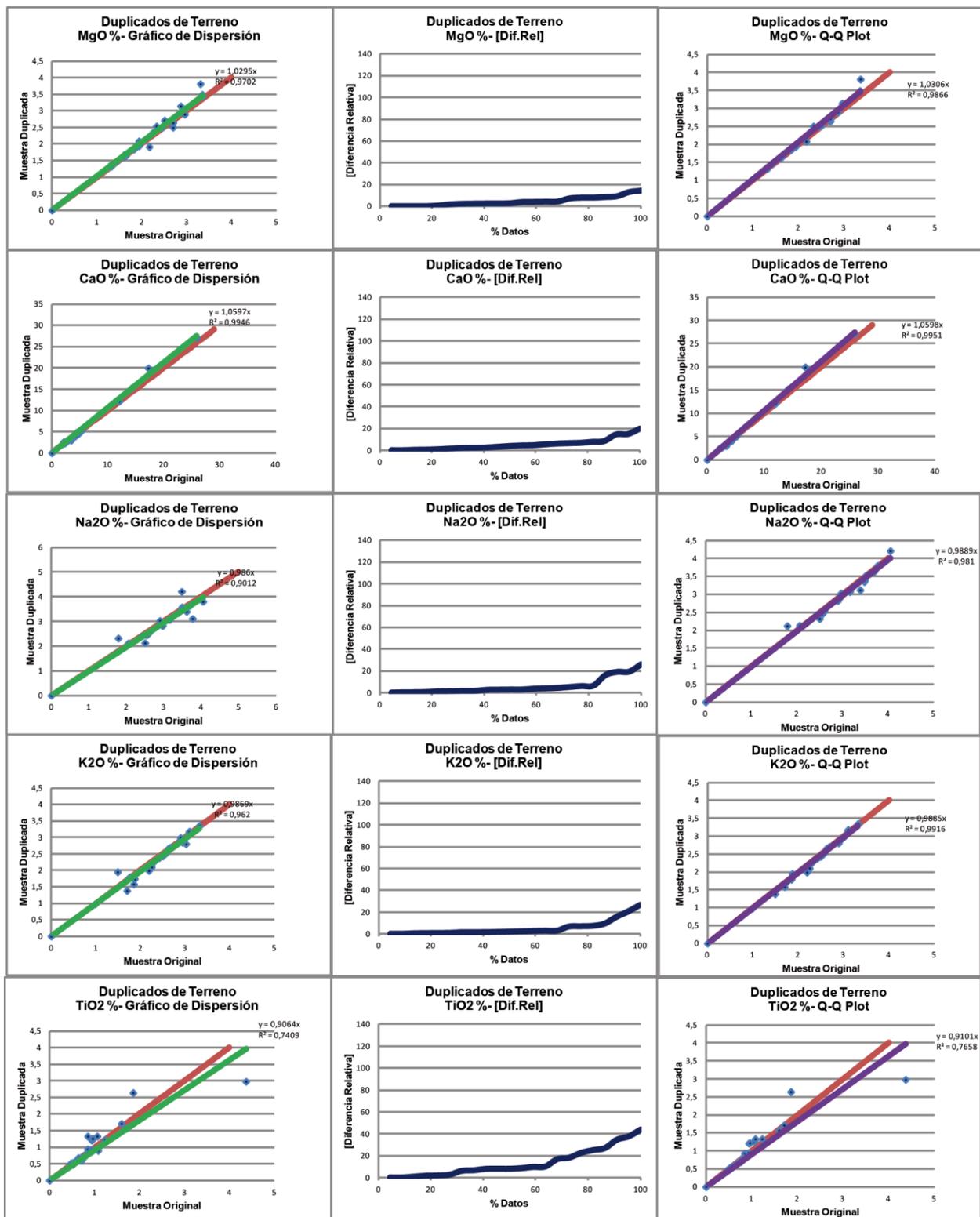


Figura C2. Gráficos control de calidad. De izquierda a derecha: Gráficos de dispersión, gráficos de diferencia absoluta y gráficos de cuantiles.

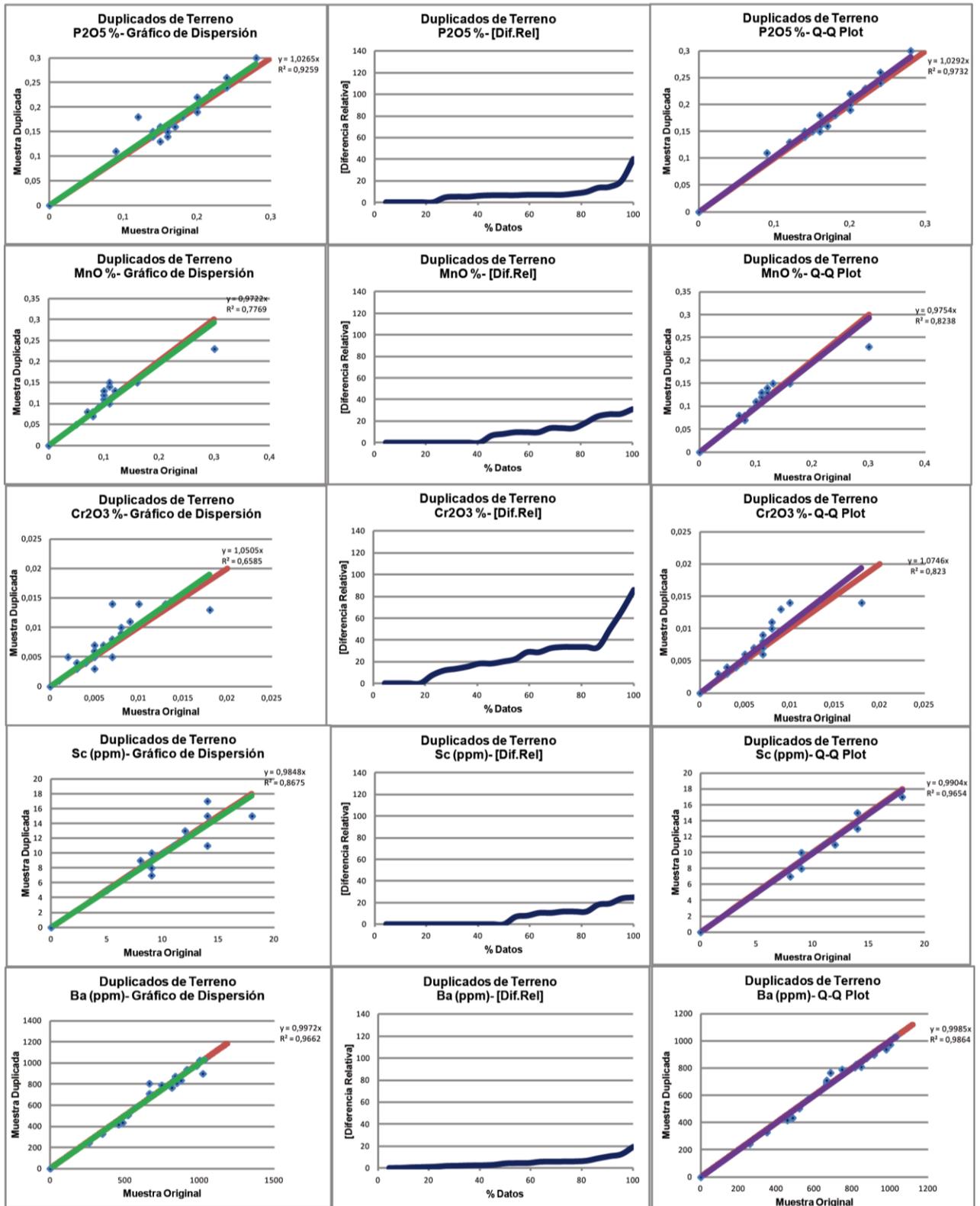


Figura C3. Gráficos control de calidad. De izquierda a derecha: Gráficos de dispersión, gráficos de diferencia absoluta y gráficos de cuantiles.

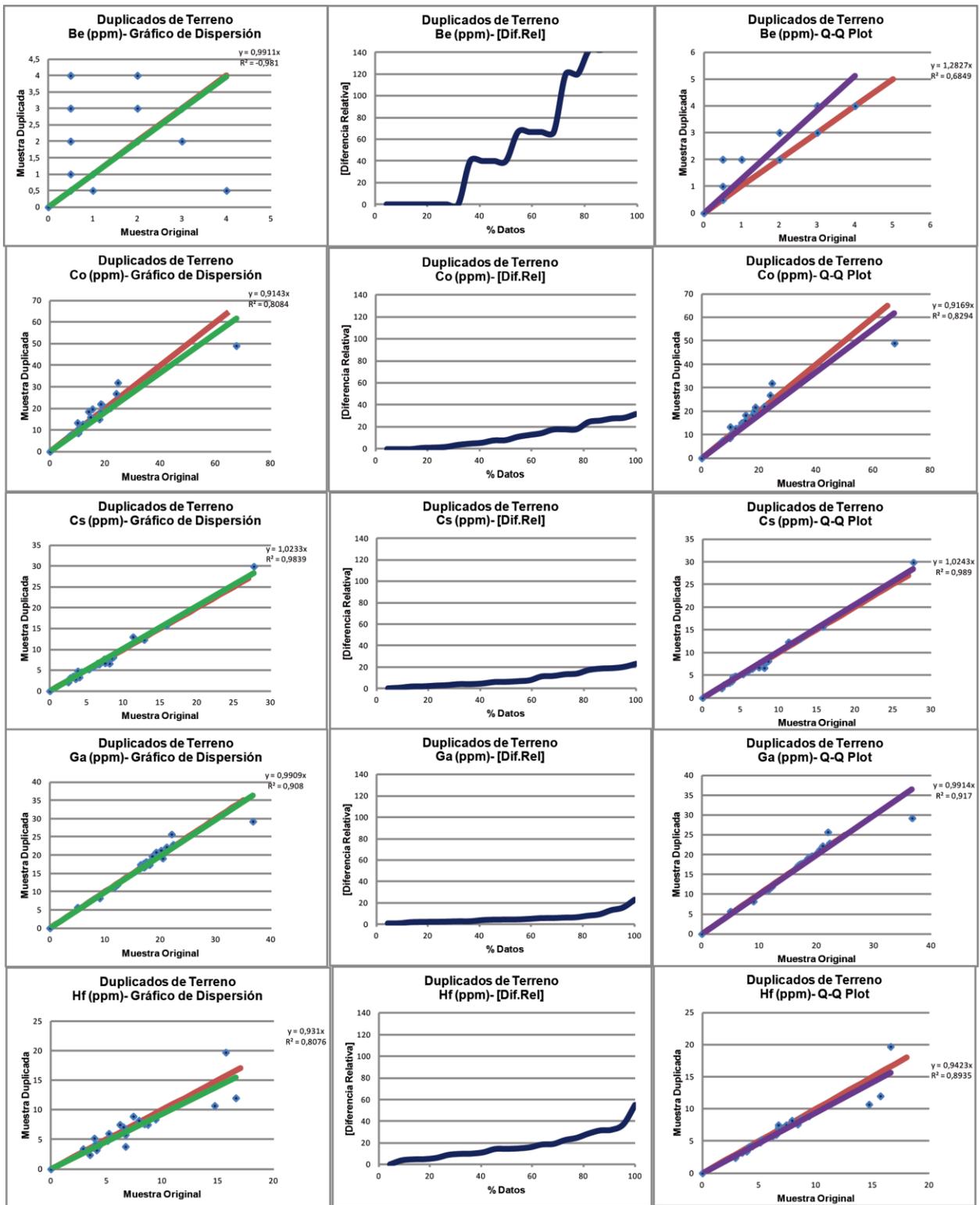


Figura C4. Gráficos control de calidad. De izquierda a derecha: Gráficos de dispersión, gráficos de diferencia absoluta y gráficos de cuantiles.

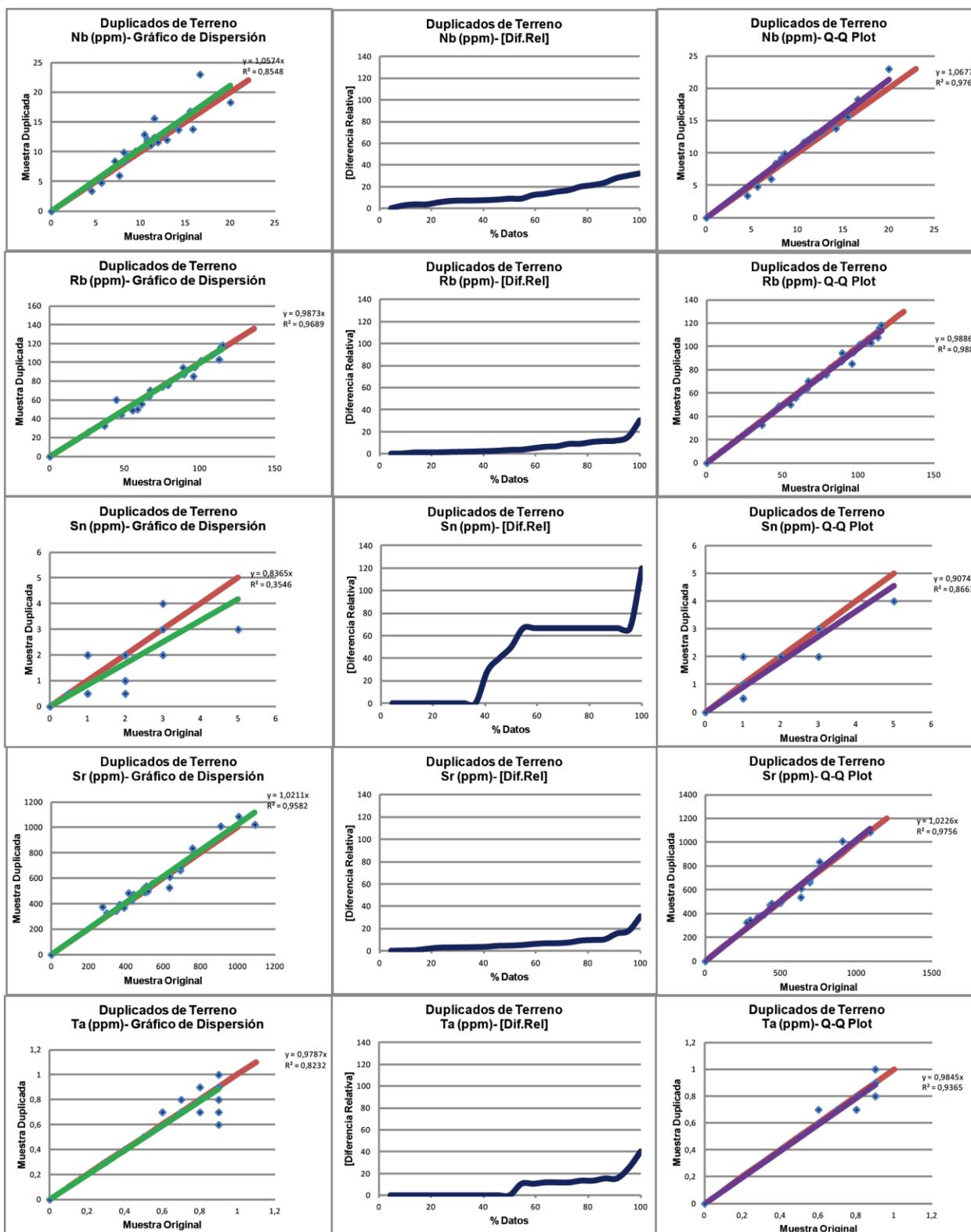


Figura C5. Gráficos control de calidad. De izquierda a derecha: Gráficos de dispersión, gráficos de diferencia absoluta y gráficos de cuantiles.

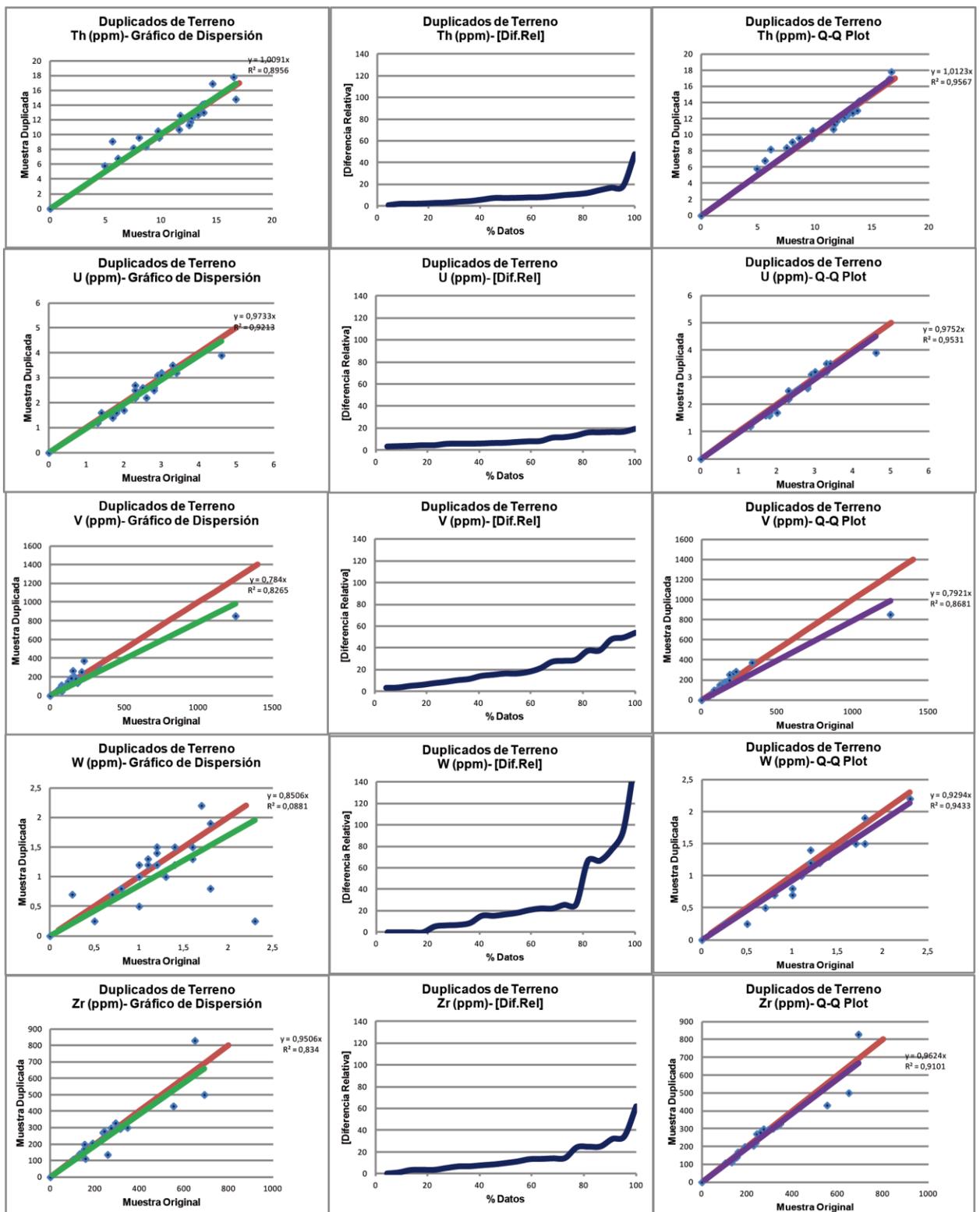


Figura C6. Gráficos control de calidad. De izquierda a derecha: Gráficos de dispersión, gráficos de diferencia absoluta y gráficos de cuantiles.

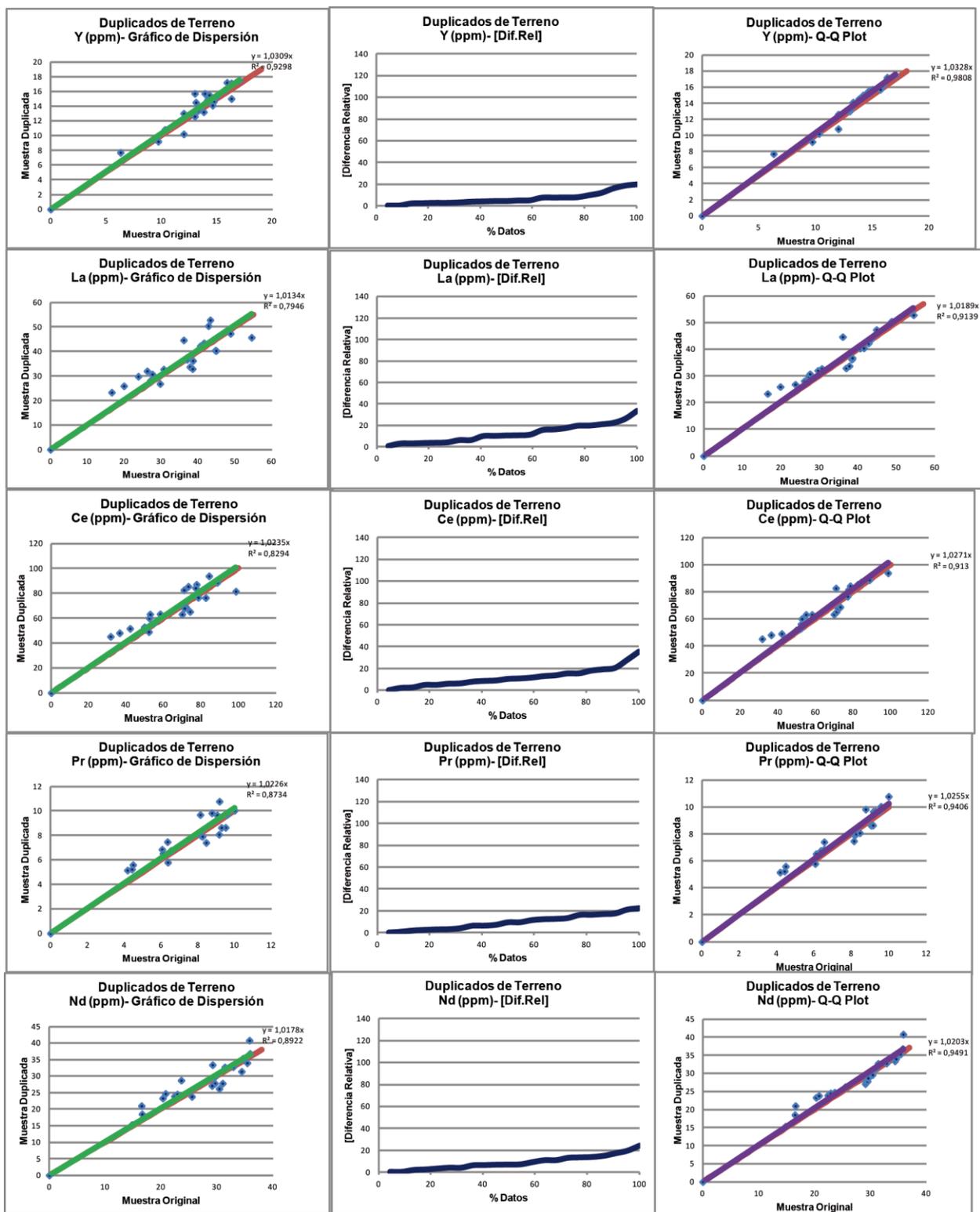


Figura C7. Gráficos control de calidad. De izquierda a derecha: Gráficos de dispersión, gráficos de diferencia absoluta y gráficos de cuantiles.

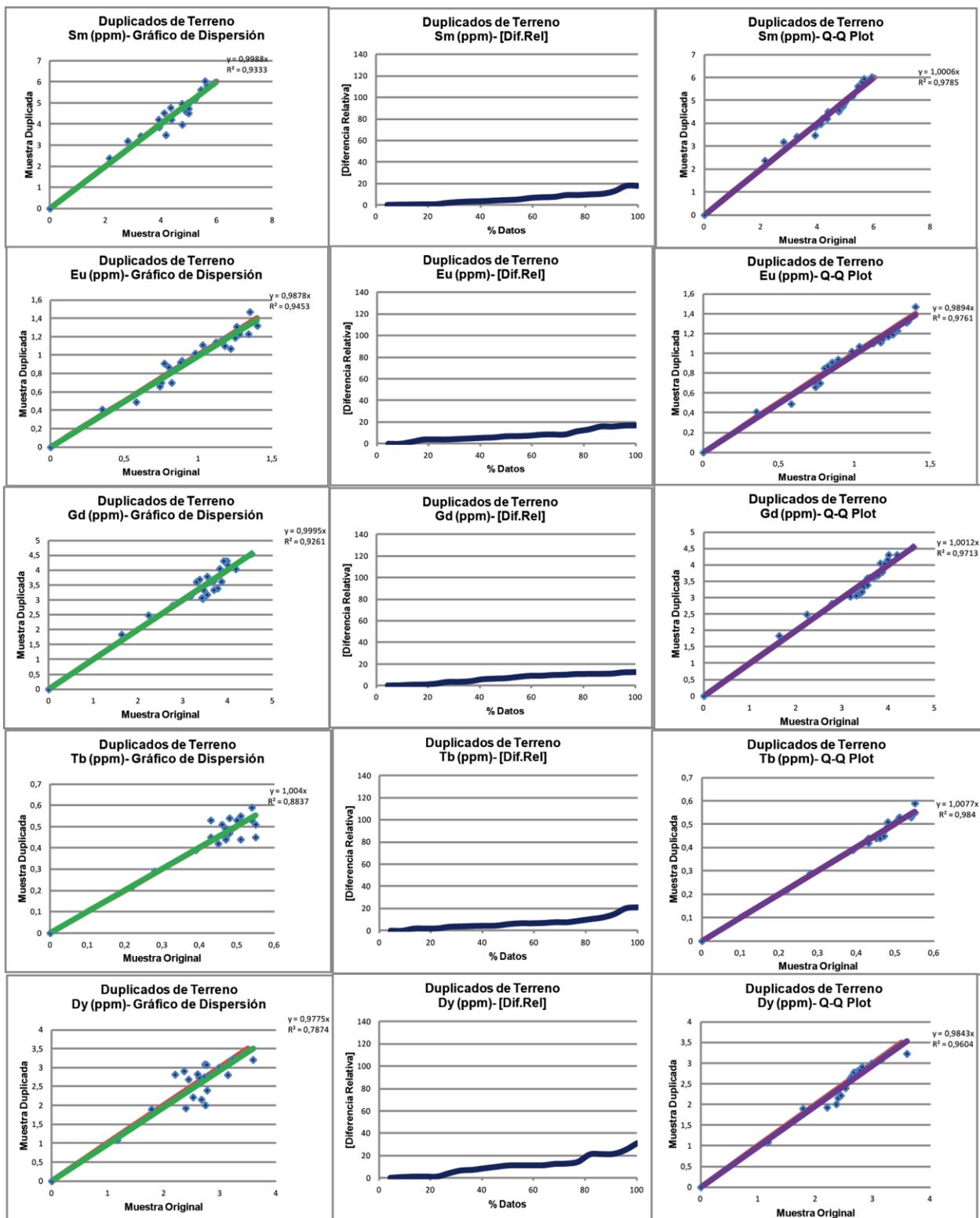


Figura C8. Gráficos control de calidad. De izquierda a derecha: Gráficos de dispersión, gráficos de diferencia absoluta y gráficos de cuantiles.

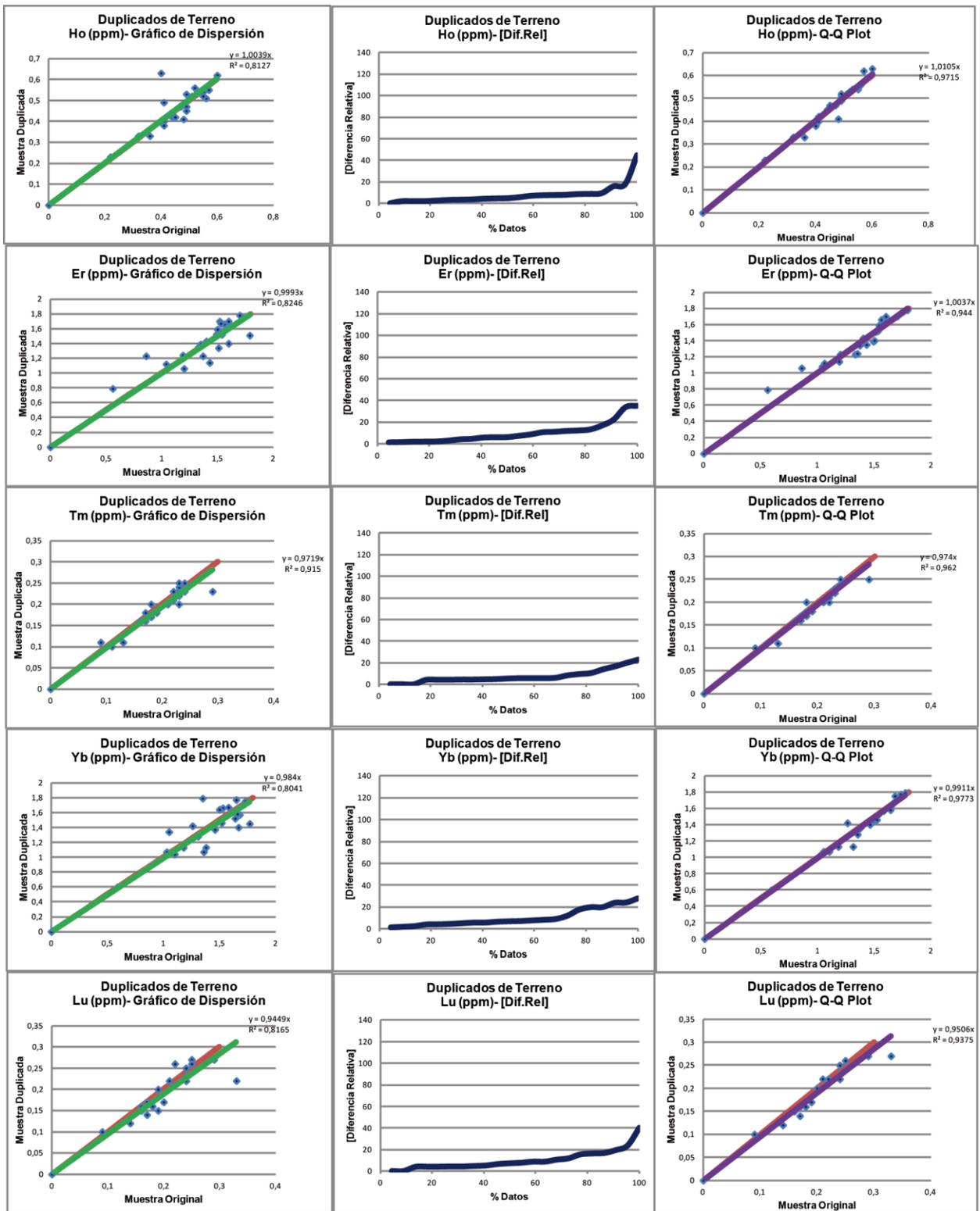


Figura C9. Gráficos control de calidad. De izquierda a derecha: Gráficos de dispersión, gráficos de diferencia absoluta y gráficos de cuantiles.

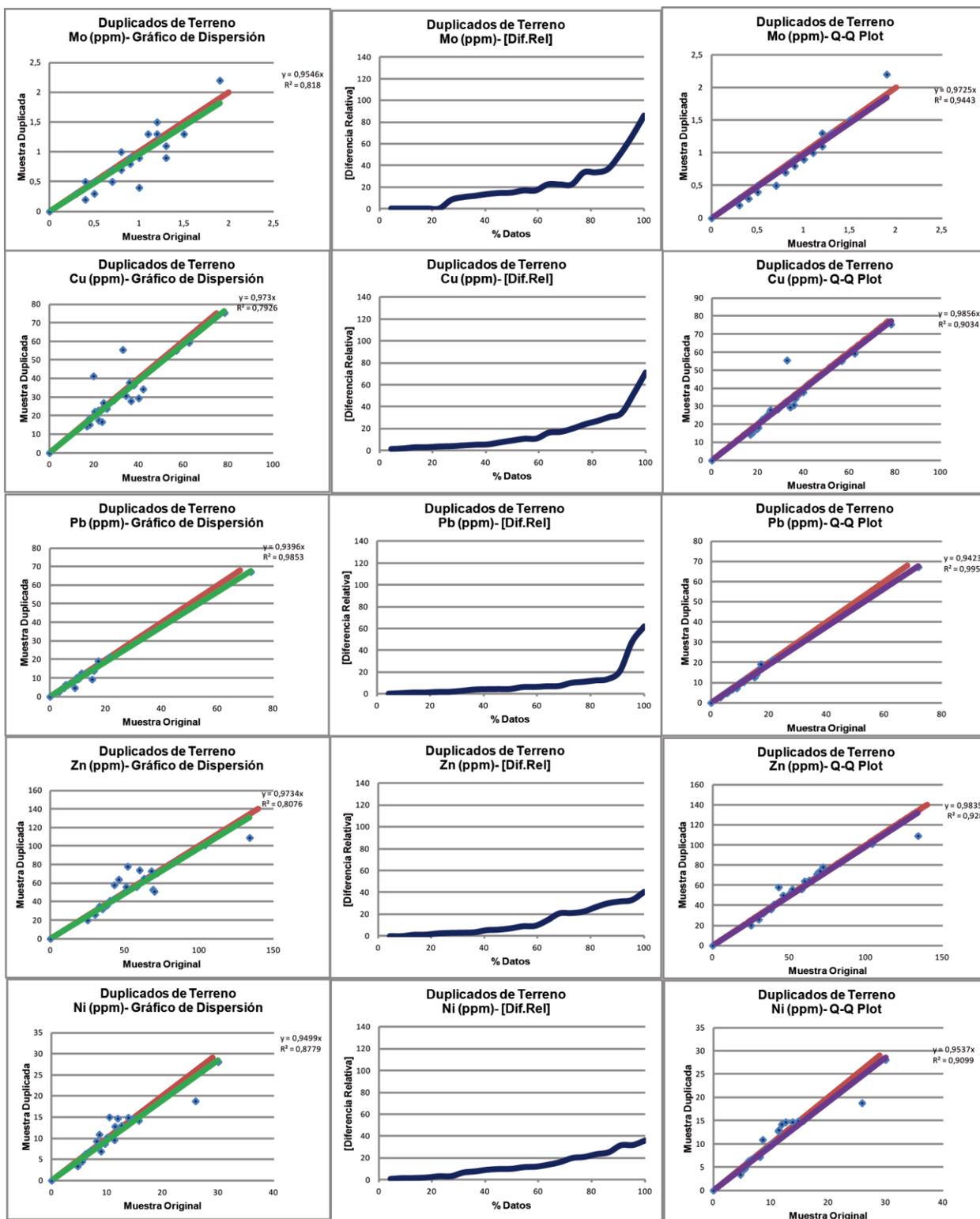


Figura C10. Gráficos control de calidad. De izquierda a derecha: Gráficos de dispersión, gráficos de diferencia absoluta y gráficos de cuantiles.

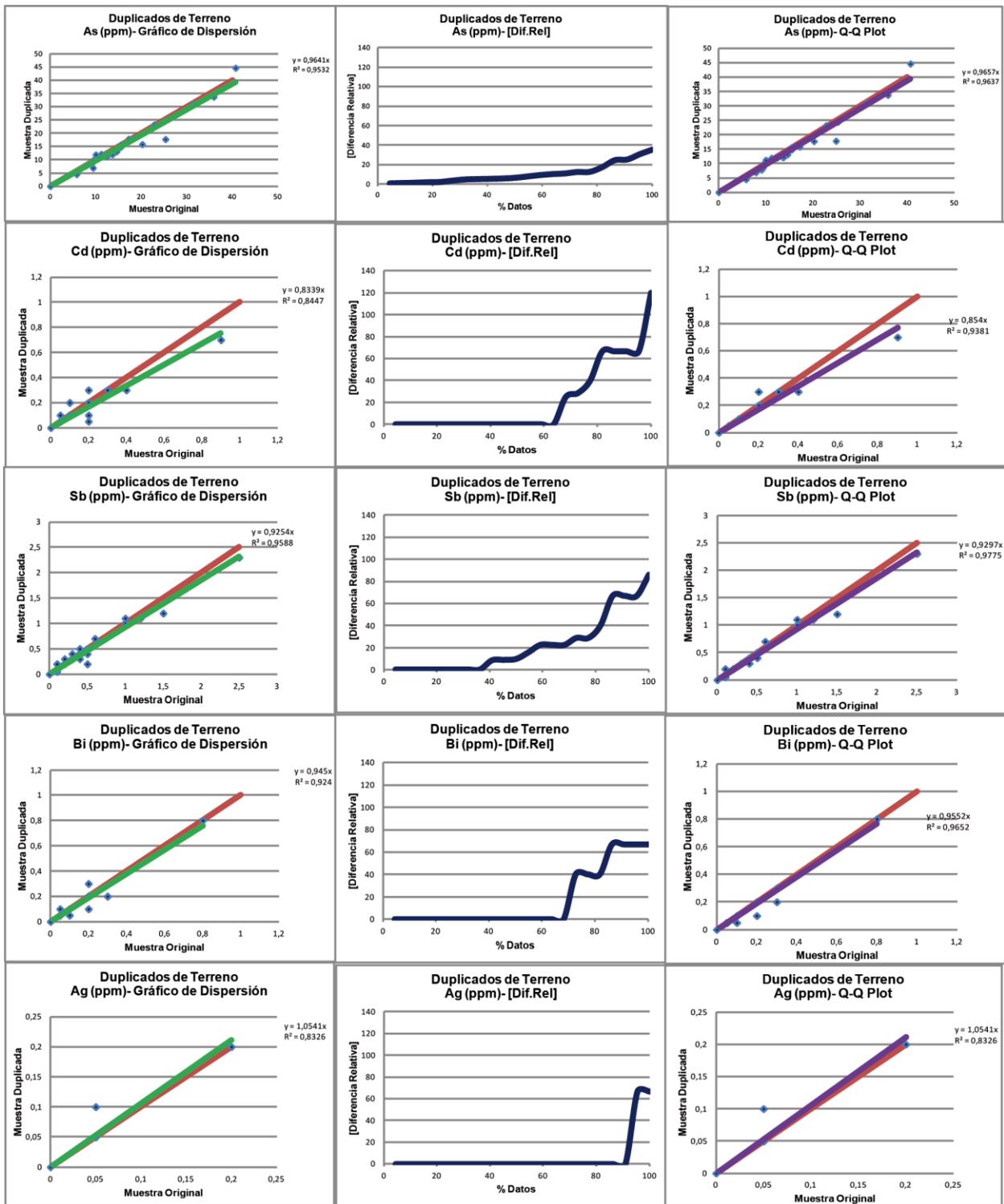


Figura C11. Gráficos control de calidad. De izquierda a derecha: Gráficos de dispersión, gráficos de diferencia absoluta y gráficos de cuantiles.

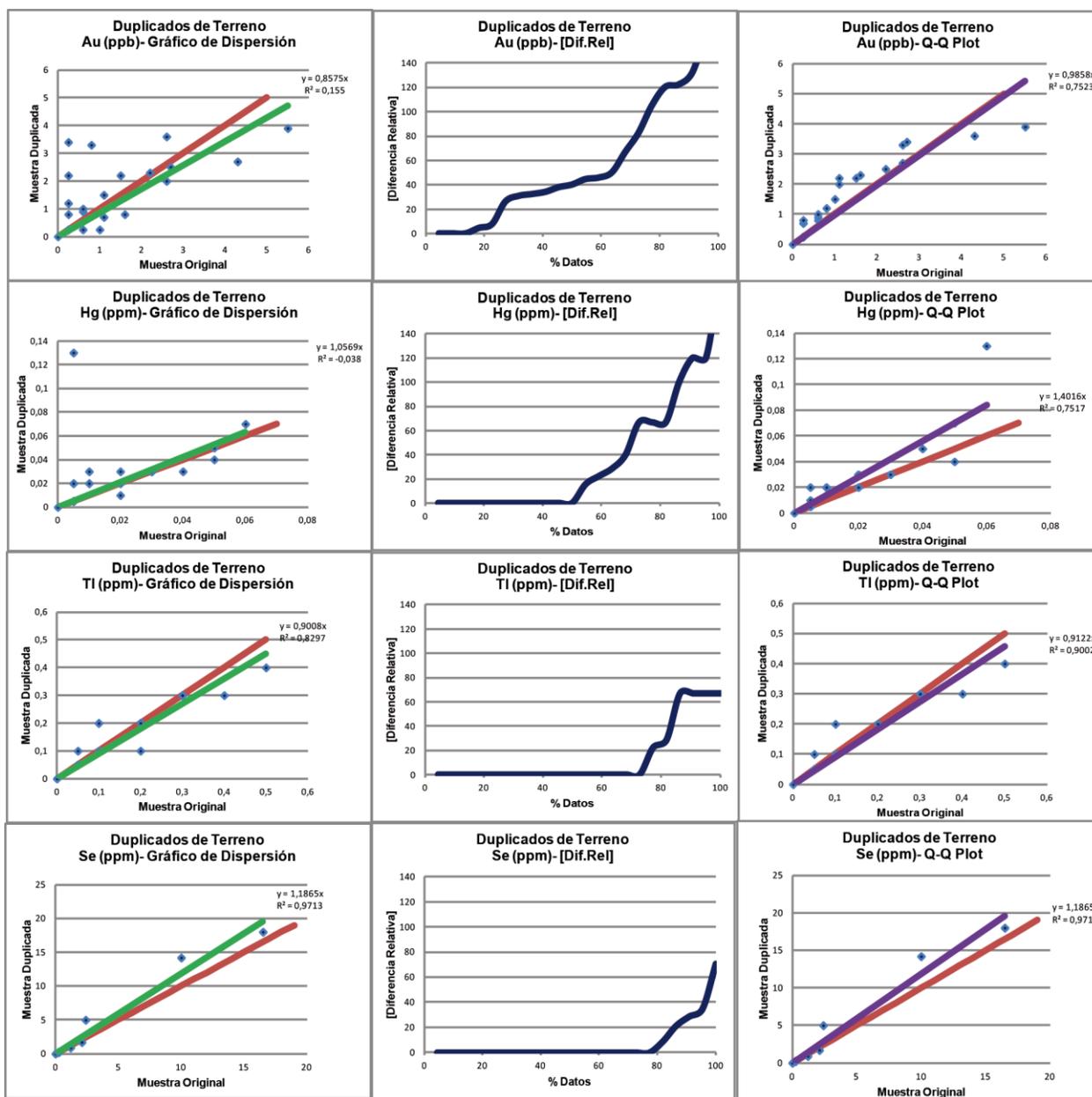


Figura C12. Gráficos control de calidad. De izquierda a derecha: Gráficos de dispersión, gráficos de diferencia absoluta y gráficos de cuantiles.