



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

**ESTUDIO AMBIENTAL Y ECONÓMICO: ANÁLISIS
MINERALÓGICO Y GEOQUÍMICO DE SEDIMENTOS DEL
SISTEMA FLUVIAL DEL RÍO LLUTA, XV REGIÓN DE
ARICA Y PARINACOTA, CHILE**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGO

LEONARDO ISMAEL BAEZA BRAVO

**PROFESOR GUÍA:
JUAN PABLO LACASSIE REYES**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
LUISA PINTO LINCOÑIR
MARTÍN REICH MORALES**

**SANTIAGO DE CHILE
NOVIEMBRE 2010**

Resumen

El presente trabajo tiene como objetivo evaluar ambiental y económicamente el sistema fluvial del río Lluta (Región de Arica y Parinacota), mediante el estudio de la composición química y mineralógica de la fracción <math><180\ \mu\text{m}</math> de 109 muestras de sedimentos activos y pre-industriales, recolectadas desde cauces de primer y segundo orden.

Los datos químicos fueron proyectados sobre diagramas de variación geográfica y procesados estadísticamente utilizando redes neuronales artificiales, a fin de identificar los patrones químicos de primer orden. Los resultados permiten la caracterización geoquímica y mineralógica de los sedimentos de este sistema fluvial y la evaluación de la influencia de factores naturales y antropogénicos.

Los factores naturales corresponden principalmente a: 1) la composición litológica del basamento rocoso; 2) a la presencia de bofedales, depósitos de azufre y zonas mineralizadas; 3) los efectos de dilución y cambios de pH generado en la confluencia con afluentes; 4) variaciones en el régimen hidrodinámico; 5) la alta tasa de evaporización de la zona. Los factores antropogénicos corresponden principalmente al efecto de la actividad minera y agroindustrial y al impacto de los centros poblados tales como Putre, Socoroma, Molinos, Taipimarca, Poconchile, Churiña, Guancarane y El Tambo.

En particular, los sedimentos activos y pre-industriales presentan elevadas concentraciones de arsénico, probablemente nocivas para la biota, las cuales estarían asociadas a factores geológicos tales como zonas de alteración hidrotermal, depósitos de azufre, actividad geotérmica y depósitos de ceniza.

La composición química y mineralógica de los sedimentos de la parte alta de la cuenca (ríos Caracarani, Qda. Huaylillas, Qda. Allane, Qda. Putre y Qda. Socoroma) refleja la presencia de zonas con alteración hidrotermal o mineralizadas. En este contexto, destaca el área de Alteración Hidrotermal Putre-Vilañuñumani, la cual estaría

aportando detritos ricos en minerales de mena y de alteración. Esto se refleja en su conspicuo patrón químico con elementos tales como Ba, Cu, Hg, Au, Bi, Se, Sn, Sc, Sb, W, Mo, S_{total} y As fuertemente correlacionados, lo que indica una marcada característica de esta zona de alteración y constituye una guía de exploración para acercarse a nuevos blancos prospectivos.

La presencia de minerales de uranio en la parte alta y baja de la cuenca, unido a las altas concentraciones de elementos fuertemente correlacionados como U y Th, refleja la presencia de zonas mineralizadas con uranio y constituye una guía de exploración para zonas con uranio primario y/o secundario en las áreas asociadas al cauce principal del río Lluta y las Qdas. Putre y Socoroma.

En general, las características mineralógicas y químicas de los sedimentos, muestran un potencial minero de la zona. En este sentido, los datos aportados por este estudio pueden proveer un marco referencial para monitoreos futuros de la calidad de los sedimentos en un hipotético escenario de intensa extracción minera.

**”Dedicado a mi hermana Jazmín, que me pidió
ser un buen Geólogo...”**

Agradecimientos

Quiero partir agradeciendo a mi familia, que me ha apoyado siempre, en particular a mis padres, que cimentaron las bases de los valores que hoy poseo. También a los amigos de la universidad y del barrio, que han estado conmigo en las buenas y en las malas. En particular, me gustaría agradecer a mi novia Tutú, que ha sido incondicional siempre, y que gracias a su apoyo emocional y científico aportó en el desarrollo de esta memoria. A mi profesor guía, JP, del que he aprendido en el ámbito académico y personal. Al Jano, por sus comentarios y buena onda. A los profesores de la comisión. A Tuco Díaz, que me acompañó y ayudó en terreno. A mi familia en Arica, que me acogió durante el período de campaña. A María Rosa, Quilo y Carlos Gómez. A Richard Soto, Miguel Tapia y Jorge Alfaro, que confiaron en mis capacidades como geólogo. Finalmente, agradecer al Proyecto Basal PB0809 y su sub-proyecto “Estudio de tres cuencas fluviales asociadas a la minería”, el cual se realizó en cooperación entre el AMTC (Advanced Mining Technology Center) de la Universidad de Chile, y el Servicio Nacional de Geología y Minería.

Tabla de contenidos

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Fundamentación del Problema.....	1
1.2 Hipótesis	2
1.3 Objetivos.....	3
1.3.1 Objetivo general	3
1.3.2 Objetivos específicos	3
1.4 Ubicación y vías de acceso.....	3
1.5 Antecedentes generales.....	5
1.6 Clima.....	5
1.6.1 Clima y drenaje regional	5
1.6.2 Clima y drenaje local	6
1.7 Metodología	9
1.7.1 Muestreo y análisis químico y mineralógico.....	9
1.7.2 Tratamiento estadístico de los datos	10
1.7.3 Redes Neuronales Artificiales.....	11
2. MARCO GEOLÓGICO	13
2.1 Unidades litoestratigráficas	13
2.1.1 Precámbrico	13
2.1.2 Paleozoico.....	13
2.1.3 Mesozoico	14
2.1.4 Cenozoico	15
2.2 Geología económica	20
2.2.1 Recursos Metálicos	21
2.2.1.1 Provincia Metalogénica de la Cordillera de la Costa.....	22
2.2.1.2 Provincia Metalogénica de la Depresión Intermedia.....	22
2.2.1.3 Provincia Metalogénica de la Precordillera-Cordillera de los Andes....	23
2.2.1.3.1 Franja Metalogénica del Paleoceno-Eoceno Inferior	23
2.2.1.3.2 Franja Metalogénica del Mioceno	24

2.2.2	Rocas y minerales industriales	25
2.2.2.1	Recursos en explotación	25
2.2.2.2	Recursos de potencial interés	26
2.2.2.3	Recursos de escaso interés actual.....	26
3.	RESULTADOS.....	29
3.1	Variación geográfica de la geoquímica de los sedimentos del río Lluta.....	29
3.2	Análisis geoquímico usando redes neuronales artificiales.....	44
3.3	Composición mineralógica de los sedimentos.....	55
3.4	Minerales pesados fracción no-magnética	58
4.	DISCUSIONES.....	60
4.1	Tramo alto cauce principal del río Lluta.....	60
4.2	Sector Quebrada Allane	75
4.3	Sector Quebrada Putre	76
4.4	Sector Quebrada Socoroma.....	85
4.5	Tramo bajo cauce principal río Lluta.....	89
4.6	Quebradas menores al oeste del río Lluta.....	102
4.7	Tierras Raras	103
4.8	Proveniencia según minerales pesados de la fracción no-magnética.....	107
4.9	Calidad ambiental del sedimento	111
5.	CONCLUSIONES.....	112
5.1	Escala regional	112
5.2	Río Lluta	113
5.3	Sector Quebrada Allane	115

5.4	Sectores Quebrada Putre y Socoroma.....	116
5.5	Quebradas menores al oeste del río Lluta.....	117
5.6	Otras consideraciones.....	117
	REFERENCIAS.....	118
	ANEXO A.....	127
	ANEXO B.....	148

Índice de Figuras

Figura 1.1: Ubicación y vías de acceso, líneas amarillas corresponden a caminos.....	4
Figura 1.2: Precipitaciones medias mensuales, ciudad de Putre (modificado de DGA, 2004)	7
Figura 1.3: Características hidrogeológicas de la cuenca del río Lluta. Modificado de Mapa Hidrogeológico de Chile, MOP-DGA.	8
Figura 1.4: Proceso de crecimiento de una red GCS.	12
Figura 2.1 (página anterior): Distribución geográfica de las muestras de sedimentos recolectadas en el sistema fluvial del río Lluta.	20
Figura 2.2: Provincias y franjas metalogénicas de la zona de estudio, modificado de Ordóñez y Rivera, 2004.	22
Figura 2.3 (página siguiente): Mapa de información geológica y de yacimientos metálicos e industriales.....	27
Figura 3.1 (página siguiente): Evolución, aguas abajo, de la concentración de los elementos mayores y en trazas asociados a la fracción < 180 µm de los sedimentos del Sistema Fluvial del río Lluta.	33
Figura 3.2: Continuación figura 3.1	35
Figura 3.3: Continuación figura 3.1	36
Figura 3.4: Continuación figura 3.1	37
Figura 3.5: Continuación figura 3.1	38
Figura 3.6: Continuación figura 3.1	39
Figura 3.7: Continuación figura 3.1	40
Figura 3.8: Continuación figura 3.1	41
Figura 3.9: Continuación figura 3.1	42
Figura 3.10: Continuación figura 3.1	43
Figura 3.11: a) Mapa neuronal resultante del análisis de los datos geoquímicos de los sedimentos activos del Sistema Fluvial del Río Lluta. Cada nodo (círculos) se representa con un número. b) Visualización bi-dimensional de la distribución de cada variable de entrada en el mapa neuronal.	51
Figura 3.12 (página anterior): Distribución geográfica de las muestras de sedimentos activos recolectadas en el sistema fluvial del río Lluta.	53
Figura 3.13: Detalle de la distribución geográfica de las muestras de sedimentos activos en el tramo bajo del río Lluta.....	53
Figura 3.14: Detalle de la distribución geográfica de las muestras de sedimentos activos en el tramo alto del río Lluta.....	54
Figura 3.15: Detalle de la distribución geográfica de las muestras de sedimentos activos en los sectores de las Qdas. Putre y Socoroma.....	55

Figura 3.16: imágenes de la fracción no magnética de minerales pesados; a) muestra LLUTA-LB-87, b) muestra LLUTA-LB-06, c) muestra LLUTA-LB-70 y d) muestra LLUTA-LB-29; simbología en anexo.	59
Figura 4.1: Distribución geográfica de las muestras de sedimentos pre-industriales recolectadas en el sistema fluvial del río Lluta.	62
Figura 4.2: Visualización bi-dimensional de la distribución de cada variable de entrada en el mapa neuronal asociadas a los sedimentos pre-industriales (ver inserto figura 4.1).	64
Figura 4.3: Concentración de coloides blanco-amarillentos en el sistema fluvial del río Lluta.....	66
Figura 4.4: Ubicación de ex mina de azufre Aguas Calientes, aledaña al río Azufre afluente del río Lluta en la Alta Cordillera (modificada de Google Earth).	70
Figura 4.5: Distribución geográfica de las muestras de sedimento activo recolectadas exclusivamente en el cauce principal del río Lluta.	72
Figura 4.6: Visualización bi-dimensional de la distribución de cada variable de entrada en el mapa neuronal asociadas a los sedimentos del cauce del río Lluta (ver inserto figura 4.5).	74
Figura 4.7: Modelo de elevación digital de la zona de estudio.	78
Figura 4.8: Evidencias de actividad agrícola: a) Tramo bajo del río Lluta, b) Sector Qda. Putre y c) Sector Qda. Socoroma.	79
Figura 4.9: Ocurrencia de costras salinas en el sistema fluvial del río Lluta. Específicamente en la Alta Cordillera.	80
Figura 4.10: a) Ubicación espacial de la Zona de Alteración Hidrotermal Putre-Vilañuñumani (modificada de Google Earth) y b) Capa rojiza de óxidos de Fe en el cauce de la Qda. Aroma.	83
Figura 4.11: Urbanización del tramo bajo del río Lluta.	95
Figura 4.12: Ubicación espacial de la planta desalinizadora de aguas ESSAT S.A. y muestra aguas abajo.	98
Figura 4.13: Punto de muestreo aguas abajo de la planta desalinizadora de aguas ESSAT S.A. (muestra LLUTA-JP-01).....	99
Figura 4.14 (página siguiente): Gallineros en el tramo bajo del río Lluta.	99
Figura 4.15: Patrones de tierras raras.....	106

Índice de Tablas

Tabla 3.1: Tabla de concentraciones promedio de los elementos, asociado a cada uno de los nodos resultantes del análisis estadístico con redes neuronales artificiales.	46
Tabla 3.2: Tabla resumen de la difracción de rayos X para sedimentos activos.	57
Tabla 4.1: Valores promedio de razones utilizadas en el análisis de proveniencia de sedimentos fluviales, asociados a cada nodo resultante del tratamiento estadístico mediante redes neuronales artificiales de la cuenca del río Lluta. Se indican los valores promedio de la UCC (McLennan, 2001).....	88
Tabla A1: Concentraciones de elementos mayores y traza, sedimentos activos	128
Tabla A2: Concentraciones de elementos mayores y traza, sedimentos pre-industriales	138
Tabla A3: Resultado del análisis mineralógico (difracción de rayos X) de los sedimentos estudiados. Sedimentos pre-industriales en celeste, sedimentos activos en blanco. .	141
Tabla A4: Resultados del análisis de la fracción no magnética de minerales pesados.	144
Tabla B1: Resumen de prospectos metálicos, incluye simbología.	149
Tabla B2: Resumen prospectos industriales.	149

1. Introducción

1.1 Fundamentación del Problema

En un sistema fluvial existen diversos factores que modifican la composición química y mineralógica a través del área de drenaje. Entre los factores naturales se incluyen la geología del basamento, topografía, clima, energía de transporte, e hidrodinámica del ambiente de depositación, siendo probablemente la fuente litológica el parámetro más importante (Sensarma et al., 2008), mientras que los factores antropogénicos son principalmente actividades mineras, agrícolas e industriales y el grado de urbanización de los sistemas fluviales (Callender, 2003; Le Maire et al., 2006; Lacassie, 2009).

La composición química y mineralógica de los sedimentos fluviales es utilizada, comúnmente, para monitorear la influencia de estos factores naturales y el impacto de los factores antropogénicos (Birch et al., 2001; Ohta et al., 2005; Gordeev et al., 2004; Ortiz y Roser, 2006; Filgueiras et al., 2004; Oyarzun et al., 2007). Los sedimentos tienen una alta capacidad de almacenamiento para contaminantes (Salomons y Stigliani, 1995); en particular, pueden actuar como reservorios de metales pesados (Power y Chapman, 1992) y tienen tiempos de residencia que van desde cientos a miles de años (Macklin et al., 2006). Luego, existe una alta probabilidad de que éstos elementos entren en la cadena trófica acuática y se bio-acumulen en plantas y animales (Hellyer, 2000), poniendo en riesgo la salud humana y ambiental.

En Chile, de norte a sur, existen numerosos sistemas fluviales en cuyas cuencas de drenaje se realizan diversas actividades antropogénicas. Sin embargo, el número de estudios relacionados a la contaminación y particularmente a la calidad medio-ambiental de los sedimentos de estos sistemas es limitado (e.g. González et al., 2007; Oyarzún et al., 2003; Oyarzun et al., 2004; Oyarzun et al., 2007; Lacassie, 2009).

En este trabajo se estudió la composición química y mineralógica de las muestras de sedimentos activos y pre-industriales recolectados en los principales ríos del sistema fluvial del río Lluta (ríos Lluta, Caracarani, Colpitas, Qda. Socoroma y Qda. Putre). Este sistema se ubica en la XV Región de Arica y Parinacota al norte de la ciudad de Arica. Hudson-Edwards (2003) y De Carlo et al. (2004) mostraron que en los sistemas fluviales el transporte de los elementos mayores y en traza está principalmente controlado por la carga en suspensión. Por lo tanto, en el presente estudio se estudia la fracción <math><180\ \mu\text{m}</math> de los sedimentos recolectados, ya que según Ortiz y Roser (2006) se considera como representativa de la carga en suspensión. Los resultados de los análisis químicos (ICP-MS) y mineralógicos (XRD) de la fracción <math><180\ \mu\text{m}</math> fueron analizados utilizando diagramas convencionales y redes neuronales no-supervisadas.

Este estudio se enmarca dentro del Proyecto Basal PB0809 y de su sub-proyecto “Estudio de tres cuencas fluviales asociadas a la minería”. Este sub-proyecto se realizó en cooperación entre el AMTC (Advanced Mining Technology Center) de la Universidad de Chile, y el Servicio Nacional de Geología y Minería.

1.2 Hipótesis

De acuerdo a lo planteado en la fundamentación del problema, la principal hipótesis de este estudio es que la composición química y mineralógica de los sedimentos fluviales refleja la influencia de factores naturales y antropogénicos de la cuenca de drenaje asociada. Los factores naturales corresponden principalmente a los cambios litológicos del basamento rocoso de la región de estudio, y los factores antropogénicos se relacionan con actividades tales como agricultura, industria, minería y el grado de urbanización.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Realizar un estudio ambiental y económico de la cuenca del río Lluta, mediante el análisis geoquímico y mineralógico de los sedimentos fluviales activos y pre-industriales de su cuenca de drenaje.

1.3.2 Objetivos específicos

- Estimar variaciones históricas en la química y mineralogía de los sedimentos de este sistema fluvial mediante la comparación de sedimentos activos y pre-industriales.
- Evaluar cómo las actividades antropogénicas (minería, agricultura, industria y urbanización) y las diferencias geológicas de la cuenca estudiada afectan a la composición geoquímica y mineralógica de los sedimentos fluviales.
- Identificar posibles zonas de interés económico de acuerdo a la geoquímica y mineralogía de los sedimentos activos de la zona.
- Evaluar la existencia de contaminación, mediante una comparación directa con estándares internacionales.

1.4 Ubicación y vías de acceso

El área de estudio se encuentra ubicada en el extremo norte de Chile, XV Región de Arica y Parinacota, entre los paralelos 18 y 19° S aproximadamente (al sur

del límite con Perú), y entre la línea de la costa pacífica (ca. 70°18'52''W) y el límite con Bolivia (ca. 69°W).

El principal acceso a la zona de estudio es la carretera Panamericana 5 Norte, que cruza la parte occidental del área de trabajo en dirección norte-sur. La carretera Panamericana lleva a la frontera con Perú, si se sigue al norte de Arica. Hacia el este de Arica, el camino internacional o ruta CH-11, que se encuentra completamente pavimentado, conduce a las localidades de Poconchile, Molinos, Zapahuira y Putre y hasta el paso de Tambo Quemado, en el límite con Bolivia. Existen caminos secundarios en la zona, generalmente ripiados, que unen Arica o Putre con las localidades Ausípar, Codpa, Esquiña, Belén, Tignámar, Alcérreca, Caquena y Guallatiri, entre otras. Además, hay disponible numerosos senderos y huellas secundarias que permiten el acceso, en vehículo, en animales de carga o a pie. Todos estos accesos, principales y secundarios, cubren gran parte de la zona de estudio (figura 1.1).



Figura 1.1: Ubicación y vías de acceso, líneas amarillas corresponden a caminos.

1.5 Antecedentes generales

El sistema fluvial del río Lluta abarca una superficie de 3.438 km² y cubre parcialmente el territorio de las provincias Arica y Parinacota. Los asentamientos humanos que componen la cuenca son 33 y corresponden a localidades rurales. El poblado de mayor importancia es la localidad de Putre, ubicado en la zona centro-oriente de la cuenca a una altitud de 3.600 m.s.n.m. El río Lluta tiene una longitud de 147 km, siendo sus principales tributarios los ríos Azufre y Caracarani, y las quebradas Allane, Putre y Socoroma (figura 1.1). El río presenta escurrimiento exorreico permanente y su cuenca se clasifica como preandina. La cuenca se caracteriza por la escasez de precipitaciones y, por tanto, la totalidad de sus suelos están desprovistos de vegetación a excepción del sector bajo del valle donde el uso del suelo es agrícola (DGA, 2004). Los usos como recurso hídrico en la cuenca del río Lluta son agua potable, y asociado a la agricultura y minería. Las actividades económicas que se desarrollan en la zona son principalmente turismo, servicios y comercio (Putre), agricultura (parte baja de la cuenca) y actividad minera.

1.6 Clima

1.6.1 Clima y drenaje regional

El clima de la Región de Arica y Parinacota, ubicada en la parte norte del desierto de Atacama, se caracteriza por un clima subtropical desértico o árido (a hiperárido), normal o marginal de altitud. La temperatura media varía entre 20-15°C y las precipitaciones son menores a 3 mm; sin embargo, localmente, existen importantes variaciones de temperatura entre el día y la noche. En la región costera y del fondo de valles, en la parte occidental de la Depresión Central, se observa abundante nubosidad y alta humedad relativa del aire, provenientes del Océano Pacífico. Más al este, en la

Precordillera, las precipitaciones son más escasas y alcanzan excepcionalmente 60 mm al año (García et al., 2004).

En la Alta Cordillera, el clima es húmedo, de estepa de altitud. La temperatura media varía entre 9-0°C, y las precipitaciones de 400-100 mm/a. Se presentan precipitaciones nivales en invierno y abundantes pluviales en verano, producidas por el llamado Invierno Altiplánico, que proviene de la cuenca Amazónica austral y más al este del océano Atlántico (García et al., 2004).

En la región de Arica y Parinacota, se distinguen dos sistemas de drenaje principales, uno oriental y otro occidental. Estos están separados por las cimas del Cordón Belén y, hacia el norte y sur de éste, por edificios volcánicos. El sistema oriental es de tipo endorreico intracordillerano y el sistema occidental es exorreico. El sistema occidental drena el borde oeste de la Alta Cordillera y desagua al Océano Pacífico (García et al., 2004).

El sistema occidental comprende las cuencas de los ríos mayores Lluta, Azapa, Vítor y Camarones, y las quebradas menores Escritos y Gallinazos. La superficie de las cuatro cuencas mayores, antes mencionadas, es de aproximadamente 3.438 km², 3.231 km², 2.269 km², 2.344 km² respectivamente. El caudal medio de anual de los ríos Lluta y Azapa, es estaciones fluviométricas de la Depresión Central, es de 2,35 a 1,44 m³/s y de 1,28 m³/s (García et al., 2004).

1.6.2 Clima y drenaje local

Específicamente, en la cuenca del río Lluta, el clima característico es de tipo desértico en todas sus variantes a través de su cauce, es decir, desértico costero, desértico de interior o normal y desértico de altura. Característico de este clima es la escasez de precipitaciones, las cuales se limitan a las áreas superiores de la cuenca en el sector cordillerano (DGA, 2004).

La precipitación media anual en la cuenca del río Lluta, aumenta gradualmente desde 0,4 mm en el sector bajo (localidad de Poconchile), a 237,7 mm en el sector alto de la cuenca (ciudad de Putre). Estos montos de precipitación se concentran, mayormente, en el período estival producto del llamado invierno Altiplánico o “Boliviano” (DGA, 2004). Los antecedentes disponibles actualmente, corresponden únicamente a los montos de precipitación media mensual registrada por la estación Pluviométrica de Putre, los cuales se presentan en la siguiente figura:

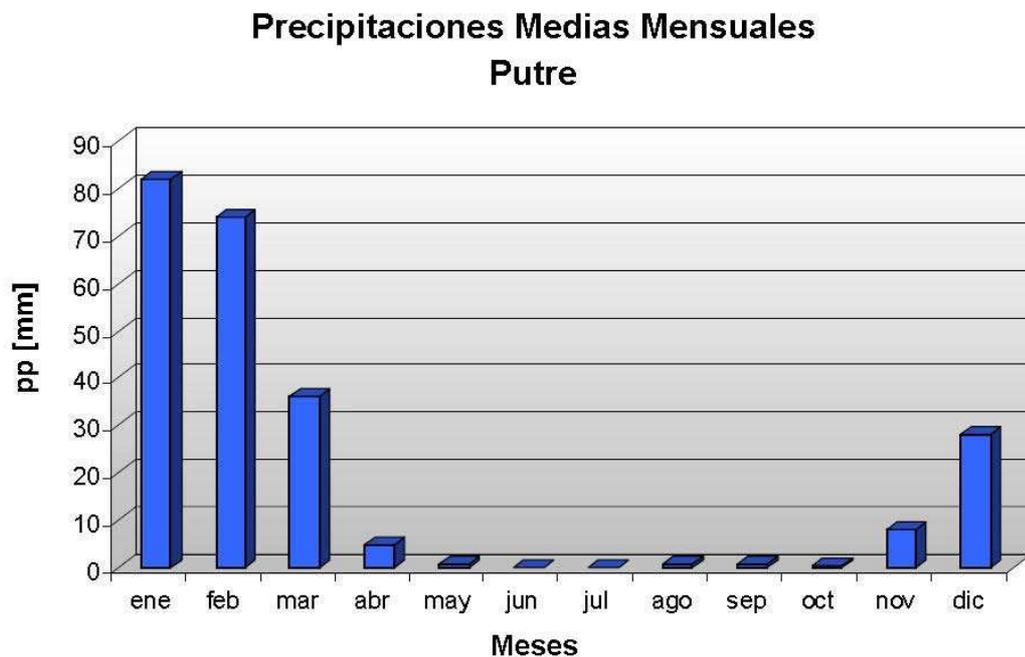


Figura 1.2: Precipitaciones medias mensuales, ciudad de Putre (modificado de DGA, 2004)

Las temperaturas medias de la cuenca del río Lluta dependen de la zona en la que ésta es medida. Así la temperatura media anual registrada en el sector bajo de la cuenca, es de 19,1°C; mientras que en el sector alto es de 8,4°C. La variabilidad de temperatura que presenta la cuenca en ambos sectores, es de 10,7°C (DGA, 2004).

La escorrentía superficial media anual registrada en la cuenca, alcanza valores no superiores a 1 mm/año en el sector bajo del valle del río Lluta hasta el sector de la

Quebrada Socoroma. Desde Socoroma, hacia los sectores altos de la cuenca, los valores de escorrentía aumentan hasta llegar a los 50 mm/año (Quebradas Caracarani, Colpitas y Río Azufre; DGA, 2004).

Desde el punto de vista de disponibilidad de los recursos hídricos, las pérdidas de agua por evaporación son altas en comparación a otras cuencas. Estas pérdidas se registran en el sector Bajo del Valle del Río Lluta, en los Humedales del sector alto de la cuenca y en la Laguna Blanca. Los valores promedio de evaporación registrados anualmente en la cuenca, alcanzan los 2.081 mm (DGA, 2004).

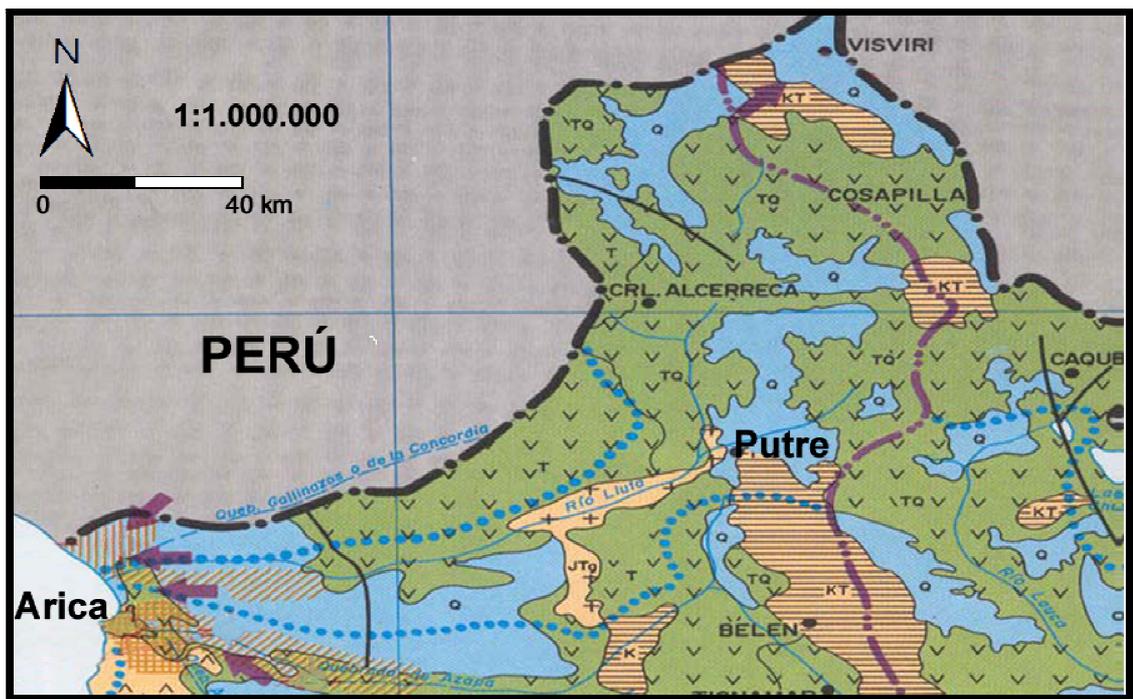


Figura 1.3: Características hidrogeológicas de la cuenca del río Lluta. Modificado de Mapa Hidrogeológico de Chile, MOP-DGA.

1.7 Metodología

1.7.1 Muestreo y análisis químico y mineralógico

De un total de 83 puntos de muestreo, separados por una distancia promedio de aproximadamente 4 km, se recolectaron un total de 109 muestras provenientes de canales activos a lo largo del sistema fluvial del Río Lluta (sedimentos activos y pre-industriales). Los sedimentos pre-industriales se obtuvieron desde terrazas fluviales antiguas, aledañas a los puntos de muestreo de sedimentos fluviales activos. Las muestras de sedimentos pre-industriales se recolectaron con una pala plástica (PVC), a distintas alturas de la terraza fluvial, para obtener una muestra representativa y luego fueron guardadas en una bolsa plástica (PVC). El muestreo se realizó en el mes de Diciembre, a principios del período estival del año 2009, de esta manera se evitó los grandes caudales que se producen debido al invierno altiplánico y se maximizó la recolección de sedimentos activos. Las muestras de sedimentos activos tienen un peso de entre 2 a 4 Kg y cada una de ellas corresponde a un compósito de sub-muestras de sedimento fluvial recolectadas en superficie, entre 0 y 5 cm de profundidad, a lo largo de un tramo de entre 20-50 m. Se utilizó una pala plástica (PVC) para recolectar las sub-muestras y luego fueron mezcladas y guardadas en una bolsa plástica (PVC). Las muestras de sedimentos activos y pre-industriales fueron secadas a temperatura ambiente (25°C) y luego tamizadas en mallas de acer o inoxidable con el propósito de separar la fracción fina < 180 µm. Posteriormente, la fracción < 180 µm de cada muestra fue pulverizada en un mortero de ágata. Luego, el material pulverizado (1 gramo) fue sintetizado con peróxido de sodio durante 1 hora a 500 °C y luego digerido con una mezcla de 72 ml de H₂O₂ al 1 % (v/v) y 28 ml de HCl al 50% (v/v). El material digerido se analizó en el laboratorio ACME con un equipo ICP-MS. Los resultados obtenidos de los análisis químicos se muestran en las tablas A1 y A2. También se determinó la composición mineralógica de la fracción < 180 µm de 41 muestras seleccionadas de sedimentos activos y pre-industriales, mediante difracción de Rayos-X (equipo modelo Pananalytical X'pert Pro) en el laboratorio del SERNAGEOMIN. Estos resultados se muestran en la tabla A3. Finalmente, se realizó una separación de

minerales pesados a 4 muestras de sedimentos activos escogidas para estos fines. En la figura 2.1 se muestra el tipo de análisis realizado en cada punto de muestreo.

1.7.2 Tratamiento estadístico de los datos

El set de datos incluye los análisis químicos de la fracción < 180 μm de las 109 muestras recolectadas a lo largo del curso del Río Lluta, que incluyen sedimentos activos y pre-industriales. Las muestras presentan información para 57 elementos químicos: 11 óxidos mayores (wt% de SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 , K_2O , Na_2O , CaO , Cr_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO , MnO y P_2O_5), 46 elementos traza (ppm de Ba, Be, Co, Cs, Ga, Hf, Nb, Rb, Sc, Sn, Sr, Ta, Th, U, V, W, Zr, Y, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Mo, Cu, Pb, Zn, Ni, As, Cd, Sb, Bi, Ag, Hg, Tl, Se; y ppb de Au), y los valores C_{total} y S_{total} en wt%. A través del lecho del río Lluta, se graficaron las concentraciones de los elementos de acuerdo a su evolución geográfica, desde la cabecera hasta la desembocadura, del cauce principal del río Lluta. De esta manera, se generaron las figuras entre 3.1 a 3.10, donde se observa la evolución aguas abajo de estos elementos, recorriendo el río Lluta en toda su extensión. Los demás puntos de muestreo se concentran, principalmente, en tres tributarios que, de norte a sur, recorren la Qda. Allane, Qda. Putre y Qda. Socoroma, respectivamente. Los puntos muestreados se componen de una muestra de sedimento fluvial activo y algunos puntos escogidos, poseen además, una muestra de sedimento pre-industrial. Sobre este set de datos se realizó un tratamiento estadístico utilizando redes neuronales artificiales no-supervisadas del tipo Growing Cell Structures (GCS; Fritzke, 1994). Esta técnica de análisis multivariado ha sido aplicada a diversos estudios geoquímicos de distintos materiales y entre sus ventajas permite visualizar la estructura de grupos (clusters) del set de datos y visualizar las relaciones lineales y no-lineales existentes entre las variables (e.g., Lacassie et al., 2004a; Lacassie et al., 2004b; Lacassie et al., 2006).

1.7.3 Redes Neuronales Artificiales

Las Redes Neuronales Artificiales (RNA) se definen, generalmente, como redes de procesadores individuales (“unidades o neuronas”) que tienen la posibilidad de almacenar una pequeña cantidad de memoria local. Estas unidades están interconectadas por canales de comunicación o “conexiones”, las cuales usualmente transportan datos numéricos (Lacassie, 2003).

Se usan RNA del tipo Growing Cell Structures (GCS; Fritzke, 1994), para visualizar diferencias geoquímicas entre los sedimentos estudiados. Estas son redes auto-organizativas que se generan gradualmente durante el proceso incremental de auto-aprendizaje y es determinada completamente por el problema en cuestión. Una red GCS típica puede ser descrita como una matriz de salida bi-dimensional, donde las unidades están organizadas formando triángulos (figura 1.4). Mediante iteraciones se produce el proceso de aprendizaje y la reorganización de la red, en la que se determina donde insertar nuevas unidades en la misma. Luego del aprendizaje, la estructura de la red GCS corresponde a un número determinado de unidades o nodos, donde cada uno de ellos se encuentra conectado con sus vecinos inmediatos a través de vértices (figura 1.4). En términos prácticos, las GCS permiten proyectar grandes conjuntos de datos multidimensionales en representaciones bi-dimensionales o mapas de características donde la información más relevante para la tarea de agrupar, se puede rescatar a partir de inspección visual (Lacassie, 2004).

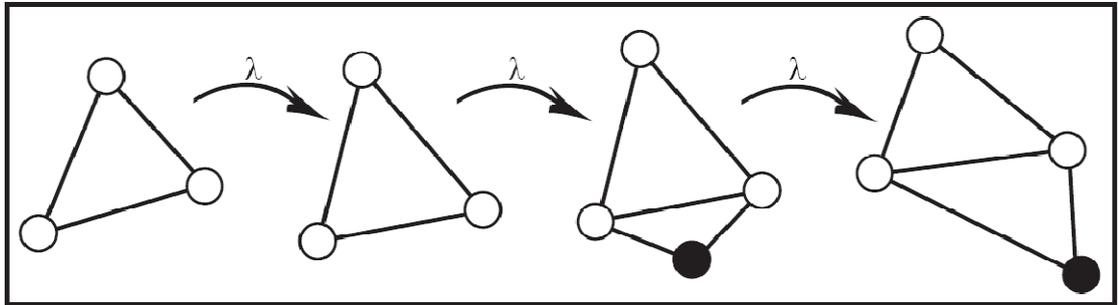


Figura 1.4: Proceso de crecimiento de una red GCS.

La figura 1.4 muestra una estructura inicial (izquierda) con unidades correspondientes a los vértices del triángulo. Luego de un número λ constante de iteraciones la estructura se reorganiza con o sin inserción de una nueva unidad (círculo negro), la que se conecta localmente a las unidades presentes en su vecindad (Lacassie, 2003).

Tanto el análisis de visualización como el de clustering son del tipo “no supervisado”, es decir, se trabaja con la información proveída por los datos a analizar, minimizándose así la acción subjetiva de del experimentador. La etapa de visualización de los datos permite obtener una expresión gráfica bi o tri-dimensional del problema de n dimensiones de discriminación de proveniencia sedimentaria, con n equivalente al número de variables del problema. Cuando estas visualizaciones permiten distinguir grupos de datos interrelacionados o “clusters”, así como las interrelaciones entre las variables utilizadas se llama a esta etapa Clustering. De esta manera, la red agrupa en un mismo nodo muestras similares geoquímicamente. Entre nodos cercanos también hay similitud geoquímica, pero en menor grado que dentro de un mismo nodo.

2. Marco Geológico

2.1 Unidades litoestratigráficas

2.1.1 Precámbrico

Este período geológico está representado por rocas metamórficas de edad precámbrica-silúrica, agrupadas en la unidad pCSm, que corresponden al complejo metamórfico de Belén (García et al., 2004; Ordóñez y Rivera, 2004). El Complejo Metamórfico de Belén (CMB) aflora en la porción suroriental de la región, en las cercanías de Belén y Tichámar, el cual formaría parte del Cratón Arequipa-Antofalla en el borde occidental de Sudamérica (Ordóñez y Rivera, 2004; figura 2.1). El CMB está constituido por una gran variedad de tipos litológicos, de los cuales se destacan esquistos, anfibolitas y gneisses (García et al., 2004). El protolito del CMB es variado. Las anfibolitas corresponderían a rocas de afinidad toleítica a calco-alcalina, mientras que para los esquistos, por la presencia de muscovita y estauroлита, se sugiere un protolito sedimentario pelítico (Ordóñez y Rivera, 2004).

2.1.2 Paleozoico

Las rocas paleozoicas incluye una secuencia de estratos del Carbonífero-Pérmico (?) denominados informalmente, Estratos Quichoco (García et al., 2004). Los Estratos de Quichoco se encuentran sobreyaciendo en discordancia angular al CMB y subyaciendo, localmente, en discordancia angular a la Formación Lupica. Alcanzan un espesor máximo de 150 m y están formados principalmente por areniscas y conglomerados, de colores rojo, pardo y verde.

2.1.3 Mesozoico

Específicamente, el Jurásico-Cretácico es más amplio en la región y está representado por rocas sedimentarias, volcánicas e intrusivas. En la Cordillera de la Costa presente en la zona de estudio, aflora una sucesión volcanosedimentaria marina, constituida por andesitas, andesitas basálticas, areniscas y calizas fosilíferas, que representan el arco volcánico Jurásico. Estas rocas están agrupadas en la unidad Jvs que incluye a la Formación Camaraca (Ordóñez y Rivera, 2004; García et al., 2004; figura 2.1), de edad Bajociano Superior-Caloviano. La unidad Jsv incluye a las formaciones Los Tarros (García et al., 2004), de edad Oxfordiano y Livícar (García et al., 2004), correspondiente al período Lias-Neocomiano. Afloran en la Cordillera de la Costa, y restringidamente en la cordillera andina, respectivamente (figura 2.1). La Formación Los Tarros es una sucesión volcanosedimentaria marina que se compone principalmente de areniscas, lutitas, andesitas y calizas fosilíferas mientras que la Formación Livícar, considerada una sucesión sedimentaria marina y transicional, fosilífera, está constituida de un miembro inferior con areniscas y paraconglomerados, y un miembro superior constituido por calizas, lutitas, areniscas con yeso y coquinas. Las rocas de la Formación Livícar se encuentran intruidas por los Intrusivos de Lluta KTg (66-54 Ma; figura 2.1), que han generado grados variables de alteración hidrotermal (propilítica o argílica), silicificación, metamorfismo de contacto y, localmente, mineralización de cobre (ver Geología Económica). Una sucesión sedimentaria clástica continental, que aflora en la Cordillera de la Costa, al sureste de Arica, está constituida principalmente por conglomerados, areniscas y limolitas. Estas rocas se encuentran agrupadas en la unidad JKsv que incluye a la Formación Atajaña (Ordóñez y Rivera, 2004; García et al., 2004; figura 2.1), de edad Kimmeridgiano-Neocomiano. Presente en la Región de Arica y Parinacota, pero no en la zona de estudio del presente trabajo, afloran rocas de edad Cretácico Inferior alto, que corresponden a la Formación Suca (García et al., 2004). La Formación Suca es una sucesión volcánica, constituida principalmente por lavas andesíticas y andesítico-basálticas, con intercalaciones menores de areniscas y limonitas.

Las rocas intrusivas corresponden principalmente a monzodioritas cuarcíferas, dioritas y granodioritas de biotita, piroxeno y hornblenda, asociadas a la unidad Jg (figura 2.1). Su edad abarca el período Jurásico Medio-Superior, datadas en 142-180 Ma. En la zona de estudio afloran en la Cordillera de la Costa, al sur de Arica (Ordóñez y Rivera, 2004; figura 2.1) e intruyen a la Formación Camaraca. Finalmente, agrupados en la unidad KTg (figura 2.1), afloran las unidades intrusivas mesozoicas más recientes, pertenecientes al Cretácico Superior-Paleoceno (54-66 Ma). Estas rocas, nombrada como “Diorita de Lluta” (Ordóñez y Rivera, 2004), corresponden principalmente a granodioritas, dioritas y pórfidos graníticos. Contienen minerales primarios como cuarzo, feldespato potásico, plagioclasa, hornblenda, biotita, ortopiroxeno, clinopiroxeno y magnetita; y minerales accesorios como zircón, apatito, titanita y turmalina (García et al., 2004). En la precordillera andina, incluyen a los intrusivos de Lluta y Esquiña, emplazados en los cursos superiores de los ríos Lluta y Camarones, respectivamente (García et al., 2004; figura 2.1). Las rocas intrusivas presentan grados variables de alteración propilítica y, están intruidas por cuerpos hipavisales andesíticos y aplíticos. Estas intrusiones tardías parecen estar asociadas, en parte, a brechas de cuarzo-turmalina, y a zonas de alteración hidrotermal y mineralización, principalmente vetiforme, de Cu y Au-Ag (García et al., 2004). Estos depósitos metálicos, situados en los cuerpos intrusivos, corresponden a la Franja Metalogénica de la Precordillera-Cordillera de los Andes (Ordóñez y Rivera, 2004).

2.1.4 Cenozoico

Las unidades del Cenozoico están representadas por una extensa cobertura de rocas volcánicas y sedimentarias continentales que ocupa más del 90% de la superficie (Ordóñez y Rivera, 2004; García et al., 2004). Una sucesión sedimentaria continental, fluvial y aluvial, agrupada en la unidad OMsv (figura 2.1), está constituida, principalmente, por conglomerados, areniscas y limolitas (García et al., 2004), del Oligoceno a Mioceno Inferior. Esta unidad incluye a la Formación Azapa y en la zona de estudio se encuentra concordantemente subyaciendo a la Formación Oxaya en la

Depresión Central occidental, Poconchile (figura 2.1). Durante el terciario se depositaron rocas volcánicas que corresponden a lavas, brechas, domos y centros volcánicos continentales, andesíticos a riolíticos, secuencias piroclásticas dacíticas a riolíticas asociadas a calderas de colapso e ignimbritas, de edad Oligoceno Superior-Mioceno inferior, que corresponden a la Formación Oxaya, agrupadas en la unidad OMv (figura 2.1). La unidad OMv aflora ampliamente en la Cordillera de Los Andes, desde la parte central de la región hasta el límite norte con Perú (García et al., 2004; Ordóñez y Rivera, 2004). Una sucesión volcánica y sedimentaria continental, del período Oligoceno Superior-Mioceno Inferior (OMvs; figura 2.1), constituida por lavas andesíticas y dacíticas, brechas y tobas ignimbríticas, dacíticas a riolíticas, con intercalaciones de rocas sedimentarias (brechas, areniscas, conglomerados, fangolitas y calizas), corresponde a la Formación Lupica (García et al., 2004). Las rocas de la formación, hospedan vetas polimetálicas de Ag, Pb, Zn, Cu, Sb y Sn (Franja Metalogénica de la Precordillera-Cordillera de Los Andes; ver Geología Económica), debidas a la intrusión de cuerpos intrusivos del Mioceno Medio (Mg; figura 2.1) y presentan extensas zonas de alteración hidrotermal. Secuencias continentales y depósitos aluviales de la Cordillera de la Costa, al sur de Arica, corresponden a depósitos semiconsolidados de arenas, gravas, brechas y limos con intercalaciones de tobas y capas de halita. Estos depósitos están agrupados en la unidad OMs (figura 2.1), de edad Oligoceno-Mioceno Medio. Agrupados en la unidad Mv (figura 2.1), se observan complejos volcánicos erodados parcialmente y secuencias volcánicas constituidas por lavas, brechas, domos y rocas piroclásticas con composiciones andesítico-basálticas, dacíticas y riolíticas. Las edades abarcan entre los 11 y 23 Ma, desde el Mioceno Inferior al Mioceno Medio. Sucesiones sedimentarias fluviales y lacustres, compuestas principalmente por areniscas, calizas, limolitas y gravas, afloran ampliamente en la Depresión Intermedia de toda la región. Corresponden a rocas de la Formación El Diablo (Ordóñez y Rivera, 2004; García et al., 2004) y se agrupan en la unidad Ms (figura 2.1), de edad Mioceno Inferior-Mioceno Superior Bajo. Volcanes del Mioceno Superior, entre los 11-5 Ma, son agrupados en la unidad Msv (figura 2.1), con rocas pertenecientes a estratovolcanes compuestos, bien a medianamente conservados y, sus remanentes se encuentran, en general, afectados por alteración hidrotermal. Se observan secuencias compuestas por lavas, domos, depósitos

piroclásticos e ignimbríticos. Su composición es esencialmente andesítica a dacítica, aunque también presenta riolitas y basaltos menos abundantes. Afloran en gran parte norte de la cordillera andina y en la parte suroriental de la Precordillera (García et al., 2004; figura 2.1). Estos depósitos están en parte asociados a depósitos epitermales de Au-Ag, incluye a la Caldera Choquelimpie (Ordóñez y Rivera, 2004). Distribuidos en la Depresión Central y borde occidental de la Precordillera, al norte y sur de la quebrada Lluta, en torno al curso medio del río, afloran depósitos de remoción en masa correspondientes al resultado de una avalancha ocurrida durante el Mioceno Superior, Avalancha de Lluta (García et al., 2004). Los bloques ignimbríticos y sedimentarios provienen de la Formación Oxaya (subordinadamente de la Formación El Diablo) y son agrupados en la unidad Mss (figura 2.1). Una sucesión sedimentaria y volcánica, que aflora en algunos sectores de la precordillera y cordillera andina, está constituida principalmente por conglomerados, areniscas, limolitas, arcillolitas y calizas; intercaladas con volcanitas ácidas, que incluyen a la Formación Las Huaylas (Ordóñez y Rivera, 2004; García et al., 2004). Las rocas de esta sucesión volcanosedimentaria son agrupadas en la unidad MsPs (figura 2.1), de edad Mioceno Superior-Plioceno. Volcanes y centros eruptivos menores del Plioceno (5-2 Ma) afloran ampliamente en la Cordillera de Los Andes de la región (Ordóñez y Rivera, 2004). Corresponden a lavas, domos y flujos piroclásticos de composición andesítico-dacítica, que incluyen al Volcán Larancagua, Volcán Miño, y la Ignimbrita Lauca, entre otros, de edad Plioceno Superior, y son agrupados en la unidad Pv (figura 2.1). En esta unidad, los núcleos expuestos de los volcanes muestran frecuentemente zonas de alteración hidrotermal (sílico-argílica) y depósitos de azufre, asociados a actividad termal. Depósitos fluviales del Plioceno, depósitos de remoción en masa del Plioceno-Cuaternario y depósitos aluviales y fluviales, son agrupados en la unidad PPIs (figura 2.1). Afloran en la costa (cerca de Arica), de forma dispersa en la Depresión Intermedia y, localmente, en la Cordillera de los Andes. Corresponden a ripios, gravas, arenas y limos, generalmente consolidadas y depósitos de deslizamientos y avalanchas. Sucesiones sedimentarias fluviales y lacustres, constituidas principalmente por areniscas, gravas y limos, con intercalaciones locales de depósitos evaporíticos, diatomitas, tobas ácidas y lavas dacíticas, y eventualmente flujos piroclásticos que incluyen a la Formación Lauca y la

Ignimbrita Lauca (García et al., 2004), son agrupadas en la unidad PPII (figura 2.1), de edad Plioceno-Pleistoceno.

Las unidades intrusivas del Cenozoico, en la zona de estudio, corresponden a intrusivos de edad Mioceno Medio (16-12 Ma) y se ubican al este de Arica, en la cordillera andina (Ordóñez y Rivera, 2004). Corresponden a dioritas, monzodioritas y monzonitas, en parte porfídicas y son agrupadas en la unidad Mg (figura 2.1). Intruyen a rocas de la Formación Lupica y, han provocado a nivel local, en aquellas rocas, grados muy importantes de alteración hidrotermal, silicificación y mineralización polimetálica.

Durante el Cuaternario se depositaron rocas sedimentarias y volcánicas que afloran principalmente al este de la región, asociadas al arco volcánico moderno, en los valles fluviales de la Depresión Intermedia y en la zona costera. Las rocas volcánicas cuaternarias están constituidas por estratovolcanes, complejos eruptivos menores y depósitos piroclásticos del Pleistoceno-Holoceno, agrupadas en la unidad Qv (figura 2.1). Su composición es, en general, andesítica y dacítica, y localmente se observan depósitos de avalanchas volcánicas. Se incluyen a los volcanes, Nevados de Putre, Tacora, Taapaca, Nevados de Payachata, Guallatiri, y Parinacota, entre otros (García et al., 2004). Algunos de estos centros volcánicos presentan zonas de alteración hidrotermal en sus núcleos (e.g., Complejo volcánico Taapaca) y otros poseen importantes depósitos de azufre (e.g., Taapaca y Guallatiri; García et al., 2004). Depósitos morrénicos, glacifluviales y glacialacustres, consistentes en diamictos de bloques y matriz de limo-arcilla, gravas, brechas sedimentarias, arenas y limos, son agrupados en la unidad PIgl (Ordóñez y Rivera, 2004; García et al., 2004; figura 2.1). Afloran en la alta cordillera de la región de estudio y tienen una edad pleistocena. Finalmente, depósitos no consolidados de tipo coluvial, aluvial, fluvial, de remoción en masa, eólico, litoral y palustre, pertenecientes al Cuaternario (Holoceno), son agrupados en la unidad Qs (figura 2.1), y se constituyen principalmente de rípios, gravas, arenas, depósitos de bloques, arenas semiconsolidadas, limos y limos con materia orgánica. Se extienden en toda la zona, específicamente en las cuencas altiplánicas, Depresión Intermedia, en ciertos sectores de la Cordillera de la Costa y en algunas zonas litorales.

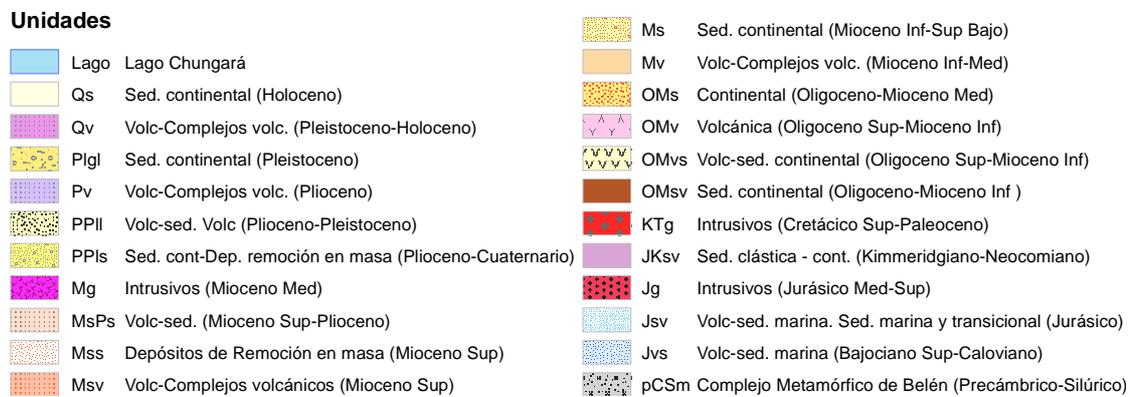


Figura 2.1 (página anterior): Distribución geográfica de las muestras de sedimentos recolectadas en el sistema fluvial del río Lluta.

En la figura 2.1 se indican los tipos de análisis realizados en cada punto de muestreo (círculos negros corresponden a geoquímica de sedimentos activos, círculos blancos a geoquímica de sedimentos activos y pre-industriales, triángulos negros a geoquímica y mineralogía de Rayos X de sedimentos activos, triángulos blancos a geoquímica y mineralogía de Rayos X de sedimentos activos y pre-industriales, y cruces negras a geoquímica y minerales pesados de sedimentos activos). Incluye la información de las principales unidades geológicas definidas en el presente trabajo, que afloran en el área de estudio. Modificado de Mapa Metalogénico de la I Región de Tarapacá, Escala 1:500.000 (Ordóñez y Rivera, 2004).

2.2 Geología económica

En el área de estudio existen recursos minerales tanto metálicos como rocas y minerales industriales. Actual e históricamente, las rocas y minerales industriales han sido los más explotados. Entre éstos, los de mayor importancia en la zona de estudio, corresponden a boratos, diatomita y alumbres (García et al., 2004). Los recursos metálicos son menos relevantes, sin embargo, el yacimiento auro-argentífero de Choquelimpie, fue importante en el pasado. Por otro lado, vetas y mantos polimetálicos

de Ag, Cu, Au, Pb, Zn, Mo, Sn y Sb y mantos de manganeso, en el área, son de reducido tamaño y de menor importancia (Ordóñez y Rivera, 2004). Otros recursos naturales tales como agua subterránea, fuentes geotérmicas y petróleo, también ocurren en la zona. Finalmente, existen depósitos de uranio en la zona de estudio, asociados a niveles diatomíticos y limo-arcillosos en sedimentos miocenos a cuaternarios (Ordóñez y Rivera, 2004).

2.2.1 Recursos Metálicos

Los depósitos y ocurrencias de minerales metálicos, en la XV Región de Arica y Parinacota, se agrupan en tres provincias metalogénicas, las que coinciden con las tres grandes unidades geomorfológicas de la región. Estas provincias, y sus respectivas franjas metalogénicas, son la continuación de las provincias y franjas reconocidas más al sur del país y, eventualmente, en el sur de Perú (Ordóñez y Rivera, 2004). Éstas son, Cordillera de la Costa, Depresión Intermedia y Precordillera-Cordillera de los Andes (figura 2.2). Específicamente, los depósitos metalíferos relevantes para el presente trabajo, se encuentran en la Provincia Metalogénica de la Precordillera-Cordillera de los Andes (figura 2.2). Las ocurrencias uraníferas presentes en la zona de estudio, se ubican en la Provincia Metalogénica de la Depresión Intermedia. En la tabla B1, se han compilado los principales yacimientos y ocurrencias de minerales metálicos del área de estudio, la numeración utilizada proviene del trabajo de Ordóñez y Rivera (2004).

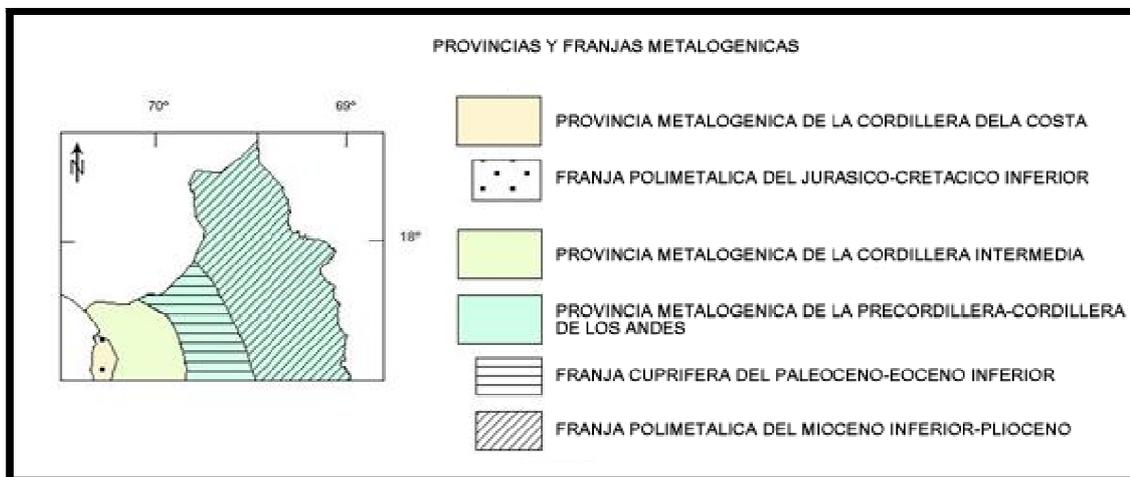


Figura 2.2: Provincias y franjas metalogénicas de la zona de estudio, modificado de Ordóñez y Rivera, 2004.

2.2.1.1 Provincia Metalogénica de la Cordillera de la Costa

Ésta provincia Metalogénica, está constituida, principalmente, por rocas volcánicas, sedimentarias e intrusivas. Las edades de las rocas son jurásicas a cretácicas y se caracterizan por poseer depósitos principalmente vetiformes, estratoligados y de relleno de fracturas, con mineralización de cobre, oro, plata y, de forma subordinada, hierro. Se agrupan en una franja polimetálica de edad jurásica-cretácica inferior, donde la mayoría de los depósitos son de dimensiones menores y no son explotados actualmente. Los más importantes corresponden a estratoligados de cobre del Distrito El Salar-San Javier, al sur de Arica (Ordóñez y Rivera, 2004).

2.2.1.2 Provincia Metalogénica de la Depresión Intermedia

La Provincia Metalogénica de la Depresión Intermedia, se encuentra asociada a sedimentos de edades que abarcan del terciario al cuaternario, asociados, en parte, a salares que rellenan la cuenca que conforma esta unidad geomorfológica. Los

depósitos más importantes de esta unidad, corresponden a las ocurrencias de uranio que se extienden desde Arica al interior (Ordóñez y Rivera, 2004). Son principalmente de tipo lagunar y están presentes en sedimentos asociados a ambientes volcanogénicos (Ordóñez y Rivera, 2004).

En la zona de la Quebrada Lluta, las ocurrencias de uranio se emplazan en niveles de diatomitas, pertenecientes a la Formación El Diablo (unidad Ms; ver Marco Geológico). En el sector de Boca Negra (A14-04; figura 2.3), se evaluaron 2 a 3 toneladas de uranio metálico y en Manuel Jesús (A14-03; figura 2.3) se estimaron 2 a 2,5 toneladas de uranio. También, se ha reconocido uranio asociado a algunos depósitos cupríferos, como Campanani (A15-05; figura 2.3).

2.2.1.3 Provincia Metalogénica de la Precordillera-Cordillera de los Andes

La Provincia Metalogénica de la Precordillera-Cordillera de los Andes es la más importante de la región y una de las más importantes a nivel mundial, ya que incluye depósitos polimetálicos, principalmente cupríferos, con reservas que se encuentran entre las mayores del planeta. En esta provincia se emplaza el arco volcánico actual y se asocia, principalmente, a rocas volcánicas, sedimentarias, intrusivas y, subordinadamente, metamórficas, con edades que van desde el Precámbrico hasta el Cuaternario (Ordóñez y Rivera, 2004; García et al., 2004). En la zona de estudio, se encuentran representantes de las franjas Cuprífera del Paleoceno-Eoceno Inferior y Polimetálica del Mioceno (figura 2.2), las que se describen a continuación (Zapettini et al., 2001).

2.2.1.3.1 Franja Metalogénica del Paleoceno-Eoceno Inferior

La Franja Metalogénica del Paleoceno-Eoceno Inferior se extiende en la precordillera, y se caracteriza por tener depósitos de tipo diseminado-stockwork y

vetiformes donde, junto a la mineralización principal de cobre, se encuentran contenidos importantes de oro, plata, plomo, cinc y molibdeno. Al interior de Arica, entre los más importantes, se encuentran Jamiralla, Rosario, Dos Hermanos, Eva II, Lucita, Halcones y Campanani (A15-01, A15-02, A15-03, A14-01, A14-06, A14-07 y A15-05, respectivamente; figura 2.3). Corresponden a depósitos vetiformes, chimeneas de brecha y de tipo stockwork. Se emplazan en rocas granodioríticas asignadas al Cretácico Superior-Terciario Inferior (unidad KTg, Marco Geológico; Ordóñez y Rivera, 2004).

2.2.1.3.2 Franja Metalogénica del Mioceno

La Franja Metalogénica del Mioceno está asociada a depósitos ubicados en la alta cordillera, sobre los 3.500 m de altitud. En las regiones XV y I, de Arica y Parinacota, y Tarapacá, respectivamente, se reconocen depósitos de cobre, plata-plomo, oro-plata-cobre, antimonio y manganeso. Los depósitos son, generalmente, vetiformes y, en menor cantidad, estratoligados y de rellenos de fracturas. En zonas de alteración asociadas a complejos volcánicos, se han descrito prospectos de cobre, oro y polimetálicos, de edad Miocena principalmente (Ordóñez y Rivera, 2004). El depósito más importante de esta franja corresponde a un epitermal aurífero-argentífero, de mediano tamaño, Choquelimpie. Le sigue en importancia la faja de depósitos del Cordón Belén-Ticnamar. Sin embargo, no se consideran relevantes para el trabajo actual, ya que se ubican en una cuenca de drenaje distinta a la del Río Lluta. Depósitos de manganeso, dentro de la cuenca del Río Lluta, se ubican al norte de la región, al interior de Arica. Están emplazados, en general, en el curso superior del Río Lluta y son de tipo manto, hospedados en rocas sedimentarias de la unidad MsPs (Formación Huaylas, Mioceno Superior-Plioceno) y en rocas tobáceas e ignimbríticas del Plioceno (figura 2.3; Marco Geológico). Los depósitos de mayor importancia corresponden a Kilómetro 130, Navidad y Huachipato (A9-02, A5-06 y A9-01, respectivamente; figura 2.3).

Existen zonas con alteración hidrotermal que se asocian a rocas volcánicas del Oligoceno y Mioceno. Dos prospectos dentro de estas zonas, corresponden a Putre Norte y Putre Sur (A9-03 y A9-04, respectivamente; figura 2.3). Son depósitos de Cu-Mo y se ubican en el margen suroccidental de los Nevados de Putre, cercanos a la localidad del mismo nombre (Ordóñez y Rivera, 2004). Por otro lado, la mineralización de hierro en esta provincia es menor, y en la zona de estudio, hay solo un depósito ferrífero, San Sebastián (A5-05; figura 2.3).

2.2.2 Rocas y minerales industriales

En la zona de estudio, existen variados recursos de rocas y minerales industriales. A continuación se describen brevemente los recursos industriales, de acuerdo, principalmente, a su clasificación en la Hoja de Arica, García et al. (1997). En la tabla B2 se han compilado los principales yacimientos y prospectos de rocas y minerales industriales, presentes en el área de estudio. Su denominación ha sido modificada del trabajo de García et al. (2004)

2.2.2.1 Recursos en explotación

Depósitos de bentonita son abundantes en el área y se presentan asociados a depósitos de diatomita. Los depósitos Macarena (I-04; figura 2.3) y Qda. Allane (I-02; figura 2.3), afloran en el curso superior del río Lluta, y San Eduardo (I-12; figura 2.3), en pampa Plazuela. El más relevante y único en explotación actualmente es el yacimiento San Eduardo, del que se extrae bentonita cálcica (tabla B2). Corresponde a un manto de bentonita, intercalado en una sucesión de ignimbritas y rocas sedimentarias, incluido en el depósito de Avalancha Lluta (unidad Mss, ver Marco Geológico).

El principal yacimiento de diatomita en el área de estudio, corresponde al yacimiento Neverman (I-15; figura 2.3), ubicado 4 km al noreste de Arica, consiste en un manto subhorizontal de diatomita, de espesor menor a 20 m. Los depósitos de diatomita que le siguen en importancia son los yacimientos Casualidad y Caracolito (I-13 e I-14, respectivamente; figura 2.3), ubicados a 62 y 63 km, al este de Arica (García et al., 2004).

2.2.2.2 Recursos de potencial interés

Los recursos de rocas y minerales industriales, de potencial interés, comúnmente no explotados o con labores actualmente paralizadas, incluyen principalmente, alumbre (sulfato de aluminio). Los principales depósitos de alumbre son Saucine, Millune y Larancagua (I-08, I-09 y I-07, respectivamente; figura 2.3), los tres se encuentran en las laderas de la quebrada Lluta. Saucine y Millune , aproximadamente a 65 km al este de Arica, se asocian, geológica y espacialmente, a la meteorización u oxidación de rocas sedimentarias y volcanoclásticas piritizadas de la Formación Livílcar, de edad jurásica-cretácica inferior (unidad Jsv, Marco Geológico). Mientras, Larancagua, se encuentra en conglomerados, brechas y lavas (García et al., 2004).

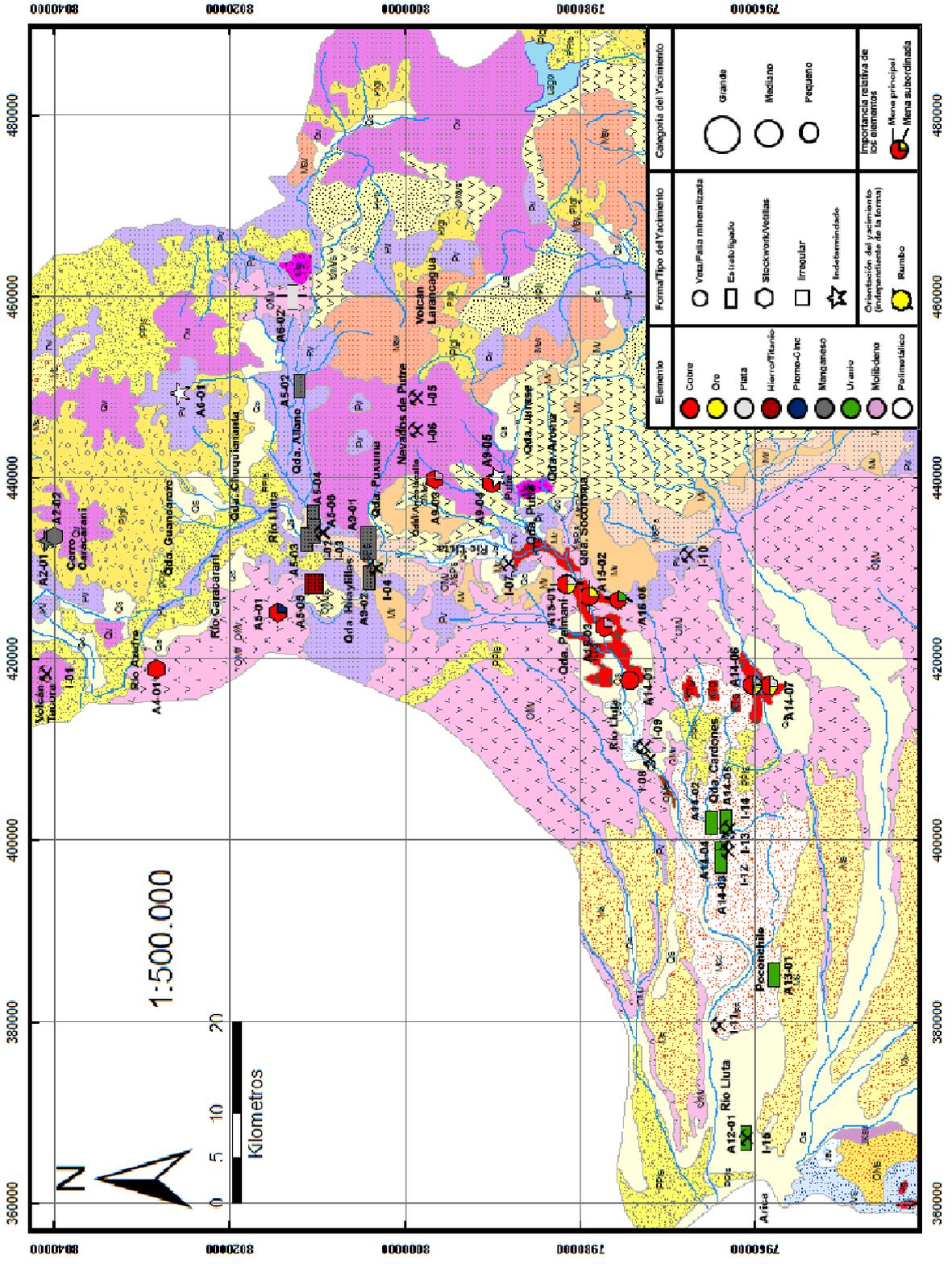
Existen extensos depósitos de pumicita, asociados a las facies superior de la Ignimbrita Lauca (unidad Pv, Marco Geológico). Asociados a esta facies, hay tres depósitos de potencial interés, en la zona de estudio. Los prospectos Quebrada Lluta (I-11, figura 2.3), Quebrada Allane (I-02, figura 2.3) y Copaquilla (I-10, figura 2.3).

2.2.2.3 Recursos de escaso interés actual

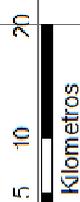
Los recursos no metálicos, con escaso o sin interés actual y cuya explotación se encuentra actualmente paralizada o nunca se ha realizado, en el área de estudio,

corresponden principalmente a azufre (García et al., 2004). Los principales depósitos son Taapaca (I-06, figura 2.3) y azufreras del Volcán Tacora (I-01, figura 2.3), que en sus laderas presenta yacimientos de azufre, además de la abandonada Mina Aguas Calientes, importante azufrera en tiempos pasados, desde donde se transportaban las riquezas por un pequeño ramal del ferrocarril Arica-La Paz.

Figura 2.3 (página siguiente): Mapa de información geológica y de yacimientos metálicos e industriales.



1:500.000



Kilometros

Elemento	Forma/Tipo del Yacimiento	Categoría del Yacimiento
Cobre	Vena/Palla mineralizada	Grande
Oro	Es tectónico	Mediano
Plata	Stockwork/Veilas	Pequeño
Hierro/Platino	Irregular	
Plomo-Cinc	Indeterminado	
Manganeso		
Uranio		
Molibdeno		
Palmitolico		
Importancia del yacimiento (independiente de la forma)		Importancia relativa de los elementos
Rumbo		Mena principal
		Mena subordinada

3. Resultados

3.1 Variación geográfica de la geoquímica de los sedimentos del río Lluta

Los diagramas resultantes para el tramo principal del río Lluta (29 puntos) muestran que las concentraciones de los elementos presentan patrones de variación geográfica complejos y la existencia de firmas geoquímicas propias, para los sedimentos de cada tramo del río (figuras 3.1-3.10).

En general, se observa una fuerte concordancia entre los patrones de variación geográfica de las tierras raras (REE) e Y de los sedimentos activos del río Lluta. Estos patrones muestran una tendencia creciente desde la cabecera hasta la desembocadura de este río. En contraste, para los sedimentos pre-industriales, los patrones de variación geográfica de las tierras raras (REE) e Y se dividen en dos grupos de elementos: Y+LREE (Y, La, Ce, Pr, Nd, Sm y Eu) y HREE (Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb y Lu). Cada grupo incluye elementos con patrones de variación geográfica altamente concordantes. Sin embargo, los patrones de Y+LREE y HREE de los sedimentos pre-industriales, presentan diferencias, las que son mucho menos marcadas para los sedimentos activos (figuras 3.1, 3.1, 3.3 y 3.4). En particular, para los elementos Y+LREE y HREE, se observa un marcado patrón creciente en los sedimentos activos tomados entre Chapizca y la Qda. Pelmani, mientras que para los sedimentos pre-industriales, en este mismo tramo, los patrones son decrecientes o planos (figuras 2.1, 3.1, 3.1, 3.3 y 3.4).

Los patrones de la variación geográfica para los elementos Zr y Hf, son casi idénticos en sedimentos fluviales activos y pre-industriales; decrecientes hasta la Qda. Pelmani y luego crecientes hasta la desembocadura del río Lluta, lo que coincide con la presencia de nuevas unidades litológicas tales como KTg y Qs (figuras 2.1, 3.3 y 3.4).

En forma similar a los patrones de Zr y Hf, los patrones geográficos de Ta, Nb, V, W, Ni, Cr₂O₃, Sc, Fe₂O₃, TiO₂, P₂O₅, MnO y Co (figuras 3.4, 3.5, 3.6, 3.7 y 3.8) presentan tendencias decrecientes desde el río Caracarani en la cabecera del río Lluta hasta aguas abajo de la Qda. Pelmani, en la Precordillera, para luego presentar tendencias marcadamente crecientes aguas abajo hasta la desembocadura del río Lluta (figura 2.1). Una característica distintiva asociada al tramo bajo del río Lluta es la brusca disminución en las concentraciones para estos elementos (incluyendo Hf y Th), en tres puntos de muestreo ubicados aguas abajo de Poconchile (figuras 3.3, 3.4, 3.5, 3.6, 3.7 y 3.8). De manera similar a lo ocurrido con las variaciones de concentración geográfica para los elementos REE+Y, entre Chapizca y la Qda. Pelmani, los sedimentos activos asociados a los elementos Zr, Hf, Ta, Nb, V, W, Ni, Cr₂O₃, Sc, Fe₂O₃, TiO₂, P₂O₅, MnO y Co, presentan en general, patrones crecientes, mientras que los sedimentos pre-industriales tienen patrones decrecientes o planos (figuras 3.3, 3.4, 3.5, 3.6, 3.7 y 3.8). Una fuerte característica asociada a las concentraciones de Zr y Hf, es la alta concentración en una muestra de sedimentos pre-industriales ubicada en el tramo correspondiente al río Caracarani (figuras 3.3 y 3.4). Por otra parte, las concentraciones de P₂O₅, presentan bruscos aumentos aguas abajo de la Qda. Socoroma y el poblado de Poconchile (figura 3.7), para los sedimentos activos, mientras que los sedimentos pre-industriales muestran tendencias similares, pero con concentraciones menores (figura 3.7)

En general, las concentraciones de Pb, As, Hg y Mo en sedimentos activos muestran patrones marcadamente decrecientes desde la alta cordillera hasta la desembocadura en el Océano Pacífico (figura 3.10). Los elementos As y Pb, muestran patrones casi idénticos para los sedimentos fluviales activos. Las concentraciones de As y Pb en los sedimentos pre-industriales, tienden a seguir los patrones de las muestras de sedimento activos, con la excepción de los puntos ubicados en la parte más alta del sistema fluvial, entre el río Caracarani, hasta después de la confluencia del río Lluta con la Qda. Allane (figura 3.10). Puntualmente en los sedimentos activos ubicados inmediatamente aguas abajo de las confluencias con la Qda. Allane y las Qdas. Putre y Socoroma, el Hg presenta un claro aumento en las concentraciones. Por otro lado, se observan dos peaks claros en las concentraciones de Mo de los

sedimentos activos, en el punto ubicado inmediatamente aguas abajo de la Qda. Ancolacalle y en la zona de yacimientos metálicos en el tramo inmediatamente al oeste de la intersección con la Qda. Socoroma (figuras 2.1 y 3.10).

Cambios de concentraciones muy acentuados, se observan para los elementos Cd, Sb y Zn, en el tramo alto del río Lluta (figura 3.9). Específicamente, para el Zn y Cd, existe un aumento notorio en las concentraciones de estos elementos en los sedimentos activos, aguas abajo de la confluencia con la Qda. Allane, lo que evidencia además una diferencia importante con respecto a las concentraciones de los sedimentos pre-industriales en el mismo tramo. El elemento Sb, tiene un peak acentuado para los sedimentos activos en el punto de muestreo aguas abajo de la confluencia de las Qdas. Putre y Socoroma, generando también una diferencia, aunque un poco menor, en comparación con las concentraciones de los sedimentos pre-industriales (figura 3.9).

Con patrones de concentraciones similares, se observan los elementos Th y U. Dos tramos de claro aumento en las concentraciones para sedimentos fluviales activos se aprecian para el U: el primero, desde las nacientes del río Lluta (río Caracarani) hasta el sector de la Qda. Huaylillas, abarcando las unidades litológicas Pv, Qs y MsPs (figura 2.1), principalmente; y el segundo, aguas abajo de la intersección de la Qda. Pelmani (unidades Qs y KTg; figura 2.1); luego, los valores aguas abajo de la Qda. Pelmani son relativamente parejos (figura 3.6). En los sedimentos fluviales activos, relacionado al Th, se repite la tendencia aguas abajo de la Qda. Pelmani. Nuevamente, se observan tendencias crecientes para los sedimentos activos entre Qda. Pelmani y Chapizca, mientras que para los sedimentos pre-industriales, en este tramo, son decrecientes (figura 3.6), pero con concentraciones mayores.

Dos patrones, en general planos, se aprecian para los elementos mayores Na_2O y K_2O (figuras 3.6 y 3.7). Muy similar a los patrones de K_2O , se observan los patrones de las concentraciones de Rb, tanto en sedimentos activos como pre-industriales (figuras 3.7 y 3.8). Patrones geográficos similares a los de K_2O y Rb, asociado a los sedimentos activos, son los que presentan los elementos Cs y Sr (figura 3.8), lo que se aprecia desde la confluencia con la Qda. Allane. Por otro lado, las

concentraciones de los sedimentos pre-industriales son mayores que las concentraciones de los sedimentos activos, para los elementos K_2O y Rb (figuras 3.7 y 3.8) en la mayor parte del río Lluta.

Tanto para sedimentos activos como pre-industriales, los patrones de variación geográfica de CaO y MgO están fuertemente correlacionados (figuras 3.7 y 3.8). Aguas abajo de las Qdas. Allane y Ancolacalle (figura 3.15), las concentraciones de CaO y MgO de los sedimentos activos presentan marcados incrementos, lo que coincide principalmente, lo que coincide con el predominio, en esos puntos, de las unidades MsPs, Jsv y Qs (figuras 2.1, 3.7 y 3.8). Adicionalmente, es posible correlacionar las concentraciones de CaO, con la evolución de las concentraciones de Sr y Ba, principalmente por la similitud entre los patrones de sedimentos fluviales activos (figuras 3.5 y 3.8). Adicionalmente, es posible correlacionar las concentraciones de CaO, con la evolución de las concentraciones de Sr y Ba, principalmente por la similitud entre los patrones de sedimentos fluviales activos (figuras 3.5 y 3.8).

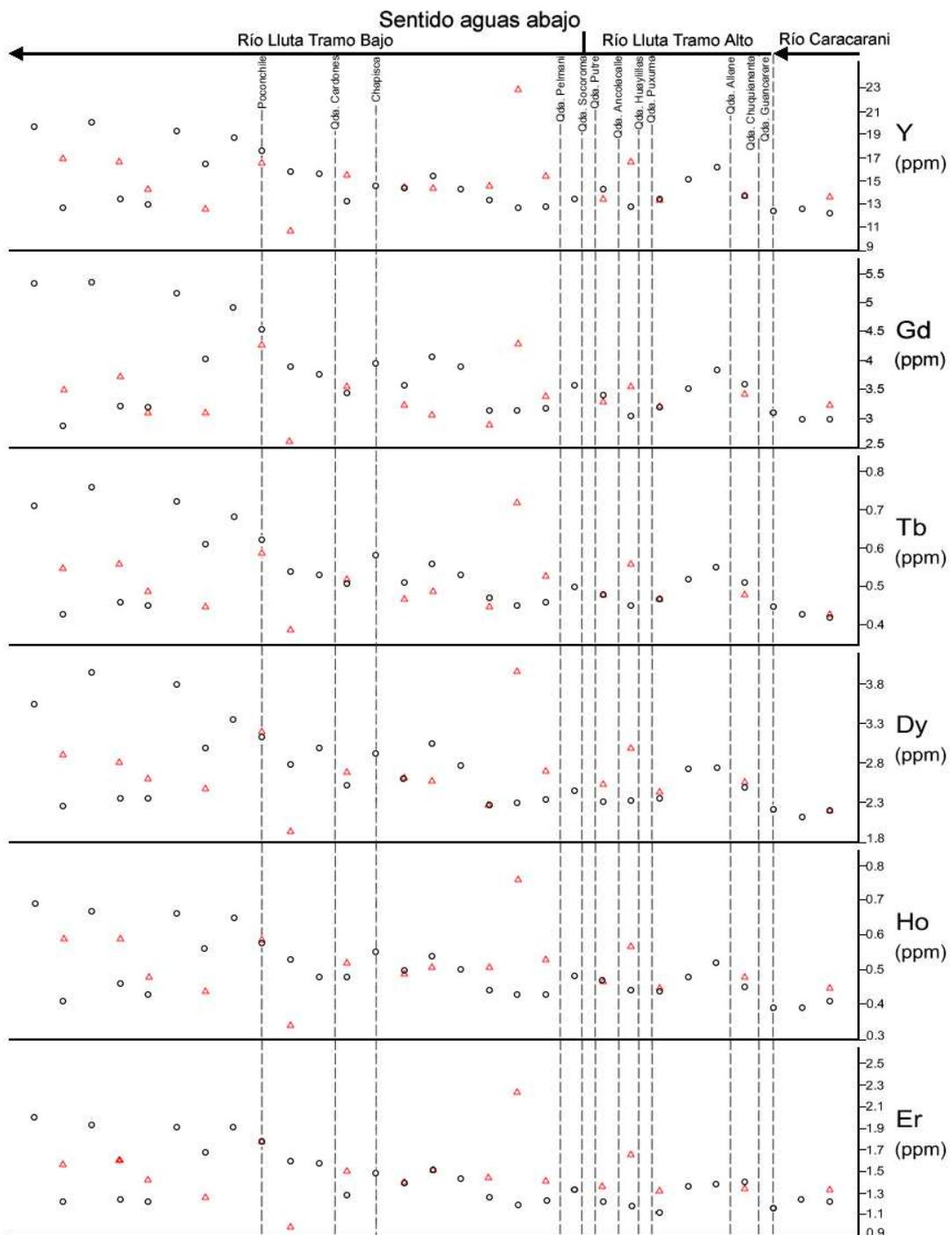
Los elementos Cu, Au, Be, Ba y Ga no muestran patrones claros en el cauce principal del río Lluta (figura 3.5). En particular, el elemento Ba, presenta patrones en general decrecientes desde la porción alta del río Lluta hacia la desembocadura, tanto en sedimentos fluviales activos y pre-industriales. En la mayoría de los puntos de muestreo, las concentraciones de Ba son menores en los sedimentos pre-industriales que en los sedimentos activos. Las concentraciones de Be, fluctúan en torno a tres valores puntuales, tanto para sedimentos activos como para pre-industriales (figura 3.5). Las concentraciones de Cu en los sedimentos activos y pre-industriales presentan una leve tendencia al aumento a medida que se avanza aguas abajo en el cauce del río Lluta (figura 3.5). Específicamente, existe una marcada disminución aguas abajo. Para el Cu, se tiene una leve tendencia al aumento en la concentración a medida que se avanza aguas abajo en el cauce del río Lluta (figura 3.5). Específicamente, existe una marcada disminución aguas debajo de la Qda. Allane y un aumento claro aguas abajo de las Qdas. Putre y Socoroma, en las concentraciones de los sedimentos activos (figura 3.5). Los sedimentos pre-industriales presentan concentraciones y tendencias similares (figura 3.5), y particularmente, en el tramo entre la Qda. Huaylillas y aguas abajo de la Qda. Pelmani, se aprecia un fuerte patrón creciente para los

sedimentos pre-industriales. Las concentraciones de Ga, muestran patrones variables a través del cauce del río Lluta. En el tramo bajo del cauce inferior, se aprecia una clara tendencia decreciente, desde Poconchile aguas abajo. Los sedimentos fluviales pre-industriales siguen tendencias similares (figura 3.5). Las concentraciones de Au para sedimentos fluviales activos en el tramo del río Caracarani, tienen un patrón creciente que decae marcadamente aguas abajo de la confluencia con las Qdas. Guancarare y Chuquiananta (figura 3.5). Aguas abajo de la confluencia con la Qda. Huaylillas, se observa un fuerte aumento en las concentraciones de Au (figura 3.5). Las características de los sedimentos pre-industriales se apegan, en general, a estas tendencias, sin embargo, algunas tienen concentraciones mucho mayores que las respectivas muestras de sedimentos activos en los puntos de muestreo (figura 3.5).

En general, las concentraciones de los elementos Bi y Se, presentan un patrón plano, a lo largo del cauce del río Lluta, desde sus nacientes hasta su desembocadura (figuras 3.8 y 3.9). Sin embargo, son notorias las altas concentraciones de Bi en el río Caracarani (figura 3.8). Las concentraciones de C_{total} y S_{total} , muestran patrones planos en la mayor parte del cauce del río Lluta. Las excepciones se observan en la cabecera de éste, donde un brusco decrecimiento predomina en los sedimentos activos; y cercano a la desembocadura, donde se observan grandes aumentos en la concentración (figuras 3.9).

Los sedimentos del río Lluta, se caracterizan por mostrar tendencias decrecientes para el SiO_2 , Al_2O_3 y TI (figura 3.2). En general, los sedimentos activos y pre-industriales de los elementos mayores SiO_2 y Al_2O_3 presentan similitudes en sus patrones de variación geográfica. Por otro lado, la tendencia al decrecimiento para TI es mucho más marcada desde las nacientes del río Lluta hasta su desembocadura (figura 3.2).

Figura 3.1 (página siguiente): Evolución, aguas abajo, de la concentración de los elementos mayores y en trazas asociados a la fracción $< 180 \mu m$ de los sedimentos del Sistema Fluvial del río Lluta.



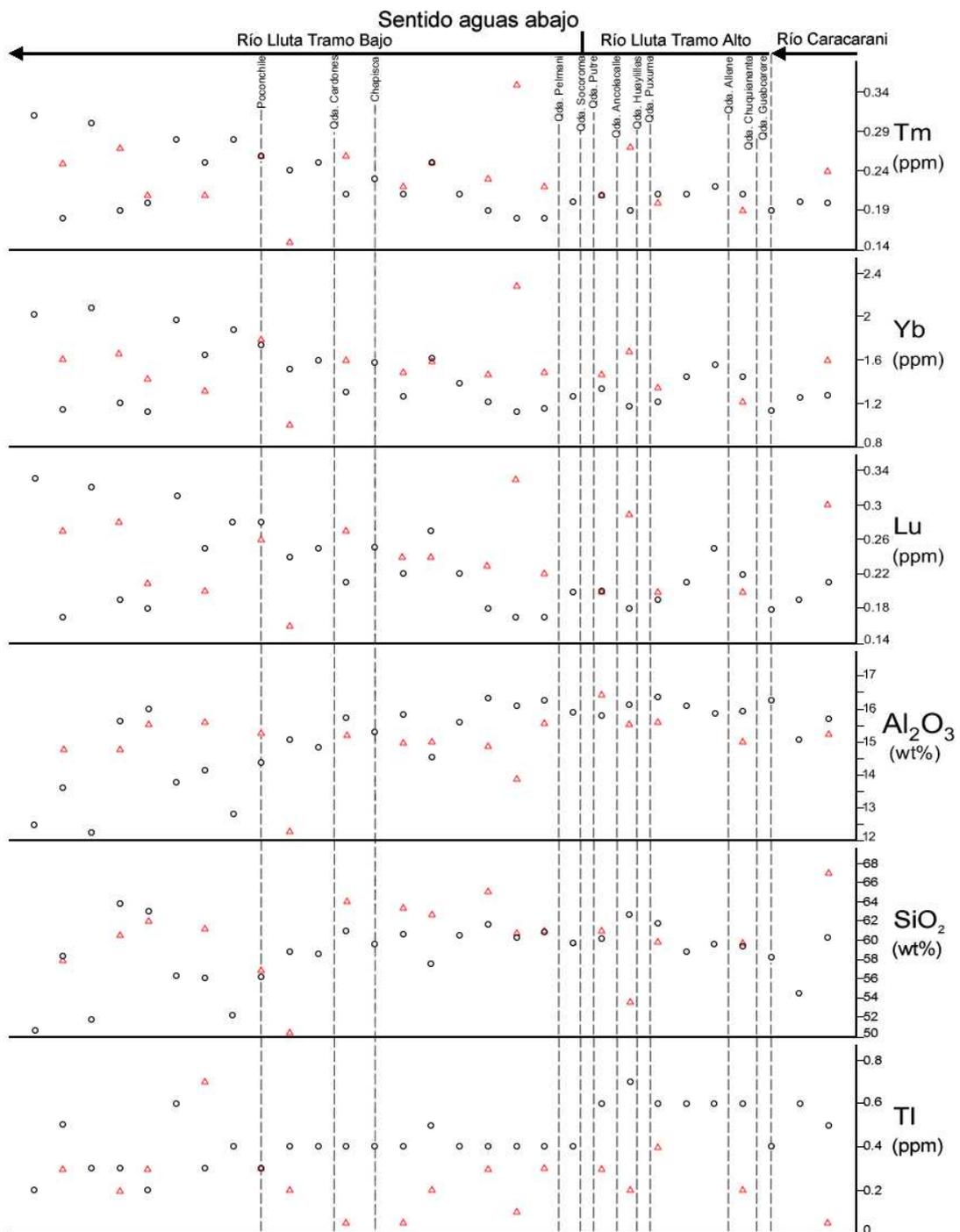


Figura 3.2: Continuación figura 3.1

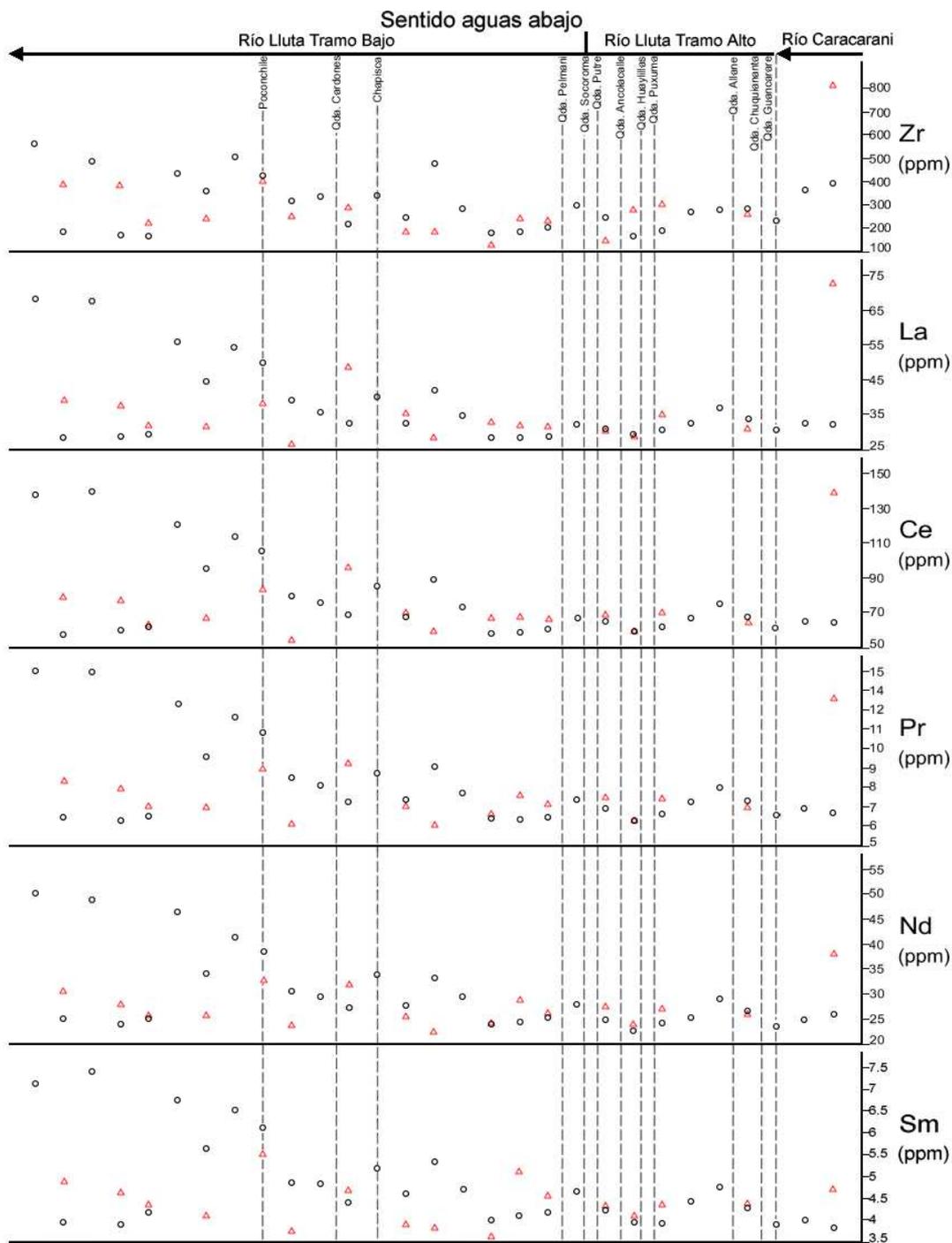


Figura 3.3: Continuación figura 3.1

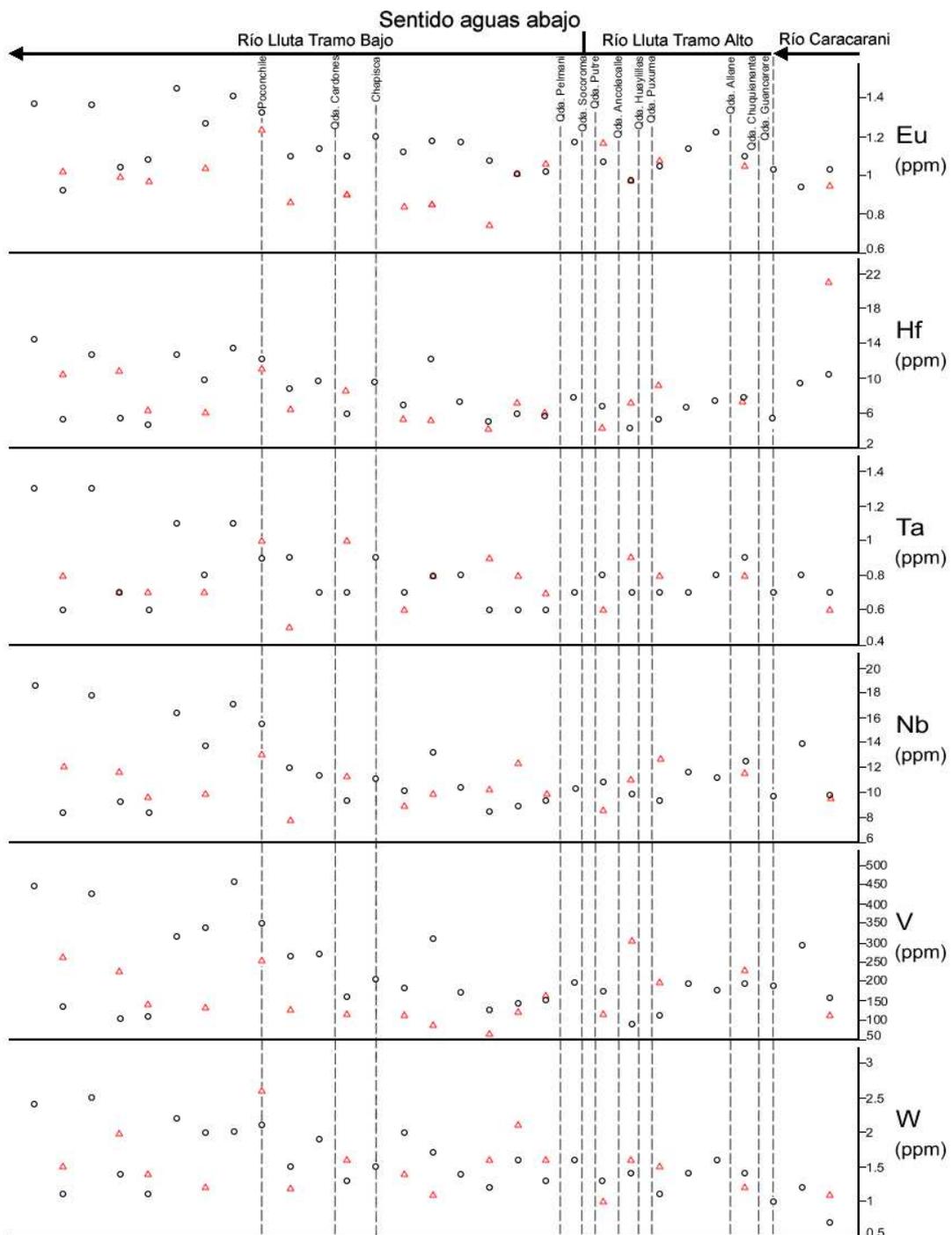


Figura 3.4: Continuación figura 3.1

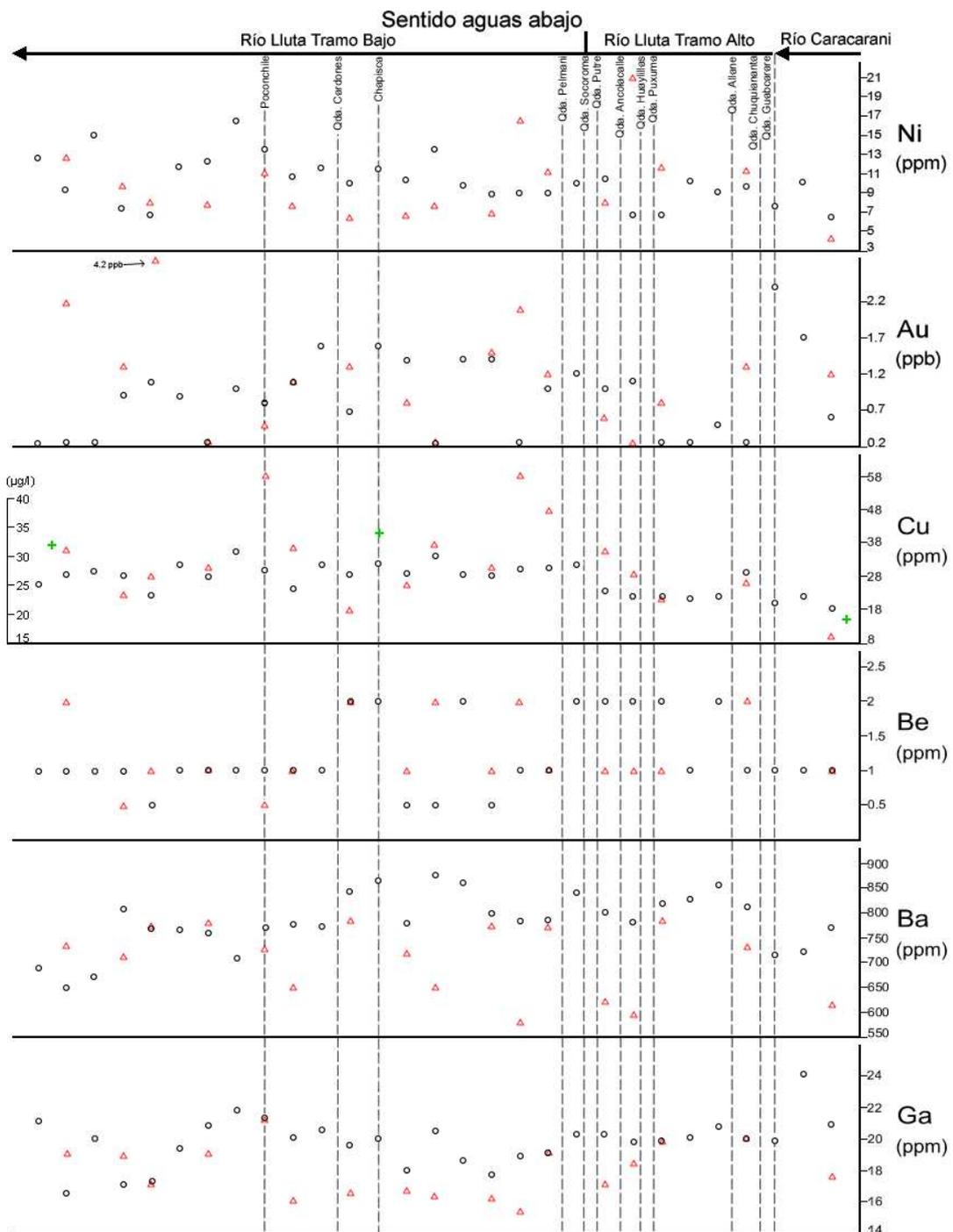


Figura 3.5: Continuación figura 3.1

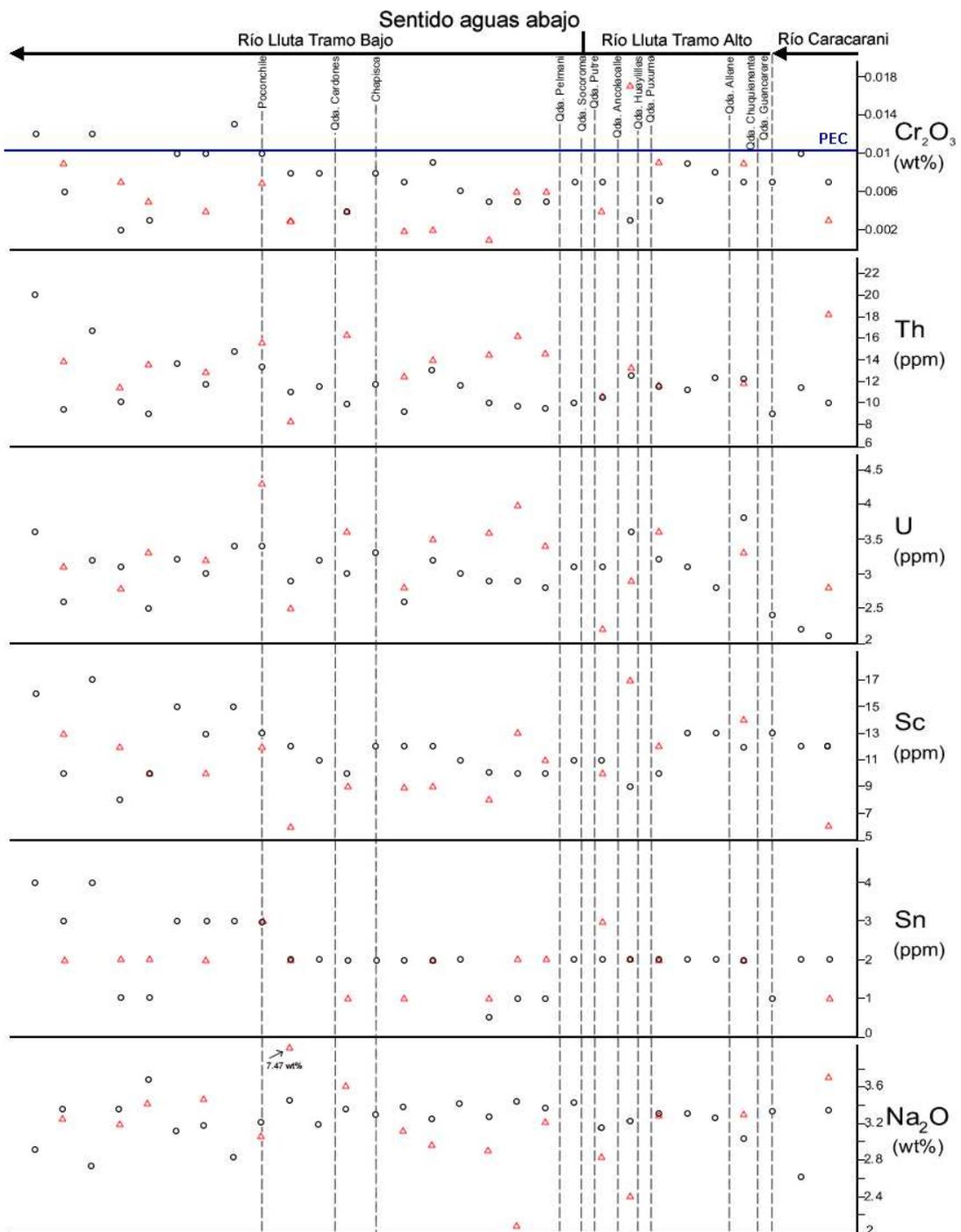


Figura 3.6: Continuación figura 3.1

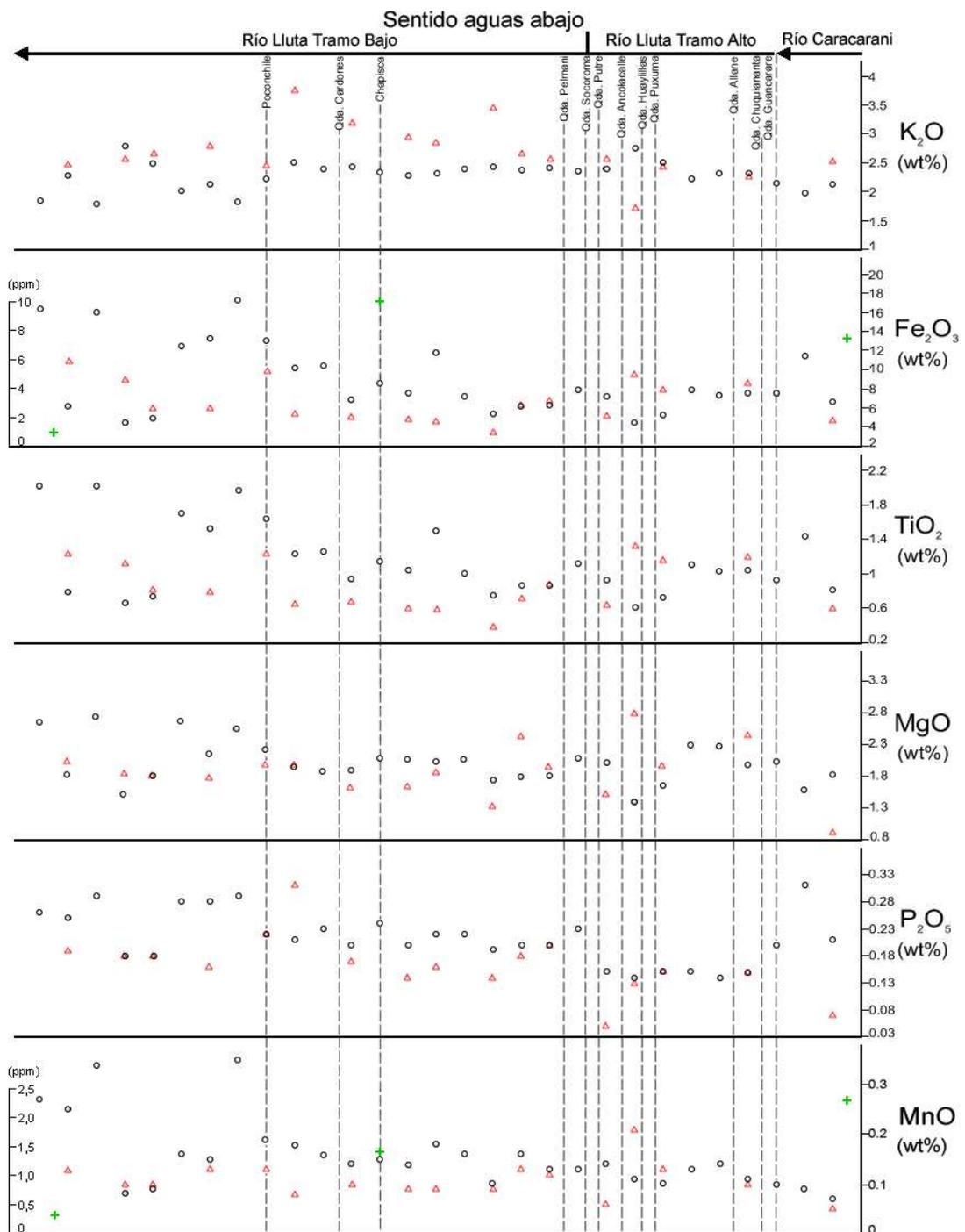


Figura 3.7: Continuación figura 3.1

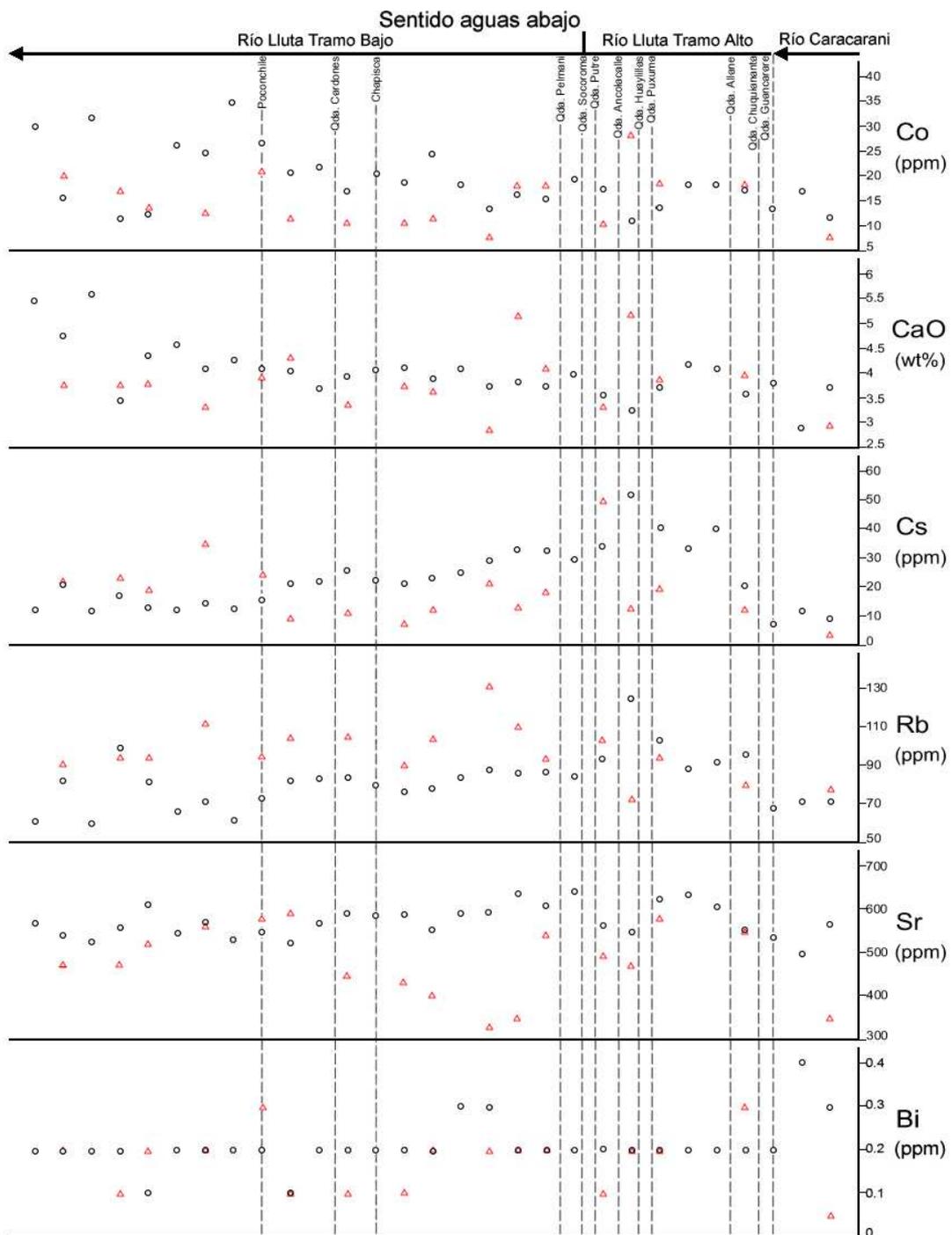


Figura 3.8: Continuación figura 3.1

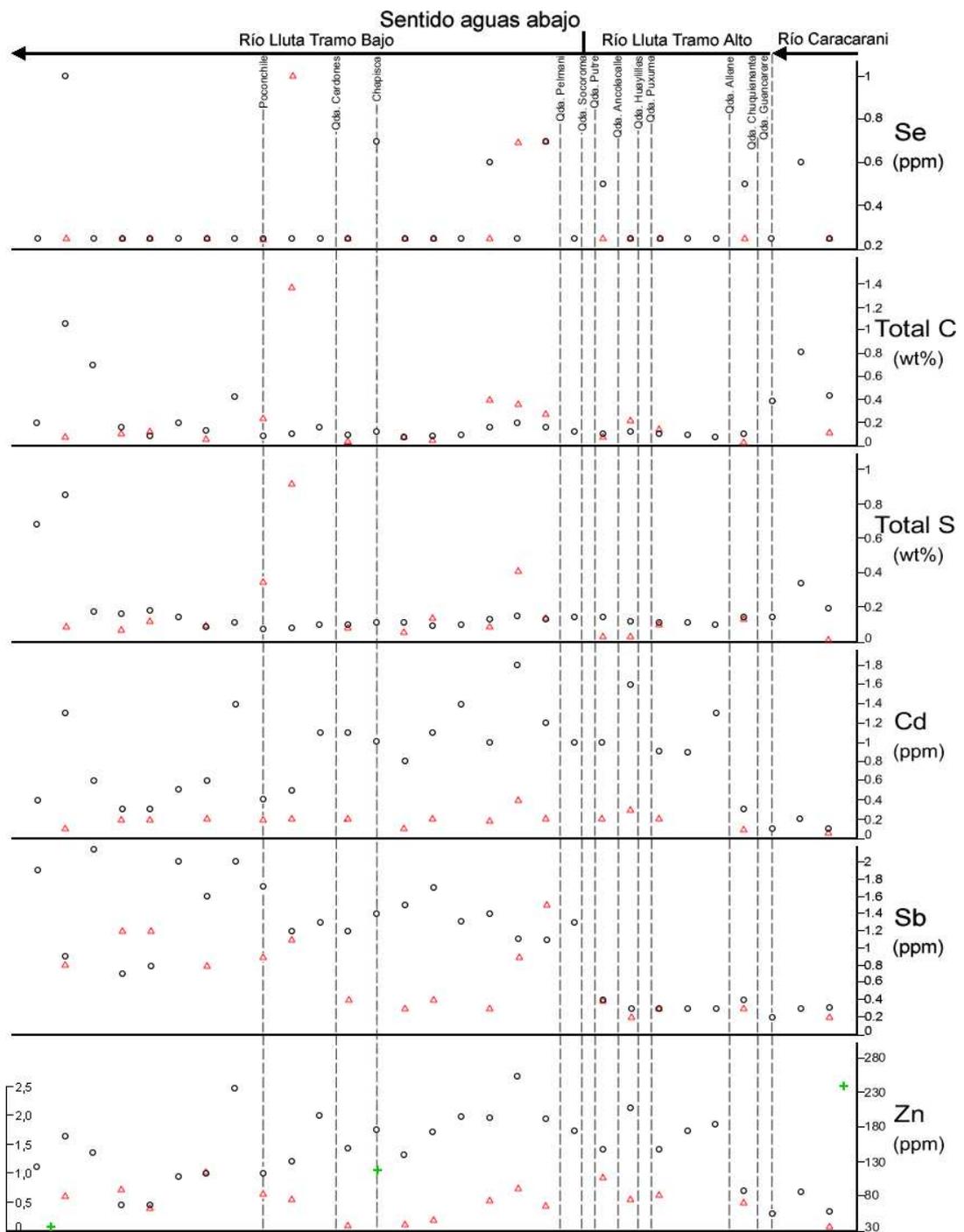


Figura 3.9: Continuación figura 3.1

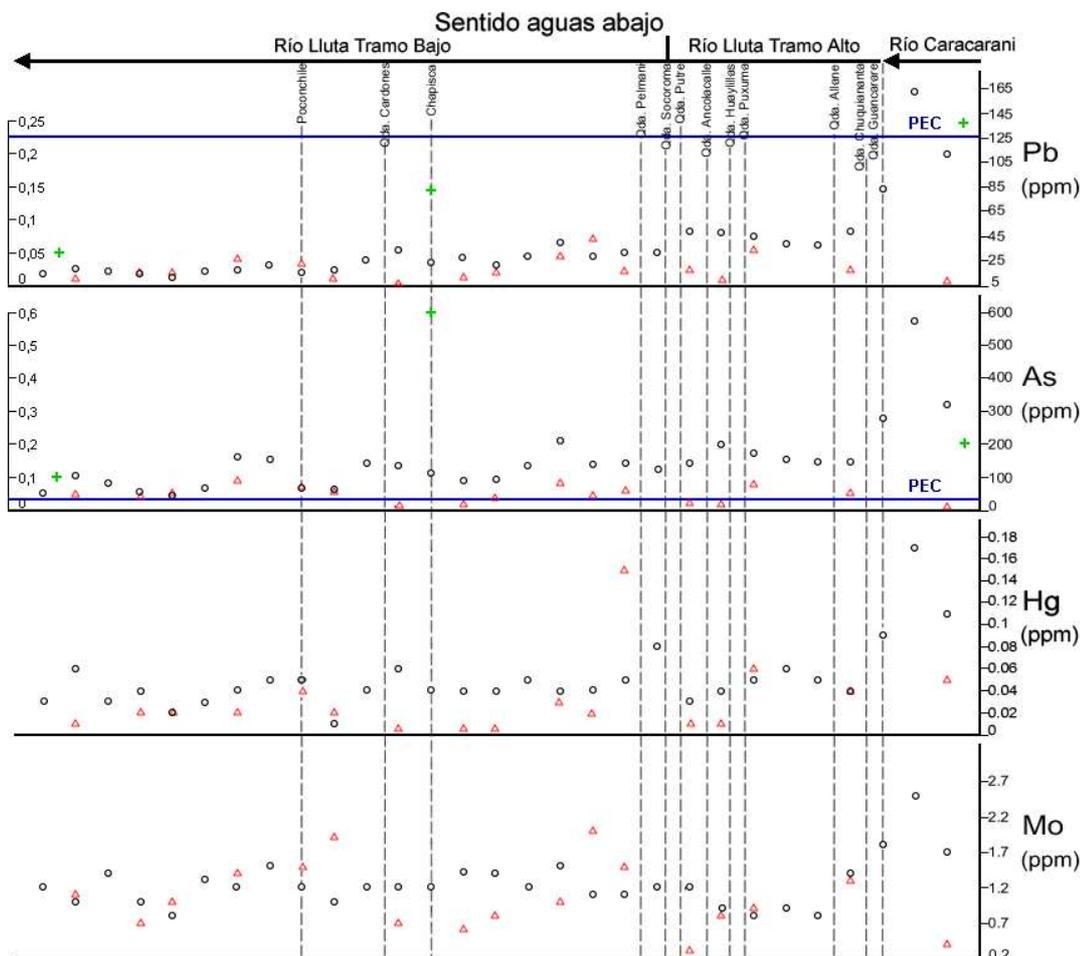


Figura 3.10: Continuación figura 3.1

En el set de figuras 3.1-3.10, los círculos negros corresponden a los sedimentos activos y los triángulos rojos a los sedimentos pre-industriales. Las muestras se distribuyen en el diagrama (de derecha a izquierda) de acuerdo a su aparición desde la cabecera del río en la zona cordillerana, hasta la desembocadura. Incluye parámetros ambientales PEC (Probable Effect Concentration; MacDonald et al., 2000) para los elementos As, Pb y Cr_2O_3 , representado por una línea azul. Para algunos elementos se ha incluido información acerca de la calidad del agua (cruces verdes; concentraciones en ppm a menos que se indique lo contrario; escalas a izquierda del diagrama) compilada del estudio de la DGA, 2004.

3.2 Análisis geoquímico usando redes neuronales artificiales

Los datos químicos obtenidos de las muestras de sedimentos fluviales fueron analizados utilizando redes neuronales artificiales no-supervisadas del tipo Growing Cell Structures (GCS; Fritzke, 1994). Como resultado de este análisis se generó un mapa bi-dimensional o “mapa neuronal”, compuesto por 8 unidades o “nodos” interconectados (figura 3.11). Cada uno de estos nodos representa un subconjunto de muestras del set de datos con características químicas similares..

La tabla 3.1, permite una previsualización de las características de cada nodo. De esta manera, para el nodo 1 se observan las mayores concentraciones promedio de elementos tales como W, As, Bi, Au, Se y S_{total} (tabla 3.1); y las menores concentraciones de MgO, CaO, Na_2O , MnO, Be, Co, Sr, La, Sm, Eu, Zn, Cd y C_{total} (tabla 3.1). Para el nodo 2, se observan altas concentraciones de Al_2O_3 , Na_2O y Sr (tabla 3.1), mientras que presenta las menores concentraciones de Nb, Sn, Ta, Th, U, Y, Ce, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Mo, Bi y Au (tabla 3.1). Por otro lado, las muestras asociadas al nodo 3 se observan las concentraciones promedio más altas de Fe_2O_3 , CaO, MgO, TiO_2 , P_2O_5 , MnO, Cr_2O_3 , Sc, Ga, Hf, Nb, Sn, Ta, Th, V, Zr, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu y Zn (tabla 3.1), mientras que las menores concentraciones promedio de SiO_2 , Al_2O_3 , Cs, Rb, As y Se (tabla 3.1), se relacionan con el nodo 3. El nodo 4 presenta concentraciones intermedias de todos los elementos como característica general. El nodo 5, se caracteriza por poseer las más altas concentraciones promedio de Rb, U y C_{total} (tabla 3.1), mientras que también asociadas al nodo 5 se observan las menores concentraciones de TiO_2 , Cr_2O_3 , Ba, Zr, Pr, Nd y Tl (tabla 3.1). Asociadas al nodo 6, se presentan las mayores concentraciones promedio de Co, Cs, Y, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Cu, Ni, y Sb (tabla 3.1), por otra parte, las menores concentraciones promedio de K_2O , Ga, Hf y Hg (tabla 3.1), se observan en el nodo 6. Las concentraciones promedio más altas de SiO_2 , K_2O , Ba, Be y Hg (tabla 3.1), se asocian al nodo 7, por otro lado, este nodo, presenta las menores concentraciones

promedio de Fe₂O₃, TiO₂, Sc, V, W, Cu, Ni y Sb (tabla 3.1). Finalmente, el nodo 8, presenta las concentraciones más altas de Pb, Cd y Tl (tabla 3.1).

En la tabla 3.1 se indican los valores promedio para la corteza continental superior (UCC) de diversos elementos; los elementos mayores fueron tomados de McLennan (2001) y los elementos traza de Li (2000). Se han pintado en amarillo las concentraciones más altas de cada elemento, mientras que en celeste las concentraciones más bajas.

Nodo	1	2	3	4	5	6	7	8	UCC
Elementos Mayores (%)									
SiO2	59.74	60.64	54.80	56.34	59.98	55.93	62.61	59.22	66.00
Al2O3	14.28	16.15	13.56	15.34	15.90	16.10	15.64	15.82	15.20
Fe2O3	9.88	5.63	13.73	9.84	5.91	7.74	5.59	8.01	5.03
MgO	130	182	2.41	2.13	162	2.20	136	2.00	2.20
CaO	132	4.22	4.56	4.15	2.84	3.64	3.10	3.76	4.20
Na2O	121	3.68	3.11	2.88	2.66	182	3.14	3.25	3.90
K2O	2.13	2.40	2.08	2.24	2.59	196	2.72	2.25	3.40
TiO2	1.13	0.83	1.73	1.32	0.75	0.96	0.81	1.04	0.68
P2O5	0.23	0.21	0.25	0.21	0.20	0.24	0.15	0.18	0.15
MnO	0.05	0.11	0.24	0.22	0.12	0.18	0.10	0.12	0.08
Cr2O3	0.004	0.004	0.010	0.008	0.003	0.004	0.004	0.007	
Elementos Trazas (ppm)									
Sc	13.4	9.1	14.2	13.0	10.3	13.9	8.8	115	14.0
Ba	907.6	810.6	757.7	834.2	712.4	715.7	950.4	806.3	570.0
Be	10	13	12	15	2.0	1.9	2.0	16	3.2
Co	8.7	14.6	27.4	24.1	15.9	29.2	11.7	17.6	17.0
Cs	16.9	24.5	110	23.6	32.2	50.5	47.4	20.9	3.7
Ga	16.9	19.4	20.6	20.3	18.2	16.9	19.1	20.4	18.0
Hf	7.3	5.8	13.2	7.8	5.8	5.5	7.5	7.3	4.0
Nb	11.4	8.9	16.5	11.3	12.0	10.2	11.4	10.7	15.0
Rb	85.7	80.3	65.2	84.4	107.1	88.4	99.9	80.4	110.0
Sn	2.7	12	3.2	2.2	2.3	2.4	2.0	19	3.3
Sr	376.4	667.7	545.1	584.9	435.3	439.6	559.3	577.1	350.0
Ta	0.76	0.59	1.12	0.74	0.89	0.64	0.80	0.75	15
Th	14.5	8.4	16.7	12.8	12.6	11.8	13.3	10.7	11.0
U	3.6	2.7	3.3	3.1	3.8	3.2	3.1	2.8	2.8
V	17.11	134.3	358.8	253.8	116.9	164.4	119.9	193.4	140.0
W	8.7	13	2.0	14	17	2.2	12	13	13
Zr	268.1	2019	484.6	288.5	194.0	194.2	277.0	274.6	170.0
Y	14.7	12.0	18.2	15.5	16.4	23.0	12.9	13.4	22.0
La	28.9	29.3	67.9	38.4	29.1	30.7	41.4	34.2	30.0
Ce	63.1	62.1	137.8	80.1	63.8	70.3	80.8	69.2	58.0
Pr	6.73	6.71	13.62	8.38	6.68	7.65	8.26	7.33	6.6
Nd	25.3	26.1	47.8	31.2	25.1	30.3	28.8	26.9	26.0
Sm	4.2	4.3	6.9	5.0	4.4	5.5	4.5	4.3	4.5
Eu	0.96	1.0	1.37	1.20	0.98	1.33	1.05	1.09	1.1
Gd	3.31	3.26	5.01	3.89	3.60	4.85	3.27	3.37	3.9
Tb	0.5	0.4	0.7	0.6	0.5	0.8	0.5	0.5	0.6
Dy	2.7	2.2	3.4	2.8	2.9	4.1	2.3	2.4	3.5
Ho	0.52	0.40	0.62	0.53	0.56	0.79	0.43	0.45	0.7
Er	15	11	18	15	16	2.2	12	13	2.0
Tm	0.24	0.17	0.28	0.24	0.25	0.33	0.20	0.20	0.3
Yb	15	11	19	15	15	2.1	13	13	2.0
Lu	0.24	0.16	0.30	0.23	0.24	0.32	0.21	0.21	0.3
C _{total} (%)	0.12	0.30	0.29	0.38	0.63	0.61	0.25	0.23	
S _{total} (%)	0.916	0.165	0.197	0.118	0.164	0.147	0.120	0.127	
Mo	7.3	0.8	12	0.9	13	15	1.1	12	16
Cu	34.9	27.1	27.2	30.6	35.6	38.6	22.5	24.4	39.0
Pb	19.5	13.3	15.2	12.1	12.7	13.9	14.7	48.0	17.0
Zn	43.9	95.4	129.0	127.1	93.5	103.0	78.3	119.2	67.0
Ni	7.1	8.1	13.1	13.9	9.9	18.2	6.9	9.4	55.0
As	335.3	79.6	71.3	71.5	139.6	269.9	120.2	164.8	16
Cd	0.08	0.50	0.56	0.41	0.32	0.36	0.31	0.62	0.1
Sb	4.9	0.7	17	0.6	17	13.0	0.3	0.6	0.2
Bi	12	0.1	0.2	0.2	0.3	0.5	0.2	0.2	0.1
Ag	0.05	0.05	0.05	0.05	0.07	0.07	0.05	0.05	0.1
Au (ppb)	18	0.6	0.7	0.8	0.8	11	0.7	0.9	2.3
Hg	0.163	0.043	0.033	0.107	0.076	0.027	0.202	0.058	0.1
Tl	0.40	0.21	0.31	0.28	0.20	0.32	0.26	0.42	15
Se	3.09	0.36	0.25	0.41	0.73	124	0.73	0.31	0.1

Tabla 3.1: Tabla de concentraciones promedio de los elementos, asociado a cada uno de los nodos resultantes del análisis estadístico con redes neuronales artificiales.

Los resultados observados de la tabla 3.1 y de la figura 3.11, revelan que las muestras asociadas a un mismo nodo, tienden a presentar una distribución geográfica común (figura 3.12). En efecto, según el tipo o los tipos de nodos preponderantes, para el cauce del río Lluta se definen dos tramos principales: 1) tramo bajo (desde la Qda. Socoroma hasta la desembocadura), y 2) tramo alto (desde el río Caracarani en la cabecera hasta la confluencia con la Qda. Putre, figuras 3.12, 3.13 y 3.14).

El tramo alto se caracteriza porque la mayoría de las muestras están asociadas al nodo 8. Luego, una característica distintiva de los sedimentos asociados al tramo alto, corresponde a la asociada al nodo 8, es decir, altas concentraciones promedio de Pb, Cd, Tl, Ga y Zn junto a concentraciones promedio medias a altas de Sc, As, Sr, K_2O , Na_2O , CaO, MgO, MnO, Cr_2O_3 y Al_2O_3 (figuras 3.14 y 3.11; tabla 3.1). En contraparte, la muestra del río Lluta asociada al nodo 7 (aguas abajo Qda. Huaylillas) contiene concentraciones promedio medias, como característica general, de CaO, Al_2O_3 , Na_2O , Cd y Zn (figuras 3.14 y 3.11; tabla 3.1).

Las muestras del tramo bajo, se asocian a los nodos 2, 3, 4 y 8 (figura 3.13), y como grupo se caracterizan por presentar concentraciones promedio medias a altas de CaO, Cd, Ga, Na_2O , Sr, Zn y MgO (figura 3.11b; tabla 3.1). En particular, los nodos 4 y 3, se caracterizan por poseer concentraciones promedio medias a altas de Cr_2O_3 , MnO, Fe_2O_3 , TiO_2 , V, Co y Sc (figura 3.11b; tabla 3.1). El nodo 3, es exclusivo de la zona baja del cauce del río Lluta (salvo una excepción en el punto de muestreo 51, figura 3.14) y se observa a partir de Poconchile (figura 3.14). Se caracteriza por presentar altas concentraciones promedio de Sn, Zr, Hf, Nb, P_2O_3 y Ta; altas concentraciones promedio de tierras raras tales como, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Th; concentraciones promedio medias de Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb y Lu; y las menores concentraciones promedio de SiO_2 y Al_2O_3 de la zona de estudio (figura 3.11b; tabla 3.1).

Los restantes sedimentos del tramo bajo del río Lluta, están asociados al nodo 2, ubicados en la parte baja del tramo bajo y en una zona donde se ubican yacimientos metalíferos de la Franja Metalogénica del Paleoceno-Eoceno Inferior (Ordóñez y Rivera, 2004; figura 3.13). Estos sedimentos se caracterizan por presentar altas

concentraciones promedio de Sr y Na₂O (figura 3.11b; tabla 3.1).

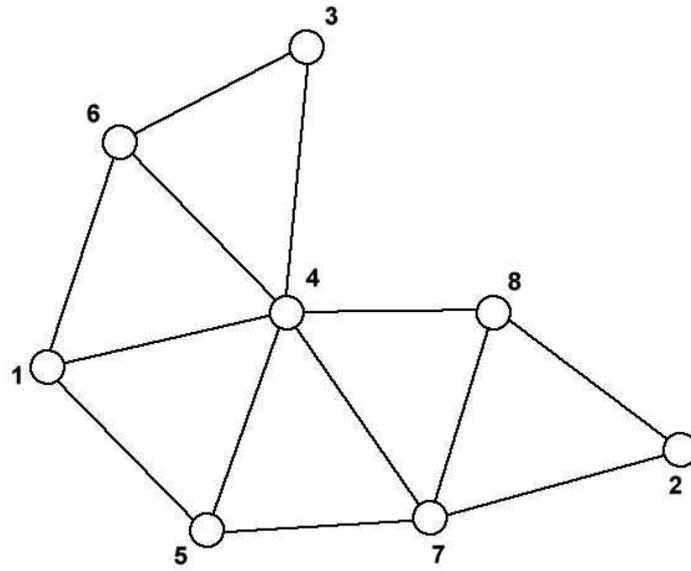
Los principales afluentes del río Lluta, río Caracarani, Qda. Allane, Qda. Putre y Qda. Socoroma, tienen señales químicas propias y distintas entre sí. En efecto, asociados a ellas están los nodos 1, 2, 4, 5, 6, 7 y 8 (figura 3.12).

Una señal química conspicua del río Caracarani, es su asociación al nodo 8, cuyas características ya han sido mencionadas (figura 3.14).

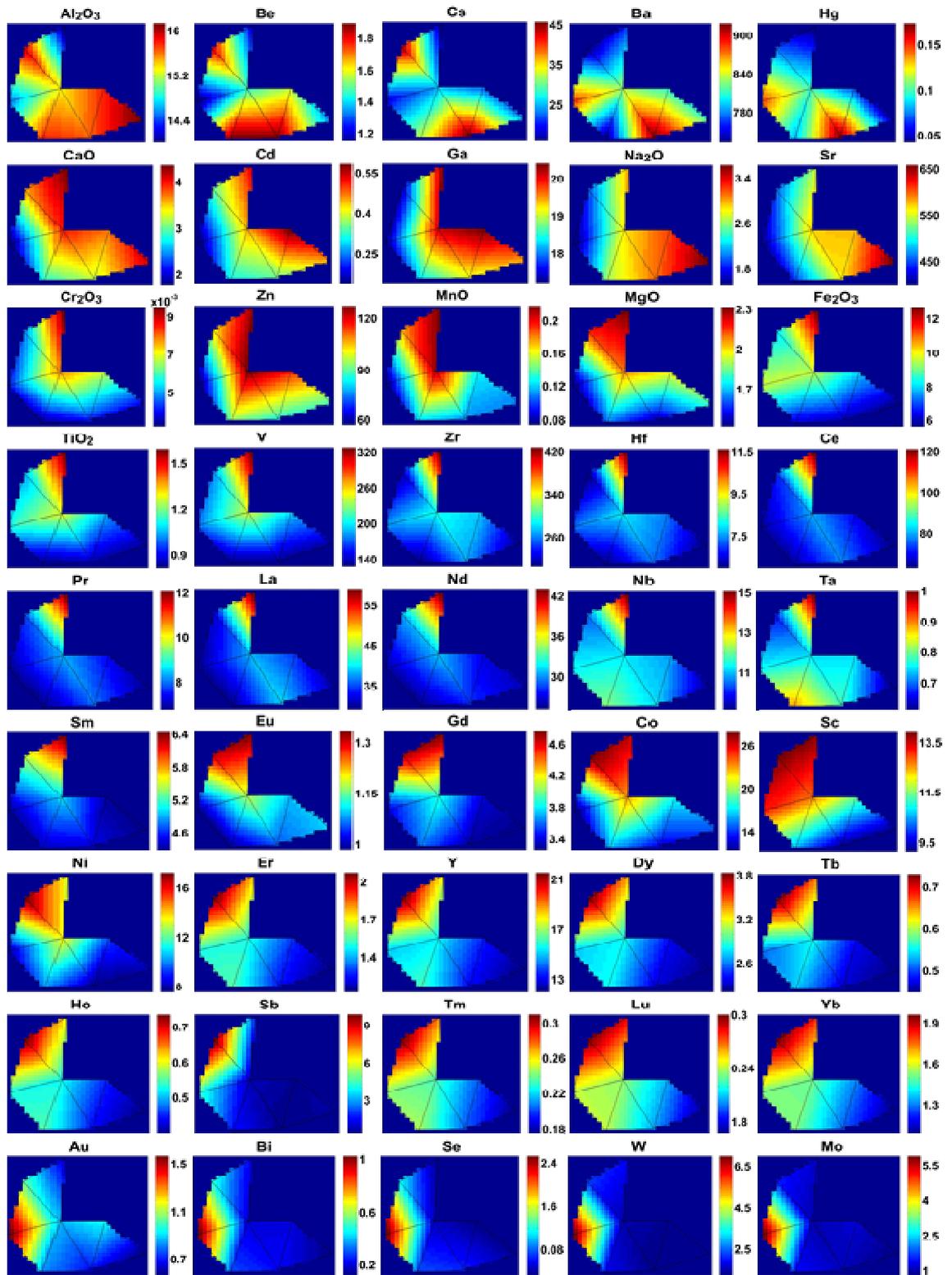
Los sedimentos asociados a la Qda. Allane presentan una signatura química caracterizada por muestras asociadas a los nodos 4 y 7 (figura 3.11b y 3.14). Destacan, para el nodo 4, las altas concentraciones promedio de Zn, Cd, MnO y Cr₂O₃; y las concentraciones medias de Ba, K₂O y Rb. En relación al nodo 7, se observan altas concentraciones promedio de Be, Cs, Ba, Hg y K₂O; y concentraciones medias de Zn, Cd, Sr y CaO (figura 3.14; tabla 3.1).

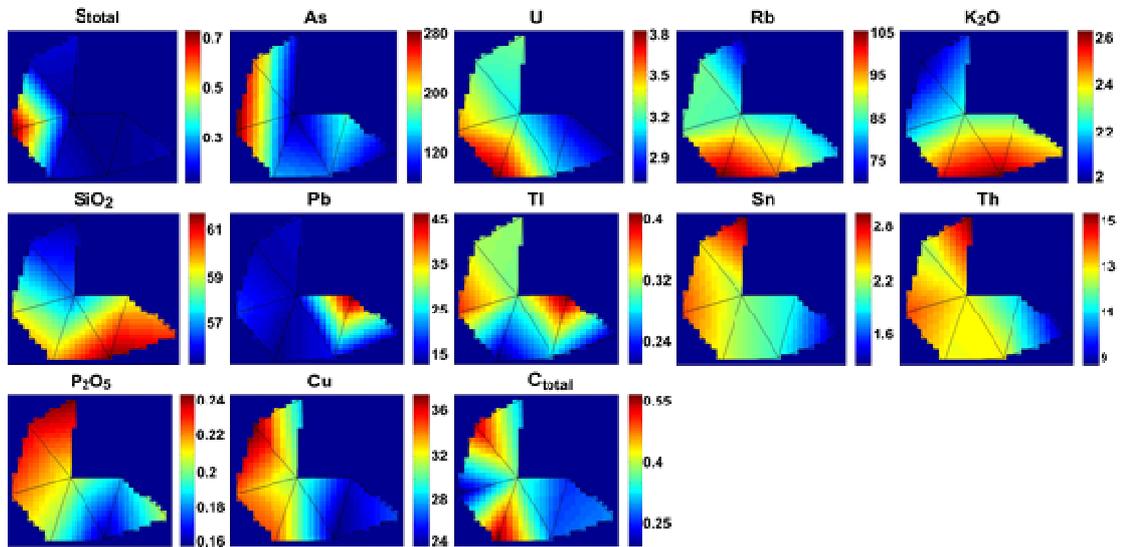
Un rasgo común y distintivo, tanto para las muestras asociadas a la Qda. Putre como para la Qda. Socoroma, es la presencia de sedimentos asociados a los nodos 1, 5 y 6 (figura 3.15). Estos nodos, como grupo, presentan concentraciones promedio medias a altas de As (las más altas asociadas al nodo 1) y de Cu (las más altas asociadas al nodo 6); y concentraciones promedio medias de Sn y Th (figura 3.11b y 3.15; tabla 3.1). En particular, los sedimentos asociados al nodo 1 se caracterizan por presentar altas concentraciones promedio de S_{total}, Au, Bi, Se, W y Mo; y como rasgo común con el nodo 7 (Qda. Allane), altas concentraciones de Ba y Hg (figuras 3.11b, 3.14 y 3.15; tabla 3.1). Por otro lado, también se observan sedimentos asociados a las subcuencas de las Qdas. Putre y Socoroma, específicamente ligados al nodo 6, con una señal química caracterizada por concentraciones promedio altas de tierras raras como Ho, Tm, Lu, Yb, Tb, Dy, Er, Gd y Eu; y también altas concentraciones promedio de Sb, Y, Ni, Co, Sc, Be (al igual que el nodo 5) y Cs (al igual que el nodo 7; figura 3.11b y 3.15; tabla 3.1).

Por último, en los sedimentos de estas dos subcuencas de drenaje (Qdas. Putre y Socoroma), se observa una conspicua señal caracterizada por altas concentraciones promedio de C_{total} (nodos 5 y 6; figura 3.15; tabla 3.1).



a)





b)

Figura 3.11: a) Mapa neuronal resultante del análisis de los datos geoquímicos de los sedimentos activos del Sistema Fluvial del Río Lluta. Cada nodo (círculos) se representa con un número. b) Visualización bi-dimensional de la distribución de cada variable de entrada en el mapa neuronal.

De la figura 3.11 se puede notar que las distribuciones de las distintas variables son comparables visualmente con facilidad. Las escalas de color a la derecha indican concentraciones (wt% o ppm para los elementos mayores o en traza, respectivamente, a excepción del Au que está en ppb).

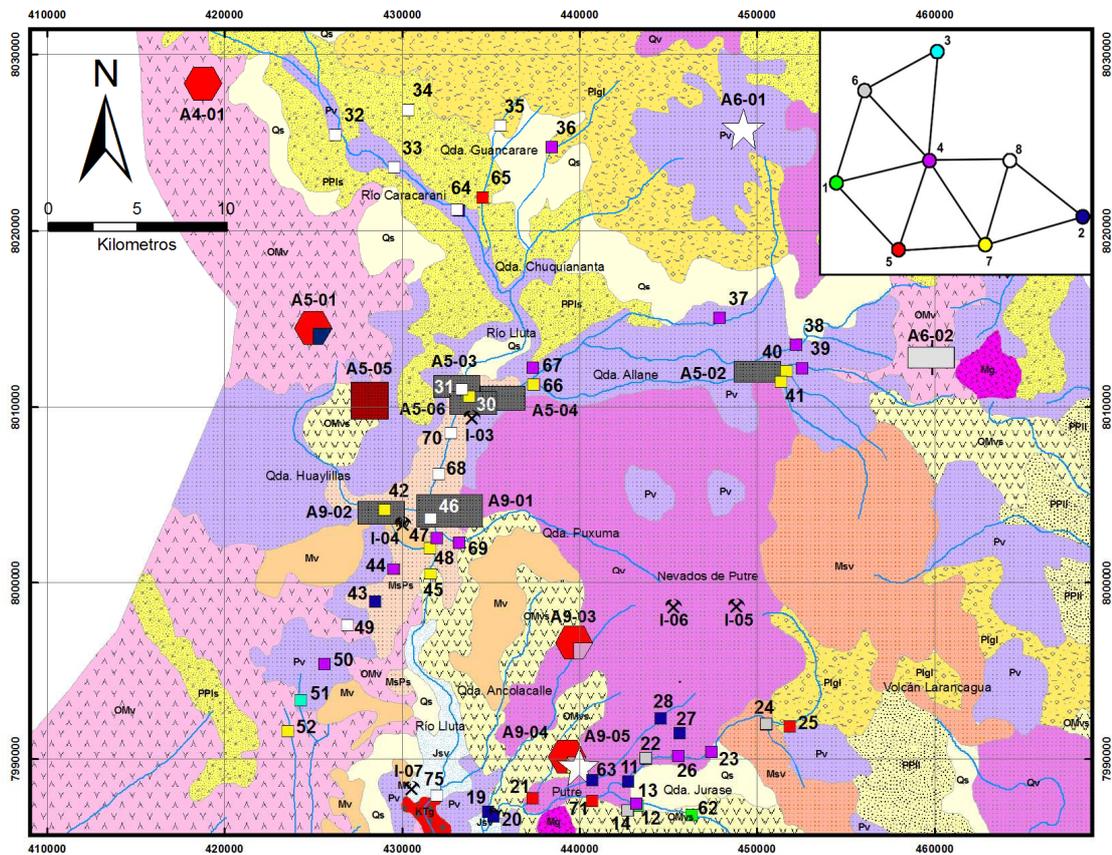


Figura 3.14: Detalle de la distribución geográfica de las muestras de sedimentos activos en el tramo alto del río Luta.

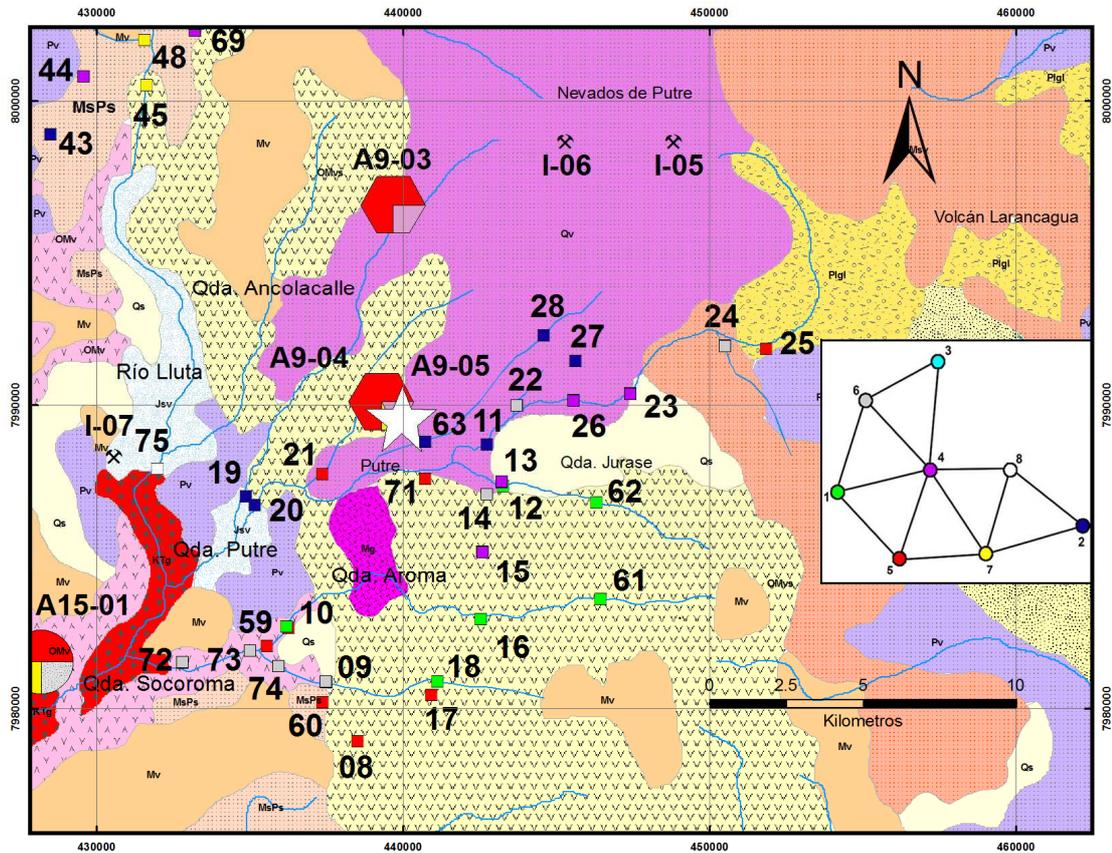


Figura 3.15: Detalle de la distribución geográfica de las muestras de sedimentos activos en los sectores de las Qdas. Putre y Socoroma.

La información geológica de las figuras 3.13, 3.14 y 3.15 corresponde a la misma que la figura 2.1 y la de los prospectos metálicos a la figura 2.3.

3.3 Composición mineralógica de los sedimentos

Las composiciones mineralógicas de los 31 puntos de muestreo seleccionados para estos fines se indican en la tabla A3. Estos resultados muestran que aparte de una asociación casi ubicua de cuarzo-albita-anortita, también hay muestras con presencia de otros feldespatos tales como ortoclasa y anortoclasa, aunque en menor cantidad. Los sedimentos del curso superior del río Lluta (tramo alto), sector Qda.

Putre, sector Qda. Socoroma, sector Qda. Allane y las pequeñas quebradas al oeste del río Lluta en el tramo alto, se caracterizan por presentar minerales máficos del grupo de las anfíbolos (riebeckita, edenita, actinolita, hornblenda o Fe-actinolita) o del grupo de los piroxenos (enstatita o augita), estos últimos principalmente en la Qda. Putre; los que prácticamente desaparecen hacia el tramo bajo del río (tabla 3.2). Similarmente, la presencia de moscovita en el cauce principal del río Lluta está constreñida al tramo alto, entre las confluencias de la Qda. Chuquiananta y aguas abajo de la Qda. Huaylillas, mientras que ninguna muestra del tramo bajo del río Lluta presenta este mineral (tablas 3.2 y A3). Adicionalmente, en los sectores de la Qda. Putre y Qda. Socoroma, es común la presencia de moscovita. La presencia de minerales de arcillas (montmorillonita, illita, saponita o nontronita), es un factor común en toda la cuenca, a excepción del tramo alto del río Lluta (tabla 3.2); por otro lado, las arcillas asociadas al tramo bajo del Lluta son muy poco abundantes y solo se observan localmente, evidenciando que no es un factor común de este tramo. Los minerales del grupo de las micas (biotita, annita o flogopita) están presentes, en general, en todos los sectores de la cuenca del río Lluta, aunque no se observan en los sectores de las Qdas. Socoroma y Allane (tablas 3.2 y A3). Por otro lado, el mineral cordierita es muy común en los sedimentos de la cuenca del río Lluta (tabla 3.2).

En este sistema fluvial existe una amplia distribución espacial de minerales de uranio (iriginita, ianthinita, petscheckita, furongita, sengierita, metauranocircita, betafita o hidróxidos de uranio); en particular, los sedimentos del tramo bajo presentan la mayor cantidad y variedad de estos minerales (tablas 3.2 y A3). Por otra parte, la presencia de minerales pesados es limitada (circón y rutilo); y se asocian a los sectores de las Qdas. Putre y Socoroma, en el caso del rutilo y al tramo bajo y la Qda. Allane, en el caso del circón (tabla 3.2). Finalmente, la ocurrencia de minerales que incluyen metales pesados tales como cuprita (Cu_2O), iriginita ($[\text{UO}_2]\text{Mo}_2\text{O}_7 \cdot x3[\text{H}_2\text{O}]$), covelina (CuS), wulfenita ($\text{Pb}[\text{MoO}_4]$), zophiita ($\text{Zn}_2[\text{SeO}_3]\text{Cl}_2$), anglesita ($\text{Pb}[\text{SO}_4]$), entre otros; se encuentran distribuidos ampliamente en la zona de estudio (tablas 3.2 y A3).

Tabla 3.2: Tabla resumen de la difracción de rayos X para sedimentos activos.

Sector	Tramo Bajo					Tramo Alto					Qda. Aliane					Qda. Putre					Qda. Socoroma					W Luta								
	LB-03	LB-82	LB-54	JP-18	LB-50	LB-05	LB-77	LB-42	LB-68	LB-28	LB-30	LB-69	LB-27	LB-65	LB-33	LB-34	LB-38	LB-35	LB-17	LB-18	LB-71	LB-13	LB-58	LB-21	LB-22	LB-10	LB-11	LB-09	LB-57	LB-49	LB-46	LB-39		
Muestra																																		
Punto	3	78	58	56	53	5	75	45	68	31	33	69	30	66	36	37	41	38	19	20	71	11	62	23	24	10	10	9	61	52	49	42		
Mi ineral																																		
Silice																																		
Feldspatos																																		
Condielita																																		
Zeolita																																		
Rutilo																																		
Circón																																		
Piroxenos																																		
Anfibolas																																		
Micas																																		
Arcillas																																		
Salés																																		
Al-fosfato																																		
Fervanita																																		
Boratos																																		
M.xs. Uranio																																		
M.xs. Cobre																																		
Sophita																																		
Sulfatos																																		
Ox. de Fe (III)																																		

3.4 Minerales pesados fracción no-magnética

El análisis de los minerales pesados de la fracción no magnética presenta como características ubicuas en las muestras seleccionadas (LLUTA-LB-29, LLUTA-LB-70, LLUTA-LB-06, y LLUTA-LB-87, puntos 32, 70, 6 y 82 desde las nacientes hacia la desembocadura del río; figura 2.1) la presencia de dos familias de anfíbolos, titanita y epidota. Las anfíbolos se diferencian por sus colores negro y rojizo. Sin embargo, ambas tienen hábito prismático y brillo vítreo, siendo los minerales de mayor abundancia. La muestra LLUTA-LB-87, en general, presenta abundante ceniza en la superficie de los cristales e inclusiones oscuras, probablemente de Fe-Ti (figura 3.16a). Se diferencian también dos familias de clinopiroxenos, una con inclusiones y la otra sin ellas, ambas de hábito prismático a anguloso (tabla A4; figura 3.16a). Fue posible observar además la presencia de actinolita? (mineral verde de hábito fibroso), biotita, ortopiroxeno, epidota, titanita, andradita y granate, siendo la muestra con mayor diversidad de minerales pesados (figura 3.16a; tabla A4).

La muestra LLUTA-LB-06 contiene clinopiroxeno, ortopiroxeno, biotita, apatito y un mineral que no fue posible de determinar (tabla A4), aparte de epidota, titanita y dos familias de anfíbola mencionados arriba. Los minerales clinopiroxeno y ortopiroxeno se observan con hábito anguloso a prismático, mientras epidota, apatito, biotita y titanita se observan, en general, subredondeados (figura 3.16b; tabla A4). De manera similar a la muestra LLUTA-LB-87, la presencia de ceniza e inclusiones oscuras es observada, sin embargo de forma menos abundante. Una característica relevante, es la presencia de clastos con pátinas de sulfuros de cobre (figura 3.16b; tabla A4).

El análisis de la muestra LLUTA-LB-70 arroja la presencia de dos familias de anfíbolos, epidota, titanita, dos tipos de clinopiroxeno y ortopiroxeno. La muestra se observa muy limpia con poca presencia de ceniza e inclusiones (figura 3.16c; tabla A4). La familia de clinopiroxeno menos abundante es muy angulosa y de un color verde oscuro intenso en comparación con los otros clinopiroxenos (figura 3.16c; tabla A4).

La muestra LLUTA-LB-29, en la cabecera del río Lluta, se caracteriza por la presencia de dos familias de anfíbolos, clinopiroxeno, epidota, titanita y biotita. Se

observan, en general, minerales euhedrales. Particularmente prismáticas se observan las anfíbolas, mientras que los clinopiroxenos abundan con hábito prismático a anguloso (figura 3.16d; tabla5). Cabe destacar que durante el análisis de esta muestra se observó un cristal de pirita.

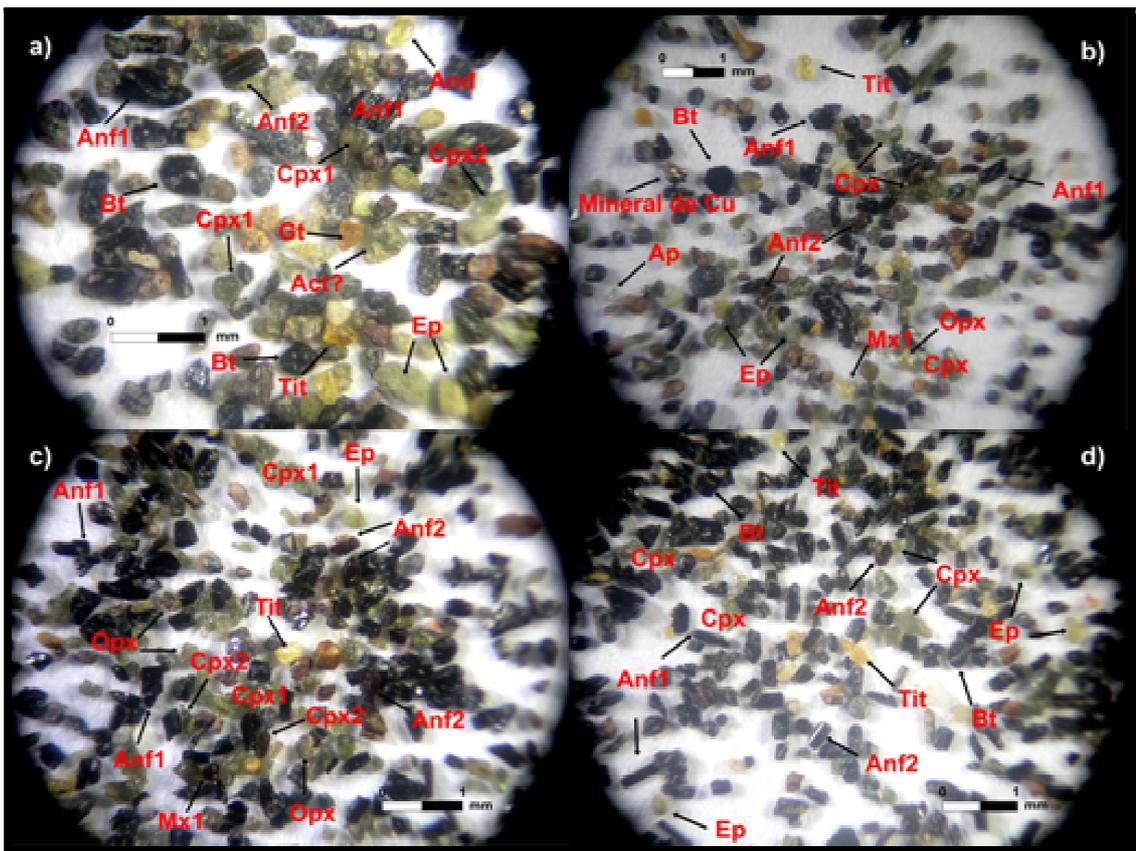


Figura 3.16: imágenes de la fracción no magnética de minerales pesados; a) muestra LLUTA-LB-87, b) muestra LLUTA-LB-06, c) muestra LLUTA-LB-70 y d) muestra LLUTA-LB-29; simbología en anexo.

4. Discusiones

A la luz de los resultados anteriores, en particular de la distribución regional de los nodos del mapa neuronal para los sedimentos activos de la cuenca del río Lluta, es posible dividir el área de estudio en 6 zonas que presentan características químicas específicas. Estas son las zonas asociadas a la Qda. Socoroma, Qda. Putre, Qda. Allane, quebradas menores al oeste del río Lluta, y los tramos bajo y alto del río Lluta (aguas abajo de la conjunción con la Qda. Socoroma y aguas arriba de la Qda. Putre, respectivamente).

4.1 Tramo alto cauce principal del río Lluta

Aguas arriba de la confluencia del río Lluta con la Qda. Putre, incluyendo al río Caracarani en la cabecera, se observa una diferencia litológica a lo largo de este tramo, marcada por la presencia de las unidades Pv (rocas volcánicas), Qs (depósitos no consolidados sedimentarios), MsPs (volcano-sedimentaria) y Jsv (volcano-sedimentaria marina; figura 3.14). Diversos estudios han mostrado directa relación entre los patrones geoquímicos de los sedimentos fluviales y la distribución espacial de las distintas litologías del basamento rocoso asociado al sistema fluvial (e.g. Stone et al., 2003; Lacassie et al., 2004a,b; Dalai et al., 2004; Gordeev et al., 2004; Dinelli et al., 2005; Ohta et al., 2005; Ortiz y Roser, 2006; Lacassie et al., 2006; Sensarma et al., 2008; Lacassie, 2009; Singh, 2010). No obstante, el tramo alto del río Lluta está claramente dominado por la presencia del nodo 8 (altas concentraciones promedio de Pb, Zn, Cd, As, Tl y Ga; tabla 3.1; figuras 3.11b y 3.14), evidenciando que los cambios litológicos no inducen cambios químicos relevantes en los sedimentos fluviales. Incluso, en el tramo bajo del río Lluta aún es posible observar muestras de sedimentos asociadas al nodo 8 (figura 3.13), aunque en menor medida, probablemente debido al fenómeno de dilución por mezcla de aguas y carga sedimentaria. Lacassie (2009)

mostró que marcadas firmas geoquímicas en los sedimentos pueden “enmascarar” otras señales geoquímicas de segundo orden, como las asociadas a los cambios litológicos en el basamento, lo que probablemente ocurre en este caso.

Existen estudios que han evidenciado la relación entre firmas químicas caracterizadas por altas concentraciones de metales pesados y la ocurrencia aguas arriba de actividades mineras activas o abandonadas (drenaje ácido, relaves), mineralización y zonas de alteración (Andrews y King, 1997; Anikiev et al., 2000; Zhang y Wang, 2001; Schäfer y Blanc, 2002; Anh et al., 2003; Hudson-Edwards, 2003; Oyarzún et al., 2003; Oyarzún et al., 2004; Gordeev et al., 2004; Ohta et al., 2005; Macklin et al., 2006; Lacassie, 2009; entre otros). En particular, Lacassie (2009); Gordeev et al. (2004) y Hudson-Edwards (2003), observaron patrones decrecientes exponenciales asociados al “input” generado por actividades mineras. Las concentraciones de Cd y Zn aumentan bruscamente aguas abajo de la confluencia del río Lluta con la Qda. Allane (figura 3.9; tabla A1), lo que podría interpretarse como contaminación antrópica, sin embargo, los patrones de los sedimentos activos no presentan el típico patrón decreciente descrito anteriormente (decreciente exponencialmente). Para tener más factores de análisis, se generaron 2 mapas neuronales extras, uno que representa los sedimentos activos asociados sólo al cauce principal del río Lluta (figuras 4.5 y 4.6) y otro que toma todas las muestras pre-industriales recolectadas en el estudio (figuras 4.1 y 4.2). En las 3 figuras asociadas a estos mapas de redes neuronales se encontró una correlación positiva entre las concentraciones promedio de Cd y Zn; y las de CaO, MgO, Al₂O₃, MnO y Fe₂O₃ (nodos 2, 3, 4 y 8 para figura 3.11; nodos 1, 2, 4 y 6 para figuras 4.5 y 4.6; y nodos 1, 4 y 5 para figuras 4.1 y 4.2), y espacialmente se observa una correspondencia con litologías volcano-sedimentarias con mayor contenido de carbonatos, las que estarían aportando material detrítico (unidades MsPs, Jsv, en tramo alto del río Lluta; figuras 3.14, 4.5 y 4.1). Esto concuerda con las altas concentraciones promedio de CaO y MgO; y el acoplamiento de elementos como Sr y Ba; y valores menores de SiO₂ y K₂O con respecto a otros nodos (tabla 3.1; figuras 3.11 y 3.14; Zhang y Wang, 2001; Dalai et al., 2004; Dinelli et al., 2005; Lacassie, 2009). La relación positiva con MnO, está asociada

a la presencia de yacimientos de manganeso ubicados adyacentes al tramo alto del río Lluta (figuras 3.14 y 3.11).

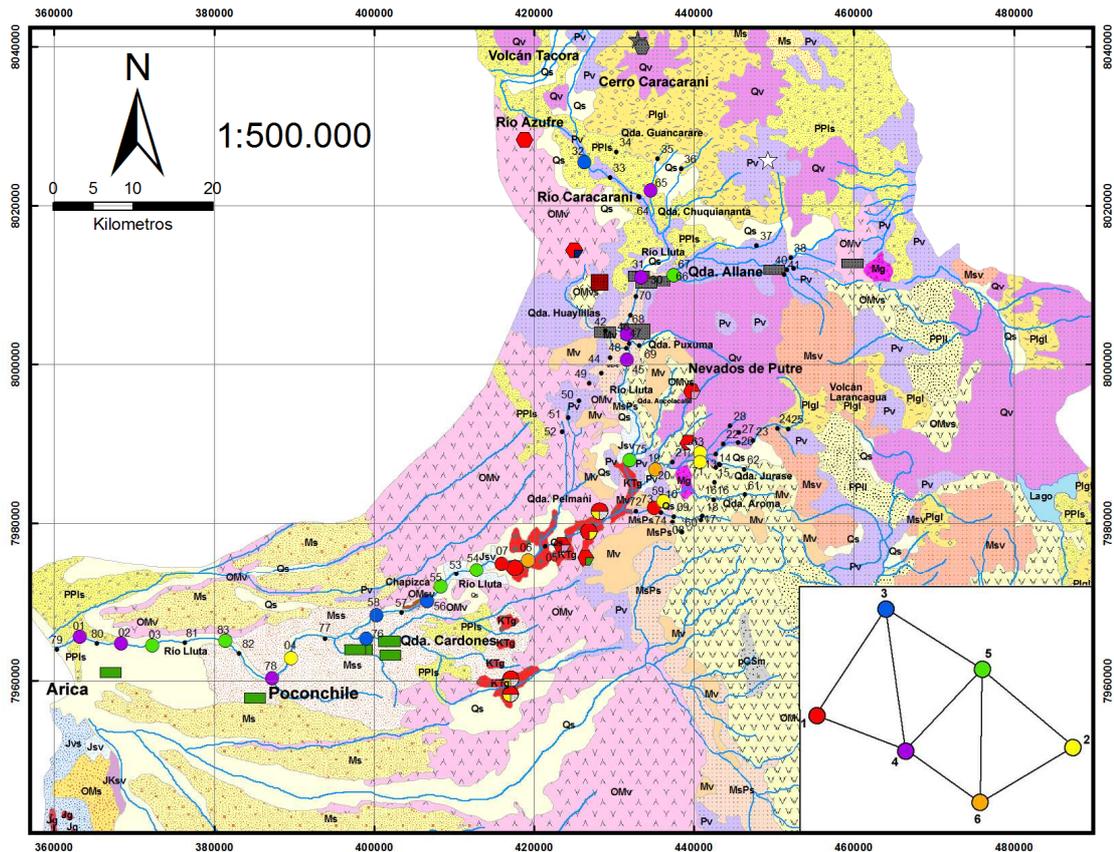
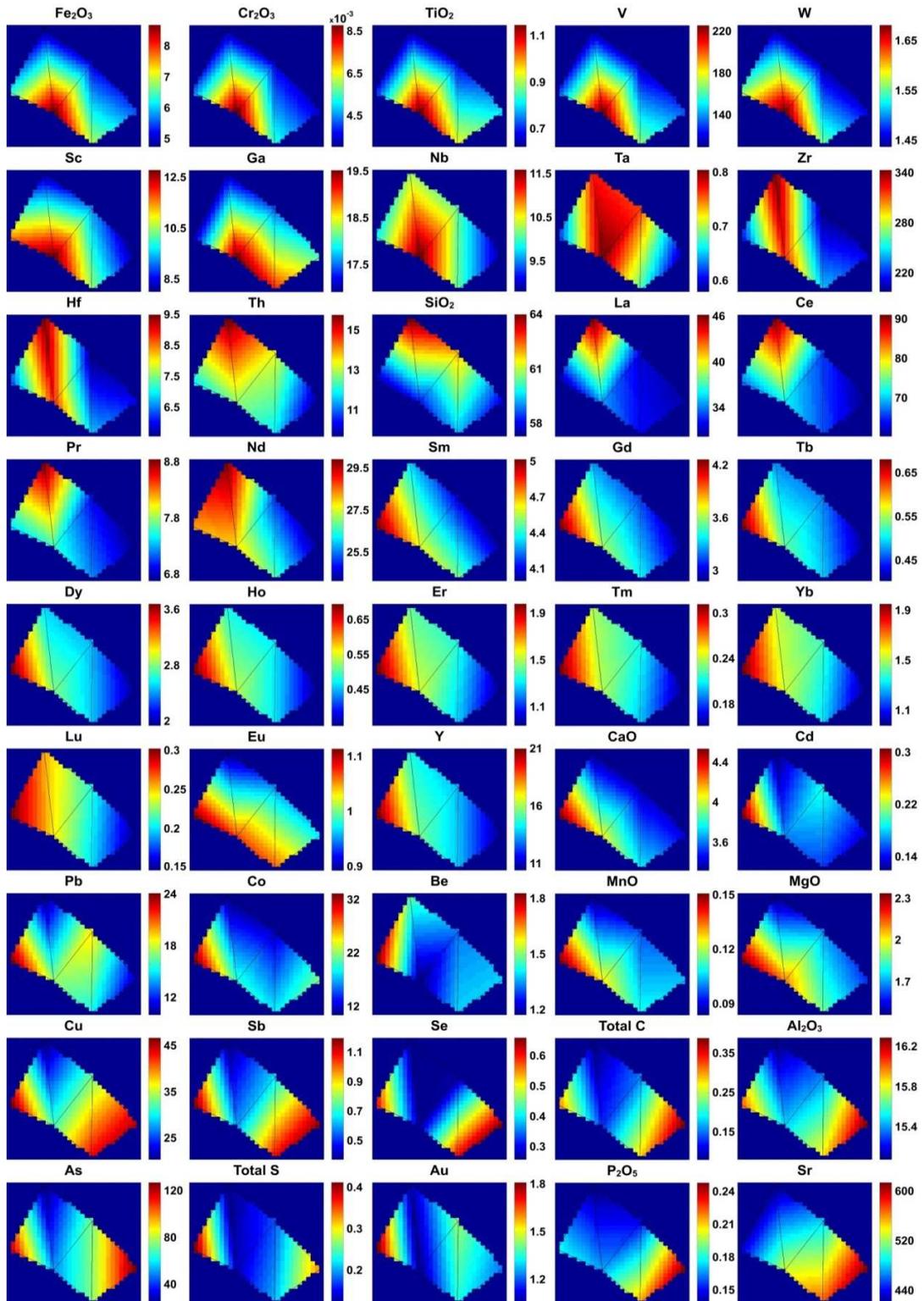


Figura 4.1: Distribución geográfica de las muestras de sedimentos pre-industriales recolectadas en el sistema fluvial del río Lluta.

La figura 4.1 incluye información acerca del nodo al cual cada muestra está asociada (según código de color que se muestra en el inserto). Los nodos corresponden al mapa neuronal resultante del análisis de redes neuronales artificial utilizando datos geoquímicos de los sedimentos pre-industriales recolectados (ver inserto). Los prospectos metálicos poseen la misma información que en la figura 2.3.



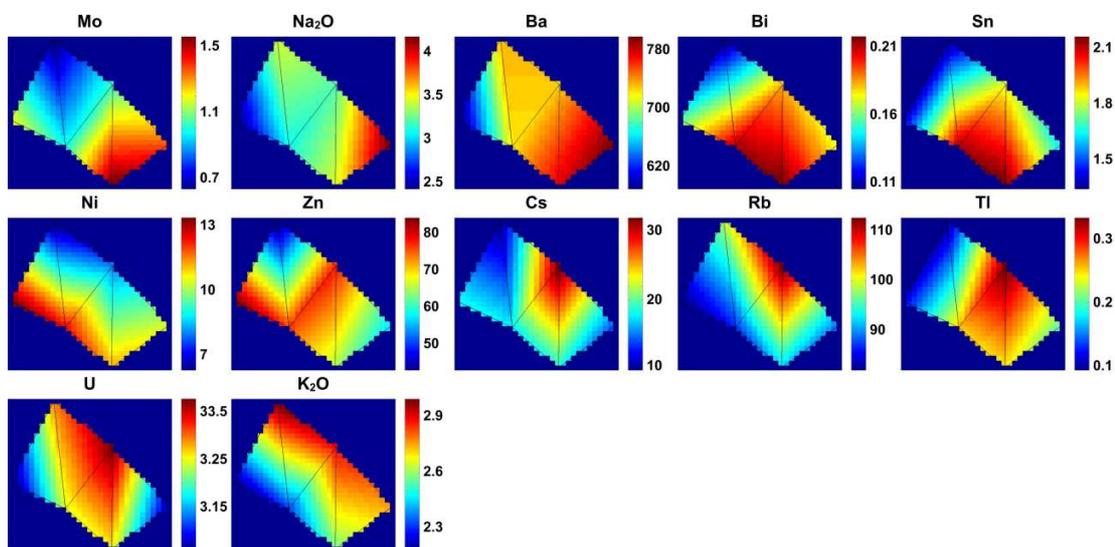


Figura 4.2: Visualización bi-dimensional de la distribución de cada variable de entrada en el mapa neuronal asociadas a los sedimentos pre-industriales (ver inserto figura 4.1).

Las distribuciones de las distintas variables pueden compararse visualmente con facilidad. Las escalas de color a la derecha indican concentraciones (wt% o ppm para los elementos mayores o en traza, respectivamente; a excepción de Au que está en ppb).

Por otra parte, el pH del río Caracarani, es fuertemente influenciado por el río Azufre, que a su vez está influenciado por el volcán Tacora y la ex mina de azufre Aguas Calientes (figura 3.14). El río Azufre le confiere al río Lluta su bajo pH y alto contenido de azufre (DGA, 2004). Hasta el año 1990, los valores de pH del río Caracarani (cabecera del río Lluta) eran de 6 a 7, pero una vez que el río Azufre se desvió hacia el río Caracarani, éste bajó sus valores de pH, llegando incluso a 2.61 (DGA, 2004). Actualmente, el valor del pH del río Caracarani en período de primavera (período en el cual se realizó la campaña en terreno), es pH=6 (pH= 4.6 en verano). Cao et al. (2001), Sen Grupta y Bhattacharyya (2008), y Cappuyns y Swennen (2008) observaron que disminuyendo a pH's más ácidos, existe una mayor capacidad de lixiviación de diversos elementos, entre ellos Cd, Zn y As. En el caso del río Lluta, específicamente en el tramo alto, se explicaría de manera similar al haber una mayor movilización de elementos cuando el pH se acidifica, lo que asociado a las características naturales de la zona (litologías y mineralización con minerales de

manganeso con impurezas de Zn y Pb, por ejemplo) entregan el background apropiado para la configuración antigua y actual de los sedimentos del río Lluta (tablas 1 y 2; figura 3.9). De esta manera, una vez que el pH retoma valores cercanos a 6, la capacidad de adsorción de los sedimentos aumenta (Cappuyns y Swennen, 2008), generando la diferencia de concentración entre los sedimentos activos y los sedimentos pre-industriales (tablas 1 y 2; figura 3.9). Por otro lado, hay que agregar el efecto de mezcla con la Qda. Allane (figura 3.14 y 3.9), el cual tiene un pH de 7.5 en primavera (DGA, 2004), y que podría subir el pH luego de mezclarse con el río Lluta. Dinelli et al. (2001); Dinelli y Tadeo (2002) y Kimball et al. (1995), han mostrado depositación de coloides blancos, usualmente enriquecidos en Al, Cd y Zn, comúnmente en sistemas fluviales donde ha ocurrido un brusco aumento del pH luego de la confluencia de ríos. En el presente estudio, y particularmente en el tramo alto del río Lluta, se observan coloides blanco-amarillentos (figura 4.3), enriquecidos en Al_2O_3 , Cd y Zn (figuras 3.11b y 3.14), y que ayudarían a entender la problemática de la zona. Adicionalmente, Mouvet y Bourg (1983) y Gaillardet et al. (2003); mostraron que para valores de pH mayores a 6 la capacidad de adsorción de los sedimentos aumenta bruscamente, lo que reafirmaría la hipótesis anterior. Es importante destacar la amplia distribución de elementos como Zn y Cd asociada a los nodos de los mapas neuronales y sus altas concentraciones promedio enriquecidas con respecto a las concentraciones de la corteza continental superior según Li (2000) (tabla 3.1; figuras 3.11b, 3.13, 3.14, 3.15, 4.5 y 4.6), indicando que son una característica regional (asociada a una zona espacial amplia y de abundantes prospectos metálicos; figura 2.3) y no puntual, desechando la opción de que su aumento de concentraciones en los sedimentos activos se debe a actividades de extracción minera directas. Sin embargo, los cambios de pH, probablemente se deban a factores antropogénicos, en este caso las azufreras en los faldeos del volcán Tacora (DGA, 2004), específicamente la ex mina de Azufre Aguas Calientes (a un costado del cauce del río Azufre; figura 4.4).



Figura 4.3: Concentración de coloides blanco-amarillentos en el sistema fluvial del río Lluta.

La figura 4.3 representa: a) confluencia río Lluta con Qda. Allane, b) y c) sector Qda. Socoroma, d) sector Qda. Putre. a) y b) muestran el aumento de coloides luego de la confluencia de afluentes con mayor pH; c) y d) acumulación de coloides.

A diferencia de los patrones en las concentraciones de Zn y Cd (figura 3.9), se observa un marcado patrón decreciente exponencialmente para las concentraciones de los sedimentos activos de los elementos Mo, Hg, As y Pb (con valores máximos de 2.5 ppm, 0.17 ppm, 575.2 ppm y 162.6 ppm, respectivamente y asociados todos a la muestra LLUTA-LB-30, en el punto 33 de muestreo; figura 3.10; tabla A1); lo que coincide con lo esperado para ríos contaminados por actividades mineras (Lacassie, 2009; Hudson-Edwards, 2003), además de la mayor concentración de estos elementos en los sedimentos activos comparados con los sedimentos pre-industriales (figura 3.10; tablas 1 y 2).

Diversos estudios han mostrado la importancia de los óxidos/hidróxidos de Fe-Mn, materia orgánica, fracción arcillosa o minerales de arcilla y carbonatos en los fenómenos de adsorción/desorción, co-precipitación y recubrimiento de metales pesados y elementos traza en sedimentos fluviales de distintas cuencas a través del mundo (Coquery y Welbourn, 1995; Konhauser et al., 1997; Yu et al., 2000; Cao et al., 2001; Filgueiras et al., 2004; Syrovetsnik et al., 2007; Kelderman y Osman, 2007; Tsai et al., 2007; Sen Gupta y Bhattacharyya, 2008; Cappuyns y Swennen, 2008; Lacassie, 2009; entre otros). Específicamente, se observa de las figuras 3.11b y 4.6, y de la tabla 3.1, la correlación positiva de distintos elementos con Fe_2O_3 , lo que muestra su capacidad de sorción de diversos elementos, además del control en las concentraciones que ejercen minerales ferromagnesianos (ricos en Fe y Mg) sobre elementos tales como Fe, Ti, Mn, Mg, V, Cr, Ta y Nb (Rollinson, 1993). Goldberg et al. (1996) y Mihaljevic et al. (2004); sugieren que bajo condiciones oxidantes, los óxidos e hidróxidos de hierro son la fracción sedimentaria más importante en la adsorción y concentración de As. Por otro lado, Dold y Fontboté (2001) y Dold (2003) muestran que los hidróxidos de Fe tienen un rol importante en la retención de oxianiones de As y Mo. Adicionalmente, Goldberg et al. (1996) muestra que la adsorción de Mo y As en arcillas es mínima para valores de pH mayores que 5, esto sumado a que en el río Caracarani el pH varía entre primavera-verano dentro de los valores 6 y 4.4, respectivamente, sugiere que para el río Caracarani el As y Mo están controlados por óxidos y/o hidróxidos de Fe. Por otro lado, numerosos estudios (e.g. Syrovetsnik et al., 2007; Sen Gupta y Bhattacharyya, 2008; Feyte et al., 2010), muestran una importante asociación del Pb a la fracción de óxidos/hidróxidos de Fe. Particularmente, Feyte et al. (2010); bajo condiciones similares a las del presente estudio (condiciones oxidantes y de pH entre 5 y 6), indicó que, incluso con una fuerte presencia orgánica, los cationes Pb^{2+} son controlados por oxihidróxidos de Fe. Las hipótesis sobre el control de Fe_2O_3 sobre los elementos As, Mo y Pb, podrían ser apoyadas también, por la similitud entre los patrones geográficos para los sedimentos activos en el tramo del río Caracarani (figuras 3.7 y 3.10). Sin embargo, para cationes de Hg^{2+} , el factor ligante preferencial es la materia orgánica; resultado soportado por otros estudios realizados sobre la concentración sedimentaria de Hg y su relación con materia orgánica (e.g. Hollweg et al., 2009; Hammerschmidt y Fitzgerald, 2004). Adicionalmente, se observa un patrón

similar de la materia orgánica C_{total} y Hg en el tramo alto del río Lluta (figuras 3.9 y 3.10). Todo esto sugiere que la concentración de Hg, está probablemente ligada a la presencia de materia orgánica proveniente de los bofedales aguas arriba del río Caracarani (DGA, 2004) y que la concentración de Pb se asocia a la presencia de óxidos e hidróxidos de hierro.

Los valores promedio en el cauce principal del río Lluta (tramo bajo y alto, figuras 3.13 y 3.14) para las concentraciones en los sedimentos activos de los elementos As, Pb, Cd y Zn son, aproximadamente, 149 ppm, 38 ppm, 0.8 ppm y 148 ppm, respectivamente; mayores en todos los casos, a las concentraciones promedio de la corteza continental superior (Upper Continental Crust; UCC), según los valores de Li (2000) (As=1.6 ppm, Pb=17 ppm, Cd=0.1 ppm y Zn=67 ppm). En adición, las concentraciones promedio de los sedimentos pre-industriales para los elementos As, Pb, Cd y Zn, son menores y con valores aproximados de 47 ppm, 19 ppm, 0.2 ppm y 73 ppm. Lo discutido anteriormente y estos valores, sugiere un enriquecimiento de estos elementos en los sedimentos activos del cauce principal del río Lluta debido, principalmente, al pH ácido actual que las aguas del río Azufre le confieren (DGA, 2004). Sin embargo, las concentraciones pre-industriales de Pb, Zn y Cd, son muy cercanas a los valores promedio de la UCC (Li, 2000). Por otro lado, las concentraciones promedio de As de los sedimentos pre-industriales en el río Lluta y, en general, en toda la zona de estudio (tablas 1 y 2) sugieren que el As está ligado a la geología de base de la zona. Con respecto a esto, en la cuenca del sistema fluvial del río Lluta, existe una intensa actividad sulfatárica ligada a los volcanes de la zona (e.g. Tacora, Chupiquiña, Taapaca o Nevados de Putre y Guallatiri, entre otros), los que han generado depósitos de azufre asociados a actividad hidrotermal; se observan además extensas zonas de alteración hidrotermal debido a intrusiones de unidades como KTg y Mg (figuras 2.1 y 4.9). Autores como, Mihaljevic et al. (2004); Oyarzun et al. (2007); Oyarzun et al. (2004); y Ohta et al. (2005), han observado niveles contaminantes de As debido a procesos geológicos. Entre ellos, fue asociado a zonas de alteración hidrotermal intensa (alteración argílica), depósitos epitermales de alta sulfidización, y depósitos de azufre. Si a esto se le agrega la actividad geotérmica de la zona (e.g. Quebrada Jurasi, al oriente del poblado de Putre, Volcán Tacora; figura 3.15), de la

cual emergen especies como arsenitos y arsenatos; y la posibilidad de que depósitos de ceniza volcánicos pueden estar implicados en la generación de aguas con alto contenido de As (Oyarzun et al., 2004; ver Marco Geológico), entonces se explicaría la fuerte presencia de As en la cuenca del sistema fluvial del río Lluta. Por otro lado, de manera similar a lo que ocurre en el río Elqui, IV región de Chile (Oyarzun et al., 2007); la altitud a la que se encuentran las fuentes de As (alto gradiente de pendiente) y el clima que proporciona abundantes lluvias durante el período estival (invierno Boliviano, ver Clima; figura 1.2), produce que el regolito rico en As sea fácilmente erodado, lavado aguas abajo, transportado, y finalmente, incorporado a la fracción sedimentaria del sistema fluvial del río Lluta.

La contaminación es usualmente una combinación entre procesos naturales y antropogénicos (Higueras et al., 2003); en particular, el tramo alto del río Lluta muestra una contaminación por arsénico asociada a procesos geológicos de gran escala, agravada por la acción humana (azufreras en los faldeos del volcán Tacora; figura 4.4); generando así un aumento en las concentraciones de metales pesados como Cd, Zn, Pb y Hg, en los sedimentos activos.

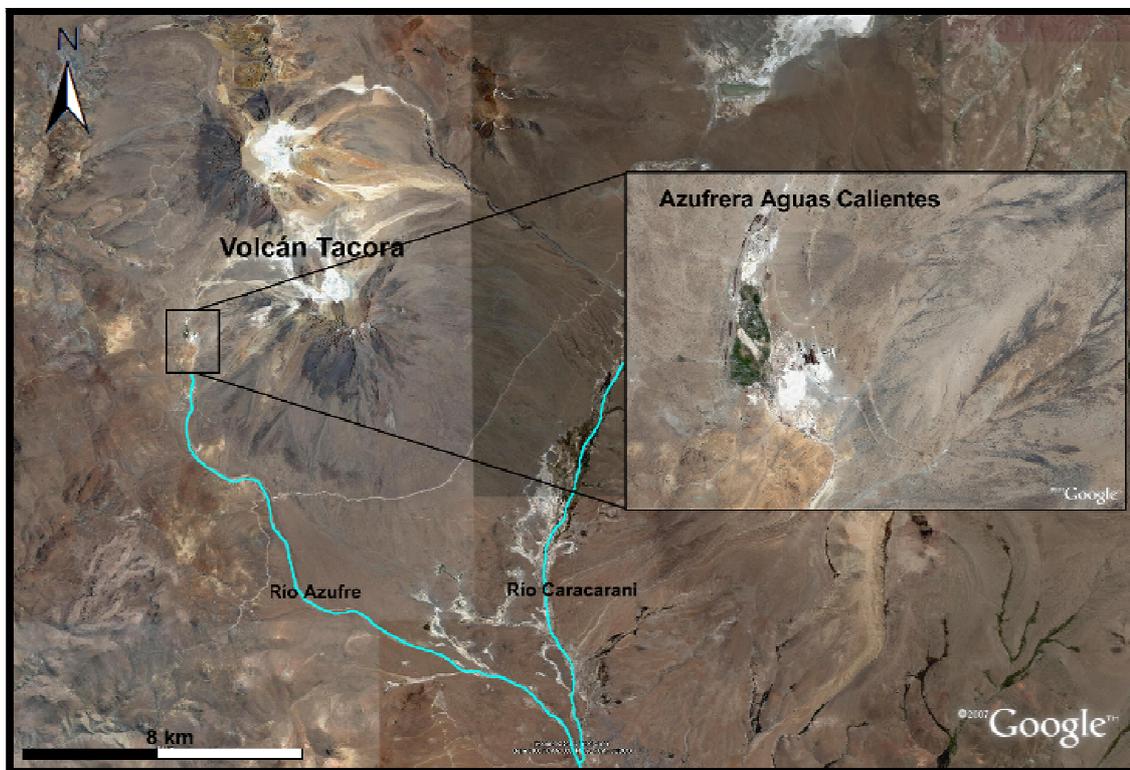


Figura 4.4: Ubicación de ex mina de azufre Aguas Calientes, aledaña al río Azufre afluente del río Lluta en la Alta Cordillera (modificada de Google Earth).

Aguas abajo de la confluencia con la Qda. Huaylillas, se observa una muestra asociada al nodo 7 (figura 3.14). La influencia de la Qda. Huaylillas se aprecia al notar las dos muestras al oeste (punto de muestreo 47 y 42) que también están asociadas al nodo 7 (figuras 3.11 y 3.14), dado el fenómeno de mezcla de aguas y sedimentos. El nodo 7, se caracteriza por tener concentraciones promedio altas de Cs, Be, Hg, Ba, K_2O y SiO_2 ; y concentraciones promedios medias a altas de CaO, Rb y Sr (figura 3.11b; tabla 3.1). Esto, sumado a las bajas concentraciones de Fe_2O_3 y TiO_2 , y las concentraciones promedio medias a bajas de Th y Nb (tabla 3.1; figura 3.11b) sugiere un aporte sedimentario desde litologías con una composición félsica (Lacassie et al., 2004b; Dinelli et al., 2005). En efecto, las litologías dominantes espacialmente para el nodo 7, corresponderían a las componentes félsicas de las unidades volcánicas OMv

(Formación Oxaya), Pv (incluye la Ignimbrita Lauca) y Qv (revisar Marco Geológico; figura 3.12). Adicionalmente, es bien sabido que minerales como feldespatos y titanita, controlan la concentración en los sedimentos de los elementos Ba, Na, Sr, Rb y Cs (Rollinson, 1993). En efecto, los resultados de la difracción de rayos X (tabla 3.2), aparte de la ubicua presencia de cuarzo, muestra una amplia distribución en la cuenca del río Lluta de minerales como anortita y albita (feldespatos); además, el estudio de minerales pesados (tabla A4), arrojó en todas las muestras analizadas, la presencia de titanita. Estas mineralogías concuerdan con las concentraciones de los elementos en el nodo 7. Otro factor que podría influir en la concentración de Ba asociado al nodo 7, es su correspondencia espacial con numerosos prospectos de manganeso de la zona (prospectos Sin nombre, Navidad este, Navidad, Huachipato y Kilómetro 30; tabla B1; figura 2.3), y sus minerales de mena ricos en Ba (holandita y criptomelano).

La distribución de nodos asociados a la figuras 4.5 y 4.6 (generada al acotar el estudio a las muestras de sedimentos activos del cauce principal del río Lluta) muestra que el nodo 5 posee las mayores concentraciones de As, Au, Bi, Hg, Mo y Pb; y se encuentran ubicados espacialmente en la cabecera del río Lluta. Por otro lado, las concentraciones de Au muestran un patrón creciente hasta la confluencia con la Qda. Guancarare (figura 3.5). Adicionalmente, en el análisis de minerales pesados con lupa binocular, se observó en la muestra LLUTA-LB-29, del punto de muestreo 32 en la cabecera del río Lluta, un cristal de pirita. Luego, la signatura geoquímica del nodo 5 (figuras 4.5 y 4.6), y la presencia de pirita, sugieren aportes detríticos desde zonas mineralizadas en la parte superior del río Lluta, subcuenca del río Caracarani.

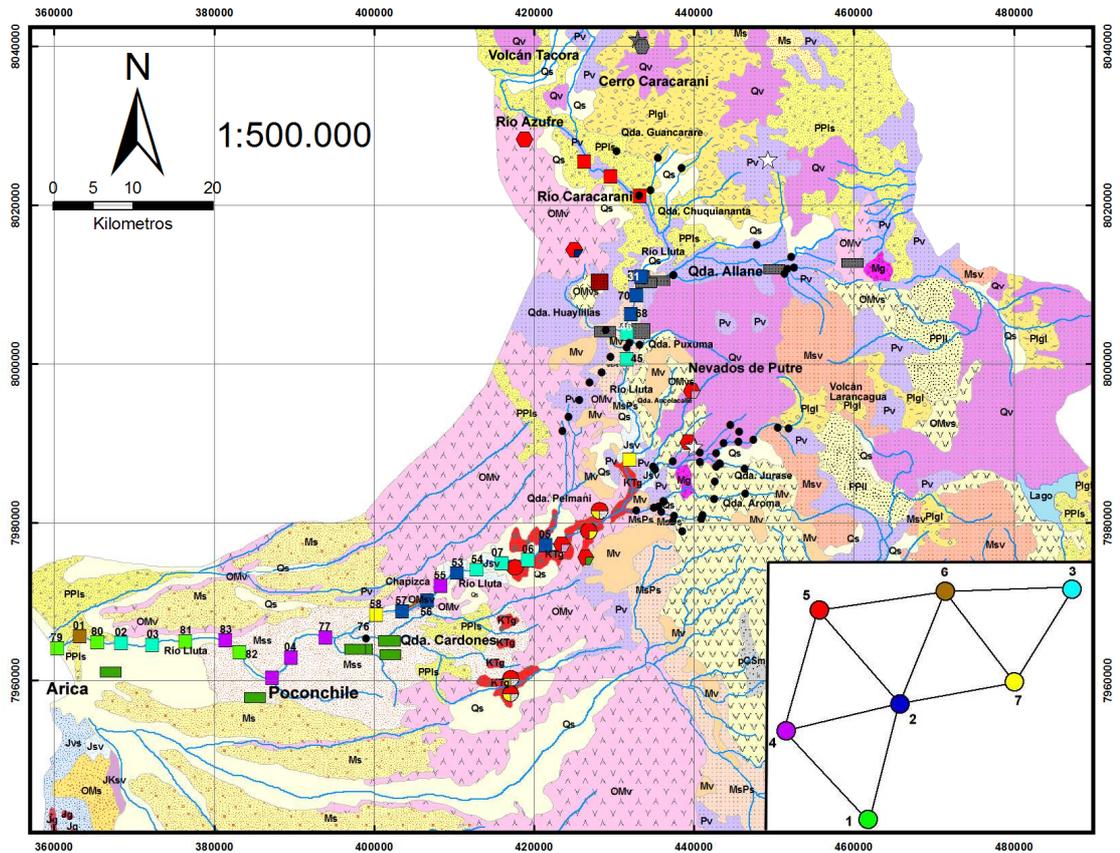
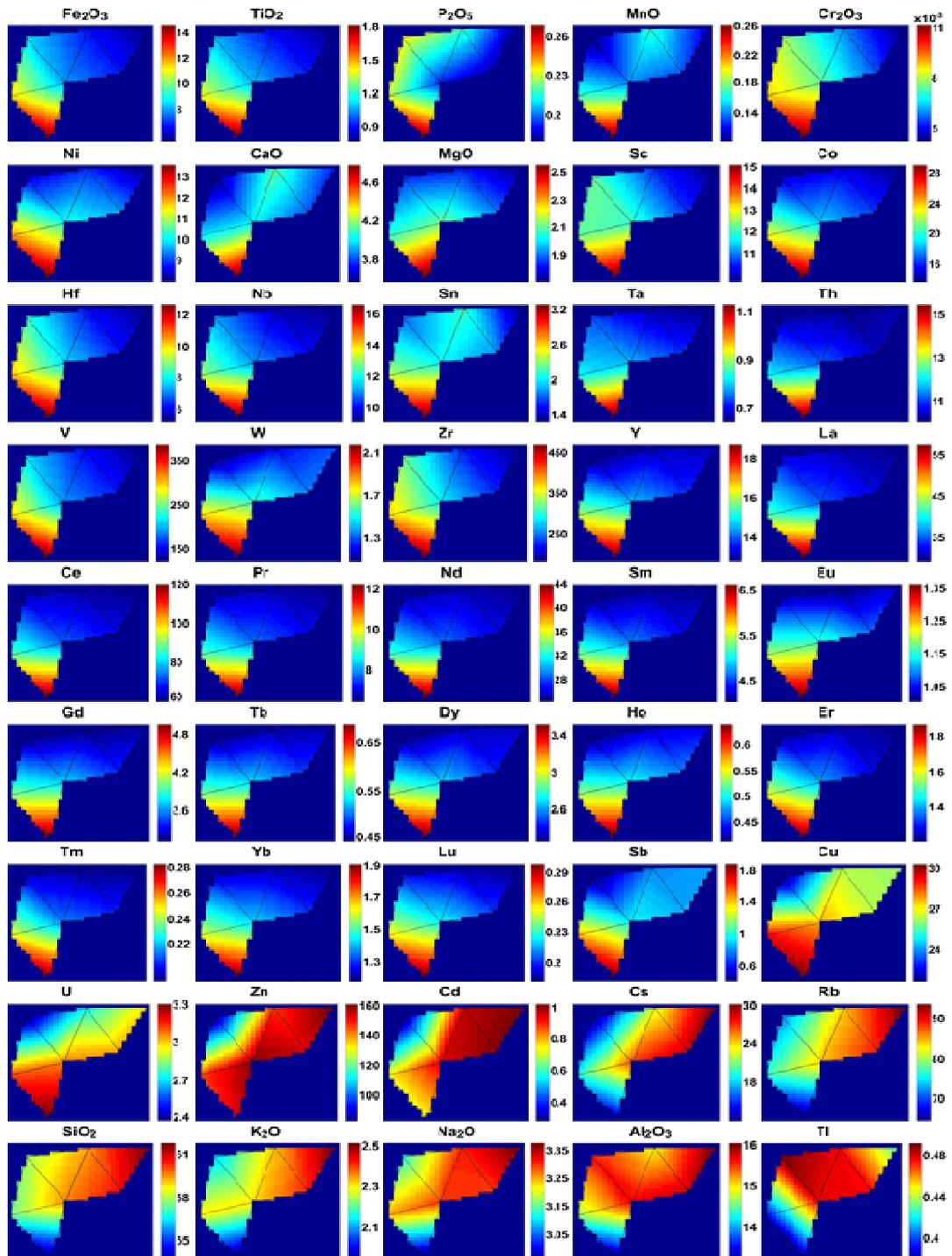


Figura 4.5: Distribución geográfica de las muestras de sedimento activo recolectadas exclusivamente en el cauce principal del río Lluta.

En la figura 4.5 se incluye información acerca del nodo al cual cada muestra está asociada (según código de color que se muestra en el inserto). Los nodos corresponden al mapa neuronal resultante del análisis de redes neuronales artificial utilizando datos geoquímicos de los sedimentos activos recolectados (ver inserto).



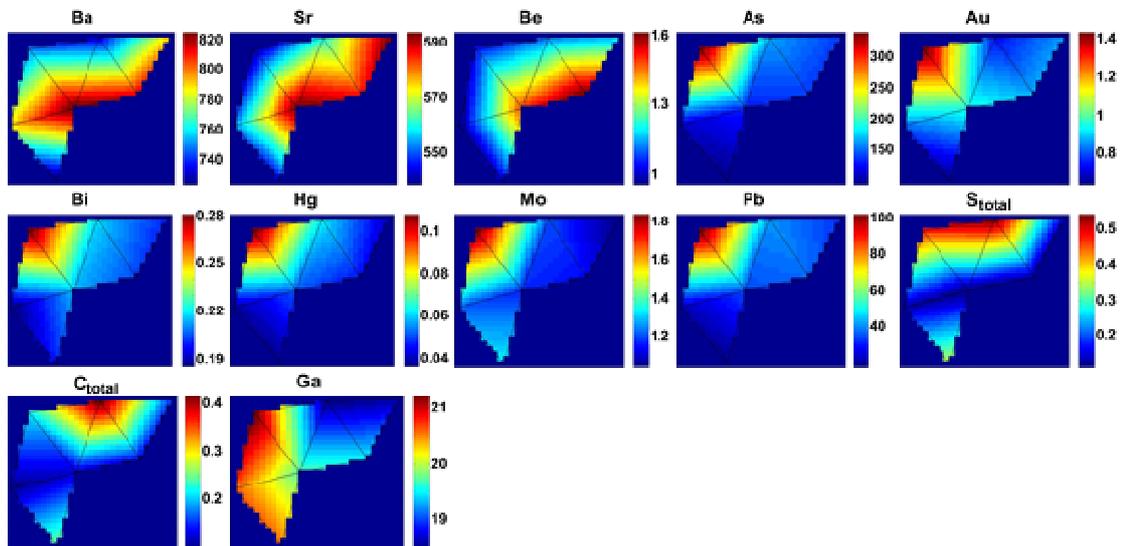


Figura 4.6: Visualización bi-dimensional de la distribución de cada variable de entrada en el mapa neuronal asociadas a los sedimentos del cauce del río Lluta (ver inserto figura 4.5).

Las distribuciones de las distintas variables pueden compararse visualmente con facilidad. Las escalas de color a la derecha indican concentraciones (wt% o ppm para los elementos mayores o en traza, respectivamente; a excepción de Au que está en ppb).

El comportamiento del uranio, en el tramo alto del río Lluta, muestra un patrón claramente creciente, lo que sugiere una posible fuente de uranio entre la cabecera del río Lluta y la confluencia con la Qda. Ancolacalle (figura 3.6), tomando en cuenta que la zona de estudio presenta numerosos depósitos de uranio (figura 2.1; tabla B1; ver Geología Económica) y minerales de uranio (tabla 3.2). Específicamente, aguas abajo de la confluencia con la Qda. Chuquiananta, en la parte alta del río Lluta, ocurre un fuerte incremento en las concentraciones de uranio (tabla A1; figura 3.6), esta anomalía puntual sugiere la existencia de fuentes mineralizadas con uranio que estarían siendo drenadas por las quebradas Chuquiananta y Guancarare, lo que concuerda con el resultado de la difracción de rayos X para la muestra LLUTA-LB-28, que contiene metauranocircita, mineral de uranio (figuras 3.6 y 3.14; tablas 3.2 y A3).

Aguas abajo de la Qda. Huaylillas, se observa un marcado crecimiento en la concentración de Au (1.1 ppb; tabla A1; figura 3.5), acoplado con aumentos de Cd, Zn, W y As (tabla A1; figuras 3.4, 3.9 y 3.10). Estas características sugieren la existencia de zonas alteradas y/o mineralizadas, siendo drenadas por quebradas secundarias al oeste del río Lluta, en su tramo alto.

La muestra más al sur del tramo alto del río Lluta, aguas abajo de la confluencia con la Qda. Ancolacalle (figura 3.14), se observa un marcado crecimiento en las concentraciones de Co, Sc, Ni, Y, V, Cr₂O₃, Fe₂O₃, TiO₂ y MgO (tabla A1; figuras 3.1, 3.4, 3.5, 3.6, 3.7 y 3.8), lo que es característico de un aporte detrítico desde fuentes máficas a ultramáficas (Ortiz y Roser, 2006; Ohta et al., 2006; Lacassie, 2009). En efecto, la Qda. Ancolacalle, drena dos unidades principalmente, OMvs y Mv (figura 3.14); Mv posee rocas de composición andesítico-basálticas (ver Marco Geológico) que podrían ser la causa del aumento puntual de estos elementos. Por otro lado, se observa un marcado aumento de concentración para CaO (figura 3.8), que estaría reflejando el aporte detrítico carbonatado debido a la denudación de las unidades Jsv y OMvs (sucesiones sedimentaria marina y volcano-sedimentaria, respectivamente). Finalmente, en este mismo punto, se observó un aumento claro en las concentraciones de Mo (tabla A1; figura 3.10), lo que concuerda con el drenaje en las nacientes de la Qda. Ancolacalle y su cercanía a un prospecto de Cu y Mo (prospecto A9-03; figura 3.14; tabla B1).

4.2 Sector Quebrada Allane

Las muestras asociadas al sector de la Qda. Allane, están relacionadas con los nodos 4 y 7, principalmente (figura 3.14). Las características del nodo 7 son las mismas discutidas para el tramo alto del río Lluta, estas incluyen concentraciones promedio altas de Cs, Be, Hg, Ba, K₂O y SiO₂; y concentraciones promedios medias a altas de CaO, Rb y Sr; lo que sumado a las bajas concentraciones de Fe₂O₃ y TiO₂, y las concentraciones promedio medias a bajas de Th y Nb, muestran el aporte detrítico de la componente félsica de las unidades litológicas OMv, Pv y Qv (ver Marco

Geológico). Adicionalmente, se indica que los minerales de mena de los yacimientos de manganeso de la zona estarían aportando con el enriquecimiento en Ba de los sedimentos asociados al nodo 7. De igual forma, en la Qda. Allane se observa una relación espacial con los yacimientos de manganeso (figura 3.14).

Los sedimentos activos asociados al nodo 4, muestran una signatura química asociada al aporte detrítico de rocas con composición intermedia (andesítica) presentes en la zona de estudio (unidades Pv, Qv y Msv; ver Marco Geológico). Esta señal se caracteriza por concentraciones promedio medias de Fe_2O_3 , Ti_2O , Cr_2O_3 , MgO , CaO , MnO , Co , V , Sc y Cu (Lacassie et al., 2004b; figuras 3.11b y 3.14; tabla 3.1).

El estudio en detalle de las muestras de sedimentos asociadas a la Qda. Allane, muestra concentraciones promedio medias a altas de As, Zn, Ba, Cd, Pb, MnO y Fe_2O_3 , para las muestras LLUTA-LB-65, LLUTA-LB-66 y LLUTA-LB-27 (puntos de muestreo 66, 67 y 30, respectivamente; figura 3.14; tabla A1), lo que considerando la presencia de depósitos de manganeso en la zona, sugiere que estas concentraciones están probablemente ligadas a zonas mineralizadas con manganeso. Por otro lado, la presencia de minerales tales como sengierita (mineral de Cu, V y U) asociados a la muestra LLUTA-LB-27 (tabla A3; figura 3.14), indica la posible cercanía a un depósito de cobre, pues es típico de depósitos de cobre con presencia de uranio (www.webmineral.com); finalmente, la muestra asociada al punto de muestreo 37 pertenece a una quebrada secundaria que drena el depósito polimetálico A6-01 (figura 3.14; tabla 3.2), lo cual podría ser el motivo de la presencia del mineral de cobre, paramelaconita (tabla A3).

4.3 Sector Quebrada Putre

En el sector de la Qda. Putre, se observan asociaciones a los nodos 1, 2, 4, 5 y 6, lo que indica que estos sedimentos presentan una composición química variable ligada a diversos factores (figuras 3.11 y 3.15). En particular, el nodo 4 representa una

signatura química asociada a una fuente litológica de composición intermedia (andesítica), como se discutió anteriormente. Por otro lado, las asociaciones de diversos elementos a los demás nodos son muy variadas. El nodo 2, similarmente al nodo 7, presenta una clara componente litológica volcánica félsica, caracterizada por altas concentraciones promedio de Sr y SiO₂, concentraciones promedio medias a altas de Ba, K₂O, Rb, CaO y Cs; y concentraciones menores de TiO₂, Cr₂O₃ y Fe₂O₃ (unidades Qv y OMvs, ver Marco Geológico; tabla 3.1; figuras 3.11b y 3.15). Sin embargo, el nodo 2 se diferencia del nodo 7 en dos aspectos: 1) una mayor concentración promedio de P₂O₅ (tabla 4; figura 3.11b); y 2) una mayor concentración promedio de Al₂O₃ (tabla 3.1; figura 3.11b). La presencia de P₂O₅, en sedimentos fluviales, es común en zonas donde la utilización de fertilizantes en base a fosfatos es extensiva (e.g. Dinelli et al., 2005, Jarvie et al., 2005, Lacassie, 2009). Entonces, las concentraciones de P₂O₅ asociadas al nodo 2, particularmente en las cercanías del poblado de Putre son probablemente un reflejo de la actividad agrícola de la zona (DGA, 2004; figura 4.8b). En relación a la mayor concentración promedio de Al₂O₃ del nodo 2 con respecto al nodo 7, se puede observar una correlación positiva entre Sr, K₂O y Al₂O₃ (figura 3.11b), este tipo de correlaciones se han atribuido en diversos estudios a la presencia de minerales aluminosos (e.g. Sensarma et al., 2008; Lacassie, 2009; Dinelli et al., 2005; Dalai et al., 2004), por lo que es probable que las muestras de sedimentos asociados al nodo 2 contengan una mayor presencia de minerales de arcilla y/o micas. Efectivamente, esto concuerda con la presencia de muscovita y/o montmorillonita en los puntos de muestreo 11 y 19 (LLUTA-LB-13 y LLUTA-LB-17, respectivamente; tabla A3; figura 3.15). Por otro lado, la presencia de estos minerales, sugiere un cambio hidrodinámico en esta zona del sistema fluvial del río Lluta, asociado probablemente a un cambio de pendiente menor, lo que generaría un caudal más lento de los ríos asociados a estos puntos y, por consiguiente, éstos depositarían su carga más liviana (arcillas y micas). La figura 4.7 (en negro y en blanco se presentan las zonas más bajas y altas, respectivamente), muestra un brusco cambio de altitud en el sector asociado a la Qda. Putre, lo que corroboraría la hipótesis de cambio en el régimen hidrodinámico del río.

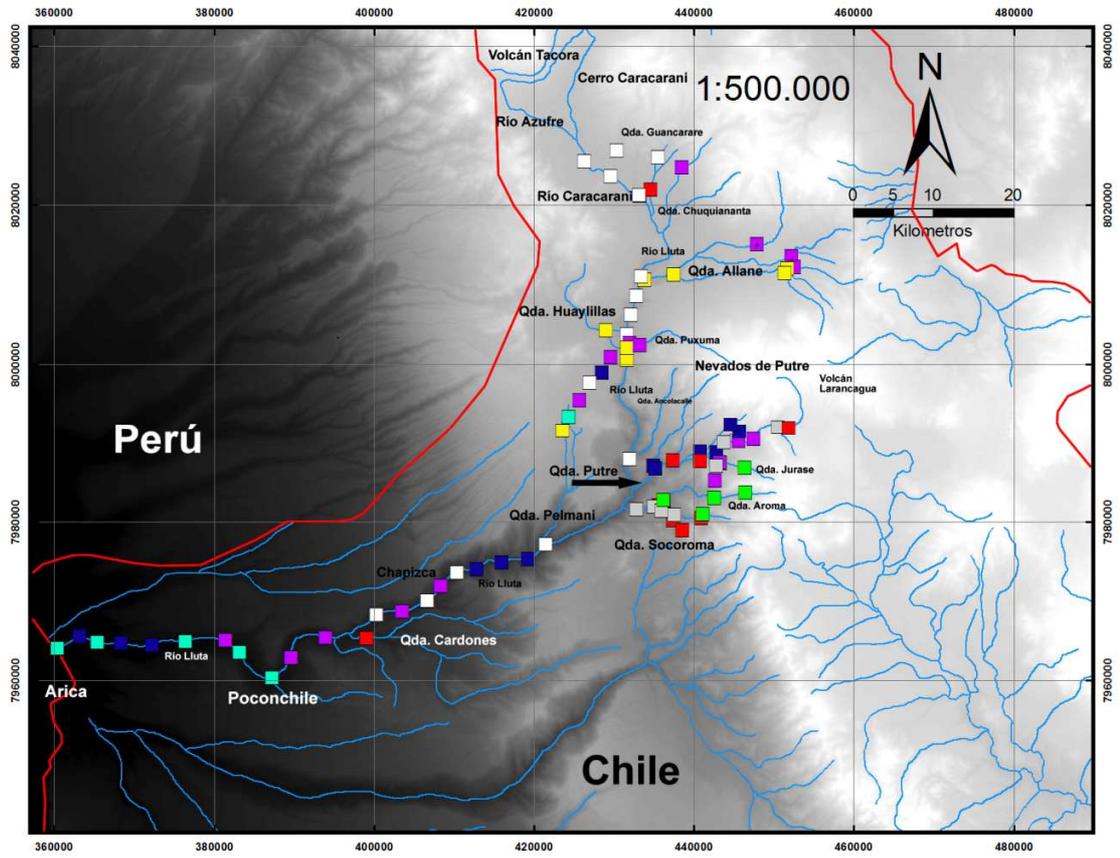


Figura 4.7: Modelo de elevación digital de la zona de estudio.

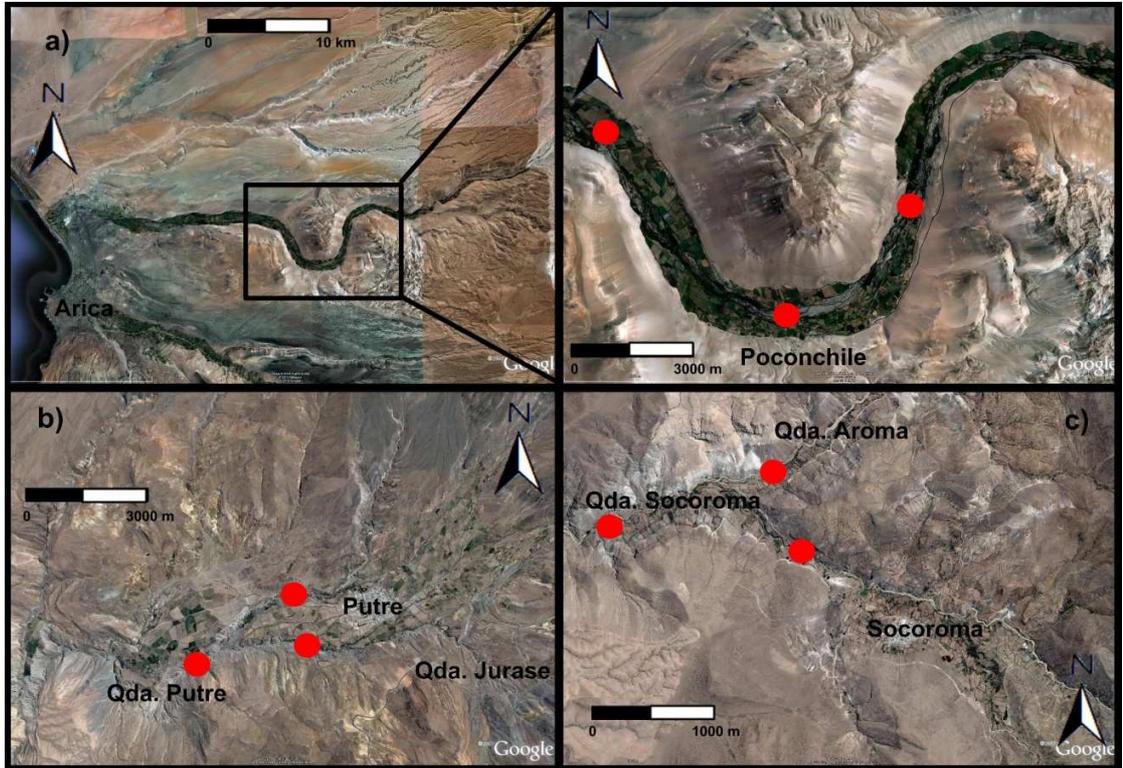


Figura 4.8: Evidencias de actividad agrícola: a) Tramo bajo del río Lluta, b) Sector Qda. Putre y c) Sector Qda. Socoroma.

En la figura 4.8, los círculos rojos indican algunos puntos de muestreo que podrían estar siendo afectados por esta actividad antropogénica (modificada de Google Earth).

Finalmente, se aprecian concentraciones promedio altas de Na_2O , asociadas al nodo 2 (figura 3.11b; tabla 3.1). Este rasgo es común con los nodos 7 y 8 (figura 3.11b), de esta manera la presencia de Na_2O , en general alta, indica que es una característica de diversas áreas de muestreo, más que de una fuente puntual, y podría asociarse a la presencia de suelos salinos y salares en la zona (DGA, 2004). Aguas arriba de las Qdas. Caracarani y Allane (y en general en la alta cordillera), existen salares que estarían aportando en las concentraciones de Na_2O (sulfosalares y nitratos; DGA, 2004). Una característica adicional que podría explicar la problemática es la alta evaporación del sistema del río Lluta, debida a la alta radiación solar existente en esta latitud, y el casi nulo porcentaje de nubosidad, y por lo tanto, la acumulación de sales

en los cursos de agua (DGA, 2004). En efecto, se observó en terreno en los puntos de muestreo cercanos al poblado de Putre, costras salinas blanquecinas (figura 4.9). Luego, las altas concentraciones promedio de Na_2O están probablemente asociadas a la presencia de fuentes salinas en la alta cordillera.



Figura 4.9: Ocurrencia de costras salinas en el sistema fluvial del río Lluta. Específicamente en la Alta Cordillera.

Otro posible aporte asociado a estas altas concentraciones promedio de Na_2O , en adición a las altas concentraciones de Al_2O_3 , para el nodo 2, es un eventual control en la precipitación de arcillas (ricas en Na) y de albita (tablas 3.2 y A3), debido a un cambio hidrodinámico que haga la circulación de aguas más lenta, tal como se discutió anteriormente (figura 4.7).

Una característica común en el sector de la Qda. Putre es la asociada a los nodos 5 y 6 y sus altas concentraciones promedio de C_{total} (figuras 3.11b y 3.15). Lo que concuerda con los diversos tipos de materia orgánica asociado a estos puntos de muestreo (presencia de abundante vegetación, zonas de pastoreo, basura humana, bofedales, aguas de uso domiciliario, actividad agrícola). Sin embargo, las altas concentraciones de C_{total} de los sedimentos pre-industriales (nodos 1, 2 y 6) y su correspondencia espacial con el sector Qda. Putre (figuras 4.1 y 4.2), sugiere que el principal aporte de materia orgánica se debe a factores naturales, específicamente a la presencia de bofedales ricos en materia orgánica en la alta cordillera (DGA, 2004). Por otro lado, el nodo 5 refleja una componente litológica félsica en el aporte detrítico (unidades Qv, OMvs; ver Marco Geológico), con concentraciones promedio medias a altas de SiO_2 , K_2O , Cs, Ba, Rb, Sr y concentraciones promedio bajas de TiO_2 y Fe_2O_3 (figuras 3.11b y 3.15; tabla 3.1).

Una señal química ligada específicamente al drenaje de la Qda. Jurase dentro del sector de la Qda. Putre (y a las Qdas. Socoroma y Aroma, como se verá en una sección más adelante), es la asociada al nodo 1 del mapa neuronal (figura 3.15). Luego, los sedimentos asociados a este nodo se identifican por poseer altas concentraciones promedio de Ba, Cu, Hg, Au, Bi, Se, Sn, Sc, Sb, W, Mo, S_{total} y As (figuras 3.15 y 3.11; tabla 3.1). Signaturas químicas similares, han sido observadas por otros autores (e.g. Ohta et al., 2005; Schäfer y Blanc, 2002), las que han sido asociadas a la ocurrencia de depósitos metálicos aguas arriba. Una revisión detallada de la geología económica de la zona (García et al., 2004), muestra una relación espacial entre los sedimentos asociados al nodo 1 y extensas zonas de rocas afectadas por alteración hidrotermal (Zona de Alteración Hidrotermal Putre-Vilañuñumani; figura 4.10a), de la Formación Lupica (unidad OMvs, Oligoceno Sup-Mioceno Inf), la cual podría presentar, al menos localmente, mineralización epitermal de Au-Ag (García et al., 2004). En las cercanías de Putre, han sido reconocidos prospectos metálicos asociados a esta zona de alteración (e.g. Prospecto Putre Sur; figura 3.15; tabla B1); además, las edades contemporáneas del Yacimiento Choquelimpie (epitermal Au-Ag, Mioceno Medio-Superior), la Subprovincia Belén-Tignámar (depósitos polimetálicos, Mioceno Medio Temprano), y la edad de la Zona de

Alteración Hidrotermal Putre-Vilañuñumani (Mioceno Medio-Superior), podrían aportar en el entendimiento de la fuerte signatura química asociada al nodo 1 y su relación con posibles zonas de mineralización, constituyendo un foco de potencial interés prospectivo (García et al., 2004).

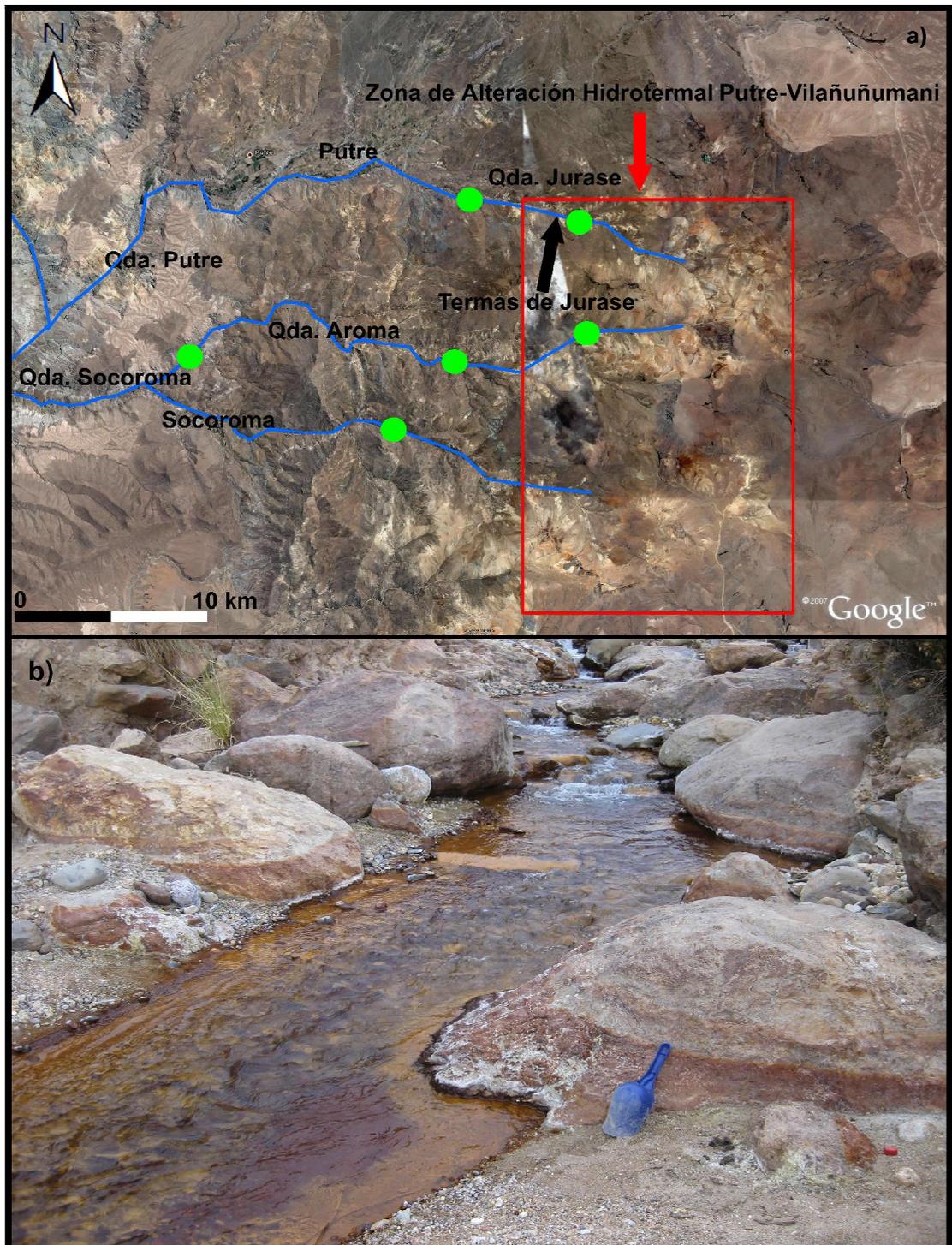


Figura 4.10: a) Ubicación espacial de la Zona de Alteración Hidrotermal Putre-Vilañuñumani (modificada de Google Earth) y b) Capa rojiza de óxidos de Fe en el cauce de la Qda. Aroma.

Por otro lado, Lacassie et al. (2006) asoció altas concentraciones de Ba a la proximidad de fuentes hidrotermales; en particular, el punto 62 donde se tomó la muestra LLUTA-LB-58, asociada al nodo 1, se caracteriza por la presencia de aguas termales (muestra tomada aguas arriba de Termas de Jurasi; figura 4.10a). Adicionalmente, la difracción de rayos X (tabla 3.2), para esta misma muestra, arrojó la presencia de sophiita, mineral de fórmula química $Zn_2(SeO_3)Cl_2$ que se asocia a fumarolas con temperaturas entre 180-230°C (www.webmineral.com). Luego, es probable que los demás sedimentos asociados al nodo 1 tengan una componente hidrotermal importante, lo que explicaría también las altas concentraciones promedio de As y S_{total} (tabla 3.1; figura 3.11b).

La muestra LLUTA-LB-19, tomada del punto de muestreo 21, al oeste de Putre (figura 3.15), drena el prospecto metálico de Cu-Mo-Au (A9-04; tabla B1), lo que se ve claramente reflejado en las altas concentraciones de Cu, Pb, Zn, Ni, Sb, Mo y Au (tabla A1) y por la presencia de wulfenita (tablas 3.2 y A3), mineral de Pb y Mo, en la muestra. Por otro lado, la muestra LLUTA-LB-71, asociada al punto de muestreo 71, al sur de Putre (figura 3.15), presenta altos valores en las concentraciones de Mo, Sb y Au (tabla A1), aunque estos valores estarían reflejando la dilución de la signatura geoquímica aguas arriba de los puntos de muestreo 12 y 62 (Qda. Jurase), ambos asociados al nodo 1 (figura 3.15; tabla A1). Lo anterior, se sustenta en que se pasa desde una zona dominada por el nodo 1 hacia zonas con nodos 5 y 6, los cuales son nodos “vecinos” (con concentraciones menores que el nodo 1) en el Mapa Neuronal, debido a que la red GCS (Fritzke, 1994) presenta la topología multidimensional. Sin embargo, la alta concentración de uranio en la muestra LLUTA-LB-71 (tabla A1), sugiere la presencia de minerales de uranio en la zona. En efecto, las muestras de sedimentos activos y pre-industriales asociadas al punto de muestreo 20, aguas abajo del poblado de Putre (figura 3.15), contienen minerales de uranio, sengierita e irigenita (tablas 3.2 y A3). El primero es un mineral secundario de depósitos de cobre con contenidos de uranio, y el segundo es el mineral secundario más abundante en la zona oxidada de depósitos hidrotermales de U-Mo (www.webmineral.com). Luego, en las cercanías de Putre, podrían existir cuerpos mineralizados con uranio-cobre-molibdeno.

4.4 Sector Quebrada Socoroma

Los sedimentos del sector Qda. Socoroma, se caracterizan por presentar firmas químicas asociadas a los nodos 1, 5 y 6 (figura 3.15). Luego, al igual que para los sedimentos asociados a la Qda. Putre, las muestras asociadas al nodo 1 reflejan la firma química de la Zona de Alteración Hidrotermal Putre-Vilañuñumani (figura 4.10a), de interés prospectivo según García et al., 2004 y el presente estudio. Probablemente, tengan una componente hidrotermal importante, como se discutió anteriormente. En particular, las altas concentraciones de Se, de las muestras tomadas en los puntos de muestreo 10, 16, 18 y 61 (figura 3.15; tabla A1), sugieren la presencia de sphiita (asociada a fuentes hidrotermales) u otros minerales de Se. En efecto, la muestra de sedimento pre-industrial LLUTA-LB-12 asociada al punto de muestreo 10 (Qda. Aroma), contiene stilleita, mineral de fórmula química ZnSe (tabla A3). Por otro lado, la identificación mediante difracción de minerales como rutilo, óxidos de Fe (III) y covelina, en la muestra LLUTA-LB-57 (punto de muestreo 61; tabla A3), explicaría sus concentraciones de Fe₂O₃, TiO₂ y Cu (tabla A1).

Las concentraciones de Au, Bi, Mo, S_{total} y As, asociadas al nodo 6 y 5, tal como se discutió anteriormente en el sector Qda. Putre, muestran el efecto de la dilución aguas abajo de las muestras asociadas al nodo 1 (tabla A1; figura 3.15); y las altas concentraciones promedio de C_{total} de estos nodos (tabla 3.1), de manera similar a lo discutido para el sector de la Qda. Putre, reflejan las diversas fuentes de materia orgánica observadas en terreno, ya sea por abundante vegetación, algas, zonas de pastoreo, basura humana, bofedales, aguas de uso domiciliario (Socoroma) o actividad agrícola.

Las altas concentraciones promedio de uranio (nodos 1 y 5, figura 3.11b) asociadas a los sectores Qda. Putre y Socoroma, y los minerales de uranio encontrados en estas dos subcuencas (tabla 3.2), sugieren que en todo este sector existan fuentes mineralizadas de uranio.

En la figura 3.15, se ve la transición entre los nodos 5 y 6 en las Qdas. Socoroma y Socoroma, lo que coincide con un cambio litológico desde las unidades OMvs a OMv (figura 3.15; ver Marco Geológico). Luego, inspeccionando detalladamente el Marco Geológico de la zona (García et al., 2004), la Qda. Socoroma y sus afluentes drenan una serie de litologías asociadas a las unidades OMvs, OMv, Mv, Pv y Mg (ver Marco Geológico). En particular, al norte y oeste de Socoroma (figura 3.15), aflora la Andesita Socoroma (unidad OMv, Formación Oxaya; García et al., 2004) con presencia de fenocristales de plagioclasa, oxihornblenda y dos piroxenos; la unidad Mv presenta litologías de composición andesítica a andesítico-basálticas; por otro lado, las litologías aflorando al este de Socoroma asociadas a la unidad OMvs (figura 3.15), Formación Lupica, se componen de dos litologías principalmente: 1) lavas andesíticas compuestas por plagioclasas, dos piroxenos, anfíbolas y ocasionalmente olivino; con circón, apatita y titanita como minerales accesorios; y 2) una ignimbrita riolítica, que se encuentra alterada hidrotermalmente (Zona de Alteración Hidrotermal Putre-Vilañuñumani; figura 4.10a), con minerales de cuarzo, sanidina, plagioclasa, anfíbola y magnetita; y presencia de minerales accesorios tales como piroxeno, circón y apatita; por otro lado, la litología de la unidad Pv aflorando al norte de Socorma (figura 3.15), se compone principalmente de lavas de composición andesítico-basálticas; adicionalmente, la unidad intrusiva Mg aflorando al sudoeste de Putre (figura 3.15) tiene una litología correspondiente a monzodiorita con presencia de ortopiroxeno, clinopiroxeno y anfíbola; finalmente y de manera muy local al este de Socoroma, aflora un pequeño cuerpo intrusivo de diorita a monzodiorita cuarcífera, de anfíbola y piroxeno (García et al., 2004). Por otra parte, las altas concentraciones promedio de tierras raras pesadas (HREE) e Y (comúnmente agregado al análisis de tierras raras debido a su radio iónico similar) representan una fuerte señal química asociada al nodo 6 (tabla 3.1; figura 3.11b). Las tierras raras (REE) en sedimentos fluviales han sido usadas ampliamente como valiosos indicadores de procesos petrogenéticos de ambientes acuáticos tales como evolución química de la corteza continental, procesos de meteorización en cuencas de drenaje y proveniencia de sedimentos (e.g. Goldstein y Jacobsen, 1988; Zhang y Wang, 2001; Kumar et al., 2007; Sensarma et al., 2008; Li et al., 2009). En particular, para el presente estudio, es de vital importancia en el análisis de proveniencia de sedimentos. La razón $(La/Yb)_n$ ha

sido utilizada para determinar si la fuente de los sedimentos es más o menos diferenciada con respecto a la UCC (e.g. Yang et al., 2002; Sensarma et al., 2008, Singh, 2010). En el caso de los sedimentos asociados al nodo 6, la razón promedio de $(La/Yb)_n=10.247$; mientras que el resto del sector Qda. Socoroma muestra para los sedimentos asociados al nodo 5, un valor promedio de $(La/Yb)_n=13.07$ y para el nodo 1, un promedio de $(La/Yb)_n=13.205$; todos estos valores se obtienen luego de normalizar según los valores de McLennan (2001). Estos valores comparados con los valores para la UCC según McLennan (2001); reflejan una componente litológica menos diferenciada localmente para los sedimentos del nodo 6 (tabla 4.1; figura 3.15), y si se compara con los nodos del resto de la cuenca del río Lluta (tabla 4.1), se ratifica esta suposición. Adicionalmente, las razones Co/Th, Th/Sc, La/Co y La/Sc, sirven como discriminantes de proveniencia (Rollinson, 1993). En particular, Th y La están típicamente concentrados en rocas félsicas, mientras Sc y Co están enriquecidos en rocas máficas (Singh, 2010). Luego, los valores promedio Co/Th, Th/Sc, La/Co y La/Sc comparados con los valores de UCC, según McLennan, 2001 (tabla 4.1); para el nodo 6, muestran una probable fuente litológica de composición más máfica comparado al resto de las litologías que drena el sistema fluvial del río Lluta. Por otro lado, las concentraciones promedio medias a altas de Ni, Co, V, Sc, P_2O_5 , MgO, CaO, TiO_2 , Fe_2O_3 y Cr_2O_3 asociadas al nodo 6 (tabla 3.1), sugieren aportes detríticos desde litologías andesítico-basálticas (Gordeev et al., 2004; Sensarma et al, 2008; Lacassie et al., 2004b; Ohta et al., 2005; entre otros). Luego, el aporte detrítico de estas litologías y mineralogías principalmente andesítico-basálticas, explicarían la fuerte signatura química asociada al nodo 6 (tablas 3.1 y 4.1; figuras 3.11b y 3.15). Por otra parte, es muy probable que la componente félsica asociada al nodo 5 se deba al aporte detrítico proveniente de la ignimbrita riolítica aflorando al este de Socoroma (unidad OMvs, Formación Lupica).

Tabla 4.1: Valores promedio de razones utilizadas en el análisis de proveniencia de sedimentos fluviales, asociados a cada nodo resultante del tratamiento estadístico mediante redes neuronales artificiales de la cuenca del río Lluta. Se indican los valores promedio de la UCC (McLennan, 2001).

Nodo	1	2	3	4	5	6	7	8	UCC
Th/Sc	1.083	0.918	1.181	0.982	1.219	0.849	1.521	0.937	0.790
La/Sc	2.149	3.208	4.789	2.956	2.826	2.216	4.726	2.984	2.210
La/Co	3.317	2.007	2.481	1.595	1.830	1.051	3.542	1.941	1.760
Co/Th	0.598	1.741	1.634	1.887	1.267	2.482	0.877	1.641	1.590
(La/Yb) _n	13.205	18.840	25.068	17.564	13.070	10.247	22.455	18.135	9.210

Diversos estudios muestran el comportamiento inmóvil de los elementos alcalinos Be y Cs en ambientes de ríos (e.g. You et al., 1989; Brown et al., 1992 a,b; Gaillardet et al., 2003). Particularmente, Brown et al. (1992 b), mostró para el sistema del río Orinoco de Bolivia, que el Be es transportado principalmente de forma adsorbida. Por otro lado, Vital y Stattegger (2000) observaron que el Cs se asocia a minerales de arcilla. Luego, la baja movilidad de Be y Cs en aguas de río podría asociarse a la atracción que tienen estos elementos hacia las superficies. Específicamente, en el sector asociado a la Qda. Socoroma, las muestras asociadas al nodo 6 muestran una fuerte correlación positiva entre los elementos Al_2O_3 , Cs y Be (figura 3.11b), lo que adicionado a la presencia de montmorillonita en muestras de la zona (LLUTA-LB-9, LLUTA-LB-10 y LLUTA-LB-58; tabla A3), sugiere que la concentración de Cs y Be en los sedimentos activos del río caracterizados por el nodo 6, y en general para toda la cuenca del río Lluta, esté dominada por la alta superficie específica de los minerales de arcilla y su capacidad de adsorber estos elementos. Por otro lado, las bajas concentraciones promedio de Al_2O_3 en el nodo 1 (figura 3.11b; tabla 3.1), en contraste con las altas concentraciones de este mismo elemento en el nodo 6 (figura 3.11b; tabla 3.1), en las Qdas. Aroma y Socoroma, podría indicar que este marcado cambio litológico, mencionado anteriormente, provoque un cambio hidrológico acoplado. Luego, debido al cambio litológico (OMvs a OMv; figura 3.15), podría generarse un fuerte cambio de pendiente con lo que se depositarían de golpe las arcillas. Este brusco cambio de pendiente se observa en la figura 4.7, donde se pasa

de zonas muy altas (blancas) a zonas más deprimidas (grises), asociadas a la Qda. Socoroma.

Los resultados muestran una alta concentración promedio de P_2O_5 asociada al nodo 6 (tabla 3.1; figura 3.11b), que está siendo afectada probablemente por: 1) la presencia de apatita, mineral pesado rico en P_2O_5 , accesorio en las rocas de la zona (García et al., 2004); y 2) el posible uso de fertilizantes en base a fosfatos (Jarvie et al., 2005) asociado a la actividad agrícola local del poblado de Socoroma (DGA, 2004; figura 4.8c). Por otro lado, los nodos 5 y 6 muestran una correlación positiva entre las concentraciones de C_{total} y Cu (figura 3.11b). Diversos estudios han mostrado la afinidad y los fuertes complejos que se forman entre distintos componentes orgánicos y Cu (e.g. Coquery y Welbourn, 1995; Lin y Chen, 1998; Gaillardet et al., 2003; Filgueiras et al., 2004; Kelderman y Osman, 2007; entre otros). Luego, es probable que la correlación positiva y la mayor concentración promedio observada entre las concentraciones de Cu y C_{total} asociada a los nodos 5 y 6 (figura 3.11b; tabla 3.1), esté controlada por la formación de complejos orgánicos.

4.5 Tramo bajo cauce principal río Lluta

El tramo bajo del cauce principal del río Lluta, abarca desde aguas abajo de la confluencia con la Qda. Socoroma hasta la desembocadura de éste (figura 3.13). Los resultados muestran que debido a la mezcla de aguas y carga sedimentaria aportada por los afluentes principales del río Lluta, en el tramo bajo las concentraciones de As, Cs, Ba, Pb, Mo y Hg disminuyen notablemente desde las nacientes del río Lluta en el tramo alto (figuras 3.5, 3.8 y 3.10; tabla A1). Por otro lado, el aporte detrítico de las Qdas. Putre y Socoroma, genera un aumento puntual aguas abajo en las concentraciones de C_{total} , Sb, REE, Hg, P_2O_5 , TiO_2 , Fe_2O_3 , Co, entre otros elementos; mostrando los fenómenos de mezcla puntual y dilución de aguas (figuras 3.1 a la 3.10 y 3.13).

En la parte alta del tramo bajo existe una marcada transición geológica que corresponde al drenaje de unidades rocosas intrusivas (unidad KTg), sedimentarias (unidad Jsv) y depósitos fluvio-aluviales no consolidados del holoceno agrupados en la unidad Qs (figura 3.13). Sin embargo, estos cambios litológicos no generan nodos distintos a los observados en la parte más alta de la cuenca (figura 3.12). En efecto, desde la desembocadura y hasta la confluencia con la Qda. Socoroma se observan sedimentos asociados a los nodos 2, 4 y 8, los cuales muestran el aporte detrítico de las aguas y sedimentos del tramo alto, sector Qda. Socoroma y sector Qda. Putre ubicados aguas arriba (figura 3.13). Luego, las señales químicas de segundo orden asociadas, por ejemplo, al nuevo basamento litológico drenado por el río vuelven a ser “enmascaradas”, tal como se observó anteriormente en el tramo alto del río Lluta. Por lo tanto, es probable que de forma similar a lo ocurrido en los sedimentos de los sistemas fluviales estudiados por Lacassie (2009), en Chile, y Gingelle y De Deckker (2005), en Australia, gran parte de la señal química de los sedimentos del tramo bajo del río Lluta es adquirida en la parte alta de la cuenca (sector cordillerano). Otra posibilidad que podría explicar la similitud entre las señales químicas del tramo bajo con la parte alta de la cuenca, recae en la presencia de la unidad Qs, pues es la litología que domina la primera parte del tramo bajo del río Lluta (figura 3.13). Luego, es probable que la composición de la unidad Qs (al ser depósitos no consolidados; ver Marco Geológico), en este tramo, contenga material detrítico (y su señal química) desde aguas arriba, incluyendo el tramo alto y los sectores de las Qdas. Putre y Socoroma. Adicionalmente, es posible identificar aportes desde litologías mediante el análisis de las figuras 3.1 a la 3.10. Por ejemplo, se observa un patrón paulatinamente creciente en las concentraciones de CaO y MgO aguas abajo de la confluencia con la Qda. Socoroma (figuras 3.6 y 3.7). Este cambio químico es similar al observado en sedimentos fluviales asociados a basamentos carbonatados (e.g. Dalai et al., 2004; Dinelli et al., 2005; Lacassie, 2009). Concordantemente, en esta zona aflora la unidad Jsv (Formación Livílcar) que contiene en sus litologías rocas tales como caliza, lutita y areniscas; y la unidad Qs con presencia de ripios, gravas y arena semiconsolidadas (figura 3.13). Por otro lado, se observa un enriquecimiento en REE e Y en los sedimentos del tramo bajo del río Lluta, debido al aporte detrítico de la unidad KTg compuesta principalmente por granodioritas, dioritas y pórfidos graníticos (ver Marco

Geológico). Zhang y Wang (2001) y Lacassie (2009) observaron resultados similares en presencia de basamento granítico. Al analizar los diagramas de variación geográfica, se observa un patrón muy particular entre las Qda. Pelmani y el poblado de Chapizca (figura 3.13), relacionado con los elementos U, Th, REE, Y, Zr, Hf, Ta, Nb, V, W, Ni, Cr₂O₃, Fe₂O₃, TiO₂ y Co (figuras 3.1, 3.2, 3.3, 3.4, 3.5, 3.6, 3.7 y 3.8). Este patrón creciente indica que aguas abajo se observan cada vez más detritos ricos en estos elementos, lo que ocurriría si en este tramo prepondera un tipo de litología, la cual se hace cada vez más importante (aguas abajo). Esta litología parece ser la unidad OMv, que se extiende de manera amplia en esta zona; o quizás el aporte de las unidades KTg y Qs (figura 3.13). Es probable que el patrón creciente de U-Th, en el tramo entre Chapizca y Qda. Pelmani, refleja que las rocas volcánicas pertenecientes a la unidad QMv (Formación Oxaya; ver Marco Geológico), contienen depósitos de uranio. Luego, en estos tramos, aguas abajo, hay cada vez más aportes desde áreas mineralizadas con uranio, que estarían contenidas en OMv (Formación Oxaya), Mss (Avalancha de Lluta), la cual está compuesta principalmente por bloques de la Formación Oxaya, y Ms (Formación El Diablo; ver Marco Geológico). Por otro lado, las variaciones geográficas de los elementos U, Th, REE, Y, Zr, Hf, Ta, Nb, V, W, Ni, Cr₂O₃, Fe₂O₃, TiO₂ y Co, para los sedimentos pre-industriales en el tramo Chapizca - Qda. Pelmani, son planos o decrecientes (figuras 3.1, 3.2, 3.3, 3.4, 3.5, 3.6, 3.7 y 3.8), lo que podría indicar que los sedimentos activos tienen una mayor cantidad de detritos de la unidad más joven de este sector y que se hace más importante aguas abajo (unidad OMv; figura 3.13), mientras que los sedimentos pre-industriales serían, en general, más antiguos en este tramo.

Los sedimentos activos del tramo bajo del río Lluta tienen un importante cambio químico desde la localidad de Poconchile hacia su desembocadura, tal como lo indica la transición desde una zona heterogénea dominada por los nodos 2, 4 y 8 a una zona dominada por el nodo 2 y 3 (figura 3.13). El nodo 3, está marcado por una fuerte correlación positiva y altas concentraciones promedio de elementos tales como Fe₂O₃, CaO, Cr₂O₃, MnO, TiO₂, V, Co, Sc, Sn, Zn, Zr, Hf, Nb, P₂O₅, Ta, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd y Th; concentraciones promedio medias de Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb y Lu; y bajas concentraciones promedio de Al₂O₃ y SiO₂ (figura 3.11b; tabla 3.1). Mientras que las

características asociadas al nodo 2 son principalmente altas concentraciones promedio de Al_2O_3 , N_2O , SiO_2 y Sr. Altas concentraciones de elementos como Ta, Y, Co, Sc, V, Fe_2O_3 , TiO_2 , MnO y Cr_2O_3 han sido usualmente asociados a fuentes de composiciones máficas a ultra-máficas (Dinelli et al., 2005; Lacassie, 2009; Ohta et al., 2005; Ortiz y Roser, 2006); sin embargo, en el tramo bajo no existen fuentes litológicas de composición máfica. Por otro lado, el posible control en las concentraciones de estos elementos por parte de minerales ferromagnesianos (Rollinson, 1993) no coincide con una fuerte presencia de éstos según la difracción de rayos X (tabla 3.2); al contrario, se observa una disminución de minerales tales como augita, muscovita, edenita, actinolita y riebeckita, entre otros, desde la parte alta de la cuenca del río Lluta hacia la desembocadura, lo que concuerda con lo esperado para minerales lábiles debido a su destrucción debida al efecto de erosión hidráulica y meteorización por el transporte aguas abajo en este río (Lacassie, 2009; Yang et al., 2009). Adicionalmente, los valores de los razones promedio de Th/Sc, La/Sc, La/Co, Co/Th y (La/Yb)_n para los sedimentos asociados al nodo 3, indican una fuente más diferenciada (tabla 4.1), de acuerdo a los valores promedio de la UCC según McLennan (2001). Lo anterior, indica que las litologías de la zona no corresponden con la fuerte señal química asociada al nodo 3. Sin embargo, el comportamiento similar de las concentraciones de sedimentos activos y pre-industriales, observado de las figuras de variación geográfica para los elementos Zr, Hf y REE (figuras 3.1, 3.2, 3.3 y 3.4), a través de todo el cauce del río Lluta, y particularmente, el aumento en las concentraciones en los puntos asociados al nodo 3 (figuras 3.11b y 3.13), sugiere un control de estos elementos por presencia del mineral pesado zircón, presente en la zona según la difracción de rayos X (tabla 3.2), y el cual es rico en Zr, Hf y REE (Yang et al., 2002; Vital y Stattegger, 2005). Luego, es esperable que otros elementos típicos de otros minerales pesados, se comporten de manera similar al Zr, Hf y REE. En efecto, al comparar los patrones de variación geográfica de elementos tales como Fe_2O_3 , Cr_2O_3 , MnO, TiO_2 , V, Co, Sc, Ni, Sn, Zn, Nb, P_2O_5 , Ta, Th e Y, con Zr, Hf y REE (figuras 3.1, 3.2, 3.3, 3.4, 3.5, 3.6, 3.7, 3.8 y 3.9), se observa una gran similitud entre ellos, lo que indica la probable presencia de minerales pesados y ferromagnesianos, tales como magnetita y otros óxidos de hierro, hidróxidos de hierro y manganeso, titanita, apatito, granate, clinopiroxeno y anfíbolos (Vital y Stattegger, 200; Lacassie, 2009; Yang et al., 2009; Song y Choi, 2009),

concordante con el análisis de la fracción magnética y no-magnética realizada (tabla A4). Lo discutido, indica que la conspicua señal química de los sedimentos asociados al nodo 3 es un reflejo de su alto contenido de minerales pesados incluyendo, magnetita, apatito y zircón. Es probable que el aumento de estos elementos a partir de Poconchile (figuras 3.1, 3.2, 3.3, 3.4, 3.5, 3.6, 3.7, 3.8 y 3.9), se deba a un cambio en el régimen hidrodinámico del río en el tramo bajo del río Lluta, probablemente debido al paso desde la Alta Cordillera (“altiplano”) hacia una zona de menor altitud como es la Depresión Central, a partir de Chapizca (figuras 3.13 y figura 4.7; ver Marco Geológico). Luego, la mayor concentración de minerales pesados sería indicativa de un cambio en el régimen hidrodinámico asociado al cambio de pendiente a partir de Chapizca, lo que influiría en la disminución de la velocidad de las corrientes fluviales en esta zona (Shumilin et al., 2005; Lacassie, 2009). Adicionalmente, si se comparan los patrones de variación geográfica de Al_2O_3 y SiO_2 (figura 3.2), con los patrones de Fe_2O_3 , Cr_2O_3 , MnO , TiO_2 , V , Co , Sc , Ni , Sn , Zn , Nb , P_2O_5 , Ta , Th e Y , con Zr , Hf y REE (figuras 3.1, 3.2, 3.3, 3.4, 3.5, 3.6, 3.7, 3.8 y 3.9), y sus concentraciones promedio asociadas al nodo 3 (figura 11b), se observan patrones geográficos complementarios y correlaciones negativas. En efecto, las muestras asociadas al nodo 2, aguas abajo de Poconchile (figura 3.13), presentan altas concentraciones promedio de SiO_2 y Al_2O_3 , lo que indica que en algunos puntos de muestreo se generan depósitos con mayor contenido de arcillas y silicatos livianos, y en otros puntos se depositan minerales pesados (nodo 3; figura 3.13). Finalmente, las fuertes variaciones en las concentraciones estarían reflejando condiciones hidrodinámicas.

Anteriormente, se mencionó la importancia de óxidos/hidróxidos de Fe-Mn, materia orgánica, minerales de arcilla y carbonatos en los fenómenos de sorción, co-precipitación y recubrimiento de metales y elementos traza en sedimentos fluviales (Coquery y Welbourn, 1995; Konhauser et al., 1997; Yu et al., 2000; Cao et al., 2001; Filgueiras et al., 2004; Syrovetsnik et al., 2007; Tsai et al., 2007; Kelderman y Osman, 2007; Sen Gupta y Bhattacharyya, 2008; Cappuyns y Swennen, 2008; Lacassie, 2009; entre otros). La fuerte correlación positiva entre Fe_2O_3 y el resto de los elementos sugiere que sean óxidos y/o hidróxidos de hierro los que controlan el transporte de elementos asociados al nodo 3 (figura 3.11b). Por otro lado, se descarta la posibilidad

de que minerales de arcillas, aún teniendo una gran capacidad de intercambio iónico, estén involucrados en procesos de adsorción/desorción, debido a la disminución de minerales de arcilla en el tramo bajo del río Lluta con respecto a los otros sectores de la cuenca (tabla 3.2). Esto se ve reflejado en una disminución en las concentraciones de Al_2O_3 , en la correlación negativa, y en la concentración promedio baja de Al_2O_3 asociada al nodo 3 (figuras 3.2 y 3.11b; tabla 3.1). De manera similar, la influencia de materia orgánica no parece ser relevante, lo que se ve reflejado en las bajas concentraciones promedio de C_{total} asociadas al nodo 3 (figura 3.11b; tabla 3.1). Lo anterior, indica que este fuerte patrón químico asociado al nodo 3 podría verse influenciado por una mayor disponibilidad de óxidos y/o hidróxidos de hierro que están siendo aportados por fuentes aledañas al río Lluta entre su desembocadura y Poconchile (figura 3.13). En efecto, este tramo se caracteriza por la presencia de la línea férrea del antiguo tren Arica-La Paz (DGA, 2004), la cual cruza el río al este de Poconchile para continuar su trayecto por la pampa al norte del río Lluta y que estaría aportando detritos ricos en Fe, Ti, Ni, Mg, Co, V y Cr; además se observa un mayor grado de urbanización (camino, agricultura, poblados; figuras 4.7a y 4.10). Adicionalmente, los sedimentos pre-industriales en el tramo bajo tienen una concentración promedio de Fe_2O_3 menor en relación a los sedimentos activos de este mismo tramo (6.5 % y 9.6 %, respectivamente), lo que confirma la hipótesis de que el aumento en las concentraciones de Fe_2O_3 se debe a factores antropogénicos.

La figura 4.11 muestra la presencia de actividades agrícolas asociadas a la llanura de inundación del valle, una mayor presencia de caminos y en detalle el cruce de la línea del ferrocarril Arica-La Paz al este de Poconchile. La línea roja representa la línea ferroviaria.

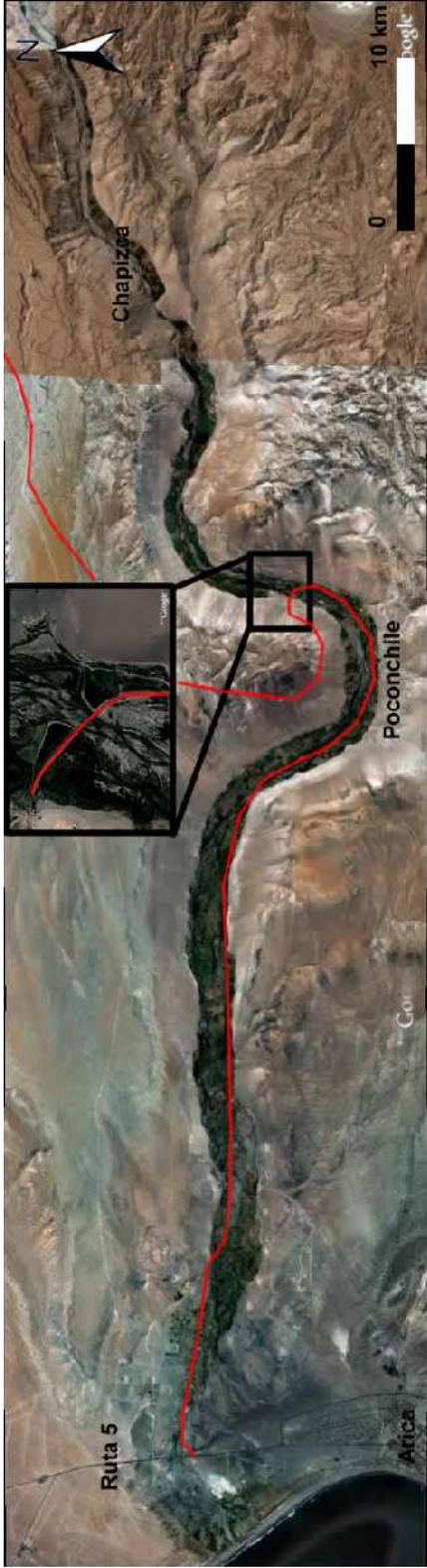


Figura 4.11: Urbanización del tramo bajo del río Lluta.

Sholkovitz (1988), Xu y Han (2009), Yang et al. (2002) y Li et al. (2009) concluyeron que en un ambiente de río la fracción disuelta o coloidal de REE's liberadas mediante meteorización, pueden ser adsorbidas en la superficie de óxidos y/o hidróxidos de hierro y luego coagulados y transferidos a la forma particulada. Específicamente, Li et al. (2009) muestra una especial tendencia de las LREE y su vinculación a óxidos/hidróxidos de hierro. Luego, es probable que la concentración de LREE en los sedimentos fluviales entre la desembocadura del río Lluta y Poconchile se deba a su afinidad con las superficies de óxidos/hidróxidos de hierro y la mayor capacidad en los procesos de adsorción debido al aumento de pH experimentado en el cauce del río Lluta entre Chapizca y la ruta Panamericana (pH's entre 5.1 y 8.1, respectivamente; DGA, 2004). Xu y Han (2009) mostraron que los fenómenos de adsorción de REE aumentan considerablemente con pH's mayores a 6-6.5, lo que soporta la hipótesis anterior. En general, a través de todo el cauce principal del río Lluta se observan patrones similares entre las concentraciones de LREE y Fe_2O_3 , lo que sugiere que la presencia de óxidos/hidróxidos de hierro probablemente controla la fracción disuelta de LREE en toda la cuenca fluvial (figuras 3.3 y 3.4). Por otro lado, los sedimentos pre-industriales LLUTA-JP-06 y LLUTA-JP-13 (puntos de muestreo 7 y 32, tramo bajo y alto respectivamente), muestran concentraciones excepcionalmente altas en HREE e Y; y LREE, Zr, Hf y Th, respectivamente (tabla A2; figuras 3.1, 3.2, 3.3, 3.4 y 3.6). Yang et al. (2002) mencionan que algunos minerales pesados aportan considerables concentraciones de REE, no importando su baja abundancia en los sedimentos de río. Luego, es probable que las muestras LLUTA-JP-06 y LLUTA-JP-13 contengan minerales pesados; posiblemente granate en la muestra LLUTA-JP-06, lo que concuerda con el contenido de HREE y la presencia de la unidad intrusiva KTg (ver Marco Geológico) que genera metamorfismo de contacto en las rocas adyacentes; mientras que para la muestra LLUTA-JP-13 se esperaría la presencia de circón (mineral reconocido en la zona), dadas las concentraciones de Zr, Hf, Th y LREE. Por otro lado, la nula correlación entre LREE y Fe_2O_3 observada para los sedimentos pre-industriales denotados por su asociación a los nodos 1 y 4, respectivamente (figuras 4.1 y 4.2), reafirma que las concentraciones de Fe_2O_3 son debidas a un factor antropogénico.

Autores como Jain y Sharma (2001), Banat y Howari (2003), Filgueiras et al. (2004) y Konhauser et al. (1997) muestran la importancia de los óxidos/hidróxidos de hierro y su capacidad para vincular metales traza, ya sea en su superficie mediante adsorción o a través de co-precipitación. La figuras 4.5 y 4.6, que representa el resultado del análisis mediante redes neuronales exclusivamente para los sedimentos activos del cauce principal del río Lluta, muestra una fuerte correlación positiva entre Fe_2O_3 y diversos elementos traza y mayores asociados al nodo 1 (figuras 4.5 y 4.6); el cual se ubica espacialmente desde Poconchile hacia la desembocadura (figura 3.13). Además, patrones similares en las concentraciones de diversos elementos con respecto a los patrones de Fe_2O_3 observados en el set de figuras entre 3.1 y 3.10 soportan esta fuerte correlación a través de todo el cauce del río Lluta. Lo anterior sugiere que la presencia de óxidos/hidróxidos de hierro en los sedimentos es uno de los factores más importantes en el transporte de elementos traza y elementos mayores de la carga en suspensión del cauce principal del río Lluta.

La tendencia creciente en las concentraciones de Fe_2O_3 en el tramo bajo del río Lluta es rota bruscamente en los puntos de muestreo 1, 2 y 3 aguas abajo de Poconchile (figura 3.7). También se observa una disminución acoplada de de elementos tales como REE, Y, Zr, Hf, Ta, Nb, V, W, Th, Sc, Co, Sb, Cr_2O_3 , TiO_2 y MgO (tabla A1; figuras 3.1-3.10). De manera adicional al cambio del régimen hidrodinámico del río en el tramo bajo del río Lluta, y la posibilidad de que existan puntos donde se acumulan más arcillas y silicatos livianos, como se discutió anteriormente, existen diversos estudios (e.g. Banat y Howari, 2003; Kelderman y Osman, 2007; Filgueiras et al., 2004) que mostraron que los óxidos/hidróxidos de hierro son termodinámicamente inestables bajo condiciones reductoras. En particular, Filgueiras et al. (2004) y Kelderman y Osman (2007) indicaron que un mayor potencial redox de los sedimentos podría generar la liberación de metales pesados por la disolución de óxidos/hidróxidos de hierro. Por otro lado, Cao et al. (2001) mostró resultados similares asociados a la pérdida de REE. En efecto, una característica observada en terreno en los puntos de muestreo 1, 2 y 3 es la presencia de materia orgánica (figura 4.12) la que podría generar un ambiente reductor en los sedimentos. Por otro lado, aguas arriba del punto 1 de muestreo existe una planta de tratamientos de agua (desalinizadora ESSAT S.A.;

DGA, 2004); que podría ser una fuente de contaminación por materia orgánica, como ha sido visto en otros sistemas fluviales donde es común la contaminación por materia orgánica debido al tratamiento de aguas (e.g. Jarvie et al., 2005; Le Maire et al., 2006; Lacassie, 2009). Adicionalmente, en el tramo bajo del río Lluta se observaron gran cantidad de gallineros abandonados y en funcionamiento (figuras 4.11 y 4.14), los que podrían estar generando contaminación por materia orgánica en la zona. Luego, la alta concentración promedio de C_{total} , aguas abajo de la planta ESSAT S.A. (que vierte sus desechos al cauce del río Lluta; DGA, 2004; figuras 4.11, 4.12 y 4.13) se aprecia en el nodo 6 de las figuras 4.5 y 4.6 y en la figura 3.9. Adicionalmente, la presencia de los poblados de Molinos, Taipimarca, Churina, el Tambo, Poconchile y Guancarane aguas arriba podrían estar aportando materia orgánica en el tramo bajo del río Lluta mediante contaminación difusa por aguas servidas (DGA, 2004).



Figura 4.12: Ubicación espacial de la planta desalinizadora de aguas ESSAT S.A. y muestra aguas abajo.



Figura 4.13: Punto de muestreo aguas abajo de la planta desalinizadora de aguas ESSAT S.A. (muestra LLUTA-JP-01)

Figura 4.14 (página siguiente): Gallineros en el tramo bajo del río Lluta.



Al igual que en la parte alta de la cuenca del río Lluta, en el tramo bajo se observan sedimentos químicamente asociados al nodo 2 (figura 3.13). Luego, una característica distintiva de los sedimentos asociados al nodo 2 es la alta concentración promedio de Na_2O (tabla 3.1; figura 3.11b). El tramo bajo del río Lluta se caracteriza por tener suelos con nitratos y sales (DGA, 2004); lo que estaría confiriéndole a los sedimentos su alta concentración de Na_2O . Particularmente, la salinidad de los sedimentos aguas abajo de Poconchile (figura 3.13), podría estar afectada por la disminución del torrente del río debido al aporte de éste a la napa subterránea (figura 1.3), ocasionando una mayor acumulación de sales debido al aumento de la saturación en el río (DGA, 2004); adicionalmente, el defectuoso drenaje asociado a la alta evapotranspiración y el clima desértico permiten el ascenso por capilaridad de las sales de la napa freática en el tramo bajo del río Lluta (DGA, 2004). Por otro lado, la planta desalinizadora ESSAT S.A. incorpora salmueras al cauce del río Lluta (DGA, 2004), siendo un factor antropogénico asociado a la acumulación de sales. Particularmente, la concentración salina de las muestras asociada a la zona costera en el estuario del río Lluta, podrían ver incrementada su salinidad debido a la interacción entre las aguas de las napas subterráneas y oceánicas. Finalmente, la presencia de minerales tales como magadiita, que precipita de salmueras alcalinas de alto pH, y kenyaita, formada por lixiviación de magadiita y desde salmueras en depósitos evaporíticos de playa; soporta la hipótesis de la alta salinidad de los suelos en el tramo bajo (tablas 3.2 y A3).

Los patrones de las concentraciones de P_2O_5 homogéneamente altas en el tramo-medio bajo del río Lluta (figuras 3.7 y 3.11), indican que la abundancia de este elemento es una característica del área de muestreo más que una señal asociada a una fuente puntual. Es posible que entre Chapizca y la Qda. Socoroma, el drenaje de unidades con presencia de minerales accesorios tales como apatita y/o el aporte sedimentario de las Qdas. Putre y Socoroma influyan en el aumento observado en las concentraciones de P_2O_5 en este trayecto (figura 3.7). Por otro lado, aguas abajo de Chapizca se observa un nuevo aumento en las concentraciones de P_2O_5 (figuras 3.7 y 3.13), lo que no concuerda con el basamento geológico específico en la zona. Sin embargo, desde Chapizca hacia la desembocadura del río Lluta, aledaño al cauce de éste se desarrolla una intensa actividad agrícola en el área (DGA, 2004; figuras 4.7a y

4.10). Luego, es probable que este aumento en las concentraciones de P_2O_5 en los sedimentos fluviales se deba al uso de fertilizantes en base a fosfatos empleados en actividades agrícola; tal como se discutió anteriormente.

Un incremento en las concentraciones de Au y Cu es observado en la zona alta del tramo bajo del río Lluta, lo que concuerda espacialmente con el drenaje de diversos tipos de prospectos metálicos de Cu, Cu-Au-Ag, Cu-Au, Cu-Mo y Cu-U (ver Geología Económica; tabla B1; figuras 3.5 y 3.13). Por otro lado, el resultado de la difracción de rayos X hecho para sedimentos activos y pre-industriales (tabla A3), indica una correspondencia entre la ocurrencia de prospectos metálicos de Cu, Au, Ag, Mo y de uranio; y las concentraciones mayores de estos elementos en este tramo (tabla A1; figuras 3.5, 3.6 y 3.10). Luego, la presencia de minerales de uranio (iriginita, lanthinita, petscheckita, furongita y sengierita), cobre (covelina, cuprita), plata (argentopentlandita) y molibdeno (wulfenita) refleja el aporte detrítico desde las zonas mineralizadas que drena el río Lluta y de los prospectos cercanos a su cauce (figura 3.13; tablas A3 y B1).

4.6 Quebradas menores al oeste del río Lluta

Los resultados muestran que los sedimentos están asociados a los nodos 2, 3, 4, 7 y 8 (figura 3.14). Los sedimentos asociados al nodo 4, como característica general, presentan concentraciones promedio medias de Fe_2O_3 , Ti_2O , Cr_2O_3 , MgO, CaO, MnO, Co, V y Sc (tabla 3.1); lo que probablemente estaría reflejando la componente litológica de composición intermedia asociada a la unidad Pv (ver Marco Geológico; figuras 3.11b y 3.13). Por otro lado, los nodos 2, 7 y 8 muestran como grupo concentraciones promedio medias a altas de SiO_2 , K_2O , Rb, Ba y Sr; lo que sumado a las bajas concentraciones promedio de Fe_2O_3 y TiO_2 (tabla 3.1; figura 3.11b), indica una signatura química asociada a la denudación de litologías de composición félsica asociada a las unidades OMv, Pv, OMvs y Mv (ver Marco Geológico; figura 3.14). La muestra asociada al nodo 3 (figura 3.14), fue tomada aguas abajo de la línea férrea de Arica-La Paz, la que probablemente le confiere su asociación al nodo 3, o

posiblemente, existe una mayor cantidad de minerales pesados asociados a esa muestra de manera similar a lo que ocurre en el tramo bajo (figura 3.13). Finalmente, la muestra LLUTA-LB-79, tomada de la Qda. Cardones, afluente del río Lluta en su tramo bajo se asocia al nodo 5 (figura 3.13), que como característica química importante presenta altas concentraciones promedio de uranio (figura 3.11b). Concordantemente, aguas arriba de la muestra LLUTA-LB-79 ocurren tres prospectos de uranio (figura 3.13; tabla B1).

El análisis detallado de la química de las quebradas menores indica que las muestras LLUTA-LB-39, LLUTA-LB-41 y LLUTA-LB-45, asociadas a los puntos 42, 44 y 48, respectivamente (figura 3.13; tabla A1), poseen altas concentraciones de Mo, Cu, Zn, As y Au, en comparación con las demás muestras asociadas a quebradas menores (tabla A1). Lo que sugiere posibles zonas mineralizadas aguas arriba de los puntos de muestreo. Particularmente, las muestras LLUTA-LB-39 y LLUTA-LB-45 fueron tomadas en la Qda. Huaylillas que drena prospectos de manganeso, cobre-plomo-zinc y hierro (figura 3.13; tabla B1). Adicionalmente, la difracción de rayos X de la muestra LLUTA-LB-39 arroja la presencia de anglesita (tabla A3), sulfuro de plomo obtenido de la meteorización de depósitos de plomo (www.webmineral.com). Finalmente, en el punto 52, muestra LLUTA-LB-49 (figura 3.13), se observa la presencia de sengierita (tabla A3), lo que concuerda con el alto contenido de uranio asociado a esta muestra (tabla A1).

4.7 Tierras Raras

Diversos estudios han mostrado la correlación existente entre las concentraciones de tierras raras en sedimentos y su fuente litológica (e.g. Li et al., 2009; Ross et al., 1995; Singh, 2009; Singh, 2010; entre otros). En particular, el promedio de las concentraciones de los sedimentos activos recolectados en el sistema fluvial del río Lluta muestra patrones de tierras raras que caracterizan de manera regional la cuenca hidrográfica (figuras 2.1 y 4.13). El patrón de REE normalizado a los valores de la UCC según McLennan (2001), muestra un claro enriquecimiento en

LREE, mientras el promedio de los sedimentos de la cuenca del río Lluta está empobrecido en HREE (figura 4.15); adicionalmente, se observa una anomalía positiva de Eu (figura 4.15). Este patrón, en conjunto con el mayor fraccionamiento de las LREE normalizadas al condrito según los valores de Taylor y McLennan (1985), con respecto a la UCC y su empobrecimiento en HREE (figura 4.15); sugieren que la roca fuente es de composición félsica; tal como ha sido visto en otros ríos con fraccionamiento de REE similares (e.g. Sensarma et al., 2008; Singh, 2009; Singh, 2010).

El sistema fluvial del río Lluta, drena principalmente, rocas de edades que abarcan desde el Oligoceno al Holoceno, y su composición es principalmente andesítica-riolítica (ver Marco Geológico; figura 2.1). García et al. (2004) mostró para el área de la cuenca del río Lluta, que las rocas del Oligoceno Superior-Holoceno y sus características geoquímicas indican que el arco volcánico del área de Arica durante este período se emplazó sobre una corteza continental gruesa y experimentó un engrosamiento creciente en el tiempo. Luego, el fraccionamiento de los valores promedio de elementos tales como Zr, Ba, Hf, Sr y Th (265 ppm, 813 ppm, 7.31 ppm, 543 ppm y 12 ppm, respectivamente) con respecto a la corteza continental superior de acuerdo a los valores de Li (2000), se explican por las características de este margen, ya que son elementos muy abundantes en la corteza continental. De esta manera, los patrones REE (figura 4.15) y las concentraciones promedio de Zr, Ba, Hf, Sr y Th antes mencionadas muestran que la geoquímica de los sedimentos refleja a nivel regional las características geodinámicas de la zona. Finalmente, la anomalía positiva de Eu podría estar ligada a la ubicua presencia de plagioclasa en la zona (tabla A3), pues es bien sabido que cantidades sustanciales de Eu^{2+} pueden reemplazar al Sr^{2+} en feldespatos, y particularmente en plagioclasa (McLennan, 1989).

El patrón de REE, normalizado a los valores PAAS (Post-Archean Australian Average Shale; Taylor y McLennan, 1985), muestra como característica general, un empobrecimiento en las concentraciones de REE de los sedimentos del sistema fluvial respecto de los valores PAAS (figura 4.15). El empobrecimiento mayor se observa para las HREE, lo que concuerda con lo discutido previamente. Por otro lado, en márgenes pasivos, donde ocurren los mayores sistemas fluviales se observan patrones de tierras raras bastante uniformes y similares al PAAS, debido a un reciclaje sedimentario que

facilita la mezcla y homogenización de las firmas químicas (McLennan, 1989). Contrariamente, el patrón de tierras raras de la cuenca del río Lluta difiere claramente del patrón PAAS (figura 4.15); este tipo de patrones ocurre principalmente en ambientes tectónicos volcánicamente activos (McLennan, 1989), lo que concuerda con el ambiente geológico de la zona de estudio. Adicionalmente, las anomalías de Eu son típicas de sedimentos volcanogénicos donde la plagioclasa es un componente abundante (McLennan, 1989), lo que podría denotar cierta inmadurez química pues sedimentos químicamente maduros no presentan este tipo de enriquecimiento (McLennan, 1989). Finalmente, razones de elementos mayores tales como Al_2O_3/Na_2O y K_2O/Na_2O han sido utilizados para denotar madurez sedimentaria (e.g. Pettijohn et al. 1972; Herron, 1988; Singh, 2010). En particular, Singh (2010) determinó la inmadurez química de sus sedimentos con razones $Al_2O_3/Na_2O = 3.2-5.7$ y $K_2O/Na_2O = 0.7-5.4$; luego, los sedimentos del río Lluta según este criterio serían inmaduros químicamente pues tienen razones con valores $Al_2O_3/Na_2O = 0.8$ y $K_2O/Na_2O = 3.7$, ratificando la hipótesis anterior.

En la figura 4.15, las líneas verde, amarilla y magenta representan las concentraciones promedio de REE en el sistema fluvial del río Lluta, normalizadas a los valores CHON (Taylor y McLennan, 1985), UCC (McLennan, 2001) y PAAS (Taylor y McLennan, 1985), respectivamente. Las líneas roja, azul y negra muestran los patrones PAAS normalizada al CHON, UCC normalizada al CHON y PAAS normalizada a UCC, respectivamente, a modo de manera referencia.

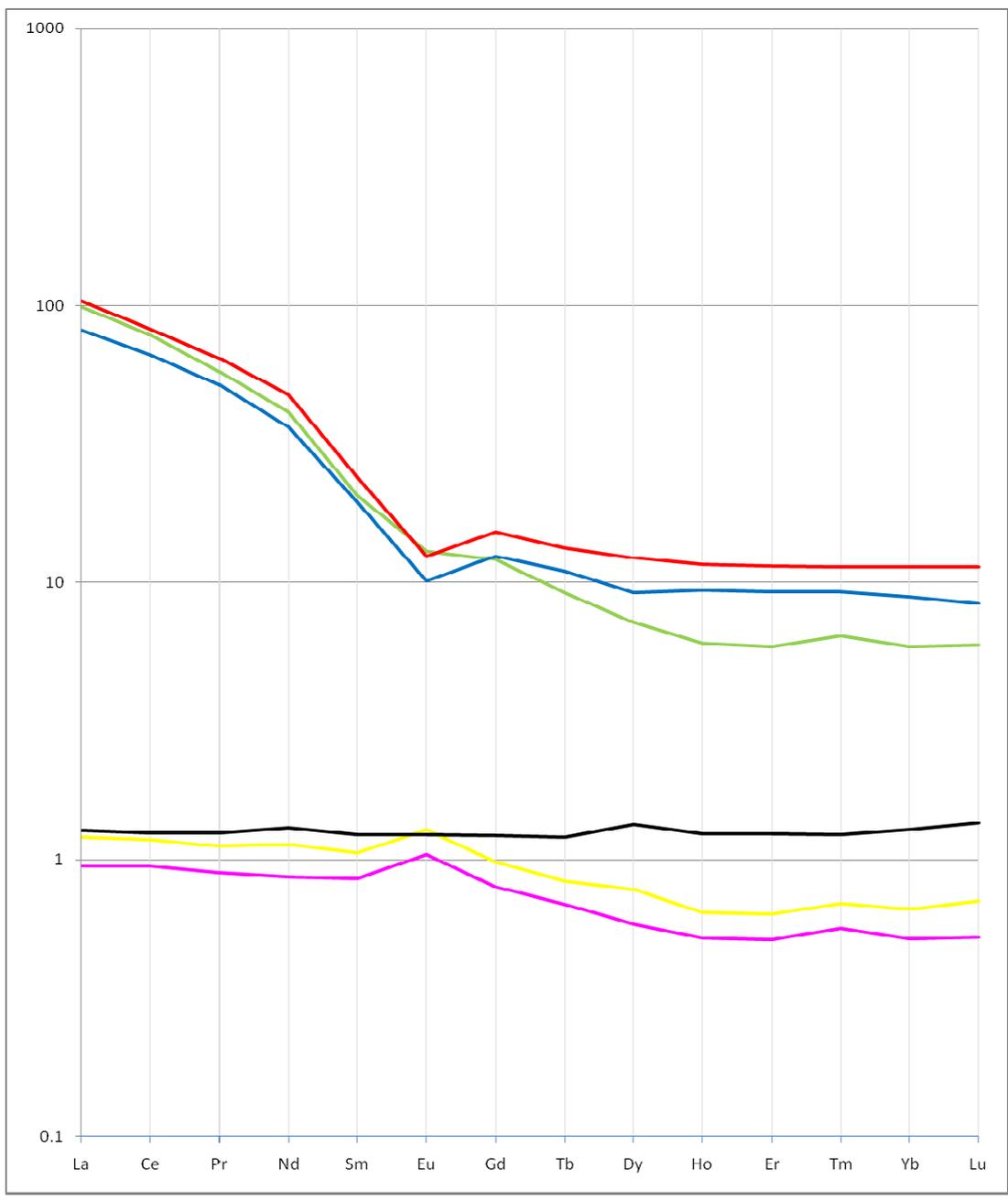


Figura 4.15: Patrones de tierras raras.

4.8 Proveniencia según minerales pesados de la fracción no-magnética

Las discusiones generadas del análisis de los minerales pesados de la fracción no-magnética son un acercamiento a las posibles rocas fuente considerando los resultados antes descritos y las asociaciones minerales que pueden hacerse. Esto debido a la falta del análisis de microsonda, el cual permite definir más claramente su proveniencia. Luego, el análisis de minerales pesados realizado a las muestras de sedimentos activos LLUTA-LB-29, LLUTA-LB-70, LLUTA-LB-06 y LLUTA-LB-87, ordenadas correlativamente desde la parte alta del río Lluta hacia la desembocadura, respectivamente (figura 2.1; tabla A4); muestran diversas mineralogías y asociaciones minerales que pueden ser confiables indicadores de proveniencia de sedimentos según diversos estudios de proveniencia (e.g. Pinto et al., 2004; Bhatia y Crook, 1986; Roser y Korsch, 1986).

Como se describió en la sección resultados, la muestra LLUTA-LB-87, presenta en general alta presencia de impurezas de Fe-Ti en una familia de clinopiroxenos y en titanita; además de abundante ceniza en la superficie de la familia de anfíbolos negros (figura 3.16a; tabla A4); lo que sugiere un origen volcánico. Adicionalmente, existe la presencia de ortopiroxenos, actinolita, biotita y clinopiroxenos limpios (figura 3.16a). Luego, la asociación mineral anfíbola+biotita podría asociarse a un volcanismo ácido; mientras que la asociación clinopiroxeno+ortopiroxeno sugiere una componente de aporte detrítico de composición intermedia andesítica. En general, todas las muestras presentan minerales bastante euhedrales lo que indicaría cierta facilidad para disgregarlos desde su roca fuente. Por otro lado, la presencia de minerales con menos impurezas y ceniza en su superficie, podría indicar fuentes litológicas diferentes. Esta característica se aprecia en minerales como andradita, granate y la familia de clinopiroxenos menos abundantes (figura 3.16a; tabla A4); que sumando la presencia de epidota (aunque es ubicua en toda la zona; figura 3.16), entregan una asociación mineral característica de metamorfismo de contacto.

La mineralogía de la muestra LLUTA-LB-06 (punto 06; figuras 2.1 y 11b), presenta minerales de anfíbola (dos familias), clinopiroxeno, ortopiroxeno, titanita, epidota, biotita y apatito, sumado a la presencia de ceniza e impurezas, aunque en menor medida que la muestra LLUTA-LB-87 (tabla A4). Luego, es posible asociar arreglos minerales como biotita+anfíbola, que reflejan una proveniencia félsica; clinopiroxeno±ortopiroxeno, de una fuente andesítico-basáltica; y la presencia de epidota, que sugiere un aporte de metamorfismo de contacto. Finalmente, las patinas de sulfuros de cobre podrían reflejar la presencia de zonas mineralizadas con este metal cercanas al cauce del río (figura 3.16b).

En el tramo alto del cauce principal del río Lluta, aguas abajo de la Qda. Allane, la muestra LLUTA-LB-70 se caracteriza por la presencia de dos tipos de anfíbolas, dos familias de clinopiroxenos, ortopiroxeno, titanita y epidota (figura 3.16c; tabla A4). Sin embargo, en contraparte a las muestras LLUTA-LB-06 y LLUTA-LB-87, la muestra en general se aprecia limpia, con muy poca presencia de ceniza e impurezas (figuras 3.16a, 3.16b y 3.16c). Esto sugiere que las asociaciones minerales ortopiroxeno+clinopiroxeno, provengan de una fuente intermedia a ácida, con composiciones andesítico-dacíticas. Por otro lado, la familia de piroxenos menos abundante y angulosos (figura 3.16c), podría eventualmente asociarse con epidota y relacionarse a un metamorfismo de contacto desde alguna fuente proximal.

En la cabecera del río Lluta, la muestra LLUTA-LB-29, se caracteriza por tener presencia de anfíbolas (dos familias), clinopiroxeno, epidota, titanita y biotita (figura 3.16d); sin embargo, la abundancia de anfíbola negra es claramente superior que el resto de las muestras del río Lluta (50% aproximado de la muestra analizada), lo que asociado a la presencia de biotita habla de un aporte detrítico desde fuentes ácidas. Nuevamente se destaca la clara forma prismática de los minerales, que sugiere una proveniencia desde rocas relativamente fáciles de disgregar. Por otro lado, también es posible asociar una proveniencia de composición más básica (andesítico-basáltica), debido a la presencia de clinopiroxeno (figura 3.16d). Finalmente, una característica común entre las cuatro muestras, es la presencia de anfíbolas rojizas (figura 3.16; tabla A4), sin embargo no es directa su asociación a otras mineralogías debido a la dificultad para determinar su tipo; en cambio, las anfíbolas negras, en general cubiertas con

distintas cantidades de ceniza en su superficie, se asocian a volcanismo y generalmente son del tipo hornblenda.

La muestra LLUTA-LB-29, probablemente refleja aportes detríticos desde la unidad OMv, de acuerdo a una de sus asociaciones minerales que refleja proveniencia ácida, y a la euhedralidad de sus cristales. Por otro lado, la fuente andesítico-basáltica, podría estar siendo aportada por la erosión de la unidad Pv en esa zona del sistema fluvial (ver Marco Geológico; figura 3.14). Por otro lado, la descripción de la muestra LLUTA-LB-70, y sus asociaciones minerales podría correlacionarse con la componente litológica félsica de las unidades OMv, Pv, Qv y MsPs, aflorando en la zona (García et al., 2004; ver Marco Geológico; figura 2.1). Para la muestra LLUTA-LB-06 se sugirieron tres posibles proveniencias, una de composición ácida, otra de composición andesítico-basáltica y otra de metamorfismo de contacto. La componente ácida, concuerda con la potente unidad OMv (Formación Oxaya) de composición riolítica principalmente que aflora en la zona; para la segunda, es probable que provenga desde la Qda. Socoroma, que se caracteriza por presentar la signatura geoquímica menos diferenciada de la zona, según discusiones anteriores; mientras que el metamorfismo de contacto concuerda con la intrusión de la unidad KTg (“Diorita de Lluta”, ver Marco Geológico; figura 2.1), que a la vez explicaría la presencia de apatita en la muestra LLUTA-LB-06, mineral accesorio de esta unidad (ver Marco Geológico). Finalmente, se observa una clara correspondencia entre la presencia de minerales de cobre en la muestra y la zona de prospectos de cobre desde donde se tomaron los sedimentos (figuras 2.1, 3.13 y 3.16b). Finalmente, las asociaciones minerales y las características de la muestra LLUTA-LB-87, indican una proveniencia concordante a los tipos litológicos drenados por el río Lluta (andesítico-riolítico), particularmente las unidades volcánicas y volcanosedimentarias OMv, OMvs, MsPs, Pv y Qv (ver Marco Geológico; figura 2.1), que además se ven reflejadas y caracterizadas por los nodos en la zona de estudio (figura 3.11). Es probable que la componente ácida esté siendo aportada por los flujos piroclásticos y tobas de la unidad OMv (Formación Oxaya), lo que se ve reflejado en la presencia de ceniza de las muestras y la euhedralidad de los minerales, que son disgregados fácilmente de la roca por el efecto de erosión que genera el río. Esta característica es común en todas las muestras lo que es coherente con la gran

extensión que presenta la unidad OMv. Por otro lado, la proveniencia metamórfica asociado a esta muestra, concuerda con la presencia aguas arriba de la unidad intrusiva KTg, que generó metamorfismo de contacto en las formaciones aledañas (García et al., 2004; figura 2.1). Por otro lado, Pinto et al. (2006) caracterizaron la Formación Azapa (unidad OMsv, ver Marco Geológico) de acuerdo a la presencia de minerales pesados; diópsido, enstatita, actinolita y titanita, entre otros, forman parte del arreglo de minerales de la formación. Según la descripción mineralógica que describen Pinto et al. (2006) para la Formación Azapa, es probable que los clinopiroxenos limpios observados en la muestra LLUTA-LB-87 (figura 3.16 a; tabla A4), sean del tipo diópsido; lo que sumado a la presencia de actinolita?, sugiere que esta formación, aflorando aguas arriba del punto 82 (ver Marco Geológico; figura 2.1) es una probable fuente litológica, aportando con una mineralogía específica. Adicionalmente, mediante difracción de rayos X, se observa para el punto de muestreo 58 (tabla A3; figura 2.1), aguas abajo de la unidad OMsv (Formación Azapa) la presencia de enstatita, probablemente proveniente de la formación, lo que ratificaría la hipótesis anterior.

4.9 Calidad ambiental del sedimento

Líneas guía de calidad de sedimentos fueron desarrolladas como parámetros numéricos por MacDonald et al. (2000), para determinar el nivel de contaminación asociado a las abundancias de As, Cd, Cr, Cu, Pb, Hg, Ni y Zn. En particular, el parámetro PEC (probable effect concentration) establece un límite superior para los metales anteriores y sus concentraciones en sedimentos. Si este parámetro es superado se estima que existe una alta probabilidad de que los organismos que habitan y/o están permanentemente en contacto con el sedimento, mueran o sean negativamente afectados (MacDonald et al., 2000).

La figuras 3.10 y las tablas A1, A2 y 3.1 muestran que, en la mayoría de los sedimentos del sistema fluvial del río Lluta (activos y pre-industriales), las concentraciones de As están muy por sobre el valor PEC (33 ppm; MacDonald et al., 2000). Luego, en este sistema fluvial serían esperables efectos adversos sobre los organismos debido a las concentraciones de este elemento. En contraste, no existen concentraciones de Cd, Cr, Cu, Pb, Hg, Ni y Zn por sobre sus respectivos límites PEC, salvo excepciones en tres puntos de muestreo aguas abajo de Poconchile en el caso del Cr y una muestra en la cabecera del río Lluta asociada a la concentración de Pb (111 ppm y 128 ppm, respectivamente; MacDonald et al., 2000; figuras 3.6 y 3.10). Por lo que no se esperarían efectos adversos asociados a las concentraciones de estos elementos en los sedimentos (MacDonald et al., 2000).

5. Conclusiones

La XV región de Arica y Parinacota tiene un alto potencial minero de acuerdo a los resultados químicos observados y a trabajos anteriores. En este sentido, y dado que el sistema fluvial del río Lluta no presenta gran intervención antropogénica, los datos aportados por este estudio pueden proveer un marco referencial para monitoreos futuros de la calidad de los sedimentos en un hipotético escenario de intensa extracción minera.

Los resultados de los análisis químicos y mineralógicos permiten la caracterización geoquímica de los sedimentos de este sistema fluvial y la evaluación de la influencia de factores naturales y antropogénicos, con la consiguiente importancia para los aspectos ambientales y económicos. Los factores naturales corresponden principalmente a la composición litológica del basamento rocoso que constituye la cuenca drenada por este sistema fluvial, los efectos de dilución y cambios de pH generado en la confluencia con afluentes, alta evaporización, zonas de alteración hidrotermal, depósitos de azufre, hidrodinámica del río y bofedales. Por otra parte, los factores antropogénicos corresponden principalmente a los efectos de las actividades mineras y agroindustriales, y la mayor urbanización (ferrocarril, caminos y aguas servidas). Específicamente, se puede concluir que:

5.1 Escala regional

Los sedimentos del sistema fluvial del río Lluta y sus concentraciones promedio de tierras raras, presentan patrones normalizados característicos de proveniencia detrítica desde litologías con composiciones félsicas. Adicionalmente, el acoplamiento de altas concentraciones de elementos tales como Zr, Ba, Hf, Sr y Th muestra la influencia de una corteza continental gruesa durante el emplazamiento del arco volcánico en el área de Arica durante el período Oligoceno Superior-Holoceno.

Por otra parte, el fraccionamiento de las tierras raras respecto de los valores PAAS, la anomalía positiva de Eu y los valores de los razones Al_2O_3/Na_2O y K_2O/Na_2O muestran el ambiente tectónico volcánico activo de la zona donde se ubica la cuenca de drenaje del río Lluta y la inmadurez química sus sedimentos.

Las altas concentraciones de As de este sistema fluvial están ligadas a la geología de base de la alta cordillera de la zona, lo que sumado a las características geomorfológicas y climáticas permiten una incorporación a la fracción sedimentaria de los sectores bajos de la cuenca del río Lluta.

La comparación con parámetros ambientales revela que se esperan efectos adversos para la biota del sistema fluvial del río Lluta, debido a los altos niveles de contaminación por concentración de As en los sedimentos.

La alta presencia de minerales de uranio asociada a sedimentos de todo el sistema fluvial muestra que es una característica regional y que probablemente hay zonas mineralizadas con este elemento en la zona de alta cordillera.

5.2 Río Lluta

Los sedimentos activos del río Lluta presentan un fuerte enriquecimiento en las concentraciones de Hg, Mo, Pb y As en el tramo alto, en comparación con los sedimentos pre-industriales. El enriquecimiento en Hg, Mo, Pb y As se origina en las nacientes del río, a partir de fuentes puntuales aguas abajo de la confluencia con el río Azufre. Estas fuentes puntuales estarían siendo aportadas principalmente desde la ex mina de azufre Aguas Calientes, aledaña al cauce del río Azufre. La signatura química decae rápidamente aguas abajo de las fuentes puntuales, con patrones lineales y exponenciales típicos de este tipo de contaminación. Adicionalmente, el pH ácido que le confiere el río Azufre al río Lluta genera una mayor movilización de Cd y Zn, que luego de la confluencia con la Qda. Allane genera un enriquecimiento de estos elementos en comparación con los sedimentos pre-industriales, debido al brusco aumento de pH.

Por otro lado, las altas concentraciones de MnO, MgO y CaO de los sedimentos en el tramo alto refleja una mayor disponibilidad de detritos carbonatados asociados a la presencia de las unidades Jsv y MsPs, y a los numerosos prospectos de manganeso en la zona.

El aumento puntual de las concentraciones de Au, W, As, Zn y As aguas abajo de la Qda. Huaylillas sugiere la presencia de zonas mineralizadas al oeste del río Lluta, que están siendo drenadas por quebradas menores.

El empobrecimiento en las concentraciones de Mo, Pb, As y Hg en el tramo bajo del río estaría relacionado con el efecto de dilución debido a la mezcla de las aguas del río Lluta con las aguas de las Qdas. Allane, Putre y Socoroma. Adicionalmente, el aumento de tierras raras y elementos incompatibles se asocia al paso por la unidad intrusiva KTg, mientras que los aumentos en las concentraciones de MgO y CaO, reflejan la presencia de litologías carbonatadas tales como Jsv y Qs. Por otro lado, los sedimentos con altas concentraciones de Na₂O y presencia de minerales evaporíticos reflejan la salinidad de los suelos en la parte baja del sistema fluvial del río Lluta; en particular, las salmueras vertidas al río Lluta por la desalinizadora ESSAT S.A. son una fuente de origen antropogénico.

Las patrones similares entre las concentraciones de Fe₂O₃, Cr₂O₃, MnO, TiO₂, V, Co, Sc, Ni, Sn, Zn, Nb, P₂O₅, Ta, Th e Y, con Zr, Hf y REE, a través del río Lluta, sugiere un control debido a la concentración de minerales pesados. Particularmente, las altas concentraciones de estos elementos a partir del poblado de Poconchile, refleja el efecto del cambio del régimen hidrodinámico del río en el tramo bajo, debido al cambio de pendiente, y la consiguiente mayor acumulación de minerales pesados.

Los altos valores de Fe₂O₃ en los sedimentos activos comparados a los sedimentos pre-industriales a partir de la localidad de Poconchile reflejan el aporte de hierro proveniente de la línea ferroviaria del antiguo tren Arica-La Paz, y probablemente de aportes difusos debidos a una mayor urbanización y redes de canales de regadío. Por otro lado, la fuerte correlación positiva de Fe₂O₃ con elementos tales como LREE, Co, Zn, V, Cr₂O₃, Sc, TiO₂, MgO, W y Ni, sugiere que óxidos/hidróxidos de hierro en los sedimentos es uno de los factores más importantes

en el transporte de elementos en la carga en suspensión del cauce principal del río Lluta, particularmente de su tramo bajo.

En general, en el tramo bajo se observa contaminación orgánica probablemente debido al aporte difuso de aguas servidas de las localidades y a la intensa agricultura desarrollada en este tramo del río Lluta. En particular, los altos valores de C_{total} aguas abajo de la planta desalinizadora de aguas ESSAT S.A., reflejan la contaminación con materia orgánica que ésta genera.

La homogéneas y altas concentraciones de P_2O_5 de los sedimentos activos en contraste con las bajas concentraciones de los sedimentos pre-industriales del tramo bajo del río Lluta reflejan un importante aporte de fosfatos derivados de la actividad agrícola de la zona.

Las concentraciones de elementos tales como Cu, Zn, Sb, U y Au, sumado a la mineralogía del tramo bajo, reflejan la abundancia de prospectos mineros de cobre y uranio.

5.3 Sector Quebrada Allane

La composición química de los sedimentos del sector de la Qda. Allane está directamente relacionada con la composición litológica del basamento rocoso de este sector de la cuenca. Mientras la signatura química caracterizada por concentraciones promedio medias a altas de SiO_2 , K_2O , Ba, Cs, Rb y Sr sumado a las bajas concentraciones promedio de Fe_2O_3 , TiO_2 y Cr_2O_3 refleja una composición félsica; las concentraciones medias de Fe_2O_3 , Ti_2O , Cr_2O_3 , MgO, CaO, MnO, Co, V, Sc y Cu refleja la componente intermedia de las litologías asociadas a las unidades Pv, OMv, Qv y Msv.

5.4 Sectores Quebrada Putre y Socoroma

La composición de los sedimentos de los sectores asociados a las Qdas. Putre y Socoroma reflejan características químicas asociadas a la composición litológica de la zona (basáltica a riolítica). En particular, las concentraciones medias a altas de Fe_2O_3 , Cr_2O_3 , V, Ni, Sc, Co y tierras raras pesadas, sumado a los menores valores en el sistema fluvial de $(\text{La}/\text{Yb})_n$, Co/Th, Th/Sc, La/Co y La/Sc indican que, localmente, en la sub cuenca de la Qda. Socoroma se emplazan rocas de composición básica-intermedia. Por otro lado, los altos valores promedio de Na_2O , asociados a los sedimentos del sector Qda. Putre reflejan la acumulación de sales debido a la alta evaporación en la zona y la presencia de salares en la alta cordillera.

Una característica común entre estas dos subcuencas son las altas concentraciones promedio de elementos tales como Au, Sb, Cu, Bi, Se, W, Mo, As, U y S_{total} ; lo que sumado a los diversos minerales con metales pesados en la zona, sugieren la presencia de cuerpos mineralizados asociados principalmente a la Zona de Alteración Hidrotermal Putre-Vilañuñumani aguas arriba. Por otro lado, las altas concentraciones promedio de C_{total} asociado a los sedimentos activos y pre-industriales de ambas sub cuencas, reflejan el aporte de los bofedales ricos en materia orgánica ubicados en la alta cordillera y el aporte menor antropogénico generado por los poblados de Putre y Socoroma.

Las altas concentraciones promedio de Cu y C_{total} y su correlación positiva entre los sedimentos de los sectores de las Qdas. Putre y Socoroma, reflejan la afinidad del Cu con la materia orgánica, y su capacidad de formar complejos. Por otro lado, la presencia de minerales de arcilla y la correlación entre Al_2O_3 y los elementos Cs y Be, muestran la afinidad de Cs y Be a ser adsorbidos por la alta superficie específica que ofrecen los minerales de arcilla.

5.5 Quebradas menores al oeste del río Lluta

La composición química de los sedimentos de las quebradas menores al oeste del río Lluta, reflejan principalmente la composición litológica del sector (composiciones andesítico-riolíticas). Por otro lado, las altas concentraciones de elementos tales como Mo, Cu, Zn, As y Au, en las quebradas menores sugieren que éstas drenan zonas mineralizadas con estos elementos.

5.6 Otras consideraciones

Los resultados indican que el sistema fluvial del río Lluta se caracteriza por altas concentraciones de As, lo que constituye una amenaza para los diferentes organismos que se desarrollan en este sistema. Esto sugiere la necesidad de ser monitoreado pues estas concentraciones están muy por encima de los estándares medio-ambientales. Adicionalmente, se observó un fuerte control ejercido por óxidos y/o hidróxidos de hierro en el transporte de metales pesados, sin embargo es necesario un mayor entendimiento de las fracciones sedimentarias involucradas en estos procesos, debido a su sensibilidad a los cambios físico-químicos en un ambiente acuático, y su consiguiente especiación y bio-disponibilidad. Por lo anterior, se recomienda efectuar estudios de extracción secuencial.

Referencias

Andrews, BJ, King, KA. Environmental contaminants in sediments and fish of Mineral Creek and the middle Gila River, Arizona. US Fish and Wildlife Service, Arizona Ecological Services Office On-line publication 1997.

Anh MT, Hong, L, Nguyen, NV, Thi, C, Minh, T, Becker-Van Slooten, K, Tarradellas, J. Micropollutants in the sediment of the Saigon – Dong Nai River: situations and ecological risks. *Chimia* 2003;5:537–541.

Anikiev, VV, Dudarev, OV, Said, MA, Al, Utkin, IV, Shumilin, EN. Natural and anthropogenic factors in the lateral distribution of the particulate material and chemical elements in water of the Nile River foredelta and adjacent area of the Mediterranean Sea. *Geochemistry International* 2000;3:69-81.

Banat, KM, Howari, FM. Pollution load of Pb, Zn, and Cd and mineralogy of the recent sediments of Jordan River/Jordan. *Environment International* 2003;28:581–586.

Bhatia, M, Crook, K. Trace element characteristics of graywackes and tectonic setting discrimination of sedimentary basins. *Contrib. Mineral. Petrol.* 1986;92:181–193.

Birch, GF, Siaka, M, Owens, C. The source of anthropogenic heavy metals in fluvial sediments of a rural catchment: Cox River, Australia. *Water, Air and Soil Pollution* 2001;12:13–35.

Brown, ET, Measures, CI, Edmond, JM, Bourle`s, DL, Raibeck, GM, Yiou, F. Continental inputs of beryllium to the oceans. *Earth Planet. Sci. Lett.* 1992a; 114:101–111.

Brown, E, Edmond, JM, Raibeck, GM, Bourle`s, DL, Yiou, F, Measures, CI. Beryllium isotope geochemistry in tropical river basins. *Geochim. Cosmochim.* 1992b; Acta 56:1607–1624.

Callender, E. Heavy Metals in the Environment-Historical Trends. *Treatise on Geochemistry* 2003;9:67-105.

Cao, X, Chen, Y, Wang, X, Deng, X. Effects of redox potential and pH value on the release of rare earth elements from soil. *Chemosphere*, 2001;44:655-661.

Cappuyns, V, Swennen, R. The application of pHstat leaching tests to assess the pH-dependent release of trace metals from soils, sediments and waste materials. *Journal of Hazardous Materials. Science*, 2008;158:185-195.

Coquery, M, Welbourn, PW. The relationship between metal concentration and organic matter in sediments and metal concentration in the aquatic macrophyte *Eriocaulon septangulare*. *Water Res.*, 1995; 29: 2094-2102.

Dalai, T, Rengarajan, R, Patel, PP. Sediment geochemistry of the Yamuna River System in the Himalaya: Implications to weathering and transport. *Geochemical Journal* 2004;3:441-453.

De Carlo, EH, Beltran, VL, Tomlinson, MS. Composition of water and suspended sediment in streams of urbanized subtropical watersheds in Hawaii *Applied Geochemistry* 2004;1:1011–1037.

DGA-Dirección general de Aguas. Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad Cuenca del río Lluta, Diciembre 2004.

Dinelli, E, Lucchini, F, Fabbri, M, Cortecchi, G. Metal distribution and environmental problems related to sulfide oxidation in the Libiola copper mine area (Ligurian Apennines, Italy). *Journal of Geochemical Exploration* 2001;74:141-152.

Dinelli, E, Cortecchi, G, Lucchini, F, Zantedesci, E. Sources of major and trace elements in the stream sediments of the Arno River catchment (northern Tuscany, Italy). *Geochemical Journal* 2005;3:531–545.

Dinelli, E, Tadeo, F. Different types of fine-grained chemical precipitates associated with acid mine drainage in the Libiola Fe-Cu mine area (Ligurian Apennines, Italy). *Applied Geochemistry* 2002;17:1081-1092.

Dold, B. Speciation of the most soluble phases in a sequential extraction procedure adapted for geochemical studies of copper sulfide mine waste. *Journal of Geochemical Exploration* 2003;8:55-68.

Dold, B, Fontboté, L. Element cycling and secondary mineralogy in porphyry copper tailings as a function of climate, primary mineralogy, and mineral processing. *Journal of Geochemical Exploration* 2001;7:3-55.

Feyte, S, Tessier, A, Gobeil, C, Cossa, D. In situ adsorption of mercury, methylmercury and other elements by iron oxyhydroxides and organic matter in lake sediments. *Applied Geochemistry* 2010;25:984-995.

Filgueiras, AV, Lavilla, I, Bendicho, C. Evaluation of distribution, mobility and binding behaviour of heavy metals in surficial sediments of Louro River (Galicia, Spain) using chemometric analysis: a case study. *Science of the Total Environment* 2004;330:115-129.

Fritzke, B. Growing cell structures-A self-organizing network for unsupervised and supervised learning. *Neural Networks* 1994;7:1441-1460.

Gaillardet, J, Viers, J, Dupre, B. Trace Elements in River Waters. *Treatise on Geochemistry* 2003;5:225-272.

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

Gingele, FX, De Deckker, P. Clay mineral, geochemical and Sr–Nd isotopic fingerprinting of sediments in the Murray–Darling fluvial system, southeast Australia. *Australian Journal of Earth Sciences* 2005;5:965–974.

Goldberg, S, Forster, HS, Godfrey, CL. Molybdenum adsorption on oxides, clay minerals, and soils. *Soil Science Society of America Journal* 1996;6:425-432.

Goldstein, SJ, Jacobsen, SB. Rare earth elements in river waters. *Earth and Planetary Science Letters* 1988;89: 35–47.

González, I, Jordán, M, Sanfeliu, T, Quiroz, M, Fuente, C. Mineralogy and heavy metal content in sediments from Rio Gato, Carelmapu and Cucao, Southern Chile. *Environmental Geology* 2007;5:1243–1251.

Gordeev, VV, Rachold, V, Vlasovaa, IE. Geochemical behaviour of major and trace elements in suspended particulate material of the Irtysh river, the main tributary of the Ob river, Siberia. *Applied Geochemistry* 2004;19:593-610.

Hammerschmidt, CR, Fitzgerald, WF. Geochemical controls on the production and distribution of methylmercury in near-shore marine sediments. *Environ. Sci. Technol.* 2004;38:1487–1495.

Hellyer, G. Ten Mile River Watershed-Massachusetts: An Assessment of Sediment Chemistry and Ecotoxicity. US Environmental Protection Agency Report 2000;URL:<http://www.epagov/Region1/lab/reportsdocuments/tenmile/WatershedEcotoxicityReportpdf.>, March 2008.

Herron, MM. Geochemical classification of terrigenous sands and shales from core or log data. *Journal of Sedimentary Petrology* 1988;58:820–829.

Higuera, P, Oyarzun, R, Biester, H, Lillo, J, Lorenzo, S. A first insight into mercury distribution and speciation in soils from the Almadén mining district, Spain. *J. Geochem. Explor.* 2003;80:95–104.

Hollweg, TA, Gilmour, CC, Mason, RP. Methylmercury production in sediments of Chesapeake Bay and the mid-Atlantic continental margin. *Mar. Chem.* 2009;114:86–101.

Hudson-Edwards, KA. Sources, mineralogy, chemistry and fate of heavy metal-bearing particles in mining-affected river systems. *Mineralogical Magazine* 2003;6:205–217.

Jain, CK, Sharma, MK. Distribution of trace metals in the Hindon River system, India. *Journal of Hydrology* 2001;253:81-90.

Jarvie, HP, Jurgens, MD, Williams, RJ, Neal, C, Davies, J, Barrett, C, White, J. Role of river bed sediments as sources and sinks of phosphorus across two major eutrophic UK river basins: the Hampshire Avon and Herefordshire Wye. *Journal of Hydrology* 2005;30:51-74.

Kelderman, P, Osman, AA. Effect of redox potential on heavy metal binding forms in polluted canal sediments in Delft (The Netherlands). *Water Research* 2007;41:4251-4261.

Kimball, BA, Callender, E, Axtmann, EV. Effects of colloids on metal transport in a river receiving acid mine drainage, upper Arkansas River, Colorado, U.S.A. *Applied Geochemistry* 1995;10:285-306.

Konhauser, KO, Powell, MA, Fyfe, WS, Longstaffe, FJ, Tripathy, S. Trace element geochemistry of river sediment, Orissa State, India. *Journal of Hydrology* 1997;193:258–269.

Kumar, R, Suresh, N, Sangode, SJ, Kumaravel, V. Evolution of the Quaternary alluvial fan system in the Himalayan foreland basin: implications for tectonic and climatic decoupling. *Quaternary International* 2007;159:6–20.

Lacassie, JP. 2003. Estudio de la proveniencia sedimentaria de los complejos metamórficos de los Andes Patagónicos (46°-51° Lat. S) mediante la aplicación de redes neuronales e isótopos estables. Tesis (Doctor en Ciencias, mención Geología). Santiago, Chile. Universidad de Chile, Departamento de Geología, 204 p.

Lacassie, JP, Ruiz-Del-Solar, J, Roser, B, Ortiz, E. Discovering geochemical patterns using artificial neural networks: Kando River case study *GeoscienceAfrica* 2004 2004a:620–621.

Lacassie, J P, Ruiz del Solar, J, Roser, BP, Hervé, F. Visualization of volcanic rock geochemical data and classification with artificial neural networks. *Mathematical Geology* 2006;3:697–710.

Lacassie, JP, 2009. Estudio mineralógico y geoquímico del sistema fluvial del río Rapel, VI Región, Chile. Servicio Nacional de Geología y Minería, Informe Registrado IR-08-37, 69 p., 10 figuras, 2 tablas. Santiago.

LeMaire, E, Blanc, G, Schäfer, J, Coynel, A, Etcheber, H. Dissolved Trace Metal-Organic Complexes in the Lot-Garonne River System Determined Using the C18 Sep-Pak System. *Aquatic Geochemistry*;1:21-38.

Li, C, Kang, S, Zhang, Q, Wang, F. Rare earth elements in the surface sediments of the Yarlung Tsangbo (Upper Brahmaputra River) sediments, southern Tibetan Plateau. *Quaternary International* 2009;208:151-157.

Li Y. H. (2000) *A Compendium of Geochemistry: from Solar Nebula to the Human Brain*. Princeton University Press, Princeton, NJ.

Lin, JG, Chen, SY. The relationship between adsorption of heavy metal and organic matter in river sediments. *Environment International* 1998, Vol.24;3:345-352.

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

Macklin, MG, Brewer, PA, Hudson-Edwards, KA, Bird, G, Coulthard, TJ, Dennis, IA, Lechler, PJ, Miller, JR, Turner, JN. A geomorphological approach to the management of rivers contaminated by metal mining. *Geomorphology* 2006;7:423–447.

McLennan, SM. Rare earth elements in sedimentary rocks: Influence of provenance and sedimentary processes. *Rev. Mineral.* 1989;21:169-200.

- McLennan, SM. Relationships between the trace element composition of sedimentary rocks and upper continental crust: *Geochemistry Geophysics Geosystems*, v. 2, 2001.
- Mihaljevic, M, Sivr, L, Ettler, V, Sebek, O, Prusa, P. Oxidation of As-bearing gold ore—a comparison of batch and column experiments. *Journal of Geochemical Exploration* 2004;81:59-70.
- Mouvet, C, Bourg, ACM. Speciation (including adsorbed species) of copper, lead, nickel, and zinc in the Meuse River: observed results compared to values calculated with a chemical equilibrium computer program. *Water Research* 1983;6:641–649.
- Ohta, A, Imai, N, Terashima, S, Tachibana, Y. Influence of surface geology and mineral deposits on the spatial distributions of elemental concentrations in the stream sediments of Hokkaido, Japan. *Journal of Geochemical Exploration* 2005;8:86–103.
- Ordóñez, A, Rivera, R. SERNAGEOMIN; GEODATOS 2004. Mapa metalogénica de la I región de Tarapacá, Escala 1:500.000. Geodatos.: 2v. Santiago
- Ortiz, E, Roser, B. Major and trace element provenance signatures in stream sediments from the Kando River, San'in district, southwest Japan. *The Island Arc* 2006;1:223–238.
- Oyarzún, J, Maturana, H, Andrzej, P, Pasieczna, A. 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 and the Environment* 2003;22:155–161.
- Oyarzun, R, Lillo, J, Higuera, P, Oyarzún, J, Maturana, H. Strong arsenic enrichment in sediments from the Elqui watershed, Northern Chile: industrial (gold mining at El Indio–Tambo district) vs. Geologic process. *Journal of Geochemical Exploration* 2004;84:53–64.
- Oyarzún, R, Oyarzún, J, Lillo, J, Maturana, H, Higuera, P. Mineral deposits and Cu–Zn–As dispersion–contamination in stream sediments from the semiarid Coquimbo Region, Chile. *Environmental Geology* 2007;5:283–294.
- Pettijohn, F.J., Potter, P.E., Siever, R., 1972. *Sand and sandstones*. Springer, New York.
- Pinto, L, Hérial, G, Moine, B, Fontan, F, Charrier, R, Dupré, B. Using geochemistry to establish the igneous provenances of the Neogene continental sedimentary rocks in the Central Depression and Altiplano, Central Andes. *Sedimentary Geology* 2004;166:157–183.

Power, EA, Chapman, PM. Assessing sediment quality. Sediment toxicity assessment. CRC Press, Boca Raton, 1992, 457 pp.

Rollinson, HR. Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation, Longman, UK 1993. 352 pp.

Roser, B, Korsch, R, 1986. Determination of tectonic setting of sandstone–mudstone suites using SiO₂ content and K₂O/Na₂O ratio. *Journal of Geology*. 1986;94:635–650.

Salomons, W, Stigliani, W. Biogeodynamics of pollutants in soils and sediments. Heidelberg: Springer-Verlag, 1995. p. 352.

Schäfer, J, Blanc, G. Relationships between ore deposits in river catchments and geochemistry of suspended particulate matter from six rivers in southwest France. *The Science of the Total Environment* 2002;29:103-108.

Sen Gupta, S, Bhattacharyya, KG. Immobilization of Pb(II), Cd(II) and Ni(II) ions on kaolinite and montmorillonite surfaces from aqueous medium. *Journal of Environmental Management* 2008;87:46–58.

Sensarma, S, Rajamani, V, Tripathi, JK. Petrography and geochemical characteristics of the sediments of the small River Hemavati, Southern India: Implications for provenance and weathering processes. *Sedimentary Geology* 2008;205:111–125.

Sholkovitz, ER. Rare earth elements in the sediments of the North Atlantic Ocean, Amazon Delta, and East China Sea: Reinterpretation of terrigenous input patterns to the oceans, *Am. J. Sci.* 1988;288:236-281.

Shumilin, E, Meyer-Willerer, A, Marmolejo-Rodriguez, AJ, Morton-Bermea, O, Galicia-Perez, MA, Hernández, E, González-Hernández, G. Iron, cadmium, chromium, copper, cobalt, lead, and zinc distribution in the suspended particulate matter of the tropical Marabasco River and its estuary, Colima, Mexico. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology* 2005;7:518-525.

Singh, P. Major, trace and REE geochemistry of the Ganga River sediments: Influence of provenance and sedimentary processes. *Chemical Geology* 2009;266:242–255.

Singh, P. Geochemistry and provenance of stream sediments of the Ganga River and its major tributaries in the Himalayan region, India. *Chemical Geology* 2010;269:220–236.

Song YH, Choi, MS. REE geochemistry of fine-grained sediments from major rivers around the Yellow Sea. *Chemical Geology* 2009;266:328-342.

Stone, P, Breward, N, Merriman, RJ. Mineralogical controls on metal distribution in stream sediment derived from the Caledonides of the Scottish Southern Uplands and English Lake District. *Mineralogical Magazine* 2003;6:325–338.

Syrovetnik, K, Malmstrom, ME, Neretnieks, I. Accumulation of heavy metals in the Oostriku peat bog, Estonia: Determination of binding processes by means of sequential leaching. *Environmental Pollution* 2007;147:291-300.

Taylor, SR, McLennan, SM. (1985). *The Continental Crust: Its Composition and Evolution*. Blackwell (Oxford), 312pp.

Tsai, L, Yu, K, Ho, ST. Cadmium distribution in sediment profiles of the six main rivers in southern Taiwan. *Journal of Hazardous Materials* 2007;148:630–639.

Vital, H, Statterger, K. Major and trace elements of stream sediments from the lowermost Amazon River. *Chemical Geology* 2000;168:151–168.

www.webmineral.com

Xu, Z, Han, G. Rare earth elements (REE) of dissolved and suspended loads in the Xijiang River, South China. *Applied Geochemistry* 2009;24:1803–1816.

Yang, S, Jung, SH, Choi, MS, Li, CX. The rare earth element compositions of the Changjiang (Yangtze) and Huanghe (Yellow) river sediments. *Earth and Planetary Science Letters* 2002;201:407-419.

Yang, S, Wang, Z, Guo, Y, Li, C, Cai, J Heavy mineral compositions of the Changjiang (Yangtze River) sediments and their provenance-tracing implication. *Journal of Asian Earth Sciences* 2009;35:56–65.

You, CF, Lee, T, Li YH. The partition of Be between soil and water. *Chemical Geology* 1989;77:105–118.

Yu, K, Tsai, L, Chen, S, Ho, S. Correlation analyses on binding behavior of heavy metals with sediment matrices. *Water Research* 2001;35:2417–2428.

Zapettini, E, Godeas, M, Seggiaro, R, Korzeniewski, L, Ribolo, D, Miranda, V, Uribe, H, Heuschmidt, B, Rodriguez, C, Vivallo, W, Gardeweg, M, Mpodozis, C, Palacios, O, Paz, M, Boulanger, E, Carpio, M, Cocking, R. 2001. Mapa metalogénico de la región fronteriza entre Argentina, Bolivia, Chile y Perú (14°S-28°S). Servicio Nacional de Geología y Minería, Publicación Geológica Multinacional, No. 2, 222 p., mapas escala 1:1.000.000. Santiago.

Zhang, C, Wang, L. Multielement geochemistry of sediments from the Pearl river system, China. *Applied Geochemistry* 2001;1:1251–1259.

Anexo A

Tablas de análisis

Tabla A1: Concentraciones de elementos mayores y traza, sedimentos activos

Sector	Quebradas Menores W Lluta								
Muestra	LB-79	LB-49	LB-48	LB-47	LB-46	LB-40	LB-39	LB-41	LB-45
Nodo	5	7	3	4	8	2	7	4	7
Punto	76	52	51	50	49	43	42	44	48
UTM E	399053	423579	424306	425648	426944	428500	429018	429598	431568
UTM N	7965295	7991540	7993299	7995368	7997568	7998904	8004162	8000881	8001982
Elementos Mayores (%)									
SiO2	61.21	65.05	61.63	55.1	58.05	60.91	63.92	53.31	64.75
Al2O3	14.26	15.85	15.62	15.02	15.83	17.1	14.95	13.72	15
Fe2O3	4.69	3.86	7.54	12.87	10.35	6.12	6.59	13.63	5.98
MgO	1.71	1.14	1.58	1.54	2.39	1.97	1.04	2.33	0.98
CaO	3.56	2.62	3.38	3.1	3.6	4.1	2.45	3.64	2.5
Na2O	3.29	3.72	3.8	3.11	3.48	3.86	2.56	2.45	2.69
K2O	3.14	3.57	2.78	2.12	2.03	2.33	2.4	2.23	2.48
TiO2	0.61	0.6	1.07	1.15	1.06	0.73	0.92	1.5	0.84
P2O5	0.14	0.13	0.13	0.13	0.12	0.12	0.13	0.17	0.12
MnO	0.1	0.07	0.1	0.16	0.13	0.14	0.07	1.47	0.06
Cr2O3	0.003	0.002	0.005	0.005	<0.002	0.003	0.004	0.007	0.003
Elementos Trazas (ppm)									
Sc	9	6	9	10	12	10	9	13	8
Ba	715	908	942	763	688	748	1054	721	940
Be	2	3	2	2	2	2	1	1	1
Co	10.6	8.5	15	21.8	23.1	16.1	11.5	33.4	9.4
Cs	14.5	5.2	3.4	3.7	2.8	13.1	3.5	100.1	3.7
Ga	16.5	19.4	19.7	24.4	20.8	21	18.5	22.2	17.8
Hf	6.3	6.5	13.4	11.5	6.9	6	13.2	7.1	9.5
Nb	12	11.7	13.6	11.3	8.9	9.4	13.4	10.1	11.6
Rb	112.1	99.9	72.1	67.2	54	65.6	73.6	110.2	73.3
Sn	3	2	2	3	2	2	2	2	2
Sr	372.6	492.2	559.9	429.6	452.6	576.2	453.8	403.8	417.7
Ta	1	0.8	1	0.7	0.6	0.6	1	0.7	0.9
Th	15.2	14.7	22	15.1	12.3	10.4	15.2	11.6	12.8
U	3.6	3.1	3.2	2.6	1.8	2.4	2.7	2.5	2.3
V	101	68	154	274	228	127	153	371	123
W	1.8	0.9	0.7	0.7	0.5	0.6	1.2	1.7	1.1
Zr	209.9	224.3	498.5	434.3	251.1	210	505.8	246.5	361.7
Y	17	11.6	13.6	13.5	10.6	11.2	14.2	11.7	11.6
La	37.2	51	111.1	60.6	54	41.1	54.6	48.1	44.1
Ce	77	100	209	115.5	102.1	79.6	101.1	91.7	86.8
Pr	7.73	9.46	18.92	10.62	9.79	8.06	10	9.11	8.3
Nd	26.8	31.9	61.7	35.4	32.7	28.3	32.8	31.6	26.8
Sm	4.33	4.81	7.61	4.7	4.46	4.16	4.38	4.44	4.14
Eu	0.83	1	1.31	1	1.04	1.1	0.96	0.86	0.89
Gd	3.41	3.34	4.75	3.51	3.26	3.13	3.12	3.02	2.8
Tb	0.55	0.44	0.57	0.47	0.41	0.42	0.45	0.42	0.42
Dy	2.94	2.18	2.85	2.38	1.98	2.34	2.31	2.17	2
Ho	0.57	0.4	0.45	0.46	0.4	0.38	0.44	0.39	0.43
Er	1.67	1.13	1.32	1.29	1.13	1.07	1.31	1.21	1.21
Tm	0.28	0.18	0.25	0.23	0.18	0.18	0.25	0.18	0.19
Yb	1.75	1.09	1.52	1.56	1.13	1.23	1.57	1.31	1.35
Lu	0.28	0.19	0.25	0.27	0.19	0.18	0.26	0.2	0.22
TOTAL C (%)	0.35	0.4	0.17	1.42	0.36	0.18	0.15	0.49	0.13
TOTAL S (%)	0.41	<0.02	<0.02	0.02	<0.02	<0.02	0.21	0.04	0.18
Mo	1	0.3	0.4	0.6	0.4	0.4	2.1	1.1	1.8
Cu	29	12.1	10.9	20.1	24	15.1	28.7	35.6	28.1
Pb	14.5	7.5	5.7	8.1	6.8	5.2	7.6	9.2	8.1
Zn	68	34	51	44	53	86	34	560	32
Ni	6.5	5.8	9	7.5	7.4	6.7	6.9	15.9	6.1
As	147.4	4.6	3.4	4.3	3.6	8.8	34.6	112.8	37.1
Cd	0.3	0.1	<0.1	0.1	<0.1	0.4	<0.1	1.1	<0.1
Sb	1.9	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.3	0.3	0.3
Bi	0.2	0.2	0.1	0.2	<0.1	<0.1	0.5	0.2	0.4
Ag	0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Au (ppb)	1	<0.5	0.8	2.2	1.5	<0.5	0.9	2.6	1.5
Hg	0.03	0.06	<0.01	0.03	<0.01	0.01	0.1	0.03	0.05
Tl	0.1	0.1	<0.1	0.2	0.1	0.1	0.1	0.7	0.1
Se	0.6	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	2	<0.5	1.4

Sector	Quebrada Allane								
Muestra	LB-31	LB-44	LB-62	LB-69	LB-27	LB-63	LB-32	LB-66	LB-65
Nodo	8	4	2	4	7	5	8	7	4
Punto	34	47	64	69	30	65	35	67	66
UTM E	430360	431947	433206	433226	433786	434558	435527	437422	437459
UTM N	8026838	8002567	8021155	8002298	8010569	8021891	8025944	8011252	8011236
Elementos Mayores (%)									
SiO ₂	57.69	55.06	59.6	54.96	61.86	60.21	58.24	60.68	57.09
Al ₂ O ₃	15.2	15.31	16.74	15.48	15.78	15.67	16.03	15.41	15.29
Fe ₂ O ₃	11.26	8.38	6.14	8.53	5.79	6.89	8.38	6	10.18
MgO	1.74	3.01	2.31	2.91	1.3	1.77	2.04	1.53	1.9
CaO	3.34	4.68	4.66	4.13	3.41	3.62	3.86	3.63	4.16
Na ₂ O	3.31	2.31	3.44	2.36	3.22	2.99	2.92	3.19	3.26
K ₂ O	2.44	2.38	2.19	2.4	2.65	2.71	2.1	2.68	2.43
TiO ₂	1.29	1.23	0.9	1.26	0.81	1.02	1.21	0.84	1.34
P ₂ O ₅	0.14	0.17	0.14	0.17	0.15	0.15	0.13	0.15	0.19
MnO	0.15	0.18	0.09	0.15	0.17	0.15	0.13	0.17	0.27
Cr ₂ O ₃	0.009	0.014	0.007	0.014	0.004	0.008	0.009	0.005	0.007
Elementos Trazas (ppm)									
Sc	9	16	13	16	9	11	11	10	13
Ba	874	759	795	794	905	743	885	896	909
Be	2	2	1	1	2	3	2	3	2
Co	211	25.6	16.9	25.1	12.8	17.6	21	13.7	22.1
Cs	6.9	22.5	4.7	19.1	99.7	11.4	7.3	203.8	60.2
Ga	22	18.5	18.7	19.1	18.4	19.7	20.9	18.3	19.5
Hf	7.8	6.1	5.6	6.1	6.7	6.5	7.6	5.5	9.1
Nb	12.5	9.4	8.3	9.9	10.7	15.7	10.5	11	13.3
Rb	73.3	104.5	70.9	101.1	119.1	119.2	72.6	131.2	93.7
Sn	2	2	1	2	2	2	2	2	3
Sr	569.1	652.3	661.7	664.9	611	496.6	660.2	698	547.6
Ta	0.8	0.8	0.5	0.7	0.6	1.1	0.8	0.8	0.9
Th	10.5	14.2	7.7	15	13.4	15	9.6	13.5	14.6
U	2.5	3.1	2.3	3.6	3.3	5.3	2.6	3.3	3.4
V	263	261	165	258	136	170	208	139	255
W	1.8	1.1	1.1	1.2	1.3	1.8	1.5	1.4	1.2
Zr	3016	213.5	202	215.1	247.8	238.8	285.8	199.9	334.5
Y	12.6	16.8	14.2	16.9	13.5	16.1	13	14.5	15.7
La	37	27.6	28.5	29.4	35.8	30.6	31.7	33.8	54.3
Ce	73	61.2	61.2	65	71.4	66	61.5	68.5	110.6
Pr	7.5	6.74	6.55	7.13	7.47	6.96	6.7	7.4	110.7
Nd	28.1	26.2	24.4	26.2	28.4	24.3	26.9	26	39
Sm	4.06	4.73	4.29	4.81	4.43	4.52	4.13	4.72	5.96
Eu	104	1.11	1.18	1.12	1.13	1.01	1.12	1.11	1.25
Gd	3.12	3.8	3.41	4.17	3.37	3.62	3.06	3.39	4.36
Tb	0.43	0.6	0.5	0.6	0.47	0.54	0.45	0.5	0.58
Dy	2.24	2.91	2.55	3.06	2.31	2.85	2.32	2.5	2.88
Ho	0.41	0.57	0.46	0.58	0.44	0.53	0.44	0.45	0.51
Er	1.28	1.53	1.27	1.51	1.34	1.49	1.29	1.21	1.51
Tm	0.19	0.25	0.21	0.24	0.22	0.24	0.2	0.2	0.24
Yb	1.35	1.53	1.31	1.48	1.38	1.54	1.22	1.3	1.61
Lu	0.2	0.24	0.19	0.21	0.2	0.25	0.19	0.19	0.23
TOTAL C (%)	0.34	0.08	0.12	0.09	0.21	0.41	0.33	0.36	0.23
TOTAL S (%)	0.04	0.06	0.09	0.09	0.12	0.1	0.13	0.09	0.05
Mo	0.9	0.6	0.3	0.6	0.8	0.5	0.6	0.6	0.9
Cu	25.8	33.7	22.1	32.6	20.7	23.4	19.1	23	26.2
Pb	6.1	9.3	6.7	8.9	12.8	8.2	6.3	12.5	7.7
Zn	87	92	40	79	139	49	49	100	134
Ni	119	23.5	8.3	24.3	7.2	12	10.3	8.4	12.6
As	9.8	37.7	9.6	27.5	225.1	46.3	31.9	412.5	164.6
Cd	0.1	0.4	0.1	0.2	0.4	0.1	<0.1	0.2	0.2
Sb	0.2	0.5	0.3	0.5	0.5	0.4	0.2	0.4	0.3
Bi	0.1	0.2	0.1	0.2	0.1	0.5	0.1	0.1	0.1
Ag	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Au (ppb)	0.5	0.7	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	0.8	<0.5
Hg	0.02	0.02	0.02	0.03	0.07	0.13	0.01	0.02	0.08
Tl	<0.1	0.4	0.1	0.3	0.5	0.2	0.1	0.3	0.6
Se	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5

Sector	Quebrada Allane						Putre		
Muestra	LB-33	LB-34	LB-38	LB-37	LB-35	LB-36	LB-17	LB-18	LB-19
Nodo	4	4	7	7	4	4	2	2	5
Punto	36	37	41	40	38	39	19	20	21
UTM E	438422	447895	451363	451674	452183	452537	434874	435161	437368
UTM N	8024727	8015004	8011388	8011995	8013484	8012173	7986997	7986702	7987724
Elementos Mayores (%)									
SiO2	55.69	58.13	61.08	60.86	56.05	56.03	56.38	61.64	61.39
Al2O3	15.17	15.67	16.01	15.97	15.6	15.65	16.52	16.57	15.98
Fe2O3	9.71	8.19	6.38	5.66	7.82	7.77	7.86	5.43	5.49
MgO	2.9	2.54	1.65	1.84	1.92	1.9	2.25	1.71	1.7
CaO	4.13	4.13	3.1	3.82	5.89	5.86	5.37	4.21	3.19
Na2O	2.75	3.18	3.21	3.28	3.08	3.06	3.41	4.21	3.36
K2O	2.07	2.36	2.57	2.64	2.2	2.19	1.95	2.5	2.65
TiO2	1.25	1.27	0.97	0.92	1.08	1.06	0.95	0.91	0.78
P2O5	0.22	0.17	0.2	0.17	0.2	0.2	0.23	0.28	0.23
MnO	0.1	0.09	0.07	0.08	0.12	0.12	0.12	0.07	0.14
Cr2O3	0.04	0.03	0.005	0.004	0.005	0.006	0.003	0.004	0.002
Elementos Trazas (ppm)									
Sc	13	12	9	10	13	13	11	7	9
Ba	867	962	1287	832	814	828	714	984	812
Be	1	1	2	2	2	2	2	2	2
Co	30	22.5	13.1	13.5	19.2	18.9	18.8	14.4	15.9
Cs	5.6	7.9	5.1	6	5.4	5.7	39	21.3	14.3
Ga	20.9	20.2	20.7	19.7	18.3	20	21.1	19.4	18.8
Hf	5.4	7.1	8.1	6	5.8	6.1	5.6	6	5.2
Nb	9.8	10	10.7	12.1	10.2	10.2	8.4	8.9	8.9
Rb	71.6	87.3	77.3	100.8	74.6	76.2	72.5	74.1	100
Sn	2	2	2	2	2	2	1	1	3
Sr	753.5	749.3	669.7	585.3	589.7	613.5	668.2	816.4	619
Ta	0.6	0.7	0.7	0.9	0.7	0.6	0.6	0.5	0.6
Th	10.8	13	11.5	12.9	11.4	11.6	5.9	6.3	11.3
U	2.9	3.7	3	3.8	2.7	2.7	2.2	3	3.6
V	208	205	138	114	185	189	189	131	120
W	13	14	15	11	1	0.9	3.8	12	17
Zr	183.9	257.6	286.3	226.4	207.9	234.4	196.6	211.2	174.5
Y	115	12.3	9.7	15.2	17.6	17.7	13.1	10.4	18.2
La	32.8	40.8	41.7	40.6	35.1	35.8	24.7	29.4	31.8
Ce	66	83	79.1	80.2	70.9	71.2	57.3	63.4	71.7
Pr	7.32	8.94	8.41	8.76	7.72	7.95	6.4	7.07	7.6
Nd	28.1	35	30.3	31.2	29.8	29.3	25.6	29.7	30.5
Sm	4.54	5.39	4.46	4.96	5.03	5.11	4.35	4.87	5.41
Eu	1.21	1.39	1.1	1.27	1.3	1.33	1.11	1.26	1.26
Gd	3.46	3.84	3.21	3.92	3.96	4.08	3.39	3.68	4.37
Tb	0.46	0.51	0.41	0.55	0.59	0.61	0.47	0.44	0.62
Dy	2.27	2.35	2	2.86	3.16	3.03	2.36	2.15	3.13
Ho	0.4	0.42	0.34	0.52	0.62	0.6	0.44	0.37	0.59
Er	1.1	1.2	0.96	1.53	1.71	1.68	1.31	0.91	1.61
Tm	0.16	0.17	0.15	0.24	0.26	0.26	0.19	0.14	0.24
Yb	1.11	1.23	0.89	1.41	1.67	1.62	1.22	0.79	1.33
Lu	0.17	0.18	0.16	0.24	0.27	0.25	0.17	0.13	0.2
TOTAL C (%)	0.61	0.34	0.3	0.34	0.6	0.6	0.25	0.09	0.61
TOTAL S (%)	0.41	0.17	0.21	0.02	0.04	0.04	0.17	0.1	0.1
Mo	12	1.1	2	0.2	0.6	0.6	0.4	0.4	3.1
Cu	26.9	28.9	26.6	18.5	24.4	25.5	30.7	36.8	54.7
Pb	6	5.6	14.2	6.3	7.3	7.4	4.7	4	16.8
Zn	44	48	38	42	58	62	71	38	101
Ni	16.8	11.2	7	7.1	9.7	9.8	8.9	7.8	14.5
As	10.7	10.6	40.3	6.5	39.3	40.2	66.5	28.8	63.7
Cd	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.1	<0.1	0.2	<0.1	0.5
Sb	0.2	0.2	0.4	0.1	0.1	0.1	1	0.6	0.9
Bi	0.5	<0.1	0.4	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.3
Ag	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Au (ppb)	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	0.5	<0.5	1.2
Hg	0.02	0.02	1.27	<0.01	<0.01	<0.01	0.02	0.02	0.01
Tl	0.2	<0.1	0.2	<0.1	<0.1	<0.1	0.1	<0.1	0.2
Se	0.9	0.7	0.9	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	1.4

Sector	Putre								
Muestra	LB-71	LB-59	LB-13	JP-7	LB-15	LB-14	LB-20	LB-26	LB-24
Nodo	5	2	2	6	4	1	6	2	4
Punto	71	63	11	14	13	12	22	28	26
UTM E	440717	440719	442743	442747	443215	443276	443721	444589	445560
UTM N	7987571	7988772	7988701	7987045	7987454	7987325	7989980	7992275	7990158
Elementos Mayores (%)									
SiO ₂	64.56	60.75	58.96	55.13	52.03	58.77	53.2	60.5	56.54
Al ₂ O ₃	15.1	16.06	15.91	15.59	15.88	15.86	15.28	16.1	16.83
Fe ₂ O ₃	3.88	4.55	7.11	6.54	10.53	8.38	8.81	3.77	8
MgO	1.14	1.74	1.74	3.74	1.71	1.55	2.87	1.48	1.89
CaO	1.99	3.89	4.74	4.26	5.11	1.14	5.66	4.03	4.09
Na ₂ O	2.91	3.56	4.14	1.05	2.65	1.14	2.1	4.18	3.05
K ₂ O	3.57	2.6	2.4	2.19	2.3	2.02	1.94	2.28	2.16
TiO ₂	0.58	0.69	1.09	0.82	1.87	1	1.05	0.81	1.29
P ₂ O ₅	0.15	0.25	0.3	0.19	0.31	0.19	0.26	0.18	0.24
MnO	0.12	0.1	0.13	0.14	0.14	0.03	0.13	0.04	0.12
Cr ₂ O ₃	<0.002	<0.002	0.005	0.008	0.002	0.005	0.003	0.003	0.005
Elementos Trazas (ppm)									
Sc	7	8	8	19	13	16	14	6	12
Ba	544	838	813	551	1067	748	740	912	839
Be	4	2	1	2	2	<1	<1	<1	2
Co	18.5	14.5	17.7	28.5	22.6	114	20.2	10.2	25.2
Cs	90.6	11.2	84.9	7.3	10.8	45.5	15.4	118	30.5
Ga	20.9	20.9	21	15.6	19	16	16.5	21.1	19.9
Hf	5.2	5.6	7.7	5.1	8.2	6	6.2	7.8	6.4
Nb	22.1	10.2	9.4	7.8	14	9.8	10.9	9.2	11.3
Rb	226.5	96.2	84.5	114.4	84.4	96.5	78.3	64.6	90.3
Sn	2	1	1	4	2	2	1	1	2
Sr	376.5	646.2	777.5	304.1	611.9	374.1	440.3	839.2	665.2
Ta	1.8	0.7	0.6	0.5	0.8	0.6	0.7	0.5	0.7
Th	22	10.1	6.2	19.6	13.2	16.5	9.8	6	13.6
U	9.5	3.5	3	4.1	3.1	3.7	2.7	2.7	3.3
V	81	93	169	129	275	150	187	137	221
W	4.6	1	1.2	1.2	1.8	20.6	1	1.2	1.3
Zr	134.7	188	271.8	180.8	296	209.7	238.2	267.2	264.6
Y	17.9	10.8	11	22	19.3	16.4	21.1	8.5	16.6
La	26.5	28.6	28.7	24.9	32.1	28.4	37.3	27.7	32.4
Ce	58.3	65.5	65.5	57.7	71.9	62.1	78.4	56.6	71.2
Pr	6.41	6.56	7.36	6.81	7.86	6.67	8.06	6.36	7.72
Nd	23	24.8	29.8	28.7	31.3	26	30.9	25.9	31.6
Sm	4.37	4.28	4.75	5.28	5.16	4.4	5.49	4.08	5.1
Eu	0.8	1.03	1.22	1.22	1.31	0.99	1.33	1.15	1.31
Gd	3.84	3.39	3.6	4.6	4.5	3.54	4.61	2.91	3.92
Tb	0.57	0.45	0.45	0.75	0.64	0.54	0.72	0.37	0.6
Dy	2.83	2.14	2.13	3.96	3.34	2.98	3.85	1.62	2.88
Ho	0.55	0.36	0.36	0.74	0.69	0.56	0.76	0.27	0.57
Er	1.38	1.05	1.06	2.15	1.8	1.66	2.24	0.73	1.65
Tm	0.24	0.16	0.15	0.33	0.31	0.26	0.33	0.12	0.26
Yb	1.42	1	0.88	1.94	1.71	1.67	2.14	0.75	1.55
Lu	0.22	0.16	0.14	0.3	0.26	0.25	0.32	0.11	0.24
TOTAL C (%)	0.44	0.64	0.34	0.57	0.47	0.11	0.68	0.52	0.4
TOTAL S (%)	0.28	0.07	0.1	0.1	0.47	1.76	0.02	0.13	0.05
Mo	1.1	0.3	0.4	0.4	0.7	6.3	0.3	2.5	0.7
Cu	34.6	30	33.5	48.2	25.8	47.2	24.8	20.8	33
Pb	8.6	7.1	3.3	11.5	9.9	13.7	14.7	2.6	7.5
Zn	70	52	49	90	65	47	64	29	99
Ni	10.2	11.7	8.4	37.7	8.1	11.3	7.9	5.3	13.3
As	299.8	16.1	221.7	32.4	65.6	708.5	15.9	53.2	50.1
Cd	0.2	0.2	0.1	0.2	0.1	0.1	0.2	<0.1	0.3
Sb	2	0.5	0.3	0.2	0.4	8.5	0.4	0.7	0.6
Bi	0.2	0.1	<0.1	0.2	<0.1	0.7	0.2	<0.1	0.2
Ag	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Au (ppb)	1.8	<0.5	0.9	0.8	0.8	1.8	<0.5	<0.5	<0.5
Hg	0.05	0.09	0.05	0.04	0.3	0.14	0.01	0.13	0.1
Tl	0.2	0.1	0.2	0.3	<0.1	0.4	<0.1	<0.1	0.2
Se	<0.5	<0.5	<0.5	0.5	0.5	2.2	<0.5	<0.5	<0.5

Sector	Putre					Socoroma			
Muestra	LB-25	LB-58	LB-21	LB-22	LB-23	LB-73	LB-74	LB-55	LB-76
Nodo	2	1	4	6	5	6	6	5	6
Punto	27	62	23	24	25	72	73	59	74
UTM E	445633	446315	447430	450505	451851	432800	435000	435555	435945
UTM N	7991434	7986800	7990362	7991931	7991827	7981500	7981888	7982045	7981381
Elementos Mayores (%)									
SiO2	62.06	53.34	55.83	52.22	55.75	54.32	57.79	56.85	57.85
Al2O3	17.14	14.34	15.97	17.63	16.23	17.6	16.1	17.79	15.2
Fe2O3	4.45	12.29	9.03	8.09	5.7	7.66	7.98	5.66	9.22
MgO	1.71	1.59	1.9	2.12	1.79	2.08	1.74	1.72	1.63
CaO	4.33	1.47	3.94	3.34	3.56	4.78	3.08	3.3	2.3
Na2O	4.28	0.92	2.97	2.13	1.9	2.59	2.06	2.56	1.46
K2O	2.56	1.97	2.05	1.85	2.23	1.59	1.95	1.82	1.95
TiO2	0.82	1.3	1.39	1.15	0.82	0.82	0.98	0.62	1.11
P2O5	0.24	0.22	0.24	0.19	0.25	0.27	0.27	0.33	0.25
MnO	0.06	0.04	0.15	0.1	0.11	0.25	0.13	0.09	0.24
Cr2O3	0.003	0.006	0.007	0.007	0.003	<0.002	0.003	<0.002	0.004
Elementos Trazas (ppm)									
Sc	7	16	13	14	10	12	13	11	13
Ba	949	1225	833	637	716	613	784	691	901
Be	2	1	2	3	2	2	2	2	2
Co	12.1	10.2	32.5	36.9	21	42.2	24.1	18.2	25.6
Cs	114	36.2	41.9	88.7	59.8	65.1	67.9	55.5	81.5
Ga	21.3	17.1	21.5	17.1	18.1	17.7	17.4	17.9	18.4
Hf	5.7	8.8	6.8	5.2	5.7	3.4	6	4.2	7.2
Nb	8.7	11	11.5	8.8	9.6	7.9	11.6	7.7	13
Rb	74.6	89.8	89.5	102.1	93.4	64.4	83.1	72.1	90.5
Sn	1	3	2	2	2	1	2	2	4
Sr	822.2	363.4	685.9	564.2	446.3	565.3	479.3	525.6	394.9
Ta	0.6	0.8	0.7	0.6	0.6	0.4	0.8	0.5	0.8
Th	7.2	16.6	12.6	12.5	10	6.4	11.7	9.2	11
U	2.4	3.5	3.3	3.1	2.6	2.8	3.7	3.1	2.9
V	109	213	261	198	110	166	164	86	196
W	0.7	26.5	1.9	1.3	1.2	1.7	3.1	1.1	5.9
Zr	197.9	349.5	265.6	190.6	215	128.7	194.1	141.5	247.6
Y	10.7	14.5	15.1	22.6	15.6	25.8	21.2	13.8	21.2
La	30.1	26.6	31.5	29.7	29.2	25.9	29.5	22.8	33.2
Ce	63.9	59.7	71.1	70.6	69.2	62.2	66.3	50.4	73.7
Pr	7.11	6.26	7.43	7.55	7.13	6.98	7.5	5.49	7.91
Nd	29.3	23.7	28.7	31	28.3	28.5	28.4	21.7	30
Sm	4.55	3.99	4.88	5.62	4.7	5.37	5.14	4.09	5.26
Eu	1.7	0.87	1.25	1.51	1.11	1.39	1.28	1.01	1.8
Gd	3.4	3.31	3.79	5.12	3.86	5.35	4.67	3.33	4.24
Tb	0.44	0.51	0.56	0.8	0.55	0.85	0.73	0.51	0.67
Dy	1.81	2.8	2.84	4.23	2.79	4.45	3.7	2.79	3.7
Ho	0.33	0.54	0.53	0.82	0.54	0.87	0.68	0.5	0.72
Er	0.93	1.54	1.44	2.25	1.63	2.31	2.01	1.38	1.98
Tm	0.15	0.25	0.21	0.31	0.24	0.33	0.3	0.23	0.31
Yb	0.91	1.55	1.3	1.91	1.47	2.21	2.1	1.34	2.01
Lu	0.14	0.25	0.21	0.3	0.22	0.31	0.31	0.22	0.32
TOTAL C (%)	0.21	0.13	0.69	0.51	0.94	0.71	0.62	1.06	0.48
TOTAL S (%)	0.04	1.97	0.07	0.06	0.06	0.1	0.15	0.11	0.16
Mo	0.3	7.8	0.8	1	0.4	1.4	2.5	1.5	2.2
Cu	23.1	38.7	36.1	34.7	26.6	43.2	41.8	43.5	40.5
Pb	3.6	25.4	8.3	11.5	8.8	9.5	14.4	8.5	18.9
Zn	29	55	147	151	104	116	91	69	101
Ni	5.6	8.8	18.9	21.4	10.1	15.7	12.7	9.4	15.6
As	13.4	445.2	88	275.3	51.8	405.3	445.2	225.2	611
Cd	<0.1	0.1	0.4	0.6	0.3	0.4	0.2	0.1	0.5
Sb	0.3	11.5	0.7	0.5	0.2	8.8	23.2	2	54.7
Bi	<0.1	0.7	0.2	0.3	<0.1	0.3	0.8	0.3	1
Ag	<0.1	<0.1	0.1	0.2	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Au (ppb)	<0.5	2.1	<0.5	<0.5	<0.5	0.9	1.5	<0.5	1.6
Hg	0.01	0.17	0.21	0.02	0.35	0.02	0.04	0.03	0.02
Tl	<0.1	0.5	0.2	0.6	0.2	0.4	0.4	0.4	0.3
Se	<0.5	1.9	0.5	0.7	<0.5	0.8	2.1	0.8	2.1

Sector	Socoroma								
Muestra	LB-10	LB-11	LB-8	LB-9	LB-56	JP-9B	JP-10	LB-16	JP-9A
Nodo	5	1	5	6	5	5	1	1	1
Punto	10	10	8	9	60	17	18	16	16
UTM E	436261	436261	437380	437514	438523	440926	441121	442569	442569
UTM N	7982643	7982643	7980184	7980846	7978902	7980436	7980885	7982893	7982893
Elementos Mayores (%)									
SiO2	57.52	62.35	59.63	60.99	60.24	62.43	65	60.68	61.16
Al2O3	15.96	14.87	16.27	15.27	16.53	15.18	14.18	13.59	14.04
Fe2O3	7.59	7.62	6.49	5.9	5.38	7.35	7.82	10.24	9.67
MgO	194	157	166	119	144	137	129	108	115
CaO	2.87	2.39	2.67	2.05	2.05	1.6	1.07	1.06	1.17
Na2O	195	175	3.03	1.36	2.84	1.79	1.21	1.22	1.25
K2O	165	2.12	2.42	2.22	2.75	2.93	2.31	2.19	2.23
TiO2	0.77	1.11	0.71	0.8	0.63	0.96	1.15	1.09	1.25
P2O5	0.25	0.23	0.18	0.23	0.17	0.16	0.23	0.24	0.23
MnO	0.09	0.08	0.12	0.27	0.16	0.1	0.06	0.04	0.04
Cr2O3	0.002	0.004	0.003	0.003	0.002	0.004	0.004	0.003	0.004
Elementos Trazas (ppm)									
Sc	13	13	12	12	9	12	14	12	13
Ba	621	802	646	784	770	866	916	840	935
Be	<1	2	1	2	2	1	<1	<1	<1
Co	12.8	11.7	15.7	27	14.8	14	10	5.6	7
Cs	25.5	9.1	20.4	27.8	26.4	4	5.4	7.5	6.5
Ga	16.5	16.8	16.7	15.6	18	18.5	18	16.8	18
Hf	4.6	6.3	5	5.5	5.2	9.6	6.7	7.2	9.8
Nb	8.4	11.5	9.8	11.5	10.1	16	13.2	11.7	12.1
Rb	65.3	80	85.7	86.2	94.4	102.7	88	84.3	86.8
Sn	2	2	2	3	3	2	3	3	3
Sr	454.8	449.6	363.7	329.1	408.5	289.3	346.3	381.8	371.7
Ta	0.7	0.8	0.8	0.7	0.7	1.1	0.8	0.8	0.8
Th	9.2	13.1	8.5	11.4	10.5	14.7	13.4	14.6	14.3
U	2.7	3.4	2	3	2.8	3.1	3.4	3.7	3.9
V	111	161	135	111	87	168	168	152	196
W	16	2.4	0.8	1.4	1.1	1.4	1.9	3.2	3.4
Zr	157.1	226.2	165.7	179.7	166.5	336.7	261.6	259	350.1
Y	14	16.5	18.3	27.3	14.6	18.1	17.9	12.8	13.9
La	22.1	28.1	23.5	34.5	28.1	39.3	32.2	28.7	31.2
Ce	47.2	61.5	53	83.1	63.8	81.4	69.4	63	65.9
Pr	5.38	6.81	5.63	8.73	6.17	8.28	7.52	6.72	7.09
Nd	21.9	25.8	22.2	34.8	23.1	29.2	27.9	25.8	25.7
Sm	3.61	4.42	3.93	6.43	3.79	4.77	4.76	4.16	4.13
Eu	0.9	1.02	0.9	1.41	0.93	1	1.04	0.94	0.96
Gd	2.95	3.54	3.42	5.36	3.3	3.94	3.67	2.98	3.24
Tb	0.45	0.52	0.55	0.88	0.48	0.59	0.56	0.44	0.48
Dy	2.39	2.91	2.91	4.7	2.79	3.12	3.11	2.33	2.53
Ho	0.5	0.58	0.64	0.91	0.5	0.63	0.61	0.47	0.49
Er	1.46	1.61	1.86	2.5	1.49	1.78	1.69	1.37	1.39
Tm	0.23	0.25	0.27	0.38	0.25	0.28	0.28	0.21	0.24
Yb	1.35	1.65	1.73	2.16	1.55	1.88	1.76	1.31	1.44
Lu	0.21	0.25	0.27	0.35	0.26	0.3	0.28	0.22	0.24
TOTAL C (%)	0.39	0.09	0.36	0.7	1.25	0.46	0.11	0.13	0.11
TOTAL S (%)	0.27	0.34	0.03	0.44	0.05	0.23	0.23	0.65	0.69
Mo	3.2	3.9	0.4	2.6	0.7	1.4	4.1	8.8	9.5
Cu	40.4	37.2	33.6	36.8	39	31.1	34.6	29.2	34.9
Pb	10.5	13.4	14	16.9	20.9	16.2	22.3	18.9	23.9
Zn	55	51	168	108	158	93	58	37	35
Ni	7.2	7.5	8.1	16.5	9.5	11.2	10.1	3.9	5.3
As	296.4	132.4	103.9	104.3	126.3	35	93.3	249.1	228.2
Cd	<0.1	0.1	0.8	0.4	0.6	0.2	0.1	<0.1	<0.1
Sb	2.1	2.3	2.5	2.9	4.3	0.8	3.4	2.4	2.7
Bi	0.6	0.9	0.2	1	0.2	0.3	1.8	1.4	1.5
Ag	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.2	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Au (ppb)	<0.5	1.4	0.9	2.2	1.3	0.8	2.2	1.4	2.6
Hg	0.07	0.15	0.02	0.04	0.05	0.02	0.06	0.17	0.14
Tl	0.2	0.2	0.1	0.2	0.3	<0.1	0.2	0.5	0.4
Se	16	2.9	0.5	2.2	<0.5	1.4	3.6	3.7	3.6

Sector	Socoroma		Río Lluta tramo bajo						
Muestra	JP-8	LB-57	LB-84	JP-1	LB-85	LB-1	LB-3	LB-86	LB-88
Nodo	4	1	3	2	3	2	2	3	4
Punto	15	61	79	1	80	2	3	81	83
UTM E	442577	446442	360440	363208	365444	368338	372303	376404	381396
UTM N	7985173	7983595	7963971	7965523	7964765	7964662	7964431	7964879	7965005
Elementos Mayores (%)									
SiO2	57.61	56.87	50.67	58.41	51.79	63.8	63.06	56.29	56.14
Al2O3	16.67	13.11	12.5	13.61	12.24	15.65	16	13.77	14.13
Fe2O3	8.43	13.15	16.24	6.15	15.95	4.45	4.91	12.4	13.23
MgO	1.76	0.88	2.66	1.83	2.75	1.52	1.82	2.68	2.15
CaO	2.16	0.92	5.45	4.75	5.59	3.44	4.34	4.56	4.09
Na2O	1.21	1.01	2.92	3.36	2.74	3.36	3.68	3.12	3.18
K2O	1.81	2.07	1.84	2.28	1.79	2.79	2.49	2.02	2.14
TiO2	1.34	1.04	2.02	0.79	2.01	0.66	0.74	1.7	1.52
P2O5	0.26	0.25	0.26	0.25	0.29	0.18	0.18	0.28	0.28
MnO	0.12	0.03	0.27	0.25	0.34	0.08	0.09	0.16	0.15
Cr2O3	0.006	<0.002	0.012	0.006	0.012	0.002	0.003	0.01	0.01
Elementos Trazas (ppm)									
Sc	17	10	16	10	17	8	10	15	13
Ba	809	887	688	649	670	809	768	765	759
Be	1	2	1	1	1	1	<1	1	1
Co	23.1	5	29.8	15.4	31.8	11.3	12.3	26.2	24.6
Cs	8.3	8.2	11.8	20.8	11.6	16.9	12.9	12	14.2
Ga	19.1	15.6	21.1	16.5	20	17.1	17.3	19.4	20.9
Hf	5.5	6.6	14.5	5.3	12.8	5.4	4.6	12.7	9.8
Nb	10.5	10.5	18.6	8.4	17.8	9.2	8.4	16.4	13.8
Rb	76.8	74.4	60.5	81.8	59.4	98.3	81	65.8	70.8
Sn	2	3	4	3	4	1	1	3	3
Sr	368.3	347.9	565.7	538	524.7	556.9	610.1	544.4	567.8
Ta	0.6	0.7	1.3	0.6	1.3	0.7	0.6	1.1	0.8
Th	14.2	13.3	20	9.4	16.7	10.1	9	13.6	11.7
U	3.3	3.6	3.6	2.6	3.2	3.1	2.5	3.2	3
V	217	158	446	134	428	101	109	316	338
W	16	3.1	2.4	1.1	2.5	1.4	1.1	2.2	2
Zr	215.7	220.8	560.3	185.3	483.4	170.3	163.8	436.2	358.1
Y	17.3	10.6	19.7	12.7	20.1	13.4	12.9	19.3	16.5
La	30.4	26.8	68.1	28.5	67.5	28.7	29.4	56	44.3
Ce	66.7	59.9	138.1	57.5	139.6	60.1	61.9	120.8	94.9
Pr	7.28	6.03	14	6.43	13.97	6.31	6.5	12.33	9.58
Nd	27.7	22.3	50.1	25	48.8	23.9	25.1	46.5	34.2
Sm	5.14	3.49	7.12	3.96	7.41	3.91	4.17	6.76	5.63
Eu	1.22	0.9	1.37	0.92	1.37	1.04	1.08	1.45	1.27
Gd	3.86	2.9	5.33	2.87	5.35	3.21	3.2	5.16	4.03
Tb	0.58	0.41	0.71	0.43	0.76	0.46	0.45	0.72	0.61
Dy	2.91	2.07	3.55	2.26	3.95	2.35	2.36	3.81	3
Ho	0.58	0.42	0.69	0.41	0.67	0.46	0.43	0.66	0.56
Er	1.71	1.13	2	1.22	1.94	1.24	1.23	1.91	1.68
Tm	0.24	0.2	0.31	0.18	0.3	0.19	0.2	0.28	0.25
Yb	1.54	1.17	2.02	1.14	2.08	1.2	1.12	1.97	1.65
Lu	0.23	0.19	0.33	0.17	0.32	0.19	0.18	0.31	0.25
TOTAL C (%)	0.17	0.13	0.2	1.06	0.7	0.16	0.08	0.19	0.13
TOTAL S (%)	0.14	0.77	0.68	0.85	0.17	0.16	0.18	0.14	0.09
Mo	11	10.6	1.2	1	1.4	1	0.8	1.3	1.2
Cu	52.8	22.7	25.5	28.6	29.7	27.9	22.1	31.6	27.7
Pb	15.8	18.6	14.8	19	16.3	15.1	12.3	16.8	17.6
Zn	63	24	122	167	143	68	68	109	114
Ni	18.5	2.8	12.6	9.3	15	7.4	6.7	11.7	12.3
As	64.8	490.3	51.1	102.7	84.2	55.8	44.6	68.6	163.7
Cd	0.1	<0.1	0.4	1.3	0.6	0.3	0.3	0.5	0.6
Sb	0.3	3.4	1.9	0.9	2.1	0.7	0.8	2	1.6
Bi	0.2	1.7	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1	0.2	0.2
Ag	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Au (ppb)	12	0.9	<0.5	<0.5	<0.5	0.9	1.1	0.9	<0.5
Hg	0.9	0.31	0.03	0.06	0.03	0.04	0.02	0.03	0.04
Tl	0.1	0.6	0.2	0.5	0.3	0.3	0.2	0.6	0.3
Se	1	3.7	<0.5	1	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5

Sector	Río Lluta tramo bajo								
Muestra	LB-87	LB-82	LB-4	LB-81	LB-54	LB-53	JP-18	LB-52	LB-50
Nodo	3	3	4	4	8	4	8	4	8
Punto	82	78	4	77	58	57	56	55	53
UTM E	383163	387275	389629	393897	400252	403527	406602	408304	410365
UTM N	7963498	7960273	7962833	7965384	7968243	7968677	7969979	7971876	7973678
Elementos Mayores (%)									
SiO ₂	52.24	56.2	58.8	58.62	60.89	59.53	60.6	57.56	60.51
Al ₂ O ₃	12.82	14.38	15.07	14.85	15.75	15.31	15.86	14.53	15.63
Fe ₂ O ₃	17.17	13.05	10.18	10.36	6.88	8.59	7.56	11.73	7.21
MgO	2.56	2.22	1.95	1.87	1.9	2.1	2.06	2.03	2.07
CaO	4.27	4.1	4.05	3.68	3.93	4.06	4.1	3.88	4.08
Na ₂ O	2.83	3.22	3.46	3.19	3.36	3.3	3.38	3.25	3.42
K ₂ O	1.82	2.21	2.51	2.39	2.43	2.34	2.28	2.31	2.39
TiO ₂	1.96	1.63	1.23	1.25	0.94	1.14	1.04	1.5	1
P ₂ O ₅	0.29	0.22	0.21	0.23	0.2	0.24	0.2	0.22	0.22
MnO	0.35	0.19	0.18	0.16	0.14	0.15	0.14	0.18	0.16
Cr ₂ O ₃	0.013	0.01	0.008	0.008	0.004	0.008	0.007	0.009	0.006
Elementos Trazas (ppm)									
Sc	15	13	12	11	10	12	12	12	11
Ba	710	771	777	772	843	865	778	877	861
Be	1	1	1	1	2	2	<1	<1	2
Co	34.6	26.7	20.5	21.7	16.9	20.4	18.5	24.4	18.1
Cs	12.3	15.1	21	21.9	25.5	22.2	21.1	23.1	25
Ga	21.8	21.3	20.1	20.6	19.6	20	18	20.5	18.6
Hf	13.4	12.2	8.8	9.7	5.8	9.5	6.9	12.2	7.2
Nb	17.1	15.5	12	11.4	9.3	11.1	10.1	13.2	10.4
Rb	61.2	72.4	81.4	82.6	83.7	79.4	75.9	77.5	83.1
Sn	3	3	2	2	2	2	2	2	2
Sr	529.9	545.8	521.9	567.2	589.2	584.7	586.9	551.1	590.3
Ta	1.1	0.9	0.9	0.7	0.7	0.9	0.7	0.8	0.8
Th	14.8	13.3	11	11.5	9.9	11.7	9.2	13	11.6
U	3.4	3.4	2.9	3.2	3	3.3	2.6	3.2	3
V	458	351	266	269	161	206	183	310	171
W	2	2.1	1.5	1.9	1.3	1.5	2	1.7	1.4
Zr	504.8	424.4	316.8	335.4	217.9	337.3	242.9	476.3	281.6
Y	18.7	17.6	15.8	15.6	13.2	14.5	14.4	15.4	14.2
La	54.3	50.1	38.9	35.6	32.6	40.1	32.4	41.9	34.7
Ce	113.8	105.5	79.7	75.8	68.8	85.6	67.4	89.1	73.2
Pr	116.4	10.84	8.52	8.1	7.25	8.71	7.35	9.08	7.73
Nd	41.4	38.5	30.5	29.5	27.3	33.9	27.6	33.2	29.4
Sm	6.52	6.13	4.87	4.83	4.41	5.17	4.59	5.33	4.71
Eu	1.41	1.32	1.1	1.14	1.1	1.2	1.12	1.18	1.17
Gd	4.92	4.54	3.89	3.76	3.45	3.96	3.58	4.08	3.9
Tb	0.68	0.62	0.54	0.53	0.51	0.58	0.51	0.56	0.53
Dy	3.36	3.14	2.78	2.99	2.52	2.92	2.6	3.04	2.77
Ho	0.65	0.58	0.53	0.48	0.48	0.55	0.5	0.54	0.5
Er	1.91	1.77	1.59	1.58	1.28	1.48	1.38	1.52	1.43
Tm	0.28	0.26	0.24	0.25	0.21	0.23	0.21	0.25	0.21
Yb	1.88	1.73	1.51	1.59	1.3	1.57	1.26	1.62	1.38
Lu	0.28	0.28	0.24	0.25	0.21	0.25	0.22	0.27	0.22
TOTAL C (%)	0.42	0.08	0.1	0.16	0.09	0.12	0.07	0.08	0.09
TOTAL S (%)	0.11	0.07	0.08	0.1	0.1	0.11	0.11	0.09	0.1
Mo	15	12	1	12	12	12	14	14	12
Cu	35.4	29.9	24.3	31.4	28.6	31.8	29	34.3	29.9
Pb	21.4	15.9	17.2	25.9	33.7	24.3	28.1	21.9	29.1
Zn	236	113	130	197	150	177	140	174	195
Ni	16.5	13.6	10.7	11.6	10	11.5	10.4	13.3	9.8
As	156.1	64.6	59.9	142.2	135.6	111.5	90.3	93.9	136.6
Cd	14	0.4	0.5	1.1	1.1	1	0.8	1.1	1.4
Sb	2	1.7	1.2	1.3	1.2	1.4	1.5	1.7	1.3
Bi	0.2	0.2	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3
Ag	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Au (ppb)	1	0.8	1.1	1.6	0.7	1.6	1.4	<0.5	1.4
Hg	0.05	0.05	0.01	0.04	0.06	0.04	0.04	0.04	0.05
Tl	0.4	0.3	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.5	0.4
Se	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	0.7	<0.5	<0.5	<0.5

Sector	Río Lluta tramo bajo				Río Lluta tramo alto				
Muestra	JP-16	LB-7	LB-6	LB-5	LB-77	LB-42	LB-43	LB-68	LB-70
Nodo	2	2	2	8	8	7	8	8	8
Punto	54	7	6	5	75	45	46	68	70
UTM E	42835	415948	419226	421474	431981	431622	431624	432096	432763
UTM N	7973992	7974812	7975213	7977123	7987889	8000509	8003679	8006186	8008507
Elementos Mayores (%)									
SiO ₂	61.67	60.34	60.87	59.7	60.14	62.65	61.74	58.77	59.67
Al ₂ O ₃	16.33	16.12	16.29	15.92	15.8	16.16	16.36	16.1	15.88
Fe ₂ O ₃	5.36	6.18	6.28	7.89	7.19	4.45	5.28	7.88	7.29
MgO	1.75	1.8	1.81	2.08	2.01	1.4	1.66	2.3	2.27
CaO	3.73	3.81	3.72	3.97	3.54	3.23	3.71	4.17	4.09
Na ₂ O	3.27	3.45	3.37	3.43	3.15	3.23	3.31	3.31	3.27
K ₂ O	2.44	2.38	2.41	2.35	2.4	2.76	2.5	2.23	2.31
TiO ₂	0.75	0.86	0.87	1.12	0.93	0.61	0.72	1.1	1.03
P ₂ O ₅	0.19	0.2	0.2	0.23	0.15	0.14	0.15	0.15	0.14
MnO	0.1	0.16	0.13	0.13	0.14	0.11	0.1	0.13	0.14
Cr ₂ O ₃	0.005	0.005	0.005	0.007	0.007	0.003	0.005	0.009	0.008
Elementos Trazas (ppm)									
Sc	10	10	10	11	11	9	10	13	13
Ba	799	783	787	841	802	781	819	827	856
Be	<1	1	1	2	2	2	2	1	2
Co	13.3	16.3	15.3	19.4	17.3	10.9	13.6	18.2	18.1
Cs	29.1	32.8	32.4	29.4	33.9	51.8	40.6	33.2	40.2
Ga	17.7	18.9	19.1	20.3	20.3	19.8	19.9	20.1	20.8
Hf	5	5.9	5.6	7.8	6.7	4.3	5.2	6.7	7.4
Nb	8.5	8.9	9.3	10.3	10.8	9.9	9.4	11.6	11.2
Rb	87.4	86	86.4	83.8	93.5	124	102.6	87.9	91.4
Sn	<1	1	1	2	2	2	2	2	2
Sr	592.7	634.1	607.7	640.6	562.5	546.8	621.2	633.3	604.4
Ta	0.6	0.6	0.6	0.7	0.8	0.7	0.7	0.7	0.8
Th	10	9.7	9.5	10	10.4	12.5	11.5	11.2	12.3
U	2.9	2.9	2.8	3.1	3.1	3.6	3.2	3.1	2.8
V	124	142	150	197	175	88	111	193	178
W	12	16	1.3	16	13	1.4	1.1	1.4	1.6
Zr	180.5	179.7	202	297.4	242.8	163.4	184.7	269	278.8
Y	13.3	12.7	12.8	13.4	14.3	12.7	13.4	15.1	16.1
La	28.2	28.3	28.7	32	30.8	29.2	30.5	32.3	36.6
Ce	58	58.8	60.5	66.8	64.9	59.1	61.4	66.7	75
Pr	6.39	6.39	6.44	7.36	6.93	6.3	6.61	7.25	8.03
Nd	24	24.4	25.4	27.9	24.9	22.6	24.2	25.1	29
Sm	4	4.11	4.17	4.64	4.24	3.95	3.92	4.43	4.76
Eu	107	101	102	117	107	0.97	1.05	1.14	1.22
Gd	3.12	3.14	3.19	3.56	3.4	3.03	3.19	3.52	3.85
Tb	0.47	0.45	0.46	0.5	0.48	0.45	0.47	0.52	0.55
Dy	2.27	2.29	2.34	2.45	2.3	2.33	2.35	2.72	2.75
Ho	0.44	0.43	0.43	0.48	0.47	0.44	0.44	0.48	0.52
Er	1.26	1.19	1.23	1.33	1.22	1.18	1.12	1.36	1.38
Tm	0.19	0.18	0.18	0.2	0.21	0.19	0.21	0.21	0.22
Yb	1.21	1.12	1.15	1.26	1.33	1.17	1.21	1.44	1.55
Lu	0.18	0.17	0.17	0.2	0.2	0.18	0.19	0.21	0.25
TOTAL C (%)	0.16	0.19	0.16	0.12	0.09	0.12	0.1	0.09	0.07
TOTAL S (%)	0.13	0.15	0.13	0.14	0.14	0.12	0.11	0.11	0.1
Mo	15	11	1.1	12	12	0.9	0.8	0.9	0.8
Cu	28.3	29.9	30.4	31.6	23.4	22	22.1	21.2	21.9
Pb	40.1	29.5	33	31.8	49.1	48.4	45.2	38.8	38.5
Zn	193	253	192	175	148	207	148	174	184
Ni	8.8	9	9	10	10.5	6.7	6.8	10.2	9.1
As	209.8	139.7	143.6	121.9	144.8	201.2	171.5	154	147.2
Cd	1	1.8	1.2	1	1	1.6	0.9	0.9	1.3
Sb	1.4	1.1	1.1	1.3	0.4	0.3	0.3	0.3	0.3
Bi	0.3	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
Ag	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Au (ppb)	1.4	<0.5	1	1.2	1	1.1	<0.5	<0.5	0.5
Hg	0.04	0.04	0.05	0.08	0.03	0.04	0.05	0.06	0.05
Tl	0.4	0.4	0.4	0.4	0.6	0.7	0.6	0.6	0.6
Se	0.6	<0.5	0.7	<0.5	0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5

Sector	Río Lluta tramo alto			
Muestra	LB-28	LB-61	LB-30	LB-29
Nodo	8	8	8	8
Punto	31	64	33	32
UTM E	433360	433206	429553	426267
UTM N	8010965	8021155	8023589	8025432
Elementos Mayores (%)				
SiO ₂	59.43	58.18	54.49	60.27
Al ₂ O ₃	15.93	16.27	15.07	15.72
Fe ₂ O ₃	7.51	7.5	11.35	6.56
MgO	1.98	2.04	1.58	1.83
CaO	3.57	3.8	2.89	3.7
Na ₂ O	3.03	3.34	2.62	3.35
K ₂ O	2.33	2.15	1.98	2.13
TiO ₂	1.04	0.93	1.43	0.81
P ₂ O ₅	0.15	0.2	0.31	0.21
MnO	0.11	0.1	0.09	0.07
Cr ₂ O ₃	0.007	0.007	0.01	0.007
Elementos Trazas (ppm)				
Sc	12	13	12	12
Ba	811	716	722	771
Be	1	1	1	1
Co	17	13.5	17.1	11.5
Cs	20.2	6.8	11.6	9.1
Ga	20	19.9	24.1	20.9
Hf	7.8	5.4	9.5	10.5
Nb	12.5	9.7	13.9	9.8
Rb	95.7	67.1	71	70.9
Sn	2	1	2	2
Sr	553.1	533.7	495.7	563.6
Ta	0.9	0.7	0.8	0.7
Th	12.2	9	11.4	10
U	3.8	2.4	2.2	2.1
V	194	187	294	158
W	14	1	1.2	0.7
Zr	2818	231.1	360.5	392.5
Y	13.7	12.3	12.5	12.2
La	33.7	30.6	32.4	32
Ce	67.3	61.2	64.9	64.3
Pr	7.34	6.58	6.94	6.66
Nd	26.5	23.4	24.7	25.8
Sm	4.27	3.91	4	3.81
Eu	1.1	1.03	0.94	1.03
Gd	3.59	3.1	2.98	2.97
Tb	0.51	0.45	0.43	0.42
Dy	2.5	2.21	2.11	2.2
Ho	0.45	0.39	0.39	0.41
Er	1.4	1.16	1.24	1.21
Tm	0.21	0.19	0.2	0.2
Yb	1.44	1.13	1.25	1.27
Lu	0.22	0.18	0.19	0.21
TOTAL C (%)	0.1	0.38	0.81	0.43
TOTAL S (%)	0.14	0.14	0.34	0.19
Mo	14	1.8	2.5	1.7
Cu	29.1	19.9	22.1	18.7
Pb	49	83.3	162.6	112.2
Zn	87	55	86	57
Ni	9.7	7.6	10.2	6.5
As	148.9	280.2	575.2	319.9
Cd	0.3	0.1	0.2	0.1
Sb	0.4	0.2	0.3	0.3
Bi	0.2	0.2	0.4	0.3
Ag	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Au (ppb)	<0.5	2.4	1.7	0.6
Hg	0.04	0.09	0.17	0.11
Tl	0.6	0.4	0.6	0.5
Se	0.5	<0.5	0.6	<0.5

Tabla A2: Concentraciones de elementos mayores y traza, sedimentos pre-industriales

Sector	Río Lluta tramo bajo								
Muestra	JP-2	LB-2	JP-3	LB-89	LB-83	JP-4	JP-20	JP-19	LB-51
Nodo	4	4	5	5	4	2	3	3	5
Punto	1	2	3	83	78	4	58	56	55
UTM E	363208	368338	372303	381396	387275	389629	400252	406602	408304
UTM N	7965523	7964662	7964431	7965005	7960273	7962833	7968243	7969979	7971876
Elementos Mayores (%)									
SiO ₂	57.91	60.56	62.05	61.2	56.87	50.5	64.08	63.39	62.71
Al ₂ O ₃	14.78	14.75	15.56	15.6	15.29	12.27	15.2	14.98	15.03
Fe ₂ O ₃	10.84	8.88	5.97	5.91	9.81	5.35	5.03	4.84	4.59
MgO	2.04	1.85	1.81	1.78	2	2	1.63	1.64	1.86
CaO	3.76	3.77	3.79	3.32	3.91	4.32	3.35	3.72	3.63
Na ₂ O	3.25	3.2	3.42	3.47	3.06	7.47	3.61	3.12	2.97
K ₂ O	2.48	2.57	2.67	2.8	2.46	3.78	3.21	2.94	2.86
TiO ₂	1.23	1.13	0.82	0.79	1.24	0.65	0.68	0.6	0.59
P ₂ O ₅	0.19	0.18	0.18	0.16	0.22	0.31	0.17	0.14	0.16
MnO	0.13	0.1	0.1	0.13	0.13	0.08	0.1	0.09	0.09
Cr ₂ O ₃	0.009	0.007	0.005	0.004	0.007	0.003	0.004	0.002	0.002
Elementos Trazas (ppm)									
Sc	13	12	10	10	12	6	9	9	9
Ba	732	711	774	779	728	649	784	717	650
Be	2	<1	1	1	<1	1	2	1	2
Co	20	16.9	13.7	12.5	21	114	10.5	10.5	114
Cs	22.4	22.9	18.8	34.9	24.5	9.3	10.9	7	12.3
Ga	19.1	18.9	17.1	19.1	21.2	16	16.6	16.7	16.4
Hf	10.4	10.9	6.4	6.1	11.1	6.5	8.6	5.3	5.2
Nb	12.1	11.7	9.6	9.9	13.1	7.8	11.3	8.9	9.9
Rb	90.8	93.9	94.2	111.6	94.6	104.3	104.9	89.6	103.5
Sn	2	2	2	2	3	2	1	1	2
Sr	472.3	472.2	519.4	561.1	577.5	589.6	446.3	431.9	402.6
Ta	0.8	0.7	0.7	0.7	1	0.5	1	0.6	0.8
Th	13.9	11.5	13.6	12.9	15.6	8.3	16.3	12.5	14
U	3.1	2.8	3.3	3.2	4.3	2.5	3.6	2.8	3.5
V	266	229	142	132	255	127	114	113	86
W	1.5	2	1.4	1.2	2.6	1.2	1.6	1.4	1.1
Zr	387.5	386.1	219.3	241.3	399	249.4	286.9	184.4	183
Y	17	16.7	14.3	12.6	16.6	10.7	15.5	14.6	14.4
La	39.1	37.6	31.9	31.7	38.3	26.6	48.6	35.2	28.6
Ce	78.8	76.7	63.7	66.3	83.6	54.7	96.1	70.8	59.5
Pr	8.38	7.95	7.04	7.01	8.94	6.14	9.29	7.06	6.11
Nd	30.7	28.1	25.7	25.8	32.9	23.6	31.9	25.5	22.5
Sm	4.88	4.63	4.36	4.12	5.52	3.77	4.7	3.91	3.84
Eu	102	0.99	0.97	1.04	1.24	0.86	0.9	0.84	0.85
Gd	3.51	3.74	3.1	3.11	4.27	2.61	3.56	3.22	3.07
Tb	0.55	0.56	0.49	0.45	0.59	0.39	0.52	0.47	0.49
Dy	2.92	2.81	2.6	2.49	3.2	1.94	2.69	2.62	2.58
Ho	0.59	0.59	0.48	0.44	0.59	0.34	0.52	0.49	0.51
Er	1.57	1.61	1.43	1.26	1.78	0.99	1.5	1.41	1.52
Tm	0.25	0.27	0.21	0.21	0.26	0.15	0.26	0.22	0.25
Yb	1.61	1.66	1.42	1.32	1.79	1	1.6	1.49	1.58
Lu	0.27	0.28	0.21	0.2	0.26	0.16	0.27	0.24	0.24
TOTAL C (%)	0.07	0.1	0.12	0.05	0.23	1.37	0.03	0.08	0.05
TOTAL S (%)	0.09	0.07	0.12	0.1	0.35	0.92	0.08	0.06	0.14
Mo	1.1	0.7	1	1.4	1.5	1.9	0.7	0.6	0.8
Cu	35.9	22.7	28.2	30.8	58.3	36.7	17.9	25.7	37.4
Pb	10.7	16.6	16.3	27.4	22.2	11.5	6.2	11.2	15.8
Zn	80	91	64	114	83	76	38	40	46
Ni	12.7	9.7	8	7.8	11	7.7	6.4	6.7	7.7
As	46.5	39.6	51.8	91.9	70.1	57.3	16	16.7	37.7
Cd	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1	0.2
Sb	0.8	1.2	1.2	0.8	0.9	1.1	0.4	0.3	0.4
Bi	0.2	0.1	0.2	0.2	0.3	0.1	0.1	0.1	0.2
Ag	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Au (ppb)	2.2	1.3	4.2	<0.5	0.5	1.1	1.3	0.8	<0.5
Hg	0.01	0.02	0.02	0.02	0.04	0.02	<0.01	<0.01	<0.01
Tl	0.3	0.2	0.3	0.7	0.3	0.2	<0.1	<0.1	0.2
Se	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	1	<0.5	<0.5	<0.5

Sector	Río Lluta tramo bajo			Río Lluta tramo alto				
Muestra	JP-17	JP-6	JP-5	LB-78	JP-14	JP-15	JP-12	JP-13
Nodo	5	1	6	5	4	4	4	3
Punto	54	7	6	75	45	46	31	32
UTM E	412835	415948	419226	431981	431622	431624	433360	426267
UTM N	7973992	7974812	7975213	7987889	8000509	8003679	8010965	8025432
Elementos Mayores (%)								
SiO2	65.05	60.81	60.98	61.05	53.7	59.9	59.79	66.99
Al2O3	14.86	13.9	15.58	16.43	15.52	15.6	15.01	15.24
Fe2O3	3.39	6.27	6.82	5.18	9.6	7.86	8.63	4.61
MgO	1.32	2.43	1.95	1.52	2.8	1.98	2.46	0.91
CaO	2.85	5.16	4.11	3.31	5.18	3.87	3.95	2.95
Na2O	2.91	2.07	3.22	2.83	2.4	3.28	3.3	3.7
K2O	3.46	2.67	2.58	2.58	1.73	2.44	2.27	2.53
TiO2	0.39	0.72	0.88	0.64	1.32	1.16	1.19	0.6
P2O5	0.14	0.18	0.2	0.05	0.13	0.15	0.15	0.07
MnO	0.09	0.13	0.12	0.06	0.21	0.13	0.1	0.05
Cr2O3	<0.002	0.006	0.006	0.004	0.017	0.009	0.009	0.003
Elementos Trazas (ppm)								
Sc	8	13	11	10	17	12	14	6
Ba	775	580	771	623	593	783	733	613
Be	1	2	1	1	1	1	2	1
Co	7.7	18.2	18.1	10.3	28.2	18.5	18.2	7.8
Cs	214	13.1	18.2	49.8	12.7	19.3	12.5	3.5
Ga	16.3	15.4	19.2	17.1	18.4	19.8	20.1	17.6
Hf	4.2	7.2	6.2	4.2	7.2	9.2	7.3	21
Nb	10.3	12.4	9.9	8.5	11.1	12.8	11.6	9.6
Rb	130.6	109.8	93.4	103.1	72.2	94	80.1	77.2
Sn	1	2	2	3	2	2	2	1
Sr	329.6	346.6	541.6	492.9	470.1	577.9	549	349.7
Ta	0.9	0.8	0.7	0.6	0.9	0.8	0.8	0.6
Th	14.5	16.2	14.6	10.6	13.3	11.7	11.8	18.3
U	3.6	4	3.4	2.2	2.9	3.6	3.3	2.8
V	66	121	162	114	306	197	228	114
W	16	2.1	1.6	1	1.6	1.5	1.2	1.1
Zr	128.4	240.8	233.3	147.8	278.2	301.1	263.4	815.7
Y	14.6	22.9	15.4	13.5	16.7	13.3	13.7	13.6
La	33	32	31.8	30.2	28.7	35	31.1	72.6
Ce	66.9	67.8	66.4	68.8	58.9	70.2	64.7	138.9
Pr	6.67	7.59	7.19	7.5	6.33	7.45	7.01	12.6
Nd	24.2	28.9	26.4	27.4	24.1	26.9	26	38.1
Sm	3.61	5.12	4.56	4.33	4.11	4.35	4.39	4.72
Eu	0.74	1.01	1.06	1.17	0.97	1.08	1.05	0.95
Gd	2.91	4.29	3.38	3.3	3.56	3.22	3.44	3.24
Tb	0.45	0.72	0.53	0.48	0.56	0.47	0.48	0.43
Dy	2.28	3.96	2.7	2.54	3	2.44	2.56	2.21
Ho	0.51	0.76	0.53	0.47	0.57	0.45	0.48	0.45
Er	1.45	2.24	1.42	1.37	1.66	1.32	1.35	1.34
Tm	0.23	0.35	0.22	0.21	0.27	0.2	0.19	0.24
Yb	1.46	2.28	1.49	1.46	1.68	1.34	1.22	1.6
Lu	0.23	0.33	0.22	0.2	0.29	0.2	0.2	0.3
TOTAL C (%)	0.4	0.36	0.27	0.07	0.22	0.14	0.03	0.11
TOTAL S (%)	0.09	0.41	0.14	0.03	0.03	0.1	0.13	<0.02
Mo	1	2	1.5	0.3	0.8	0.9	1.3	0.4
Cu	30.5	58	47.7	35.7	28.6	21	26.1	9.9
Pb	28.7	43.8	16.8	18.3	9.9	33.5	17.7	8.6
Zn	74	92	66	107	75	82	71	36
Ni	6.9	16.5	11.2	8	21	11.6	11.3	4.2
As	83.4	45.1	60.1	24.8	17.7	80.7	53	3.7
Cd	0.2	0.4	0.2	0.2	0.3	0.2	0.1	<0.1
Sb	0.3	0.9	1.5	0.4	0.2	0.3	0.3	0.2
Bi	0.2	0.2	0.2	0.1	0.2	0.2	0.3	<0.1
Ag	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Au (ppb)	1.5	2.1	1.2	0.6	<0.5	0.8	1.3	1.2
Hg	0.03	0.02	0.15	0.01	0.01	0.06	0.04	0.05
Tl	0.3	0.1	0.3	0.3	0.2	0.4	0.2	<0.1
Se	<0.5	0.7	0.7	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5

Sector	Quebrada Allane		Socoroma		Putre			W Lluta
Muestra	LB-64	LB-67	LB-75	LB-12	JP-11	LB-72	LB-60	LB-80
Nodo	4	5	1	2	6	2	2	3
Punto	65	67	73	10	20	71	63	76
UTM E	434558	437422	435000	436261	435161	440717	440719	399053
UTM N	8021891	8011252	7981888	7982643	7986702	7987571	7988772	7965295
Elementos Mayores (%)								
SiO ₂	56.54	60.94	51.55	54.96	59.48	62.71	61.74	65.33
Al ₂ O ₃	17.5	14.61	18.93	20.27	16.15	16.48	16.91	14.5
Fe ₂ O ₃	8.09	4.44	5.83	7.12	6.65	4.51	4.4	2.98
MgO	1.85	1.86	2.5	0.88	1.86	1.81	1.51	1.27
CaO	4.19	3.07	4.26	1.05	3.51	4.3	3.94	2.92
Na ₂ O	3.11	3.41	2.31	1.38	3.39	4.55	4.08	3.58
K ₂ O	2	3.13	1.36	1.88	2.61	2.79	2.57	3.65
TiO ₂	1.15	0.62	0.53	0.91	0.96	0.85	0.76	0.42
P ₂ O ₅	0.15	0.17	0.19	0.19	0.27	0.3	0.24	0.15
MnO	0.1	0.1	0.2	0.2	0.09	0.06	0.08	0.07
Cr ₂ O ₃	0.009	0.004	<0.002	0.004	0.003	0.003	0.003	<0.002
Elementos Trazas (ppm)								
Sc	13	8	10	11	10	6	7	6
Ba	778	747	505	741	829	956	886	842
Be	1	2	2	<1	2	2	2	2
Co	18.3	10.5	619	55.9	16.4	13	11.7	7.5
Cs	6.6	74.4	26.2	15.5	20.7	13.4	6.7	8.1
Ga	20.5	18	17.9	13.4	19.9	21.4	21	16.3
Hf	7	4.7	3.7	6.8	6.2	4.4	6	5
Nb	10.4	12.3	6	10.2	9.9	8.2	7.6	11.1
Rb	72.1	153.7	43.6	78.6	94.7	84.8	76.6	123.9
Sn	2	1	<1	2	3	1	1	2
Sr	633.8	549.9	506.4	350.2	618.4	861.7	725.9	394.2
Ta	0.7	0.9	0.3	0.8	0.6	0.4	0.5	0.9
Th	11	14.7	5.7	15	9.9	6	6.9	18.7
U	2.6	4.6	1.8	4	3.3	2.7	2.9	4
V	194	102	112	161	157	109	120	57
W	1.5	2.3	0.9	2.3	1.5	1.1	1.2	1.6
Zr	278.7	170.5	121.8	218.6	209.3	168.1	210.8	157.2
Y	15.2	12.6	22.8	9.8	13.5	8.8	8.8	13.8
La	31.7	29.9	23.4	38.4	31.5	29.8	27.5	39.9
Ce	68.1	63.4	60.5	57.4	66.9	63.4	59.7	77.5
Pr	7.17	6.71	6.89	6.45	7.44	7.15	6.51	7.74
Nd	26.9	23.4	27.4	20.4	28.9	26.1	24	26.7
Sm	4.48	4.07	5.24	2.94	4.91	4.71	4.16	3.96
Eu	1.19	0.91	1.3	0.63	1.18	1.26	1.07	0.78
Gd	3.68	3.17	4.76	2.15	3.75	3.28	3	2.85
Tb	0.53	0.46	0.75	0.33	0.51	0.42	0.38	0.44
Dy	2.73	2.21	4.03	1.65	2.56	1.87	1.67	2.34
Ho	0.51	0.41	0.74	0.33	0.45	0.29	0.29	0.42
Er	1.5	1.13	2.01	1.02	1.16	0.65	0.72	1.37
Tm	0.23	0.17	0.32	0.17	0.19	0.11	0.12	0.23
Yb	1.42	1.11	1.87	1.05	1.2	0.74	0.74	1.41
Lu	0.22	0.16	0.31	0.17	0.18	0.09	0.11	0.23
TOTAL C (%)	0.06	0.23	0.35	0.04	0.41	0.08	0.16	<0.02
TOTAL S (%)	0.1	0.59	0.61	0.36	0.25	0.04	0.1	0.27
Mo	0.4	1.6	0.4	2.5	2.7	0.4	0.4	0.5
Cu	25.7	36.7	45.4	46.9	54.1	66.6	34.3	14.9
Pb	10	11.9	6.9	14.7	16	2.9	6.8	5.7
Zn	57	75	86	69	55	30	42	28
Ni	12.2	8.5	11.3	19.4	11.4	7	7.7	4.3
As	27.7	167	256	477.9	70	15.6	17.7	12.9
Cd	<0.1	0.2	0.3	0.2	0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Sb	0.2	0.7	2	2.8	1.3	0.5	0.5	0.3
Bi	0.2	0.2	0.1	0.4	0.3	<0.1	0.1	0.1
Ag	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Au (ppb)	0.7	1.9	2	0.9	1.9	1.5	1.1	0.8
Hg	0.03	0.01	0.02	0.01	0.07	<0.01	0.21	<0.01
Tl	0.2	0.3	0.1	0.4	0.2	<0.1	0.1	0.1
Se	<0.5	<0.5	0.7	1.2	1	<0.5	<0.5	<0.5

Tabla A3: Resultado del análisis mineralógico (difracción de rayos X) de los sedimentos estudiados. Sedimentos pre-industriales en celeste, sedimentos activos en blanco.

Sector	Tramo Bajo										Tramo Alto				Tramo Alto		
Muestra	LB-03	JP-03	LB-82	LB-83	LB-54	JP-20	JP-18	JP-19	LB-50	LB-05	LB-77	LB-78	LB-42	LB-68	JP-12	LB-28	LB-30
Punto	3	3	78	78	58	58	56	56	53	5	75	75	45	68	31	31	33
Mineral	[Grilla de presencia de minerales]																
Cuarzo	[Grilla de presencia de Cuarzo]																
Cristobalita	[Grilla de presencia de Cristobalita]																
Moganita	[Grilla de presencia de Moganita]																
Trydimita	[Grilla de presencia de Trydimita]																
Albita	[Grilla de presencia de Albita]																
Anortita	[Grilla de presencia de Anortita]																
Ortoclasa	[Grilla de presencia de Ortoclasa]																
Anortoclasa	[Grilla de presencia de Anortoclasa]																
Microclina	[Grilla de presencia de Microclina]																
Cordierita	[Grilla de presencia de Cordierita]																
Sekaniñaita	[Grilla de presencia de Sekaniñaita]																
Gobbsinita	[Grilla de presencia de Gobbsinita]																
Zeoilita	[Grilla de presencia de Zeoilita]																
Rutilo	[Grilla de presencia de Rutilo]																
Circón	[Grilla de presencia de Circón]																
Enstatita	[Grilla de presencia de Enstatita]																
Augita	[Grilla de presencia de Augita]																
Riebeckita	[Grilla de presencia de Riebeckita]																
Edenita	[Grilla de presencia de Edenita]																
Actinolita	[Grilla de presencia de Actinolita]																
Hornblenda	[Grilla de presencia de Hornblenda]																
Fe-Actinolita	[Grilla de presencia de Fe-Actinolita]																
Moscovita	[Grilla de presencia de Moscovita]																
Flogopita	[Grilla de presencia de Flogopita]																
Biotita	[Grilla de presencia de Biotita]																
Anita	[Grilla de presencia de Anita]																
Montmorillonita	[Grilla de presencia de Montmorillonita]																
Saponita	[Grilla de presencia de Saponita]																
Illita	[Grilla de presencia de Illita]																
Caolinita	[Grilla de presencia de Caolinita]																
Clorita-Vermiculita	[Grilla de presencia de Clorita-Vermiculita]																
Nontronita	[Grilla de presencia de Nontronita]																
Magadiita	[Grilla de presencia de Magadiita]																
Kenyaíta	[Grilla de presencia de Kenyaíta]																
Halita	[Grilla de presencia de Halita]																
Yeso	[Grilla de presencia de Yeso]																
Metaheulandita	[Grilla de presencia de Metaheulandita]																
Koninckita	[Grilla de presencia de Koninckita]																
Al-fosfato	[Grilla de presencia de Al-fosfato]																
Fervanita	[Grilla de presencia de Fervanita]																
Simplotita	[Grilla de presencia de Simplotita]																
Scorodita	[Grilla de presencia de Scorodita]																
Hidrobortita	[Grilla de presencia de Hidrobortita]																
Gowerita	[Grilla de presencia de Gowerita]																
Sassolita	[Grilla de presencia de Sassolita]																
Irginita	[Grilla de presencia de Irginita]																
Ianthinita	[Grilla de presencia de Ianthinita]																
Petscheckita	[Grilla de presencia de Petscheckita]																
Furongita	[Grilla de presencia de Furongita]																
Metaurano circita	[Grilla de presencia de Metaurano circita]																
Hidróxido de U	[Grilla de presencia de Hidróxido de U]																
Betafita	[Grilla de presencia de Betafita]																
Sengierita	[Grilla de presencia de Sengierita]																
Covelina	[Grilla de presencia de Covelina]																
Paramelaconita	[Grilla de presencia de Paramelaconita]																
Dioptase	[Grilla de presencia de Dioptase]																
Cuprita	[Grilla de presencia de Cuprita]																
Franklinfurnaceita	[Grilla de presencia de Franklinfurnaceita]																
Sophita	[Grilla de presencia de Sophita]																
Stilleita	[Grilla de presencia de Stilleita]																
Wulfenita	[Grilla de presencia de Wulfenita]																
Anglesita	[Grilla de presencia de Anglesita]																
Argentopentlandita	[Grilla de presencia de Argentopentlandita]																
Arsenolita	[Grilla de presencia de Arsenolita]																
Na-Mg Sulfato	[Grilla de presencia de Na-Mg Sulfato]																
Pb-Sulfato	[Grilla de presencia de Pb-Sulfato]																
Ox. de Fe (III)	[Grilla de presencia de Ox. de Fe (III)]																
Antimonio	[Grilla de presencia de Antimonio]																
Bismita	[Grilla de presencia de Bismita]																
Au	[Grilla de presencia de Au]																

Sector	Qda. Allane							Qda. Putre				Qda. Putre					
	Muestra	LB-69	LB-27	LB-65	LB-33	LB-34	LB-38	LB-35	LB-17	LB-18	JP-11	LB-71	LB-72	LB-13	LB-58	LB-21	LB-22
Punto		69	30	66	36	37	41	38	19	20	20	71	71	11	62	23	24
Mineral																	
Cuarzo																	
Cristobalita																	
Moganita																	
Trydimita																	
Albita																	
Anortita																	
Ortoclasa																	
Anortoclasa																	
Microclina																	
Cordierita																	
Sekaninaita																	
Gobbsinaita																	
Zeolita																	
Rutilo																	
Circón																	
Enstatita																	
Augita																	
Riebeckita																	
Edenita																	
Actinolita																	
Hornblenda																	
Fe-Actinolita																	
Moscovita																	
Flogopita																	
Biotita																	
Annita																	
Montmorillonita																	
Saponita																	
Illita																	
Caolinita																	
Cloinita-Vermiculita																	
Nontronita																	
Magadiita																	
Kenyaíta																	
Halita																	
Yeso																	
Metaheulandita																	
Koninckita																	
Al-fosfato																	
Fervanita																	
Simplotita																	
Scorodita																	
Hidrobo rita																	
Gowerita																	
Sassolita																	
Irginita																	
Ianthinita																	
Petscheckita																	
Furongita																	
Metauranocircita																	
Hidróxido de U																	
Betafita																	
Sengierita																	
Covelina																	
Paramelaconita																	
Diopside																	
Cuprita																	
Franklinfurnaceita																	
Sophiita																	
Stilleita																	
Wulfenita																	
Anglesita																	
Argentopentlandita																	
Arsenolita																	
Na-Mg Sulfato																	
Pb-Sulfato																	
Ox. de Fe (III)																	
Antimonio																	
Bismita																	
Au																	

Sector	Qda. Socoroma					W Lluta		
Muestra	LB-10	LB-11	LB-12	LB-09	LB-57	LB-49	LB-46	LB-39
Punto	10	10	10	9	61	52	49	42
Mineral								
Cuarzo								
Cristobalita								
Moganita								
Trydimita								
Albita								
Anortita		█					█	
Ortoclasa								
Anortoclasa								
Microclina								
Cordierita						█		
Sekainaita								
Gobbsinita								
Zeolita								
Rutilo					█			
Circón								
Enstatita								
Augita							█	
Riebeckita							█	
Edenita							█	
Actinolita								
Hornblenda								
Fe-Actinolita								
Moscovita	█			█				
Flogopita								
Biotita								
Annita							█	
Montmorillonita	█				█			
Saponita								
Illita								█
Caolinita			█					
Clorita-Vermiculita			█					
Nontronita						█		
Magadiita								
Kenyaíta								
Halita								
Yeso								
Metaheulandita								
Koninckita								
Al-fosfato		█						
Fervanita								
Simplonita								
Scorodita								
Hidroborita								
Gowerita								
Sassolita	█							
Irginita								
Ianthinita								
Petscheckita								
Furongita								
Metauranocircita								
Hidróxido de U				█				
Betafita								█
Sengierita						█		
Covelina					█			
Paramelaconita								
Dioptase		█						
Cuprita								
Franklinfurnaceita				█				
Sophiita								
Stilleita			█					
Wulfenita								
Anglesita								█
Argentopentlandita								
Arsenolita								
Na-Mg Sulfato	█							
Pb-Sulfato								
Ox. de Fe (III)			█		█			
Antimonio			█					
Bismita			█					
Au			█					

Tabla A4: Resultados del análisis de la fracción no magnética de minerales pesados.

codigo de la muestra:	LLUTA-LB-87					
tipo de fracción:	Pesados no-magnéticos					
observaciones generales:	En general, los minerales muestran inclusiones oscuras (Fe-Ti), y ceniza en sus superficies					
Mineral	color	hábito	%	transparencia	brillo	
Anfibola 1 (Anf1)	negro	prismático	40	opaco	vítreo	
Anfibola 2 (Anf2)	rojizo	prismático	10	semitraslúcido	vítreo	
Clinopiroxeno 1 (Cpx1)	verde oscuro	prismático a anguloso	15	semitraslúcido a translúcido	vítreo	
Clinopiroxeno 2 (Cpx2)	verde oscuro	prismático a anguloso	3	traslúcido	vítreo	
Ortopiroxeno (Opx)	miel	prismático a anguloso	tr	traslúcido	vítreo	
Actinolita (Act?)	verde musgo	prismático fibroso	tr	semitraslúcido a translúcido	vítreo	
Epidota (Ep)	amarillo-verde manzana lechoso	subredondeado	20	opaco a translúcido	opaco	
Titanita (Tit)	amarillo	subredondeado a anguloso	5	traslúcido	vítreo	
Andradita (And)	amarillo pálido	anguloso	tr	traslúcido	vítreo	
Granate (Gt)	anaranjado	anguloso	tr	semitraslúcido a translúcido	vítreo	
Biotita (Bt)	negro y tonos oxidados	subredondeado y micáceo	tr	opaco	perlado	
OBSERVACIONES:						
titanita con inclusiones oscuras, gran cantidad de clastos con inclusiones oscuras						
Cpx1 con muchas inclusiones oscuras y ceniza, Cpx2 con pocas inclusiones						

codigo de la muestra:	LLUTA-LB-06					
tipo de fracción:	Pesados no-magnéticos					
observaciones generales:	muestra presenta inclusiones oscuras y ceniza en superficie de minerales, aunque en menor cantidad que LLUTA-LB-87					
Mineral	color	hábito	%	transparencia	brillo	
Anfibola 1 (Anf1)	negro	prismático prismático a	40	opaco	vítreo	
Anfibola 2 (Anf2)	rojizo	anguloso prismático a	20	semitraslúcido	vítreo	
Clinopiroxeno (Cpx)	verde oscuro	anguloso prismático a	20	traslúcido	vítreo	
Ortopiroxeno (Opx)	miel	anguloso subredondeado a	tr	traslúcido	vítreo	
Titanita (Tit)	amarillo	anguloso	5	traslúcido	vítreo	
Epidota (Ep)	verde lechoso negro y tonos oxidados	subredondeado	10	opaco	opaco	
Biotita (Bt)		subredondeado	tr	opaco	perlado	
Apatito (Ap)	incolore	subredondeado	tr	traslúcido	vítreo	
Mx1 ?	amarillo pálido	anguloso	tr	traslúcido	vítreo	
Simbología:						
OBSERVACIONES:						
	tit y cpx con inclusiones oscuras, cenizas en superficie de anfíbolos					
	se observaron clastos con pátinas de calcopirita y posible bornita					

Tabla A4: continuación

codigo de la muestra:	LLUTA-LB-70				
tipo de fracción:	Pesados no-magnéticos				
observaciones generales:	muestra limpia, menor presencia de ceniza y pocas inclusiones				
Mineral	color	hábito	%	transparencia	brillo
Anfibola 1 (Anf1)	negro	prismático	40	opaco	vítreo
Anfibola 2 (Anf2)	rojizo	prismático	10	semitraslúcido	vítreo
Clinopiroxeno (Cpx1)	verde oscuro	prismático a anguloso	30	traslúcido	vítreo
Clinopiroxeno (Cpx2)	verde oscuro intenso	prismático a anguloso	tr	traslúcido	vítreo
Ortopiroxeno (Opx)	miel	prismático a anguloso	15	traslúcido	vítreo
Epidota (Ep)	amarillo lechoso	subredondeado	tr	opaco	opaco
Titanita (Tit)	amarillo	subredondeado a anguloso	tr	traslúcido	vítreo
Mx1 ?	ámbar	anguloso	tr	traslúcido	vítreo
<u>Simbología:</u>					
<u>OBSERVACIONES:</u>	se observó la fracción magnética de la muestra y aparecen los mismos minerales, con mayor cantidad de inclusiones oscuras				

Tabla A4: continuación

codigo de la muestra:	LLUTA-LB-29				
tipo de fracción:	Pesados no-magnéticos				
observaciones generales:	numerosos clastos con coloración amarillo-anaranjada (S?)				
Mineral	color	hábito	%	transparencia	brillo
Anfibola 1 (Anf1)	negro	prismático	50	opaco	vítreo
Anfibola 2 (Anf2)	rojizo	prismático a prismático a	15	semitraslúcido a semitraslúcido a	vítreo
Clinopiroxeno (Cpx)	verde oscuro	anguloso	25	traslúcido	vítreo
Epidota (Ep)	verde lechoso	subredondeado	tr	opaco	opaco
Titanita (Tit)	amarillo	subredondeado a anguloso	5	traslúcido	vítreo
Mx1?	amarillo pálido	anguloso	tr	traslúcido	vítreo
Biotita (Bt)	negro y tonos oxidad	anguloso y micáceo	tr	opaco	perlado
Simbología:					
OBSERVACIONES:					
se observó pirita en la revisión de la muestra a la lupa					
la fracción de minerales pesados magnéticos muestra los mismos minerales, a excepción de la titanita					

Tabla A4: continuación

Anexo B
Resumen Prospectos

Tabla B1: Resumen de prospectos metálicos, incluye simbología.

Número	Nombre	UTM Este	UTM Norte	Mena Principal	Mena Subordinada	Roca de Caja	Unidad	M inerales de M ena	M inerales de Ganga	Alteración
A2-01	Sicini	432,844	8,041,025	Mn		Areniscas e ignimbritas, pórfidos riolíticos	Qv	Crip, Holl		Sl, Hnt
A2-02	Quillere	433,377	8,040,104	Mn		Areniscas finas	Qv	Holl, Crip, Wad		Sl, Arcl
A4-01	Prospecto Cerro Colorado Norte	418,800	8,028,400	Cu		Pórfido, rocas volcánicas y sedimentarias	Onv			Clo, Arcl, Sl, Cal, Lim
A5-01	Prospecto Colina B	425,000	8,014,600	Cu	Zn	Pórfido cuarífero, tobac brechosas y andesitas porfíricas	Onv			
A5-02	Pascual	450,022	8,012,025	Mn		Ignimbritas	Pv, Qv	Crip, Holl	Sl, Pom	
A5-03	San Nombre	433,092	8,011,141	Mn		Tobac brechosas	MSPs, Pv	Holl, Crip		
A5-04	Navidad Este	435,560	8,010,416	Mn		Areniscas	MSPs	Holl, Crip, Wad	Sl	
A5-05	San Sebastián	428,136	8,010,278	Fe		Ignimbritas	Pv	Hnt	Vit	
A5-06	Navidad	433,962	8,010,168	Mn		Areniscas	MSPs	Crip, Holl		
A6-01	Prospecto Lexone	449,174	8,025,912	Polimetálico		Lavas andesíticas y domos	Pv			Hnt, Sl, Arcl
A6-02	Locura (o Colpita o Copacagua)	489,803	8,012,820	Ag	Pb, Zn	Brechas andesíticas, pórfido cuarífero	Onv	Gl, Blen	Py, Ozo	
A9-01	Huachipato	432,844	8,004,141	Mn		Lavas riolíticas, brechas riolíticas, areniscas, ignimbritas	MSPs, Pv, Qv	Psi, Pírol, Wad	Sl, Alum, As, M,gt, Wif	Sl, Hnt
A9-02	Kilómetro 130	428,867	8,003,930	Mn		Rocas tobáceas y brechosas, areniscas	MSPs, Mv, Pv	Holl, Crip	Sl, Lit	
A9-03	Prospecto Puro Norte	439,600	7,996,600	Cu	Mo	Tonalita, pórfidos cuaríferos y andesitas porfíricas	OM vs. Qv		Py	Sl, Caol, Clo, Epdt, Lim
A9-04	Prospecto Puro Sur	439,252	7,990,118	Cu	Mo, Au	Diorita, pórfido cuarífero y lavas andesíticas porfíricas	OM vs. Qv	Cris, Cu, Wad, Mol	Py, Hnt	Ser, Clo, Epdt, Lim, Jgr, Sl, Arg
A9-05	Prospecto Laranagua	439,900	7,989,600	Al	Mg	Conducto volcánico	Pv		Py	
A12-01	Neverman	367,200	7,960,950	U		Diatomita	Os	Carn	Sl	
A13-01	Poconchile	385,200	7,957,800	U		Diatomita	Mss	Carn	Sl	
A14-01	Eva II (o Chlorita)	417,718	7,974,363	Cu		Granodiorita	KTg	Cpy	Py, Ozo, Aspy, Rut	
A14-02	T-1	401,950	7,964,950	U		Diatomita	Mss	Carn?		
A14-03	Manuel Jesús	397,700	7,963,900	U		Diatomita	Mss	Carn, MxU	Sl, Org.	
A14-04	Boca Negra	398,530	7,963,900	U		Diatomita	Mss	Carn?	Sl	
A14-05	La Oreja	402,100	7,963,200	U		Diatomita	Mss	MxU		
A14-06	Lucita	417,463	7,960,172	Cu	Ag, Au	Granodiorita y filones leucocráticos	KTg	Cris, A lmg, M al, Cs	Ozo, Hnt	Lim
A14-07	Hilcones	417,110	7,958,297	Cu	Au, Ag	Granodiorita y filones leucocráticos	KTg	Cris, A lmg, Atac, Mal, Cs	Ozo, Hnt, Cal	Arcl, Prop
A15-01	Jamilla	428,268	7,981,528	Cu	Au, Ag	Granodiorita intruida por diques	KTg	Cris, A lmg, Cs, Cup, M al, Chal, Cu, Au	Turm, Ozo, Hnt	Lim
A15-02	Rosario	427,000	7,979,000	Cu	Au	Granodiorita intruida por diques	KTg	Cs, Cris, A lmg, A lmg, Cup, M al, Chal	Ozo	Lim
A15-03	Dos Hermanos	423,540	7,977,240	Cu	Mo	Granodiorita	KTg	Cs, Mol, Mal	Ozo	Adul, Biot, Arcl
A15-05	Campañani	426,591	7,975,613	Cu	U	Granodiorita, pórfidos dioríticos	KTg	Cris, A lmg, A lmg, Cup, Cs, Cpy, Sclb	Espec, Hnt, Ozo, Jasp, Turm	Clo, Lim

Adul:	adularia	Chal:	chalcanthita	Jar:	jarosita	Py:	pirita
Almg:	almagre	Clo:	clorita	Jasp:	jaspe	Qzo:	cuarzo
Alum:	Alúmina	Cpy:	calcopirita	Lim:	limonita	Rut:	rutilo
Arci:	arcillas	Crip:	criptomelano	Lit:	fragmentos líticos	Sche:	scheelita
As:	arsénico nativo	Cris:	crisocola	Mal:	malaquita	Ser:	sericita
Aspy:	arsenopirita	Cs:	calcosina	Mgt:	magnetita	Sil:	silice
Atac:	atacamita	Cu:	cobre nativo	Mol:	molibdenita	Turm:	turmalina
Au:	oro nativo	Cup:	cuprita	Mx.U:	minerales de uranio	Vit:	fragmentos vítreos
Biot:	biotita	Epdt:	epidota	Org:	materia orgánica	Wad:	wad
Blen:	blenda	Espc:	especularita	Prol:	pirolusita	Wlf:	wolframita
Cal:	calcita	Gl:	galena	Pom:	fragmentos de pómez		
Caol:	caolinita	Hnt:	hematita	Prop:	alteración propilitica		
Carn:	carnotita	Holl:	hollandita	Psi:	psilomelano		

Tabla B2: Resumen prospectos industriales.

Número	Nombre	UTM Este	UTM Norte	Mena	Mineralogía	Recursos Totales	Leyes	Tipo Yacimiento	Roca de Caja
I-01	Tacora	418,422	8,040,995	Azúfre					
I-02	Quebrada Allane	433,978	8,009,389	Caolín		3,000,000 t		Estratiforme	Manto de caolín y arcillas
I-03	Prospecto Qda. Allane	433,971	8,009,377	Diatomita, Pumicita				Estratiforme	Diatomita, sedimentos acilicosos y oneríficos
I-04	Macarena	430,084	8,003,343	Bentonita, Diatomita				Estratiforme	Mantos de bentonita y diatomita, en sedimentos lacustres
I-05	Llancone	448,859	7,988,659	Azúfre	Azufrenativo			Mantos, bolsones	Aparato volcánico andesítico-dacítico
I-06	Taapaca	445,332	7,988,650	Azúfre	Azufrenativo	2,900,000 t	40-50% S	Mantos, bolsones	Aparato volcánico andesítico-dacítico
I-07	Laracaque	430,600	7,988,300	Alumbre	Sulfatos de Al y Mg	1,000,000 t		Cuerpos masivos, vetiformes, costros	Conglomerados, brechas y lavas
I-08	Saucine	410,404	7,972,825	Alumbre				Cuerpos masivos, vetiformes, costros	Rocas sedimentarias clásticas con clastos de andesites
I-09	Millune	408,994	7,972,122	Alumbre				Cuerpos masivos, vetiformes, costros	Rocas sedimentarias clásticas con clastos de andesites
I-10	Copaquilla	431,500	7,967,700	Pumicita				Estratiforme	Toba riolítica ligeramente soldada
I-11	Prospecto Qda. Luita	379,700	7,984,200	Pumicita		10,000,000 t		Cuerpo irregular	Toba riolítica ligeramente soldada
I-12	San Eduardo	398,803	7,963,112	Bentonita	Bentonita cálcica	2,000,000 t		Estratiforme	Estrato de bentonita sobre diatomita, en secuencia lacustre
I-13	Casualidad	399,972	7,963,100	Diatomita				Estratiforme	Mantos de diatomita en secuencia lacustre
I-14	Caracolito	401,384	7,963,025	Diatomita				Estratiforme	Mantos de diatomita en secuencia lacustre
I-15	Neverman	367,200	7,960,950	Diatomita		3,000,000 t (residuales)		Estratiforme	Mantos de diatomita en pequeña cuenca aluvial y lacustre, entre depósitos de remoción en masa

