



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

**CONTROLES DETERMINANTES EN LA GEOQUÍMICA Y
MINERALOGÍA DE LOS SEDIMENTOS FLUVIALES ACTIVOS EN LA
CUENCA DEL RÍO LIMARÍ - IV REGIÓN DE COQUIMBO, CHILE**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGO

FELIPE IGNACIO ASTUDILLO WELLS

**PROFESOR GUÍA:
JUAN PABLO LACASSIE REYES**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
BRIAN TOWNLEY CALLEJAS
LUISA PINTO LINCOÑIR**

**SANTIAGO DE CHILE
MARZO 2011**

Resumen

En el presente trabajo se analiza la composición mineralógica y química de los sedimentos activos y pre-industriales de los principales ríos que conforman la cuenca del Río Limarí (Región de Coquimbo, Chile). El objetivo es determinar la influencia que tiene tanto la geología como la actividad antropogénica sobre los sedimentos fluviales que componen la cuenca. Luego, en base a la abundancia de metales pesados, establecer su calidad ambiental. Se estima que los resultados de este trabajo son de particular interés en esta zona debido a la estrecha interacción que existe entre sus principales actividades económicas, correspondientes a agricultura y minería.

Se analizó la fracción fina (<180 μm) de los sedimentos, la cual se estima representativa de la carga en suspensión. La composición química fue determinada mediante espectrometría de masa y la composición mineralógica mediante difracción de Rayos-X.

Los datos fueron procesados utilizando herramientas tales como diagramas de variación geográfica y redes neuronales artificiales. Estos diagramas permitieron realizar una caracterización geoquímica y mineralógica de la cuenca y definir cuáles son los factores más influyentes sobre la composición de los sedimentos.

Los resultados obtenidos indican que los factores naturales con mayor influencia sobre la composición química y mineralógica de los sedimentos son: la composición química del basamento rocoso, la presencia de zonas mineralizadas, el efecto de dilución (o concentración) asociado a la confluencia con ríos tributarios y la geomorfología de los valles. Por otro lado, entre los factores antropogénicos se destacó la influencia asociada a la agricultura (uso de fertilizantes), a la minería (lixiviación del material de descarte hacia los ríos) y a la urbanización (descargas urbanas). Los resultados también sugieren que el sistema de embalses ha afectado el régimen hidrodinámico natural modificando tanto la carga en suspensión como los patrones de sedimentación.

En particular, los sedimentos activos de algunos cursos fluviales presentan concentraciones de elementos muy superiores al promedio de la cuenca, evidenciando anomalías geoquímicas. Los casos más representativos corresponden a: 1) curso superior del Río Hurtado, presenta altas concentraciones de Cu, Cd, As, Zn, Y, Co, Ni, Se, Bi, Tl, Be, U, MnO, Mo, Sn y HREE asociados a una zona de alteración hidrotermal en la Cordillera de los Andes; 2) curso medio del Estero Ingenio, presenta elevadas concentraciones de Cu, Hg, Au, Fe₂O₃, Bi, Co, Ni, Sb, Ag y Au asociados a las descargas de la planta La Cocinera (planta de flotación de Cu, Au y Ag); 3) curso superior del Estero Punitaqui (aguas abajo de la Quebrada Los Mantos), presenta elevadas concentraciones de Cu, Hg, Au y Total S asociados a la mina Mantos de Punitaqui.

Por lo tanto, los resultados permiten concluir que la ocurrencia anómala de metales pesados en los sedimentos tienen un origen natural, antrópico o mixto, correspondientes a los procesos de lixiviación tanto de cuerpos mineralizados, como lixiviación de materiales de descarte asociados a yacimientos metálicos y plantas de beneficio que son explotados por la pequeña y mediana minería.

La toxicidad de los sedimentos se determinó comparando los resultados con parámetros internacionales. Los resultados mostraron que en diversas localidades de la cuenca, las concentraciones de Cu, Cd, Hg, As, Zn y Cr, son superiores a los máximos recomendados, razón por la cual existe una alta probabilidad de que en algunos sectores de la cuenca, los ecosistemas asociados se vean afectados en forma negativa.

Agradecimientos

Quiero agradecer a todos aquellos que colaboraron tanto en mi formación universitaria como en la realización de este trabajo. En primer lugar quiero agradecer a mi familia, y en especial a mi madre por su preocupación y apoyo incondicional. A mis compañeros y amigos de la universidad. A Daniela por tenerme infinita paciencia y por haber estado siempre a mi lado apoyándome en los momentos de estrés y cansancio. A mi profesor guía "JP" por su excelente disposición en compartir sus conocimientos. A los profesores miembros de la comisión por sus valiosos consejos. A María Rosa por su simpatía y preocupación. Por último, agradezco al Proyecto Basal PB0809, Estudio de Tres Cuencas Fluviales Asociadas a la Minería, desarrollados en conjunto entre el Centro Avanzado de Tecnología para la Minería de la Universidad de Chile y el Servicio Nacional de Geología y Minería, por hacer posible el desarrollo de este trabajo.

INDICE

1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	Antecedentes generales	1
1.2	Objetivos	4
1.2.1	Objetivo general	4
1.2.2	Objetivos específicos	4
1.3	Hipótesis	4
1.4	Ubicación y accesos	4
1.5	Descripción de la zona de estudio	6
1.5.1	Drenajes principales	6
1.5.2	Geomorfología	9
1.5.3	Clima	11
1.5.4	Asentamientos humanos	12
1.5.5	Actividades económicas	12
2	METODOLOGÍA DE TRABAJO	16
2.1	Terreno	16
2.2	Laboratorio	17
2.3	Procesamiento de datos	18
2.3.1	Datos geoquímicos	18
2.3.2	Datos mineralógicos	24
3	MARCO GEOLÓGICO	25
3.1	Unidades litoestratigráficas	26
3.1.1	Rocas estratificadas	26
3.1.2	Rocas intrusivas	28
3.1.3	Rocas metamórficas	31
3.2	Zonas con alteración hidrotermal	31
3.3	Estructuras principales	31
3.4	Yacimientos minerales	35
3.4.1	Yacimientos metálicos	35
3.4.2	Yacimientos no-metálicos	39
4	RESULTADOS	42
4.1	Control de calidad de datos	42
4.2	Gráficos univariados de variación geográfica	43
4.2.1	Eje norte: Río Limarí - Hurtado	45

4.2.2	Eje norte: Estero Ingenio	55
4.2.3	Eje norte: Estero Punitaqui	57
4.2.4	Eje Centro: Río Grande - Rapel - Los Molles	60
4.2.5	Eje Sur: Río Guatulame - Cogotí	67
4.3	Redes neuronales artificiales.....	73
4.4	Composición mineralógica de los sedimentos.....	79
5	DISCUSIONES.....	89
5.1	Geoquímica exógena	89
5.2	Control de calidad de datos	90
5.3	Río Hurtado	90
5.4	Río Limarí.....	96
5.5	Estero Ingenio	98
5.6	Estero Punitaqui.....	101
5.7	Río Los Molles-Rapel	103
5.8	Río Grande	104
5.9	Río Cogotí	105
5.10	Río Guatulame	106
5.11	Calidad ambiental de los sedimentos	107
5.12	Fuentes de error y métodos de mitigación.....	113
5.12.1	Muestreo	113
5.12.2	Preparación de las muestras.....	114
5.12.3	Análisis geoquímico.....	114
5.12.4	Análisis mineralógico.....	114
5.12.5	Redes neuronales.....	114
5.12.6	Gráficos univariados de variación geográfica.....	115
5.12.7	Tablas mineralógicas.....	115
6	CONCLUSIONES	116
6.1	Redes neuronales	116
6.2	Río Hurtado	117
6.3	Río Limarí.....	118
6.4	Estero Ingenio	119
6.5	Estero Punitaqui.....	119
6.6	Río Los Molles-Rapel	120
6.7	Río Grande	120
6.8	Río Cogotí	121
6.9	Río Guatulame	121

6.10	Efectos de la minería	122
6.11	Sistema Paloma	122
6.12	Calidad ambiental del sedimento	123
6.13	Recomendaciones.....	123
7	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	124
	ANEXO A.....	129
	ANEXO B.....	141
	ANEXO C.....	144
	ANEXO D.....	148
	ANEXO E.....	151

Índice de Figuras

Figura 1.1: Zona de estudio.....	5
Figura 1.2: Red de drenajes principales.....	8
Figura 1.3: Modelo topográfico de la cuenca del Río Limarí.....	10
Figura 1.4: Superficie cultivada por sector agrícola.....	13
Figura 2.1: Determinación del error de análisis químico.....	20
Figura 3.1: Mapa geológico.....	33
Figura 3.2: Leyenda del mapa geológico.....	34
Figura 3.3: Distribución de yacimientos metálicos.....	38
Figura 3.4: Distribución de yacimientos no-metálicos.....	41
Figura 4.1: Ubicación de muestras recolectadas.....	44
Figura 4.2: Eje Norte (A), Ríos Limarí - Hurtado.....	48
Figura 4.3: Eje Norte (B), Ríos Limarí - Hurtado.....	49
Figura 4.4: Eje Norte (C), Ríos Limarí - Hurtado.....	50
Figura 4.5: Eje Norte (D), Ríos Limarí - Hurtado.....	51
Figura 4.6: Eje Norte (E), Ríos Limarí - Hurtado.....	52
Figura 4.7: Eje Norte (F), Ríos Limarí - Hurtado.....	53
Figura 4.8: Eje Norte (G), Ríos Limarí - Hurtado.....	54
Figura 4.9: Eje Norte (H), Estero Ingenio.....	56
Figura 4.10: Eje Norte (I), Estero Punitaqui.....	59
Figura 4.11: Eje Centro (A), Ríos Grande - Rapel - Los Molles.....	63
Figura 4.12: Eje Centro (B), Ríos Grande - Rapel - Los Molles.....	64
Figura 4.13: Eje Centro (C), Ríos Grande - Rapel - Los Molles.....	65
Figura 4.14: Eje Centro (D), Ríos Grande - Rapel - Los Molles.....	66
Figura 4.15: Eje Sur (A), Ríos Guatulame - Cogotí.....	69
Figura 4.16: Eje Sur (B), Ríos Guatulame - Cogotí.....	70
Figura 4.17: Eje Sur (C), Ríos Guatulame - Cogotí.....	71
Figura 4.18: Eje Sur (D), Ríos Guatulame - Cogotí.....	72
Figura 4.19: Red de sedimentos activos.....	74
Figura 4.20: Distribución de nodos.....	78
Figura 4.21: Ubicación de muestras seleccionadas para análisis mineralógico.....	80
Figura 4.22: Ubicación de minerales con contenido de metales preciosos y metales pesados.....	88
Figura 5.1: Zona de alteración hidrotermal en las nacientes del Río Hurtado.....	92
Figura 5.2: Quebrada "Paso de la Coipita".....	92
Figura 5.3: Planta La Cocinera - Estero Ingenio.....	99
Figura 5.4: Imagen satelital de la planta La Cocinera.....	100
Figura 5.5: Quebrada Los Mantos - Punitaqui.....	102
Figura 5.6: Mapa de centros poblados susceptibles a ser afectados por metales pesados.....	112

Índice de Tablas

Tabla 1.1: Población total de la cuenca del Río Limarí.....	12
Tabla 2.1: Resultados geoquímicos de Cu para muestras duplicadas.....	20
Tabla 2.2: Límites máximos PEC.....	23
Tabla 4.1: Límite de detección, resolución y error asociado a la medición de cada elemento.....	42
Tabla 4.2: Concentración media de cada elemento por nodo.....	75
Tabla 4.3: Elementos más representativos de cada nodo.....	76
Tabla 4.4: Resumen mineralogía Ríos Limarí y Hurtado.....	81
Tabla 4.5: Resumen mineralogía Estero Ingenio.....	81
Tabla 4.6: Resumen mineralogía Estero Punitaqui.....	82
Tabla 4.7: Resumen mineralogía Ríos Grande, Rapel, Los Molles.....	82
Tabla 4.8: Resumen mineralogía Ríos Guatulame y Cogotí.....	82
Tabla 5.1: Contaminantes detectados en cada río estudiado.....	107
Tabla 5.2: Detalle de localidades donde la concentración de metales supera el parámetro PEC.....	111

1 Introducción

1.1 Antecedentes generales

Los sedimentos fluviales activos están formados por un compuesto de material clástico (producto de la erosión de la cuenca que es drenada) y de material hidromórfico (precipitado y/o absorbido por el agua de la corriente) (Ortiz y Roser, 2006; Griem-Klie, 2009).

Los datos geoquímicos y mineralógicos de sedimentos fluviales se utilizan principalmente para monitorear la influencia que tiene tanto la geología del basamento como factores antropogénicos (actividades mineras, agrícolas, industriales y grado de urbanización) sobre la calidad ambiental de los sistemas fluviales (Birch et al., 1999; Birch et al., 2001; Conaway et al., 2005; Ortiz y Roser, 2006).

En el presente trabajo se analizará la composición mineralógica y química de las muestras de sedimentos activos y pre-industriales recolectados, respectivamente, de los cauces y terrazas laterales de los principales ríos que conforman la cuenca del Río Limarí. El estudio se concentrará en la fracción <180 μm de los sedimentos recolectados, la cual se considera como representativa de la carga en suspensión (principal medio de transporte de los elementos mayores y en trazas) (Ortiz y Roser, 2006). La composición química de las muestras recolectadas será determinada mediante espectrometría de masa (ICP-MS e ICP-ES) y la composición mineralógica mediante difracción de Rayos-X (XRD). Los datos químicos obtenidos serán procesados utilizando herramientas convencionales, tales como diagramas univariados de variación geográfica, y en forma multidimensional, mediante redes neuronales artificiales.

La cuenca hidrográfica del Río Limarí, se ubica en la Región de Coquimbo. Sus límites geográficos son el valle del Río Elqui por el norte, el valle del Río Choapa por el sur, la Cordillera de los Andes por el este y el Océano Pacífico por el oeste (Figura 1.1).

Administrativamente corresponde a la Provincia de Limarí subdividida en las comunas de Combarbalá, Monte Patria, Ovalle, Punitaqui y Río Hurtado. La capital provincial es la comuna de Ovalle (DGA, 2004) (Figura 1.2).

El sistema hídrico de la cuenca del Limarí es el de mayor tamaño de la región, con una extensión de 11.800 km², que en conjunto con sus embalses han facilitado el desarrollo de la agricultura hasta convertirla en la principal actividad económica y sustento social de la Provincia (SEREMI, 2009) (Figura 1.2).

El paisaje es montañoso y se identifica por la presencia de valles fluviales transversales de orientación principalmente E-W, los cuales en menos de 150 km atraviesan la región desde la Cordillera de los Andes hasta el Océano Pacífico (DGA, 2004) (Figura 1.3).

Esta región se caracteriza por un clima semiárido condicionado por el Anticiclón del Pacífico Sur, el cual, periódicamente es afectado por fuertes variaciones climáticas asociadas a "El Niño", que trae las lluvias intensas e inundaciones (Oyarzún, R. 2006).

La cuenca está constituida principalmente por estratos de rocas volcánicas y sedimentarias mesozoicas, a excepción de las Serranías Costaneras en la parte occidental, donde afloran rocas metamórficas y graníticas paleozoicas, y de la parte nororiental, formada por extensos afloramientos graníticos paleozoicos (Thomas, 1967) (Figuras 3.1 y 3.2).

Esta cuenca también se caracteriza por presentar depósitos minerales y zonas de alteración hidrotermal de interés económico (Figuras 3.3 y 3.4). Por consiguiente, la segunda actividad de mayor desarrollo es la minería. Algunos de sus depósitos incluso han sido explotados casi continuamente por Cu, Au y Hg desde los siglos XVI y XVIII (Oyarzún, 2007; Higuera, 2004).

Las características geológicas de la región y la extensa actividad minera, han repercutido en algunos sectores en forma de perturbaciones ambientales, principalmente en forma de dispersión de elementos metálicos corriente abajo de los cauces cercanos a depósitos minerales (Higuera, 2004).

En el caso de existir en esta cuenca, contaminación generada a partir de la actividad industrial (principalmente minera), sería particularmente preocupante ya que, tanto minería como agricultura, deben coexistir en estrechos valles (Oyarzún, 2007; Higuera, 2004) (Figura 5.3). Las consecuencias asociadas a ello pueden significar un riesgo para la salud humana y ambiental: los sedimentos fluviales pueden actuar como reservorios de metales pesados por largos períodos de tiempo, de cientos a miles de años (Macklin et al., 2006), existiendo una alta probabilidad de que éstos elementos entren en la cadena trófica acuática y se bio-acumulen en plantas y animales (Hellyer, 2000).

Por estas razones se hace necesario establecer una línea de base tanto geoquímica como mineralógica de los sedimentos fluviales, y a través del análisis de estos datos, determinar cuáles son realmente los factores que inciden en la composición de los sedimentos (e.g. González et al., 2007; Oyarzún, et al., 2003; Oyarzún, et al., 2004; Oyarzún, et al., 2007; Lacassie, 2008).

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

- Determinar la influencia que tiene tanto la geología como la actividad antropogénica (minería, agricultura, industria y urbanización) sobre la mineralogía y geoquímica de los sedimentos fluviales activos en la cuenca del Río Limarí.

1.2.2 Objetivos específicos

A partir del estudio de los sedimentos activos de la cuenca se espera:

- Establecer una línea de base geoquímica para los sedimentos fluviales de esta cuenca.
- Establecer una línea de base mineralógica para los sedimentos fluviales de esta cuenca.
- Determinar la calidad ambiental de los sedimentos fluviales activos, en base a la abundancia de metales pesados presentes en éstos.

1.3 Hipótesis

La composición química y mineralógica de los sedimentos fluviales (en la fracción <180 µm), refleja tanto influencia natural como la antrópica en el sistema fluvial estudiado.

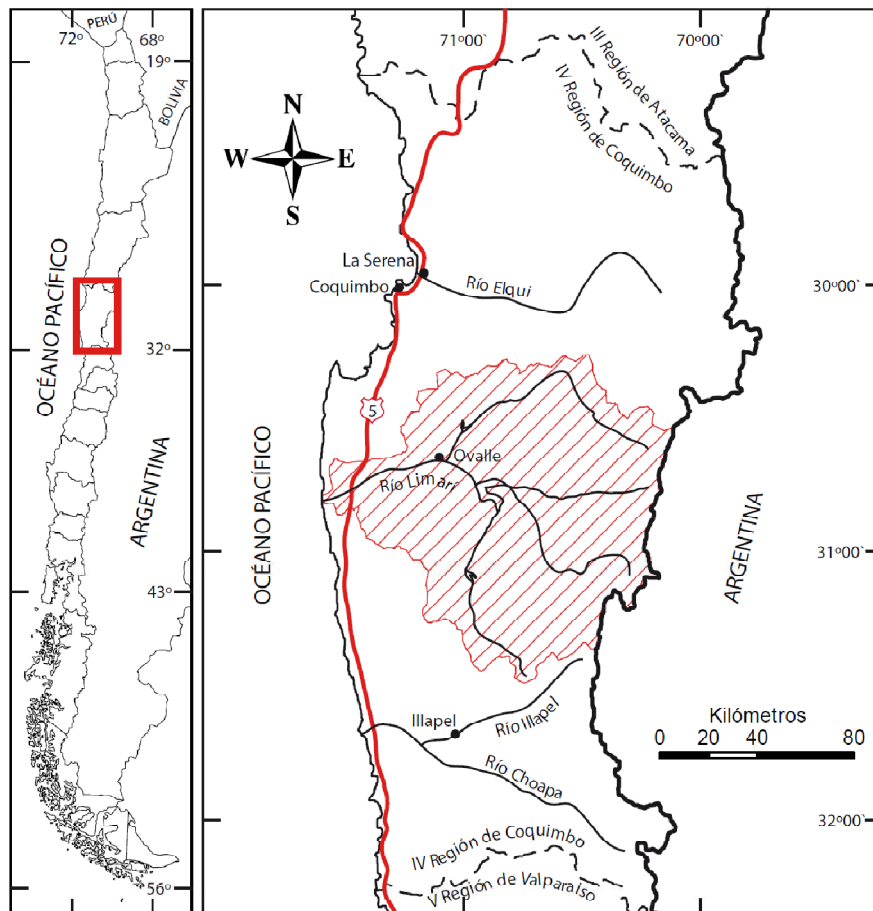
Los factores naturales corresponderían principalmente a las diferencias químicas entre las distintas litologías y a los cambios en el régimen hidrodinámico a lo largo de la cuenca fluvial. Mientras que los factores antrópicos se relacionarían con las actividades agroindustriales, las actividades mineras, el grado de urbanización y la presencia de embalses.

1.4 Ubicación y accesos

La Cuenca Hidrográfica del Río Limarí se ubica en la Provincia del Limarí, IV Región de Coquimbo - Chile, entre los paralelos 30°15' y 31°2 0' de latitud sur. Por el norte limita con el Valle del Río Elqui y por el sur con el Valle del Río Choapa (Figura 1.1).

El acceso al valle del Río Limarí se encuentra en el kilómetro 375 de la Ruta 5 norte en la localidad de Salala. Allí se debe tomar el desvío hacia la ruta D-565 con rumbo a Ovalle (Figura 1.1).

En este trabajo se estudiaron las sub-cuencas de los Ríos Limarí, Hurtado, Grande, Rapel, Los Molles, Guatulame, Cogotí y Combarbalá, y los Esteros Ingenio y Punitaqui (Figura 1.2).



Simbología








-  IV Región de Coquimbo - Chile
-  Detalle zona de estudio: Cuenca Río Limarí
-  Acceso principal: Ruta 5
-  Límite Regional
-  Límite Fronterizo
-  Ríos Principales
-  Ciudades Principales

Figura 1.1: Zona de Estudio: Cuenca del Río Limarí.

1.5 Descripción de la zona de estudio

De acuerdo con la hipótesis con la que se trabajó en este estudio, los principales agentes que podrían influenciar de forma directa e indirecta, tanto la composición de los sedimentos fluviales activos como sus patrones de sedimentación, tienen relación con la composición química del basamento rocoso, con la red de drenajes, con el clima, con la geomorfología de los valles, con los asentamientos humanos y con las actividades económicas que se desarrollan en la cuenca.

1.5.1 Drenajes principales

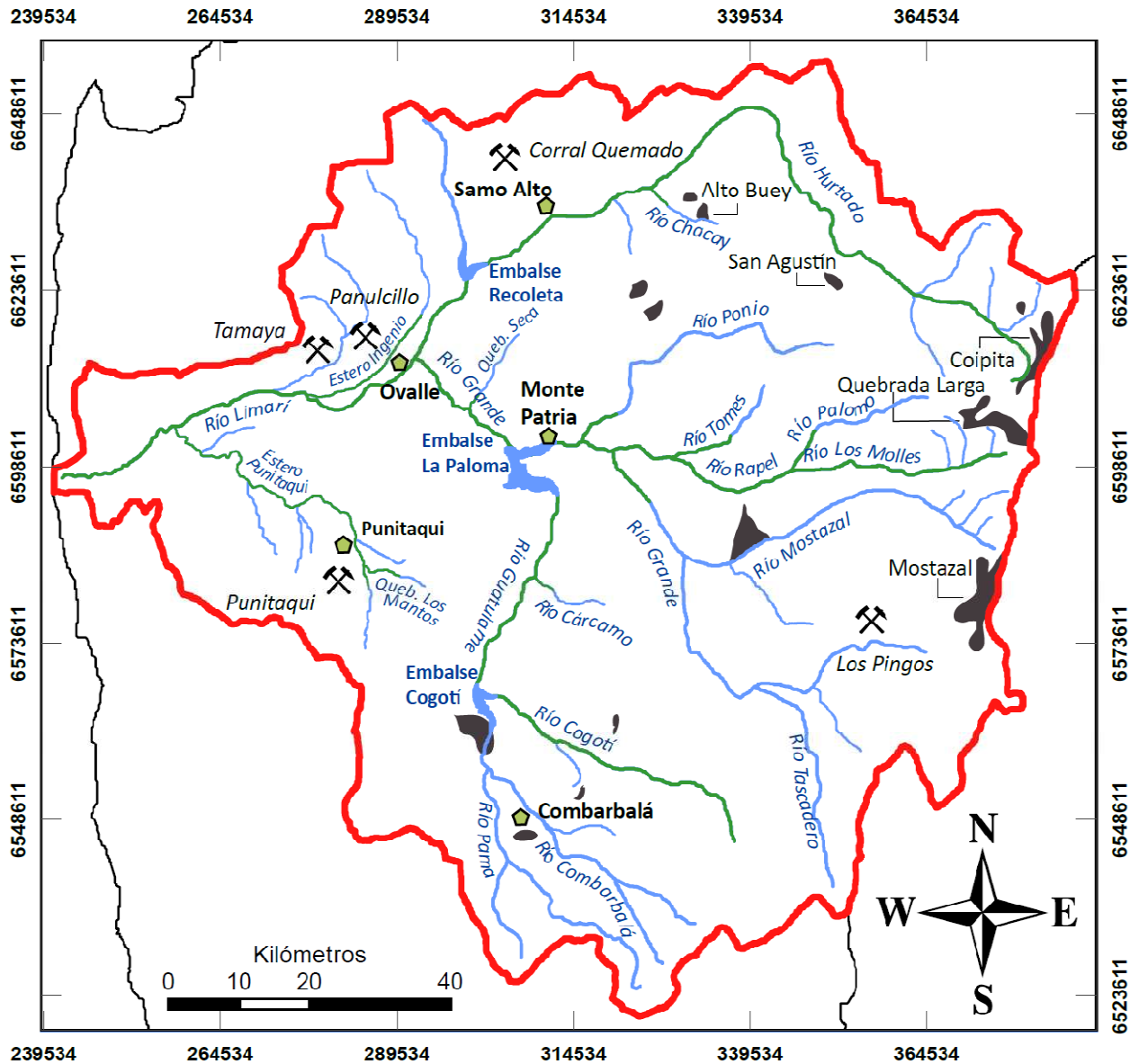
- El Río Limarí, se forma en la unión de los Ríos Grande y Hurtado (aproximadamente 4 km aguas arriba de la ciudad de Ovalle) y recorre alrededor de 60 km hasta su desembocadura, adyacente a localidad Punta Limarí (Figura 1.2). La hoya hidrográfica de este río muestra un régimen nivo – pluvial, con grandes caudales entre noviembre y diciembre, producto de los deshielos cordilleranos. Entre julio y agosto también presenta caudales de consideración debido a lluvias invernales (DGA, 2004).

Entre la ciudad de Ovalle y su desembocadura recibe dos afluentes de escasa importancia, ellos son los Esteros Ingenio, por el norte, y Punitaqui, por el sur, teniendo ambos sus orígenes en la cordillera de la Costa (Figura 1.2). Estos afluentes muestran un régimen claramente pluvial, ya que su hoya hidrográfica se encuentra a muy baja elevación, de manera que no recibe aportes nivales. Los mayores caudales ocurren entre julio y septiembre. Entre diciembre y marzo se presentan caudales muy bajos debido a la inexistente influencia nival (DGA, 2004).

- El Río Hurtado drena una cuenca de aproximadamente 2.600 km². Esta cuenca es la que se encuentra más al norte y que presenta menor pluviosidad (Figura 1.2). Nace en el paso fronterizo El Viento en la Cordillera de los Andes. Este río presenta un régimen nival con una pequeña influencia pluvial en años muy secos. Los mayores caudales en años húmedos se observan entre noviembre y enero, producto de importantes deshielos, mientras que en años secos los caudales son muy bajos y se distribuyen de manera bastante regular a lo largo del año. En su recorrido recibe

numerosos afluentes (en su mayoría esteros de escaso caudal) siendo los más importantes el Río Ternero, la Quebrada Elqui, la Quebrada Rapel y el Río Chacay. En la parte más baja de la sub-cuenca del Río Hurtado se encuentra el Embalse Recoleta, con capacidad útil de 100 millones de m³ (DGA, 2004).

- El Río Grande, con una sub-cuenca de 6.537 km², es el afluente más importante del Río Limarí. A lo largo de su curso recibe una serie de afluentes de importancia, entre los cuales cabe mencionar: el Río Tascadero, el Río Rapel (con sus afluentes Palomo y Molles), el Río Mostazal y el Río Guatulame (con sus afluentes Combarbalá, Pama y Cogotí) (Figura 1.2). Otros afluentes de menor relevancia son los Ríos Turbio, Torca y Ponio. Este río y sus afluentes presenta un régimen nival con sus mayores caudales entre noviembre y enero, también presentan influencias pluviales de consideración en la parte más baja de la sub-cuenca entre los meses de junio y agosto (DGA, 2004).
- El Río Guatulame, corre de sur a norte, es el último afluente importante que confluye al Río Grande, se forma por la unión de los Ríos Cogotí y Pama en cuya junta se construyó el Embalse Cogotí, de capacidad máxima de 150 millones de m³ (Figura 1.2). En la junta de los Ríos Guatulame y Grande, se construyó el Embalse Paloma, con una capacidad máxima de 750 millones de m³ (DGA, 2004).



Simbología







-  Capital comunal
-  Límite cuenca río Limarí
-  Ríos y esteros principales
-  Ríos y esteros analizados en este estudio
-  Zonas con alteración hidrotermal
-  Principales distritos mineros

Figura 1.2: Red de drenajes principales de la Cuenca del Río Limarí. Se han incluido a la figura los distritos mineros más importante de la provincia y las principales zonas de alteración hidrotermal. Las coordenadas se indican en UTM (mapa adaptado de Oyarzún et al, 2006).

1.5.2 Geomorfología

Con excepción de un cordón montañoso costero (Altos del Talinay), la cuenca presenta una geomorfología de valles transversales, a través de los cuales, los ríos descienden desde la Cordillera de los Andes, a través de estrechos valles encajonados con laderas de abrupta pendiente (como resultado de la acción glacial y del agua), hacia el Océano Pacífico (Oyarzún, R. 2006) (Figura 1.3).

En la parte central de la cuenca, los ríos confluyen en uno solo (Río Limarí) (Figura 1.3), el cual escurre desde Ovalle hacia el mar a través de un valle muy abierto, 2 o más kilómetros de ancho, donde desarrolla un patrón anastomosado flanqueado planicies fluviales aterrazadas.

Al acercarse al mar, el valle se interrumpe repentinamente por un cordón montañoso con altitudes máximas de 450m (Altos del Talinay) (Figura 1.3). En este sector, el río se estrecha notablemente, y con un cauce de aproximadamente 500 m de ancho corta transversalmente a este cordón para entregar sus aguas al mar (DGA, 2004).

Las principales unidades geomorfológicas de la cuenca se resumen en (Oyarzún, R. 2010):

- Alta Montaña: corresponde a la Cordillera de Los Andes. Ocupa la posición extrema oriental de la región y se distingue por sus altitudes (Figura 1.3), su capacidad de retención nival y por la ausencia de volcanismo cuaternario. Sus cumbres superan los 3.500 m.s.n.m., alcanzando sobre la frontera chileno-argentina los 6.000 m.s.n.m.
- Montaña Media: agrupa todos aquellos relieves cuya altitud no supera los 3.000 m.s.n.m. (Figura 1.3) y están separados de la Cordillera de los Andes por la Falla de Vicuña (Figura 3.1). Aparece como un relieve desmembrado y discontinuo, debido a la intensa disección fluvial a que ha estado sometido. El límite occidental de la unidad queda demarcado por la franja litoral y los relieves asociados a ella.

Por lo general, los cursos de agua que se originan en estos relieves no logran acumular recursos hídricos suficientes como para escurrir permanentemente o para construir valles con depósitos sedimentarios y sistemas de terrazas.

- Franja Litoral: en este ambiente se inicia el dominio de las terrazas de sedimentación marina (Figura 1.3). Los Altos de Talinay presentan un conjunto de plataformas de abrasión marina que se correlacionan con los niveles de sedimentación de las bahías de Coquimbo y Tongoy. Estas terrazas litorales limitan hacia el este con macizos de varios cientos de metros separados unos de otros por quebradas que han formado los cursos de agua en su trayecto para alcanzar el mar.
- Valles Fluviales Transversales: su forma es producto de la actividad de las aguas corrientes, con altitudes que no superan los 300 m.s.n.m. en su curso inferior (Figura 1.3). Estos valles fluviales se caracterizan por presentar, en sus cursos medio e inferior, un completo sistema de terrazas que corresponden a las superficies de sedimentación marina descritas anteriormente. De esta forma, estas terrazas se correlacionan con los cambios sufridos por el nivel del mar durante el Cuaternario.

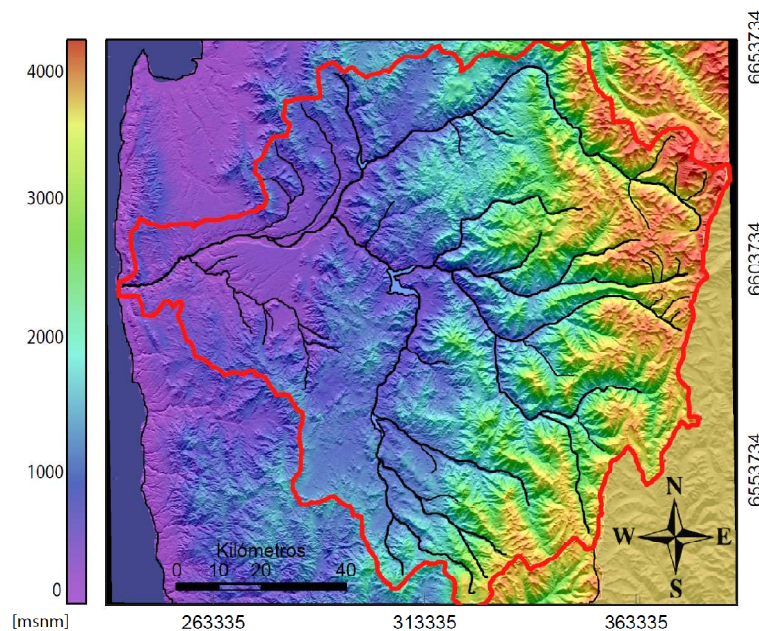


Figura 1.3: Modelo topográfico de la cuenca del Río Limarí construido a partir de imagen DEM (Modelo de Elevación Digital) utilizando el software ENVI. La línea roja delimita la zona de estudio, la franja azul hacia el W corresponde al océano Pacífico y la franja amarilla hacia el E corresponde a Argentina. Las coordenadas se indican en UTM. La escala de color a la izquierda indica altitud.

1.5.3 Clima

A grandes rasgos, el clima está fuertemente condicionado por el Anticiclón del Pacífico Sur. La temperatura media anual a lo largo de la costa es de 14°C, aumentando hacia el interior a 16°C. La precipitación media anual en el interior es de 100 mm (promediando los últimos 30 años en Ovalle), mientras que en la Cordillera de los Andes es de aproximadamente 180 mm (lluvia más nieve). Además la región se caracteriza por fuertes variaciones inducidas por los vientos del oeste que se correlacionan con los años de "El Niño", que traen las lluvias intensas y posteriores inundaciones repentinas (Oyarzún, R. 2006).

La cuenca del Río Limarí presenta tres tipos climáticos (DGA, 2008):

- *Semiárido con nublados abundantes*, el cual se presenta a lo largo de toda la costa. Su influencia llega hasta el interior hasta 40 km, por medio de los valles transversales y quebradas. Su mayor característica es la abundante nubosidad; humedad, temperaturas moderadas, con un promedio de precipitaciones de 130 mm anuales con un período seco de 8 a 9 meses.
- *Semiárido templado con lluvias invernales*, el cual se sitúa en el valle del Río Limarí, caracterizándose por ser un clima seco en el cual la evaporación es superior a la precipitación y donde no hay excedentes hídricos. Sus temperaturas medias anuales son inferiores a 18°C.
- *Semiárido frío con lluvias invernales*, el cual se localiza en la Cordillera de Los Andes sobre los 3.000 metros de altitud con características de altas precipitaciones, temperaturas bajas y nieves permanentes, las cuales constituyen un aporte significativo de agua en el período estival.

1.5.4 Asentamientos humanos

La población urbana de la cuenca del Río Limarí, se concentra mayoritariamente en la ciudad de Ovalle y en la localidad de Monte Patria (Tabla 1.1). La población total de la provincia es de 156.158 habitantes, de los cuales 96.239 se emplaza en los principales centros urbanos (INE-Censo 2002).

Nombre del asentamiento	Población total 2002	Población total urbana 2002	Río asociado a localidad
Ovalle	98.089	73.790	Río Limarí
Monte Patria	30.276	13.340	Río Grande
Combarbalá	13.483	5.494	Río Cogotí
Punitaqui	9.539	3.615	Estero Punitaqui
Río Hurtado	4771	0	Río Hurtado

Tabla 1.1: Población total de la cuenca del Río Limarí (INE-Censo, 2002).

Actualmente todas las comunas de la cuenca (a excepción de Río Hurtado) cuentan con servicio de agua potable y alcantarillado. Este servicio es prestado por la empresa sanitaria Aguas del Valle S.A. La empresa sanitaria también provee a la población con servicios de recolección y tratamiento de aguas servidas. Las plantas de tratamiento de aguas servidas de la provincia atienden las localidades de Chañaral Alto, Combarbalá, El Palqui, Monte Patria, Ovalle, Punitaqui y Sotaquí (SISS, 2009).

1.5.5 Actividades económicas

1.5.5.1 Agricultura

En esta cuenca se concentra el 48% de la superficie agrícola regional y un 70% de las exportaciones regionales. La cuenca del Limarí cuenta con una superficie total de aproximadamente 1,2 millones de hectáreas de las cuales han sido cultivadas entre el 3 y el 5 %. La superficie bajo cultivo ha aumentado históricamente desde la construcción y puesta en operación del Sistema Paloma (sistema de regadío interconectado que integran los Embalses Recoleta, Cogotí y La Paloma) (Oyarzún, R., 2010).

Los terrenos agrícolas se distribuyen principalmente en los siguientes valles (DGA, 2004):

- Valle del Río Limarí, entre Ovalle y el Estero Punitaqui. Esta zona es la que presenta mayor superficie y es la de mayor importancia (Figura 1.2).
- Valle del Río Hurtado, entre Embalse Recoleta y confluencia con el Río Grande, la agricultura se desarrolla únicamente en los sectores aledaños a las terrazas fluviales, siendo éstas muy reducidas (Figura 1.2).
- Valles de los Ríos Mostazal y Grande, aguas arriba de Embalse La Paloma. Al igual que ocurre en el Río Hurtado, se presentan superficies de terreno muy reducidas (Figura 1.2).
- Valle del Río Grande, entre Embalse La Paloma y confluencia con Río Hurtado (Figura 1.2).

Según los antecedentes existentes al año 2007 (VII Censo Nacional Agropecuario), la provincia del Limarí posee terrenos agrícolas destinados principalmente a cultivos de forrajeras anuales y permanentes, frutales, hortalizas, viñas y parronales viníferos (Figura 1.4).

Las industrias presentes en la zona se especializan principalmente en el procesamiento de la fruta, como las pisqueras y vitivinícolas, jugos concentrados, entre otros. Las pisqueras presentes en la provincia son: Capel Serón en Río Hurtado, Capel Punitaqui, Capel Sotaquí y Control Monte Patria.

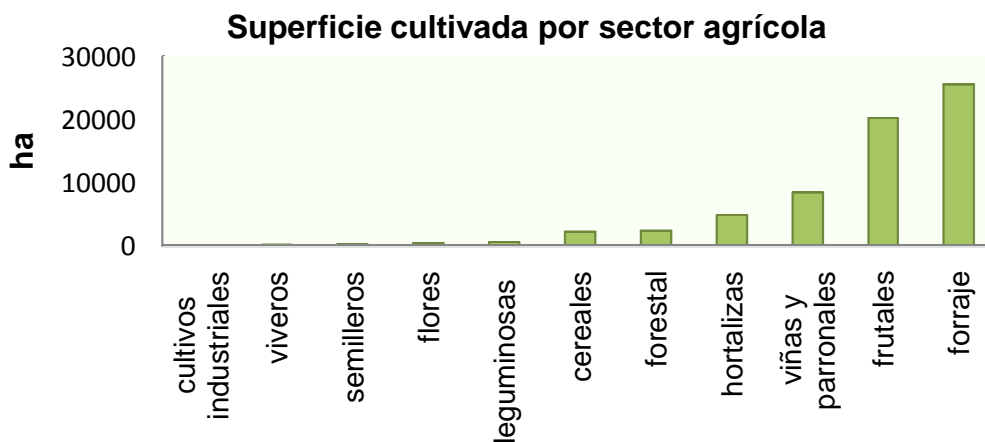


Figura 1.4: Superficie cultivada por sector agrícola (VII Censo Nacional Agropecuario, 2007).

1.5.5.2 Minería

Esta parte de Chile es rica en yacimientos minerales y en operaciones mineras (Figuras 3.3 y 3.4). Gran parte de la actividad minera de la provincia es de antigua data, el caso más notable corresponde al distrito minero Punitaqui (Cu-Au-Hg), que inició sus operaciones durante la época colonial española (S.XVI-XVIII) (Oyarzún, R. 2006).

Actualmente, las principales actividades mineras se desarrollan en la sub-cuenca del Río Grande por parte de la Compañía minera Cemin y en el Estero Ingenio por la Compañía Minera Panulcillo (Rodríguez, 2009).

- La Compañía Minera Cemin opera la mina de cobre a cielo abierto "Los Pingos" en la zona cordillerana correspondiente a la comuna de Monte Patria en el sector de Tulahuén (Figura 1.2). El complejo minero está diseñado para procesar las reservas de sulfuro usando los sistemas tradicionales de flotación y concentración.
- La Compañía Minera Panulcillo filial de la Empresa Nacional de Minería, opera la planta La Cocinera (Figura 1.2). Esta última es una planta de flotación de cobre, oro y plata ubicada cerca de la ciudad de Ovalle.

Otros distritos mineros de importancia que se encuentran en la provincia son:

- Distrito de Corral Quemado: Presenta extensos yacimientos estratiformes de manganeso (Thomas, H. 1967). Actualmente pertenece a la Compañía Manganesos Atacama y opera las minas Loma Negra y Toda La Vida (Figura 1.2).
- Distrito de Tamaya: Vetas cupríferas de alta ley que fueron explotadas en el pasado (mediados del siglo XIX) (Thomas, 1967) (Figura 1.2).
- Distrito de Punitaqui: Yacimiento vetiforme que ha producido cantidades importantes de oro, mercurio y cobre (Thomas, 1967). En este distrito, la Cía. Minera Punitaqui (declarada en quiebra el año 2008 y rematada por la empresa Minerales del Sur en enero del 2010) operaba la mina Cinabrio y planta Los Mantos (Au-Cu-Ag) (Diario El Ovallino - 20 enero 2010) (Figura 1.2).

Si bien la actividad minera es económicamente de importancia en la Provincia, se la identifica también como una actividad generadora de problemas ambientales de importancia, principalmente como consecuencia del descuido y/o abandono de tranques de relave. El riesgo asociado a estos se debe a que las sustancias químicas que éstos poseen, son susceptibles a contaminar los cursos de aguas superficiales, y de napas freáticas por lixiviación y por ende los pozos de extracción de aguas (Rodríguez, 2009).

En la provincia del Limarí se han identificado un número de 43 relaves, de los cuales el 49% se encuentran desmantelados, 28% están paralizados y 23,3% están activos (Rodríguez, 2009).

Dentro de la cuenca, las zonas con mayor riesgo de ser afectadas como consecuencia de su cercanía con tranques de relave, se encuentran en:

- Comuna de Ovalle: Los centros poblados de Lagunillas, Guindo Alto y Sotaquí, por encontrarse a menos de dos kilómetros de centros mineros y a una cota inferior. De los centros poblados mencionados, el de mayor riesgo ambiental es el poblado de Lagunillas, por encontrarse aguas abajo de "La Cocinera" uno de los tranques de relave con mayor actividad, que concentra material de la extracción de cobre.
- Comuna de Punitaqui: se reconoce con riesgo ambiental el relave de la ex Compañía Minera Punitaqui por posible contaminación superficial de la napa del Estero Punitaqui. Otros focos de riesgo ambiental lo constituyen algunos relaves (desmantelados y paralizados) próximos al Río Combarbalá y Cogotí.
- Comuna de Monte Patria: en el sector de Tulahuén, constituye un riesgo ambiental la planta El Pingo. La cual se localiza en la Cordillera de los Andes, en una zona de alta pendiente, junto a una quebrada que tributa las nacientes del Río Grande.

2 Metodología de trabajo

2.1 Terreno

La recolección de muestras se desarrolló durante los meses de enero y febrero del año 2010. En total, se recolectaron 126 muestras. La mayoría de estas, corresponden sedimentos fluviales de canales activos. Las demás, corresponden a sedimentos antiguos recolectados en las terrazas fluviales pre-industriales cercanas al cauce principal.

Las muestras fueron recolectadas a lo largo de tres ejes que recorren la cuenca de este a oeste (Figura 1.2): 1) Eje norte: Ríos Limarí-Hurtado; 2) Eje centro: Ríos Grande-Rapel-Los Molles; 3) Eje sur: Ríos Guatulame-Cogotí. En forma complementaria al Eje norte, se recolectaron muestras de dos esteros tributarios al Río Limarí: Estero Ingenio y Estero Punitaqui.

Los ríos muestreados se seleccionaron bajo el criterio de abarcar la mayor superficie drenada y la mayor cantidad de unidades geológicas posibles. Las muestras fueron recolectadas a una distancia aproximada de de 3 km unas de otras, haciendo la transecta desde las nacientes de los ríos, en las altas cumbres de la Cordillera de los Andes, hasta su desembocadura en el Océano Pacífico.

En cada punto de muestreo se registró la coordenada geográfica, se marcó dicha coordenada sobre la correspondiente carta topográfica (Cartas Topográficas 1:50000 del IGM) y se realizó una breve descripción del lugar. En cuanto a las muestras, cada una de éstas correspondió a compósito de sub-muestras (2 a 4 kg en total) recolectadas en un tramo de entre 20 y 50 m a lo largo del canal, a una profundidad máxima de 5 cm en el lecho del mismo (cuando las condiciones lo permitieron, se tomaron sub-muestras de ambas riveras del cauce principal). Las muestras fueron recolectadas utilizando una pala de PVC y almacenadas en bolsas de polietileno transparente.

2.2 Laboratorio

El trabajo de laboratorio se realizó en tres etapas: 1) Preparación de muestras; 2) Análisis químico; 3) Análisis mineralógico.

1) Preparación de muestras

En el laboratorio del Servicio Nacional de Geología y Minería (Sernageomin) las muestras fueron secadas en un horno a 27°C durante un período de 3 a 5 días (se utilizó esta metodología para evitar cambios mineralógicos de baja temperatura que suelen ocurrir en las arcillas). Debido a la limitada capacidad del horno, numerosas muestras debieron permanecer en sus respectivas bolsas durante varios días antes de ser secadas. En forma posterior al secado, las muestras fueron tamizadas en mallas de acero inoxidable (malla # 80) con el fin de separar la fracción fina <180 µm. De esta fracción se recuperaron aproximadamente 30 gramos de material fino (<180 µm), los cuales fueron pulverizados posteriormente con un mortero de ágata durante 3 minutos. El material fino-pulverizado resultante se almacenó en frascos plásticos transparentes estériles.

2) Análisis geoquímico

Los frascos con las muestras preparadas (tamizadas y pulverizadas) fueron enviados a AcmeLabs (laboratorio Canadiense con certificación internacional). Allí se determinó la abundancia total de óxidos principales mediante espectrometría de emisión ICP-ES y la abundancia de elementos traza mediante espectrometría de masa ICP-MS.

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

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

3) Análisis mineralógico

Para este análisis se seleccionaron 45 muestras representativas de toda la cuenca. Estas muestras seleccionadas (previamente tamizadas con la malla # 80), fueron trituradas y homogenizadas con un mortero de ágata hasta conseguir un tamaño de grano $<20 \mu\text{m}$ (método del polvo). Posteriormente, en el laboratorio del Sernageomin, las muestras fueron analizadas utilizando un equipo de Difracción de Rayos-X, marca PANalytical, modelo X'Pert PRO.

2.3 Procesamiento de datos

2.3.1 Datos geoquímicos

El procesamiento de los datos geoquímicos se realizó en tres etapas. La primera consistió en la realización de un control de calidad de los resultados entregados por AcmeLabs. La segunda consistió en el procesamiento de los resultados mediante gráficos de variación geográfica de las concentraciones elementales. Finalmente, en la tercera etapa, el set de datos fue procesado en su totalidad, utilizando una técnica de análisis multivariado basado en el uso de redes neuronales artificiales no-supervisadas.

En forma previa al procesamiento de los datos, un conjunto de elementos fue agrupado por motivos de simplificación del análisis. Este grupo de elementos presentaba un comportamiento similar a lo largo de la cuenca (sus concentraciones aumentaban, o disminuían, de la misma manera). El valor asignado a este grupo fue la sumatoria de las concentraciones de los elementos que lo constituyen en cada medición. Los elementos agrupados fueron:

- Tierras Raras Livianas (LREE = light rare earth elements): La - Ce - Pr - Nd - Sm
- Tierras Raras Pesadas (HREE = heavy rare earth elements): Eu - Gd - Tb - Dy - Ho - Er - Tm - Yb - Lu

1) Control de calidad de datos

En total se analizó la composición química de 126 muestras de sedimentos (activos y pre-industriales) y se obtuvo la concentración de 49 elementos en cada una de ellas. Los resultados obtenidos se presentan en forma detallada en el Anexo A.

El análisis geoquímico fue realizado en AcmeLabs, laboratorio canadiense que cumple con la ISO 9001 (sistema de calidad conforme a la Organización Internacional de Normalización) y la ISO / IEC 17025 requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración.

En el mismo laboratorio, a través de análisis de blancos y duplicados, se determinó el error analítico. Este análisis es necesario para determinar el nivel de precisión (límite de detección y resolución) del equipo y mantenerlo calibrado correctamente. El límite de detección indica la concentración mínima que el equipo es capaz de detectar, mientras que la resolución indica el intervalo mínimo al que el equipo puede diferenciar dos mediciones.

El error total asociado a las mediciones se determinó mediante la comparación de los resultados con sus correspondientes valores duplicados. Para ello, se enviaron 4 pares de muestras duplicadas (sin dar esta información al laboratorio).

En total se obtuvieron entre 8 y 10 duplicados para cada elemento (duplicados solicitados más duplicados de calibración), medidos en distintas muestras. La cantidad de duplicados representa aproximadamente al 8% del total de muestras.

No se discutió en detalle el comportamiento de aquellos elementos que presentaron un error total superior al 10% (criterio de corte), debido a su nulo o muy bajo valor conclusivo. Sin embargo, sí se indicó su ocurrencia, ya que un alto valor en la concentración podría ser respaldado por la mineralogía.

El procedimiento realizado para determinar el error total, se describirá solamente para el caso del Cu, sin embargo se repitió para los 49 elementos estudiados en este trabajo.

En la Tabla 2.1, se exponen los resultados de las distintas mediciones de Cu y su correspondiente duplicado:

ID Muestra	Concentración de Cu en muestra original (ppm)	Concentración de Cu en muestra duplicada (ppm)
06	57,2	56,4
11	19	19,4
121	226,4	230,5
13	51,9	56,9
31	97,2	100,5
41	1063,7	1071,2
50	126,2	112,9
66	44,7	40,6
80A	51,4	51,5
90	205,3	202,5

Tabla 2.1: Resultados geoquímicos de Cu para muestras duplicadas.

A partir de la Tabla 2.1, los resultados se exponen un gráfico de dispersión de puntos: "Original v/s Duplicado".

Posteriormente, al conjunto de puntos se le asigna la línea de tendencia (regresión lineal) que mejor se ajusta a la distribución (Figura 2.1):

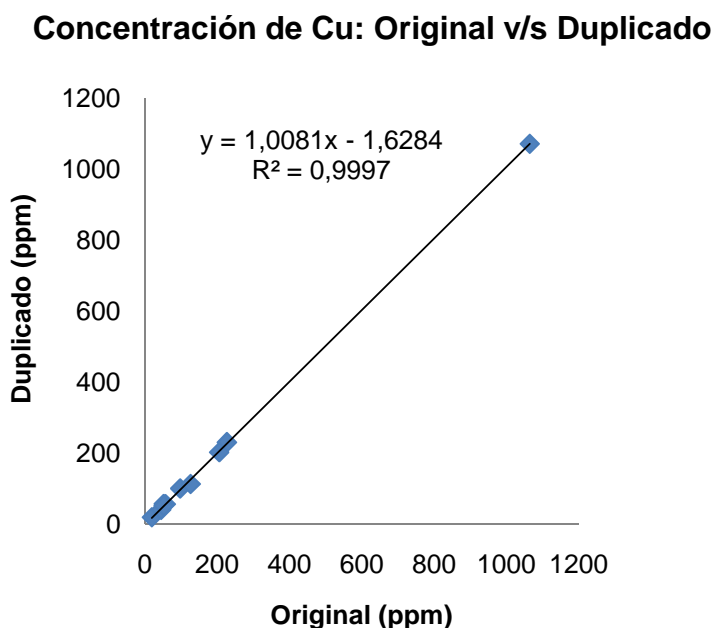


Figura 2.1: Determinación del error de análisis químico. Regresión lineal entre muestras duplicadas.

La ecuación de la recta que describe la línea de tendencia tiene una pendiente muy cercana a 1, lo cual quiere decir que la correlación entre las dos mediciones es del tipo 1:1, lo cual es un buen indicio de la exactitud en las mediciones. Sin embargo, el valor más relevante es el del R^2 , el cual indica con que precisión se ajusta la recta al conjunto de puntos. Este valor se puede expresar como porcentaje al multiplicarlo por 100. Pero como lo que se quiere obtener es el error asociado a la precisión del instrumento, el resultado se expresará de la siguiente forma:

$$error (\%) = 100 - (R^2 \times 100)$$

Entonces, en el caso del Cu:

$$R^2=0,9997 \Rightarrow error = 0,03 \%$$

Esto quiere decir que para cada medición de Cu, se asumirá que tiene un error asociado del 0,03%.

Algunas consideraciones sobre el tratamiento dado a los datos:

- Las muestras que presentaban más del 50% de sus resultados bajo el límite de detección, fueron excluidas de este análisis.
- Los valores que se encontraban en el límite de detección, fueron reemplazados por la mitad del correspondiente límite.
- Los valores que se encontraban bajo el límite de detección, fueron reemplazados por cero.

2) Gráficos univariados de variación geográfica

Con el fin de examinar la influencia de la variación geográfica del basamento sobre la composición química de los sedimentos, se graficó la concentración de cada uno de los elementos en función de su posición geográfica (a lo largo del cauce asociado) (Figuras 4.2 a 4.18).

En el eje horizontal de los gráficos se indicó el nombre de cada muestra. Éstas se encuentran dispuestas de izquierda a derecha según un orden geográfico consecutivo y en la misma dirección de escorrentía de las aguas (Figuras 4.2 a 4.18).

Complementariamente, a cada gráfico se le agregó el valor de algunas muestras correspondientes a sedimentos pre-industriales (tomadas de terrazas fluviales del mismo río), y de sedimentos activos de ríos y esteros tributarios inmediatamente antes de la confluencia con el río principal (Figuras 4.2 a 4.18).

Además, todos los gráficos fueron superpuestos con una subdivisión simplificada de la geología de la cuenca (tres franjas con orientación norte-sur). Esto se realizó con el fin de poder hacer correlaciones directas entre la geoquímica y el basamento rocoso (el cual se dispone predominantemente en franjas con orientación norte-sur, (Figura 3.1).

La subdivisión propuesta es:

- a) Zona I: Parte baja de la cuenca (franja occidental).
- b) Zona II: Parte intermedia de la cuenca (franja central).
- c) Zona III: Parte alta de la cuenca (franja oriental).

Con el fin de dar a conocer los elementos que se presentan en concentraciones anómalas (relativas a la cuenca), se procedió a calcular el valor promedio de las concentraciones de cada uno de estos. Para este cálculo se consideraron todas las muestras de sedimentos activos, tanto del los ríos principales como de los ríos tributarios y se excluyeron las muestras pre-industriales. Posteriormente se le agregó a cada gráfico la recta que representa dicho valor.

Otro factor que será analizado con la ayuda de estos gráficos, es la toxicidad asociada al As, Cd, Cr, Cu, Pb, Hg, Ni y Zn al encontrarse en elevadas concentraciones en los sedimentos. Para ello se trazó sobre cada gráfico correspondiente, el valor máximo establecido por el parámetro PEC (Tabla 2.2) (Probable Effect Concentration, McDonald et al, 2000). Este parámetro, establecido por consenso internacional, dice que cuando existen concentraciones (asociadas a sedimentos) superiores a estos valores máximos, existe una alta probabilidad de observar efectos adversos sobre los organismos que

conviven con los sedimentos. Dicho de otra forma, el PEC establece un criterio para decir si un sedimento es tóxico o no lo es (McDonald et al, 2000).

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

Tabla 2.2: Límites Máximos PEC (McDonald, 2000).

3) Redes Neuronales Artificiales

Las Redes Neuronales Artificiales son una tecnología que permite modelar de manera efectiva problemas complejos multivariados. Los modelos son generados a partir de los mismos datos a través de la búsqueda de patrones (relaciones entre datos) de forma inductiva mediante algoritmos de aprendizaje (Salas, [s.a.]).

En este estudio, la gran cantidad de información obtenida a partir de los análisis químicos, fue procesada a través de Redes Neuronales Artificiales no-supervisadas del tipo Growing Cell Structures (GCS; Fritzke, 1994). Esto quiere decir que el crecimiento de la estructura correspondió a un modelo de auto-organización, el cual se realizó sin supervisión de aprendizaje, encontrando automáticamente una estructura de red y un tamaño adecuado. La red final corresponde a triángulos interconectados, en donde cada unidad (nodo) tiene por lo menos dos conexiones con las unidades vecinas (Figura 4.19). Para la construcción de las redes se utilizó el software "Growing Cell Structures Visualisation (GCSVIS) Toolbox¹".

Mediante esta técnica se pueden visualizar tanto la estructura de grupos (o clusters) del set de datos como visualizar las relaciones lineales y no-lineales entre las variables (e.g., Lacassie et al, 2004a; Lacassie et al, 2004b; Lacassie et al, 2006).

¹ Código base escrito y desarrollado por Andrew J. Walker, Dr. Robert F. Harrison, and Dr. Simon S. Cross. Departments of Automatic Control and Systems Engineering and Pathology at the University of Sheffield, UK, con código adicional escrito y desarrollado en Matlab por J.P. Lacassie, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Geología, Universidad de Chile.

2.3.2 Datos mineralógicos

Los resultados de los análisis mineralógicos fueron presentados en diagramas independientes para cada río. En ellos se incluyó la mineralogía y su ubicación relativa a las demás muestras.

Para la elaboración de estos diagramas, se utilizaron las 45 muestras seleccionadas del total. La selección de las muestras se realizó de forma tal que estas se encontraran distribuidas por toda la cuenca, dándole más importancia a las muestras recolectadas en las confluencias de ríos (tanto aguas arriba como aguas abajo), a las recolectadas en zonas con evidentes perturbaciones ambientales y a las muestras recolectadas en las cabeceras de los ríos.

Mediante estos diagramas, los sedimentos fluviales de cada tramo quedaron representados por un set mineralógico particular, lo que permitió realizar comparaciones directas entre basamento y mineralogía. En forma complementaria, fueron proyectados sobre el mapa geológico las zonas en donde se detectaron minerales de posible interés económico.

3 Marco geológico

La Provincia del Limarí presenta unidades de rocas cristalinas (ígneas y metamórficas) paleozoicas, tanto en la faja costera como en la faja andina, con predominio de formaciones cretácicas volcánicas o volcano-clásticas con intercalaciones sedimentarias marinas (Cretácico Inferior) o continentales (Cretácico Superior-Terciario Inferior) en la parte central, ocupando la mayor extensión de su territorio (Figuras 3.1 y 3.2). Estas formaciones están cortadas por intrusivos graníticos también de edad cretácica o terciaria, lo que genera zonas de contacto y alteraciones hidrotermales que aportan mineralización de cobre, oro, hierro, manganeso y mercurio (Figura 3.3). También dicho efecto de contacto o alteración es responsable de la formación de yacimientos de dos piedras ornamentales: el lapislázuli (en la zona andina) y la combarbalita, en torno a la ciudad del mismo nombre (Oyarzún, R. 2010) (Figura 3.4).

Una gran zona de falla, situada en la continuación de la Falla Vicuña, separa la cordillera andina de la parte central del territorio. Por otro lado, y como es propio de la región tectónica compresiva de los Valles Transversales, no hay una separación clara entre la zona central y la “Cordillera de la Costa” (Oyarzún, R. 2010) (Figura 3.1).

Un rasgo característico de esta provincia es la amplia distribución de las terrazas de sedimentos marinos y continentales del Terciario superior y Cuaternario, en particular al W y NW de Ovalle y al S de la Bahía de Tongoy (Oyarzún, R. 2010).

3.1 Unidades litoestratigráficas²

3.1.1 Rocas estratificadas

Paleozoico

- Formación Hurtado (Devónico - Carbonífero inferior): Marina (?), areniscas, lutitas y pizarras grises.
- Formación Pastos Blancos (Pérmico): Continental, lavas riolíticas y andesíticas, tobas y brechas piroclásticas riolíticas.

Jurásico

- Formación Tres Cruces (Jurásico Inferior): Secuencia sedimentaria y volcánica marina formada por areniscas arcósicas de guijarros, fosilíferas y conglomerados de cuarzo matriz soportados.
- Complejo Volcánico Agua Salada (Jurásico): Rocas volcánicas y subvolcánicas continentales formadas por andesíticas y dacíticas, con escasas intercalaciones de areniscas y lutitas.
- Formación Algarrobal (Jurásico Superior): Secuencia volcánica continental formada por tufitas, andesitas porfíricas de anfíbola con abundantes vetillas de epidota y cuarzo, ocoitas y brechas tobáceas de líticos andesíticos que se intercalan con brechas epiclásticas rojas y con lentes de areniscas.

Cretácico

- Formación Río Tascadero (Titoniano Superior - Hautenviano): Secuencia marina carbonatada compuesta por calizas de grano fino, constituidas por una alternancia de lutitas y calizas lodosas.

² Referencias:

- Carta Geológica de Chile escala 1:500000: Hoja Ovalle (1967).
- Cartas Geológicas de Chile escala 1:250000: Hoja Illapel (1991); Hoja Pisco-Elqui (1998).
- Cartas Geológicas de Chile escala 1:100000: Hoja Andacollo-Puerto Aldea (2006); Hoja Vicuña-Pichasca (2006); Hoja Monte Patria (2008).

- Formación Arqueros (Neocomiano): Secuencia volcánica andesítico-basáltica, de depositación submarina y subaérea, con intercalaciones sedimentarias marinas. Se compone de 6 miembros: 1) Lavas porfíricas ('ocoitas'): Andesitas basálticas de piroxeno, basaltos de piroxeno-olivino, andesitas de anfíbola-piroxeno y de anfíbola; 2) Basaltos, andesitas basálticas, andesitas porfíricas haloclásticas y peperitas; 3) Filones-manto de pórfidos andesíticos de piroxeno-anfíbola y andesitas de anfíbola; 4) Alternancia de lavas almohadillas, sedimentitas y escasa rocas piroclásticas; 5) Calizas y areniscas subordinadas, en parte fosilíferas, con intercalación de lutitas y tobas; 6) Tobas y brechas piroclásticas con intercalación de lavas de piroxeno, de depositación subaérea.
- Formación Quebrada Marquesa (Hauteriviano - Albiano inferior): Formación volcánica compuesta de 2 miembros. El miembro superior corresponde a una secuencia volcánica continental compuesta por andesitas ferruginosas de piroxeno-anfíbola, con intercalación de tobas de lapilli, tobas soldadas cineríticas y de líticos andesíticos, tufitas, conglomerados finos, andesitas autoclásticas y niveles evaporíticos con yeso. El miembro Inferior corresponde a una secuencia continental con intercalación marina compuesta por brechas tobáceas gruesas, tufitas, andesitas, tobas de lapilli, areniscas calcáreas finas a gruesas con alternancia de calizas bioclásticas, calizas finas, areniscas lacustres, brechas volcánicas andesíticas, tobas cineríticas líticas, tobas de lapilli soldadas y basaltos de olivino.
- Formación Pucalume (Aptiano - Cenomaniano): Secuencia continental compuesta por conglomerados de grano medio, areniscas muy gruesas, calizas y limolitas carbonatadas.
- Estratos de Quebrada La Totorá (Albiano superior - Turoniano): Secuencia sedimentaria continental. De base a techo se compone de: a) Brechas piroclásticas líticas en parte tufitas; b) Conglomerados monomícticos y fragmentos andesíticos ocoíticos; c) Areniscas calcáreas lacustres, lutitas y tobas intercaladas; d) Conglomerados tobáceos pardos rojizos y areniscas de guijarro.

- Formación Viñita (Turoniano - Campaniano?): Secuencia volcánica continental compuesta por andesitas y andesitas basálticas de anfíbola y piroxeno con intercalaciones de tobas de lapilli y brechas piroclásticas.
- Formación Los Elquinos (Campaniano - Maastrichtiano): Secuencia volcano-sedimentaria continental compuesta por areniscas de guijarros, conglomerados, tufitas, tobas cineríticas líticas con intercalaciones de lavas andesíticas y calizas lacustres.
- Estratos de Quebrada Yungay (Maastrichtiano): Secuencia volcánica continental compuesta por tobas dacíticas soldadas vítreas de cristales.

Neógeno

- Formación Confluencia (Mioceno - Pleistoceno): Depósitos continentales de gravas gruesas polimícticas con matriz de arena que forman terrazas altas, brechas poco consolidadas polimícticas con matriz de arena que forman conos aluvionales, los que son colados por depósitos aluviales recientes.

Cuaternario

- Sedimentos glaciales y fluvio-glaciales: Depósitos morrénicos, glaciares de roca, escombros crionivales y sedimentos morrénicos retrabajados por agua.
- Depósitos fluviales, aluviales y coluviales (Pleistoceno-Holoceno), compuestos por gravas y bloques angulosos, con matriz de arena y limo, no consolidados.

3.1.2 Rocas intrusivas

Paleozoico

- Superunidad Elqui:
 - Unidad Guanta (Carbonífero?): Tonalitas, granodioritas y dioritas cuarcíferas de grano grueso con hornblenda y biotita.
 - Unidad Cochiguás (Carbonífero?): Granodioritas y granitos de biotita y/o muscovita, de grano grueso.

- Unidad El Volcán (Carbonífero?): Granodioritas y granitos de biotita leucocráticos de grano grueso.
- Superunidad Ingaguás:
 - Unidad El León (Pérmico - Triásico): Monzogranitos leucocráticos rosados de grano medio con biotita y hornblenda subordinada.

Triásico

- Complejo Plutónico Altos de Talinay (213 - 207 Ma): Principalmente, rocas de falla con relaciones de contacto y afloramientos de aspecto intrusivo. Presenta tres facies: facies melanocráticas de protolito diorítico compuesto por cataclasitas, milonitas, dioritas y monzodioritas cataclásticas y dioritas-monzodioritas con cataclasis leve; facies leucocráticas de protolito granitoide: monzogranito de biotita cataclástico, cataclasitas y sienogranitos; facies de apariencia agmática: rocas cataclásticas de protolito diorítico y milonitas.

Jurásico

- Intrusivos monzodioríticos - granodioríticos (164 - 151 Ma): Monzodiorita cuarcífera de anfíbola-piroxeno-biotita, granodiorita de biotita-piroxeno-anfíbola y granodiorita leucocrática de anfíbola. Presenta sectores con rocas cataclásticas y sectores con rocas miloníticas.
- Intrusivos dioríticos (151 - 143 Ma): Monzodioritas cuarcíferas de anfíbola-piroxeno y de piroxeno-biotita, diorita cuarcífera de piroxeno-biotita-anfíbola y pórfido monzodiorítico cuarcífero de anfíbola-piroxeno-biotita.

Cretácico Inferior

- Intrusivos graníticos a dioríticos (122 - 110 Ma) Constituyen plutones de variadas dimensiones en el lado oriental de la Falla Romeral. Se compone de dioritas de piroxeno, de anfíbola y de piroxeno-anfíbola, monzodioritas de anfíbola-biotita, de anfíbola-piroxeno-biotita, de anfíbola-piroxeno y monzogranitos de anfíbola-biotita.

Cretácico Superior Temprano

- Intrusivos hipabisales andesíticos a dacíticos (63 - 76 Ma): Compuestos por pórfidos andesíticos de piroxeno, andesitas de anfíbola y pórfidos dioríticos de piroxeno y olivino.

Cretácico Superior Tardío

- Diorita Pichasca: Dioritas de anfíbola-piroxeno.
- Monzodiorita El Pedregoso: Monzodioritas cuarcíferas de anfíbola-biotita.

Cenozoico

- Granodiorita Rapelcillo (Paleoceno): Granodioritas y facies subordinadas de granitos de grano medio de biotita-anfíbola y anfíbola de piroxeno.
- Monzogranito Loma Colorada (Eoceno): Monzogranitos y en menor cantidad granodioritas de biotita.
- Diorita Nuevitos (Paleoceno): Dioritas y dioritas cuarcíferas de grano fino a medio de anfíbola y biotita, y granodioritas de anfíbola y biotita.
- Monzogranito El Bosque (Eoceno): Monzogranitos de biotita y granodioritas de biotita-anfíbola y piroxeno.
- Granodiorita Guatulame (Eoceno): Granodioritas de grano medio de biotita-anfíbola y facies ocasionales de granito de biotita.
- Diorita Campanario (Eoceno): Dioritas de grano medio de anfíbola-piroxeno, y pórfidos granodioríticos y dacíticos de anfíbola-piroxeno.
- Diorita Morro Blanco (Eoceno): Dioritas, dioritas cuarcíferas y tonalitas de grano fino de anfíbola-biotita.
- Diorita El Venado (Eoceno): Dioritas cuarcíferas a tonalitas de grano medio.
- Superunidad Cogotí
 - Unidad Fredes (Paleoceno - Eoceno): Granodioritas y monzogranitos de grano medio a grueso, incluye monzodioritas cuarcíferas y dioritas.
- Superunidad Río Grande

- Unidad El Maitén - Junquillar (Terciario): Dioritas y gabros de hornblenda de grano fino, dioritas cuarcíferas y pórfidos.
- Unidad Bocatoma (Oligoceno inferior): Granodioritas, tonalitas y dioritas cuarcíferas de grano medio con hornblenda y biotita.
- Unidad Río de las Cuevas (Oligoceno - Mioceno?): Principalmente monzogranitos leucocráticos de grano medio a grueso y monzonitas con monzodioritas subordinadas.
- Unidad Infiernillo (Terciario): Dioritas cuarcíferas de grano medio a fino, granodioritas, tonalitas y pórfidos andesíticos subordinados, y granodioritas leucocráticas.

3.1.3 Rocas metamórficas

Paleozoico

- Complejo Metamórfico del Choapa (Devónico - Carbonífero): Metasedimentitas y metabasita compuestas por esquistos de actinolita, clorita y plagioclasa color verde (metabasitas), esquistos de cuarzo, epidota y biotita (metaturbiditas), y filitas de biotita, muscovita, anfíbola, cuarzo y epidota (metapelitas).

3.2 Zonas con alteración hidrotermal

Las zonas de alteración hidrotermal están ligadas principalmente al emplazamiento de cuerpos intrusivos cretácicos y terciarios. Se distribuyen principalmente en el sector central y oriental de la cuenca en forma de franjas con rumbo norte-sur, de las cuales la más occidental se relaciona con la intrusión cretácica y la oriental con la terciaria (Figuras 3.1 y 3.2). Asociadas a estas áreas de alteración hidrotermal se presentan gran parte de los yacimientos de cobre, oro, cobalto, plomo-zinc, baritina y alunita (Figuras 3.3 y 3.4).

3.3 Estructuras principales

En el sector occidental de la cuenca se presenta un sistema de fallas con rumbo NNE a NE (Figura 3.1) que afectan principalmente a las rocas paleozoicas, triásicas y jurásicas

del área, manifestándose primordialmente como fallas transcurrentes y normales. Como consecuencia de este sistema de fallas, existen plegamientos locales de escaso desarrollo, los cuales afectan a las secuencias estratificadas y metamórficas, de edad paleozoica a cenozoica (Figura 3.1). De este sistema, las que se encuentran hacia el este corresponden a fallas normales que forman un límite entre las serranías costeras (complejo Altos de Talinay) y la parte central de la cuenca (Figura 3.1). Este límite, sin embargo, no está bien definido ya que se encuentra cubierto por sedimentos cenozoicos.

En el sector central de la cuenca existen numerosas fallas locales con rumbo preferencial NNE a NE de desarrollo local. La mayoría se encuentran cubiertas y son inferidas (Figura 3.1). Afectan principalmente rocas cretácicas y terciarias. La mayoría de los yacimientos de la cuenca corresponden a vetas mineralizadas asociadas a estas fallas.

En el sector oriental se presentan las fallas de mayor desarrollo, tienen rumbo general NS (Figura 3.1). Este sistema de fallas, reactivado durante la última etapa del Ciclo Andino, ha controlado el emplazamiento longitudinal de los intrusivos cretácicos y terciarios. La estructura de plegamiento principal del área es una estructura sinclinal, que afecta a las rocas estratificadas mesozoicas y cenozoicas. Este sinclinal tiene un rumbo general norte sur y su ala oriental se presenta mucho más inclinada que la occidental (Ulriksen, 1990).

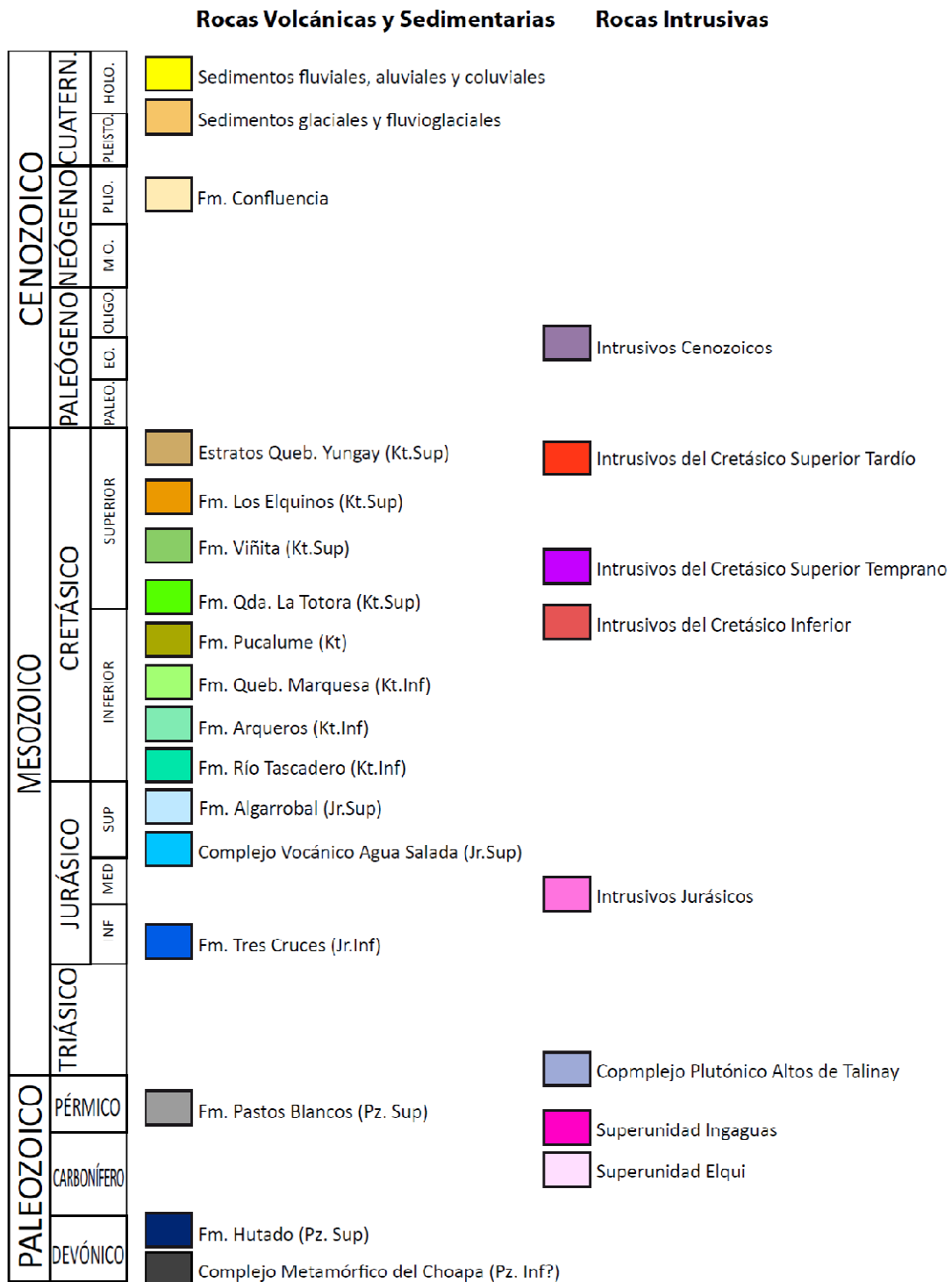


Figura 3.2: Leyenda mapa geológico. Adaptado de las cartas geológicas de Chile (SERNAGEOMIN): Hoja Ovalle (1967), Hoja Illapel (1991), Hoja Pisco - Elqui (1998), Hoja Andacollo - Puerto Aldea (2006), Hoja Vicuña - Pichasca (2006), Hoja Monte Patria (2008).

3.4 Yacimientos minerales

3.4.1 Yacimientos metálicos

La mineralización de la cuenca se manifiesta principalmente a lo largo de tres franjas metalogénicas de orientación norte-sur (Maksaev, 2001):

- Franja Metalogénica del Cretácico Inferior (Cu - Fe - Au - Ag): Conjunto de depósitos metalíferos ubicados a lo largo de la Cordillera de la Costa (Figura 3.3). Estos incluyen algunos pórfidos cupríferos, la mayoría subeconómicos, y yacimientos de Fe (magnetita - apatito) con indicios menores de mineralización de cobre y oro. Los depósitos ferríferos están dentro del dominio del segmento meridional del Sistema Falla de Atacama. A lo largo de la cordillera de la costa existe un gran número de vetas auríferas mesotermales que carecen de importancia económica, pero algunos distritos como Mantos de Punitaqui (Figura 1.2) se encontraban en explotación hasta hace poco.
- Franja Metalogénica del Cretácico Superior (Au - Cu - Ag): Corresponde a una franja distribuida en la parte media del país. Incluye vetas mesotermales a epitermales de oro - plata - cobre (Figura 3.3).
- Franja Metalogénica del Neógeno (Au - Ag -Cu): Es la franja metalogénica más oriental, se extiende por la Alta Cordillera en límite con Bolivia y Argentina. Esta franja incluye otro grupo de pórfidos cupríferos, depósitos epitermales de metales preciosos y numerosos prospectos (Figura 3.3).

Morfológicamente, la mineralización se presenta en forma de vetas (principalmente Cu, Au y Fe), mantos (Cu y Mn), cuerpos irregulares, brechas, placeres (Au), stock-works (Cu y Mo) y diseminados (Cu y Mo).

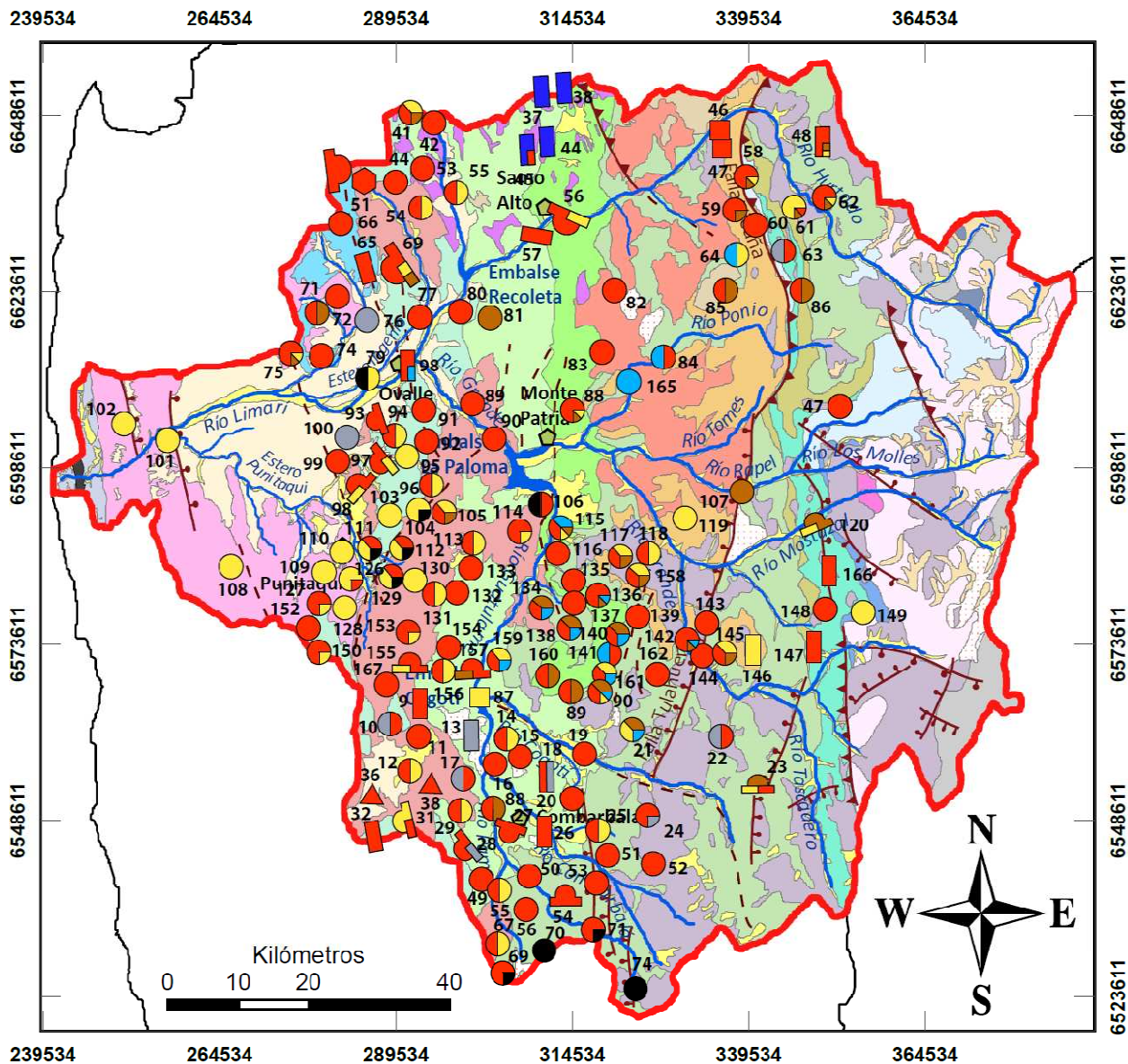
Descripción de Yacimientos (Ulriksen, 1990)

- COBRE: Son los más numerosos (Figura 3.3), se dividen en tres grupos: macizos mineralizados, vetiformes y mantiformes:
 - Yacimientos en macizos mineralizados tipo pórfido: se relaciona con las zonas de alteración hidrotermal resultante de las fases intrusivas del Cretácico

Superior y del Terciario Inferior. La mineralización consiste en cuerpos tipo stock-works con mineralización diseminada de Cu-Mo (Figura 3.3). Existen pocos indicios de enriquecimiento secundario, por lo que la explotación se enfoca en la mineralización primaria de sulfuros. Se destacan 9 yacimientos: Andacollo, Churque, Los Pelambres, Cerro Loica, El Sauce, Tres Cruces, Sotaquí, Pangué y Granilla.

- Yacimientos mantiformes: Probable origen singenético. Se alojan principalmente en rocas clásticas, calcáreas, volcánicas y rocas córneas del Cretácico Inferior y en andesitas y rocas volcanoclásticas del Cretácico Medio y Superior. La mineralización consiste en sulfuros de Cu (calcopirita, bornita, y calcosina, en algunos casos acompañada de Au, Fe y Mo) (Figura 3.3).
- Yacimientos vetiformes: Son los más comunes en el área de estudio. Desde el punto de vista genético son epigenéticos hidrotermales. Respecto a su morfología corresponden a veas de fisura y fallas mineralizadas en prácticamente todos los tipos de rocas de la cuenca. La mineralización principal consiste en pirita, calcopirita y especularita, y en algunos casos bornita (Figura 3.3).
- ORO: Estos representan el segundo tipo de yacimientos más numerosos y de mayor distribución (Figura 3.3). Existen de dos tipos: los yacimientos primarios hidrotermales y los placeres auríferos:
 - Yacimientos auríferos hidrotermales: Corresponden a vetas que se encuentran en rocas intrusivas y estratificadas del Cretácico y en la región costera en rocas metamórficas Paleozoicas (Figura 3.3). La asociación mineralógica característica de estos depósitos es oro metálico, calcopirita, pirita, especularita, blenda, galena, cuarzo, calcita y tetraedrita.
 - Yacimientos tipo placeres: En estos yacimientos el oro se encuentra finamente diseminado acompañado frecuentemente con minerales pesados como la magnetita, pirita, zircón, granate y anfíbola. La mayor concentración de estos minerales se produce en placeres litorales, cuyos materiales constitutivos provienen de la disgregación de las rocas metamórficas paleozoicas (Figura 3.3).

- **HIERRO:** Se distribuyen en vetas hidrotermales, yacimientos de contacto, yacimientos de origen volcano-sedimentario y yacimientos de arena de mar, por lo general de baja ley. Se emplazan en una franja norte sur principalmente entre las rocas volcánicas del Cretácico Inferior y las rocas metamórficas Paleozoicas (Figura 3.3). El mineral dominante es magnetita, con cierta oxidación a hematita.
- **MANGANESO:** Los yacimientos de manganeso se presentan en forma de mantos en la franja sedimentaria del Cretácico Medio (Figura 3.3). Los yacimientos más importantes pertenecen a los distritos de La Liga, El Arrayán, Corral Quemado y Fragua (Figura 1.2). Las asociaciones mineralógicas en estos yacimientos son: braunita, pirolusita, magnetita, psilomelano y hausmanita, con ganga de calcita, hematita, cuarzo, feldespato y clorita.
- **PLOMO y ZINC:** Estos yacimientos se ubican principalmente en la precordillera, al este de los 71°00' W. los yacimientos se distribuyen en la franja de alteración hidrotermal del Terciario Superior (Figura 3.3), presentando una relación espacial con los pórfidos de cobre y por ende con la franja de intrusivos Terciarios, lo que sugiere una génesis común, con una zonación desde centros de más intensa mineralización (yacimientos cupríferos) a una posición periférica, de menor mineralización de Pb-Zn. Respecto a la morfología, corresponden a vetas y mantos.
- **MERCURIO:** Corresponden a yacimientos vetiformes hidrotermales y se distribuyen en la franja de alteración hidrotermal del Cretácico Superior (Figura 3.3). Están asociadas a fallas de pequeña magnitud, salvo las del distrito Punitaqui (Figura 1.2), que tienen carácter regional. La mineralización consiste en tetraedrita mercurial, cinabrio, calcopirita y ganga de baritina, calcita, cuarzo y pirita.
- **MOLIBDENO:** El Mo se obtiene como subproducto de la minería del Cu en los yacimientos tipo pórfido (Figura 3.3).



Simbología

- Capital comunal
- Limite cuenca Río Limarí
- Ríos y esteros principales
- Falla inversa
- Falla normal
- Falla cubierta o inferida

Elemento

- Oro
- Cobre
- Plata
- Hg-W-U-Sn-Sb
- Plomo - Zinc
- Hierro
- Manganeso

Forma del Yacimiento

- Vetiforme
- Irregular, bolsón
- Chimenea de brecha
- Stockwork
- Estratiforme
- Estratiforme - Vetiforme

Figura 3.3: Distribución de yacimientos metálicos en la cuenca del Limarí. Los códigos que acompañan a cada yacimiento, se detallan en los Anexos E1 a E4. Mapa adaptado del Mapa Metalogénico de Chile entre los 18° y 34° S - Boletín 42 (Ulriksen, 1990).

3.4.2 Yacimientos no-metálicos

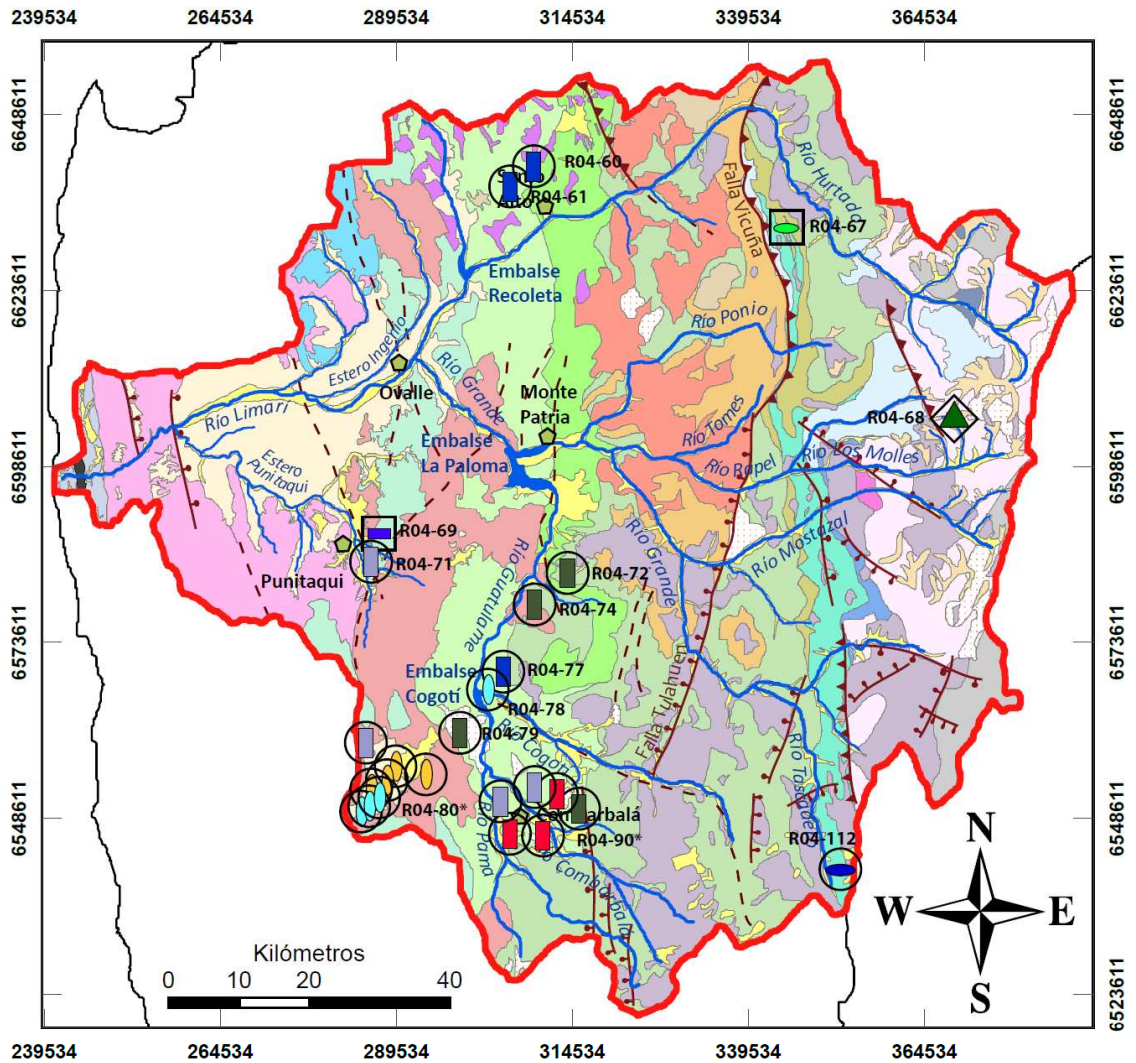
En la cuenca de Limarí existen rocas y minerales industriales distribuidos en numerosos yacimientos (Figura 3.4). Estos yacimientos se encuentran en explotación permanente o esporádica (o nunca explotados pero de interés geológico y tecnológico) (Gajardo, et. al., 2004).

Descripción de los yacimientos:

- **ALUNITA:** Los yacimientos de alunita se distribuyen en la precordillera regional (Figura 3.4). Comprenden cuerpos irregulares y vetiformes que han sido originados en procesos de alteración hidrotermal argílica avanzada, relacionada con la intrusión de cuerpos plutónicos del Cretácico Superior, Superunidad Illapel, y del Terciario Inferior, Superunidad Cogotí en rocas volcánicas de la Formación Quebrada Marquesa.
- **ARIDOS:** Los yacimientos de áridos corresponden fundamentalmente a depósitos fluviales y aluviales del Cuaternario, localizados, principalmente, en terrazas aluviales y cauces actuales del Río Limarí (Figura 3.4).
- **AZUFRE:** Los yacimientos de azufre se localizan en la Cordillera de los Andes, y están genética y espacialmente relacionados con la actividad volcánica del Terciario Superior-Cuaternario (Figura 3.4). Consisten en mantos y cuerpos irregulares que prácticamente no han sido explotados, debido a sus bajas leyes y ubicación desfavorable.
- **BARITINA:** Los yacimientos de baritina consisten en cuerpos vetiformes, distribuidos principalmente en la Cordillera de la Costa y precordillera regional (Figura 3.4). Están genética y espacialmente relacionados con procesos de alteración hidrotermal, generados por plutones del Cretácico Superior (Superunidad Illapel) en rocas volcánico-sedimentarias de la Formación Quebrada Marquesa.
- **CALIZA:** Los yacimientos de mayor interés del Cretácico Inferior se relacionan con las intercalaciones sedimentarias de la Formación Arqueros (Figura 3.4).
- **CAOLIN:** Los yacimientos de caolín se distribuyen en la precordillera entre Guatulame y Combarbalá (Figura 3.4). Comprenden cuerpos vetiformes y bolsones

irregulares, resultantes de procesos de alteración hidrotermal argílica, generados por plutones del Cretácico Superior, Superunidad Illapel, en secuencias volcánico-sedimentarias del Cretácico Inferior, especialmente las Formaciones Arqueros y Quebrada Marquesa.

- **CARBONATO DE CALCIO BLANCO:** Los yacimientos de carbonato de calcio blanco constituyen cuerpos estratiformes de hasta 10 m de potencia, que han sido generados, principalmente, por metamorfismo de contacto, producido por la intrusión de plutones de composición granítica y granodiorítica, del Cretácico Superior en rocas calcáreas de alta ley de la Formación Arqueros (Figura 3.4).
- **COMBARBALITA:** Los yacimientos de combarbalita se distribuyen, principalmente, en los alrededores de la localidad de Combarbalá (Figura 3.4). Consisten en cuerpos irregulares y vetiformes, encajados en rocas volcánicas de la Formación Quebrada Marquesa y han sido generados por procesos de alteración hidrotermal, resultantes de la intrusión de plutones graníticos del Cretácico Superior, Superunidad Illapel, o del Terciario Inferior, Superunidad Cogotí.
- **CUARZO:** Los yacimientos de cuarzo se localizan en el sector de Quilitapia. Corresponden a cuerpos pegmatíticos, de formas tabulares e irregulares, que se emplazan en rocas plutónicas, principalmente del Jurásico (Superunidad Mincha) y del Cretácico Superior (Superunidad Illapel) (Figura 3.4).
- **FELDESPATO:** Los principales yacimientos de feldespato se localizan tanto en el sector de Quilitapia, al norte de Combarbalá (Figura 3.4). Corresponden a cuerpos pegmatíticos, de tipo irregular y tabular, emplazados en plutones de edad principalmente cretácica superior (Superunidad Illapel) y jurásica (Superunidad Mincha).
- **LAPISLAZULI:** El único yacimiento de lapislázuli existente en Chile se ubica en la Cordillera de los Andes, al sureste de Ovalle (Figura 3.4). Consiste en lentes y bandas emplazadas en calizas de la Formación Río Tascadero. Esta unidad ha sido afectada por metamorfismo termal y subsecuente alteración hidrotermal, debido a la intrusión de un plutón perteneciente a la Superunidad Río Grande.



Simbología

- Capital comunal
- Límite cuenca Río Limarí
- Ríos y esteros principales
- Falla inversa
- Falla normal
- Falla cubierta o inferida

Forma de yacimientos:

- Estratiforme
- Estratiforme y/o irregular
- Vetiforme y/o irregular

Yacimientos según proceso genético:

Pegmatítico

- Cuarzo
- Feldespato

Metamórfico

- Carbonato de Calcio Blanco
- Lapislázuli

Sedimentario

- Caliza

Alteración Hidrotermal

- Alunita
- Baritina
- Caolín
- Combarbalita

Volcánico

- Azufre

Figura 3.4: Distribución de yacimientos no-metálicos en la cuenca del Limarí. Adaptado de: Yacimientos de rocas y minerales industriales de la IV región (Gajardo, 2004). Coordenadas en UTM. Los códigos que acompañan a cada yacimiento, se detallan en el Anexo E5.

4 Resultados

4.1 Control de calidad de datos

No se pudo determinar el error total asociado a la medición de Ag, Be, Bi, Se, Tl ya que las muestras duplicadas presentaban más del 50 % de los valores bajo el límite de detección. Por otro lado, se observó que los elementos Sn, U, Th, W presentaron un error total muy alto (24,5 %, 27,01 %, 44,25 y 70,89 %, respectivamente), por lo que no se analizó en detalle su comportamiento, sin embargo, sí se indicó su existencia cuando la medición fue muy alta (el resultado podría ser corroborado por la mineralogía).

Los valores de límite de detección (ppm), resolución (ppm) y error (%), asociado a cada elemento se exponen a continuación en la Tabla 4.1. Los elementos analizados están ordenados según su porcentaje de error en orden creciente:

Elemento	Unidad	Límite detección	Resolución	% error	Elemento	Unidad	Límite detección	Resolución	% error
CaO	%	0,01	0,01	<0,01	Lu	ppm	0,01	0,01	1,84
As	ppm	0,5	0,1	0,01	Sm	ppm	0,05	0,01	2,14
Fe ₂ O ₃	%	0,04	0,01	0,01	Dy	ppm	0,05	0,01	2,22
Mo	ppm	0,1	0,1	0,03	Hf	ppm	0,1	0,1	2,25
SiO ₂	%	0,01	0,01	0,03	Ce	ppm	0,1	0,1	2,36
Cu	ppm	0,1	0,1	0,03	Tb	ppm	0,01	0,01	2,38
TOTAL C	%	0,02	0,01	0,03	Hg	ppm	0,01	0,01	2,78
MgO	%	0,01	0,01	0,03	Y	ppm	0,1	0,1	2,80
Na ₂ O	%	0,01	0,01	0,06	Ga	ppm	0,5	0,1	2,96
Al ₂ O ₃	%	0,01	0,01	0,06	Cr ₂ O ₃	%	0,002	0,001	3,08
K ₂ O	%	0,01	0,01	0,09	Ni	ppm	0,1	0,1	3,10
Zn	ppm	1	1	0,12	La	ppm	0,1	0,1	3,22
TOTAL S	%	0,02	0,01	0,16	Er	ppm	0,03	0,01	3,65
MnO	%	0,01	0,01	0,20	Zr	ppm	0,1	0,1	3,77
Sc	ppm	1	1	0,24	Tm	ppm	0,01	0,01	4,39
V	ppm	8	1	0,30	Ho	ppm	0,02	0,01	4,83
Cd	ppm	0,1	0,1	0,35	P ₂ O ₅	%	0,01	0,01	5,07
Eu	ppm	0,02	0,01	0,43	Sb	ppm	0,1	0,1	6,79
Co	ppm	0,2	0,1	0,46	Au	ppb	0,5	0,1	6,88
Sr	ppm	0,5	0,1	0,48	Ta	ppm	0,1	0,1	9,07
Ba	ppm	1	1	0,58	Sn	ppm	1	1	24,50
Rb	ppm	0,1	0,1	0,63	U	ppm	0,1	0,1	27,01
TiO ₂	%	0,01	0,01	0,77	Th	ppm	0,2	0,1	44,26
Cs	ppm	0,1	0,1	0,86	W	ppm	0,5	0,1	70,89
Pb	ppm	0,1	0,1	1,42	Ag	ppm	0,1	0,1	-
Nd	ppm	0,3	0,1	1,49	Be	ppm	1	1	-
Pr	ppm	0,02	0,01	1,58	Bi	ppm	0,1	0,1	-
Yb	ppm	0,05	0,01	1,76	Se	ppm	0,5	0,1	-
Nb	ppm	0,1	0,1	1,79	Tl	ppm	0,1	0,1	-
Gd	ppm	0,05	0,01	1,81					

Tabla 4.1: Límite de detección, resolución y % de error asociado a la medición de cada elemento. Se destaca en rojo aquellos elementos con un % de error superior al 10 % (criterio de corte).

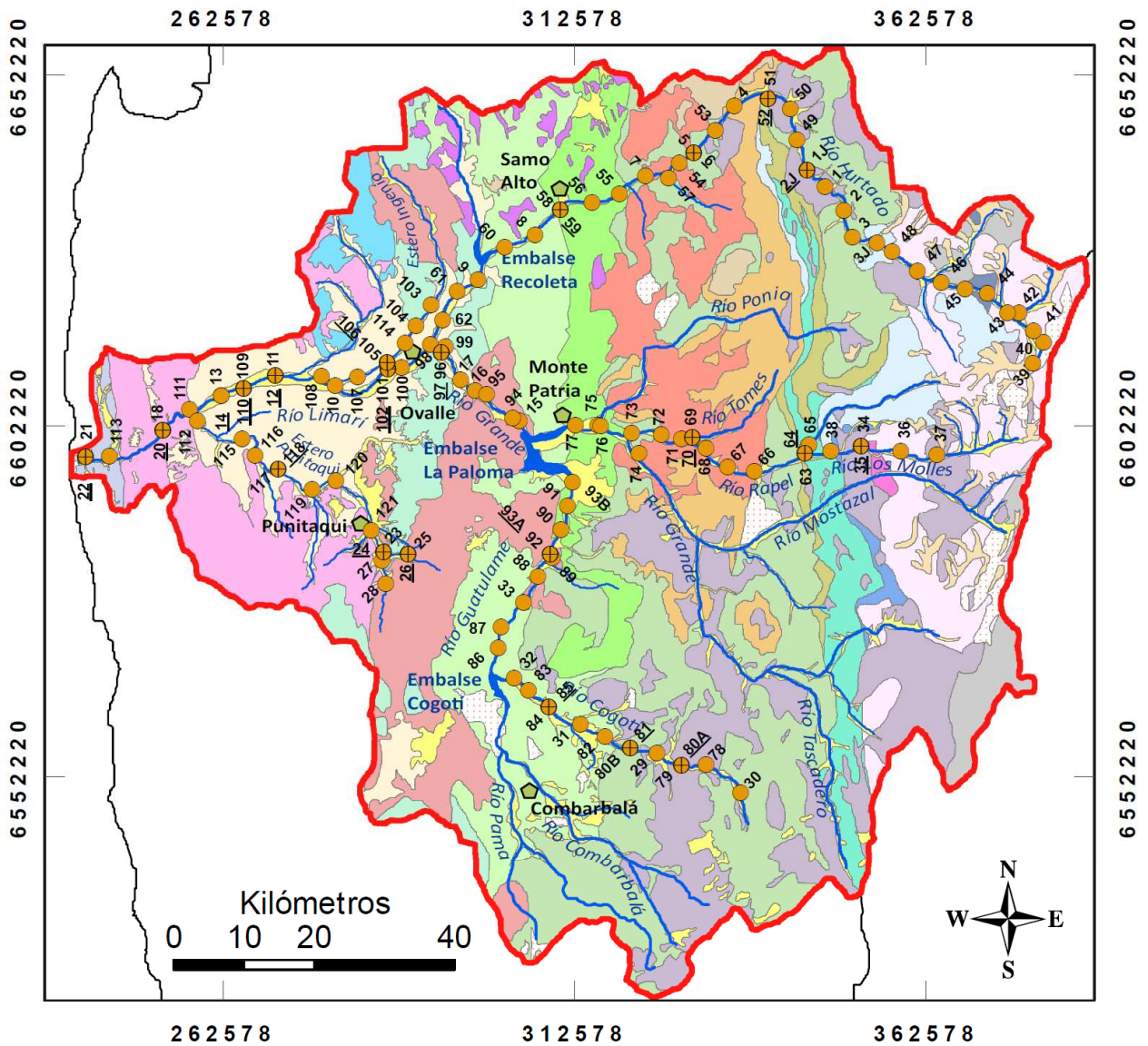
4.2 Gráficos univariantes de variación geográfica

A continuación se describirá el comportamiento de la señal química de los elementos (Figuras 4.2 a 4.18), analizados a lo largo de los tres ejes en que fue recorrida la cuenca (Figura 1.2): 1) Eje norte: Ríos Limarí-Hurtado y los Esteros Ingenio y Punitaqui; 2) Eje centro: Ríos Grande-Rapel-Los Molles; 3) Eje sur: Ríos Guatulame-Cogotí.

En forma complementaria a éste análisis, se marcó la ubicación geográfica de cada muestra recolectada sobre el mapa geológico de la cuenca (Figura 4.1), haciendo posible una correlación más precisa entre geología y geoquímica.

En el Capítulo 2 (Metodología), se mencionó que la cuenca fue subdividida, según sus características geológicas, en tres franjas con orientación norte-sur. Los antecedentes presentados en el Capítulo 3 (Marco geológico), permitieron describir estas tres franjas geológicas de la siguiente manera:

- Zona I: Parte baja de la cuenca (franja occidental) constituida principalmente por depósitos sedimentarios continentales neógenos (Fm. Confluencia) y cuaternarios (depósitos fluviales y de terrazas aluviales) que se encuentran sobre unidades graníticas jurásicas y del cretácico inferior. También forma parte de la Zona I la franja de rocas ubicada en el extremo oeste de la cuenca, constituida por rocas metamórficas paleozoicas (esquistos, filitas y gneiss) e intrusivos triásicos (Complejo plutónico Altos de Talinay).
- Zona II: Parte intermedia de la cuenca (franja central) constituida por formaciones volcánicas (cretácicas) ácidas e intermedias, con intercalaciones sedimentarias clásticas continentales, intruidas por cuerpos graníticos cretácicos y cenozoicos.
- Zona III: Parte alta de la cuenca (franja oriental), conformada por formaciones marinas (paleozoicas) y volcano-continentales ácidas a intermedias (paleozoicas), intruidas por cuerpos graníticos paleozoicos, que a su vez son intruidas por granitos cenozoicos formando amplias zonas de alteración hidrotermal del tipo argílica y argílica avanzada hacia el extremo oriental.



Simbología






-  Capital comunal
-  Límite cuenca Río Limari
-  Ríos y esteros principales
-  Muestras de sedimentos activos
-  Muestras de sedimentos pre-industriales

Figura 4.1: Ubicación de muestras recolectadas. El número que acompaña a la muestra corresponde al su código identificador. El código de los sedimentos pre-industriales se encuentra subrayado para diferenciarlos de sedimentos activos cuando se superponen. Las coordenadas del mapa están expresadas en UTM.

4.2.1 Eje norte: Río Limarí - Hurtado

Las aguas del curso superior del Río Hurtado fluyen sobre rocas definidas anteriormente como "Zona III". En este sector, los sedimentos se destacan por presentar las mayores concentraciones (respecto a los demás sedimentos de la cuenca) de HREE, Y, Co, Ni, Se, Bi, Tl, Cu, As, Be, U, MnO, Mo, Zn, Cd, Sn (Figuras 4.4, 4.5 y 4.6). Adicionalmente los sedimentos de la parte alta del Río Hurtado, se caracterizan por presentar relativamente altas concentraciones de LREE, K₂O, Rb, Cs, Sb (Figuras 4.3 y 4.8), y también por valores elevados, pero no exclusivos (valores similares también se observan en el curso inferior del Río Limarí) de Fe₂O₃, Total S, Ag y Au (Figuras 4.6 y 4.8).

El nacimiento del Río Hurtado se compone de numerosos cursos de agua que escurren a través de pequeñas quebradas que presentan alteración hidrotermal (Figura 3.1). En particular la muestra la muestra 40, fue recolectada de una quebrada sin nombre que comunica con el paso fronterizo "Paso de la Coipita" ("Quebrada Paso de la Coipita"). Los resultados obtenidos de esta muestra, revelan que los sedimentos de la Quebrada Paso de la Coipita, presentan una alta carga de Fe₂O₃ (~42 %), As, Total S, Ag y Sb. También presenta valores superiores al promedio (pero no tan elevados) de Pb, Cs, Se, Bi, Tl, Cu, Mo, Sn y Au (Figuras 4.3, 4.4, 4.5, 4.6 y 4.8). Concordantemente, aguas abajo de la Quebrada Paso de la Coipita, se observa un marcado incremento en las concentraciones de Cu, Mo, Fe₂O₃, Total S, Sb, Ag, Au y Tl en los sedimentos del Río Hurtado.

Entre la Quebrada Paso de la Coipita y el límite entre las zonas II y III, los sedimentos del Río Hurtado presentan una marcada tendencia ascendente en las concentraciones de Cu, Zn, Cd, Ni, W, Mo, MnO y Co (Figuras 4.4, 4.5 y 4.6), alcanzando sus valores máximos unos pocos kilómetros antes del cambio geológico (cambio de Zona III a Zona II). Posteriormente, al ingresar en la Zona II, se observa un abrupto descenso en las concentraciones de los elementos mencionados. En aproximadamente 10 km las concentraciones de todos estos elementos recuperan valores "normales" (valores dentro del promedio de la cuenca). Por otro lado, en el mismo sector, las

concentraciones de Rb, K₂O, REE, Y, Se, Bi, Tl, As, Be, U, Sn, Total S y Sb, tienen una tendencia descendente (Figuras 4.3, 4.4, 4.5, 4.6 y 4.8), y alcanzan valores "normales" al mismo tiempo que los elementos que tenían una tendencia ascendente.

En el tramo recién descrito, el Cu, As, Zn y Cd superan varias veces el nivel máximo establecido por el parámetro PEC, y el Ni lo alcanza en dos ocasiones sin superarlo.

Entre la muestra 1J (Zona II) y el Embalse Recoleta, las concentraciones de la mayoría de los elementos se mantienen relativamente constantes y con valores cercanos al promedio. Una excepción corresponde a un fuerte aumento en Pb y un aumento menor en Sb detectados inmediatamente aguas abajo de la confluencia con el Río Chacay (Figuras 4.3 y 4.8). También se observa un leve aumento en las concentraciones de CaO, Total C en las últimas muestras aguas arriba del Embalse Recoleta (aproximadamente 5 a 6 km aguas arriba) (Figura 4.7).

Por lo general la mayoría de los elementos mantienen una concentración cercana al promedio tanto aguas arriba como aguas abajo del Embalse Recoleta. Sin embargo se reconocen algunas leves variaciones inmediatamente aguas abajo de éste: leve aumento en las concentraciones de P₂O₅, MgO, Sc, Ga, Al₂O₃, SiO₂, LREE, MnO, Fe₂O₃, V, Au, Ba, K₂O, Rb, destacándose los tres últimos elementos listados (Figuras 4.2, 4.3, 4.5, 4.6 y 4.8); marcada disminución en la concentración de Pb, CaO y Total C (Figuras 4.3 y 4.7); y leve disminución de Cs, Se, Cd y Total S (Figuras 4.3, 4.4, 4.6 y 4.8).

Posteriormente, entre el Embalse Recoleta y la confluencia con el Río Grande, los patrones geoquímicos tienden a acercarse a los valores promedios de la cuenca, aumentando o disminuyendo su concentración levemente en cada caso.

En la confluencia del Río Hurtado con el Río Grande, el río cambia de nombre a Río Limarí, y entra en la zona definida anteriormente como "Zona I".

Desde el inicio del Limarí hasta la confluencia con el Estero Ingenio, en su mayoría presenta concentraciones que varían en torno al promedio. Sin embargo algunos

elementos presentan cambios un poco más notorios, por ejemplo, inmediatamente luego de la confluencia con el Río Grande, se manifiesta un aumento de Pb (que disminuye rápidamente), LREE, Sn, Hf, Zr, Fe₂O₃, V, Cr₂O₃, TiO₂, Nb, Ta (Figuras 4.3, 4.6 y 4.7). Y aproximadamente 6 km aguas abajo de dicha confluencia (a la altura de la ciudad de Ovalle), se observa un aumento de P₂O₅, Total S, Ag y Au (Figuras 4.2 y 4.8).

Entre el Estero Ingenio y el Estero Punitaqui la señal geoquímica del Río Limarí tiene un comportamiento irregular. Las gráficas manifiestan un patrón zigzagueante con cambios bruscos en las concentraciones entre muestras consecutivas, pasando de valores cercanos al promedio a valores muy bajos de Sc, Na₂O, Ga, Al₂O₃, SiO₂, K₂O, Rb, LREE, HREE, Y, Co, Be, Cr₂O₃, TiO₂, Nb, Ta, Sn, Hf, Zr, Fe₂O₃, V (Figuras 4.2, 4.3, 4.4 y 4.6); y pasando de valores cercanos al promedio a valores altos de Se, Sr, CaO, Total C, Total S (Figuras 4.4, 4.7 y 4.8). Estos grupos dos grupos, tienen un comportamiento especular, es decir, cuando aumenta la concentración de uno, disminuye la del otro.

En esta parte de la cuenca (Zona I) fueron recolectadas numerosas muestras pre-industriales procedentes de terrazas fluviales laterales adyacentes al cauce principal. Las concentraciones que entregan estas muestras no manifiestan el mismo comportamiento que se observa en los sedimentos activos (zigzagueante), sino que presentan una tendencia relativamente "plana" con valores cercanos al promedio en la mayoría de los casos (Figuras 4.2, 4.3, 4.4, 4.5, 4.6, 4.7, y 4.8).

Se observa un aumento en las concentraciones de Sc, Ga, LREE, Th, Sn, Cr₂O₃, TiO₂, Nb, Ta aguas abajo de la confluencia con el Estero Ingenio (Figuras 4.2, 4.3, 4.6 y 4.7).

Se observa también que los sedimentos del Estero Punitaqui no tienen mayor influencia sobre los del Río Limarí. La señal geoquímica procedente del estero se ve rápidamente disuelta aguas abajo de la confluencia (Figuras 4.2, 4.3, 4.4, 4.5, 4.6, 4.7 y 4.8).

Un rasgo destacable de la parte inferior de la cuenca del Limarí ("Zona I") son las altas concentraciones de Sr, CaO, Total C y P₂O₅ (Figuras 4.2 y 4.7). Y en particular en la zona de los Altos del Talinay, altas concentraciones de MgO, Sc, Cr₂O₃, TiO₂, Nb, Ta, Hf, Zr, Fe₂O₃, V, Total S (Figuras 4.2, 4.3 y 4.6).

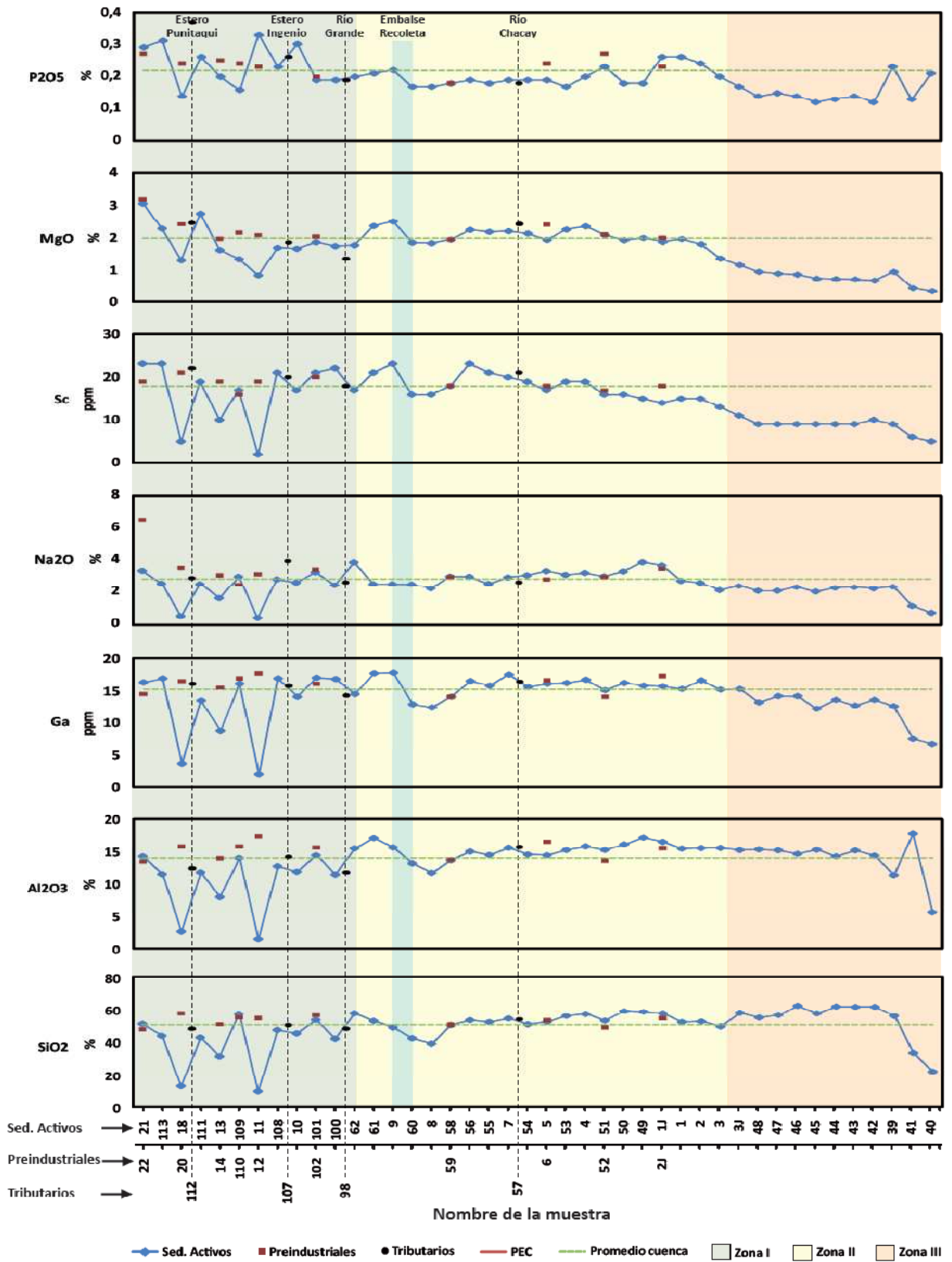


Figura 4.2: Eje Norte (A), Ríos Limarí - Hurtado.

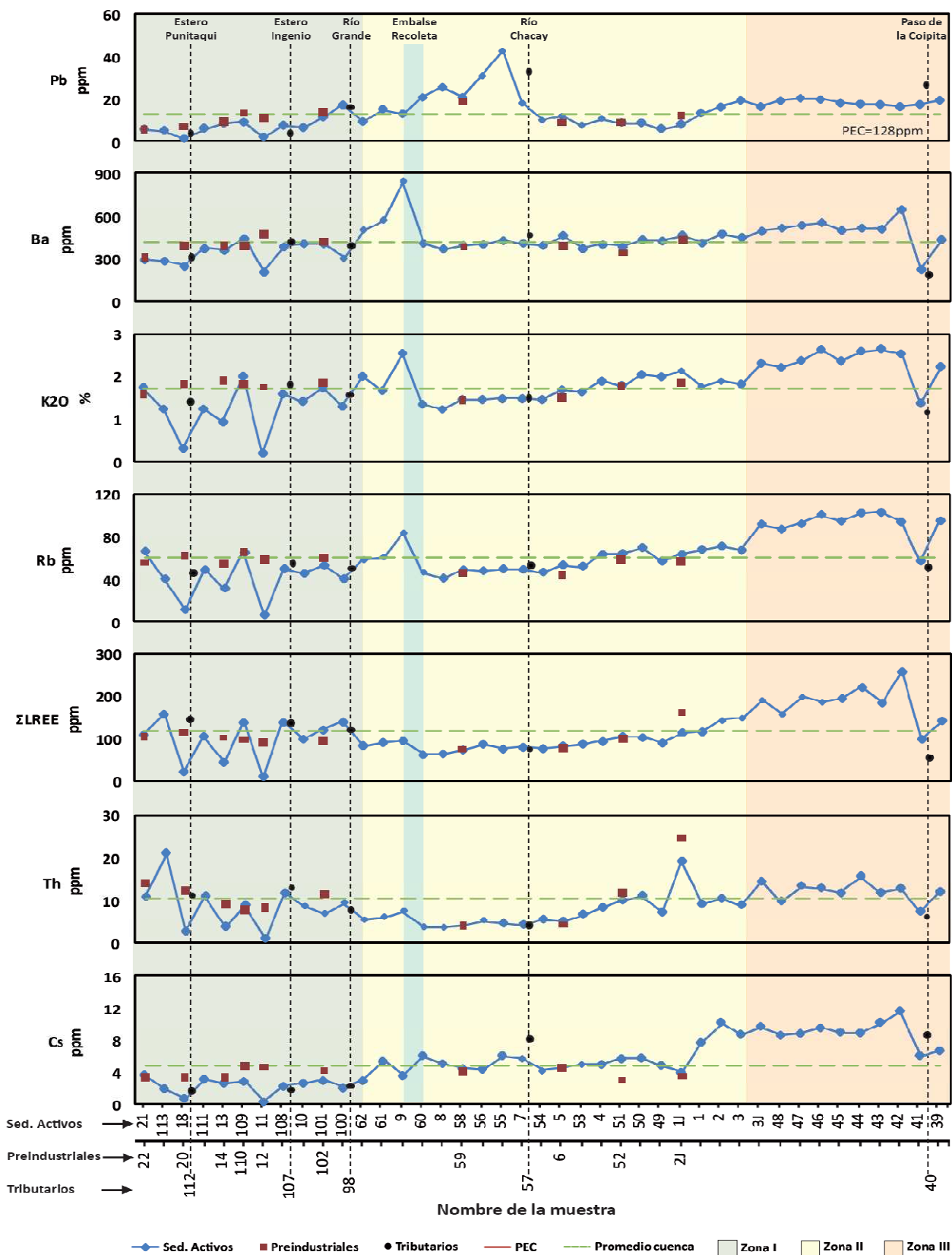


Figura 4.3: Eje Norte (B), Ríos Limarí - Hurtado.

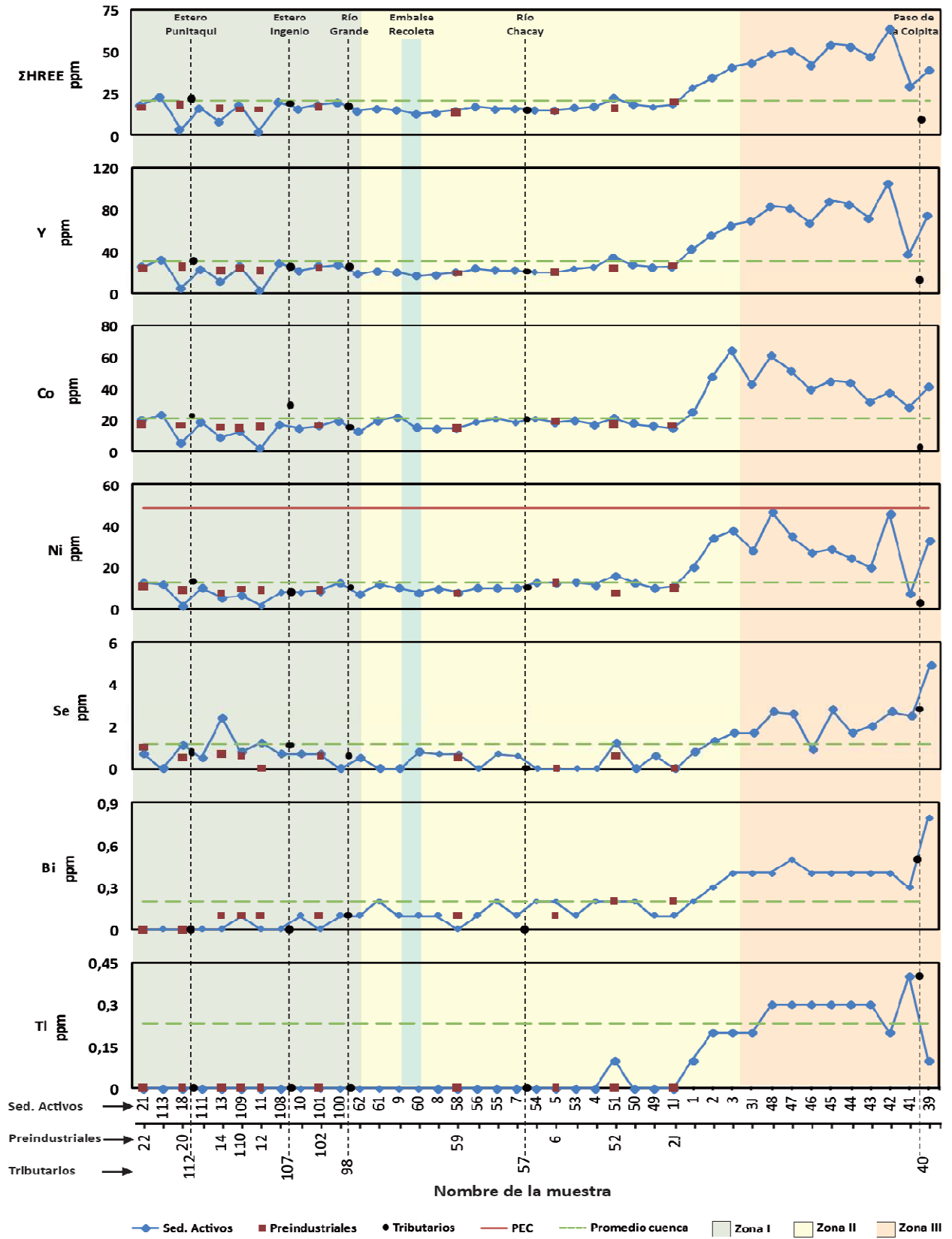


Figura 4.4: Eje Norte (C), Ríos Limarí - Hurtado.

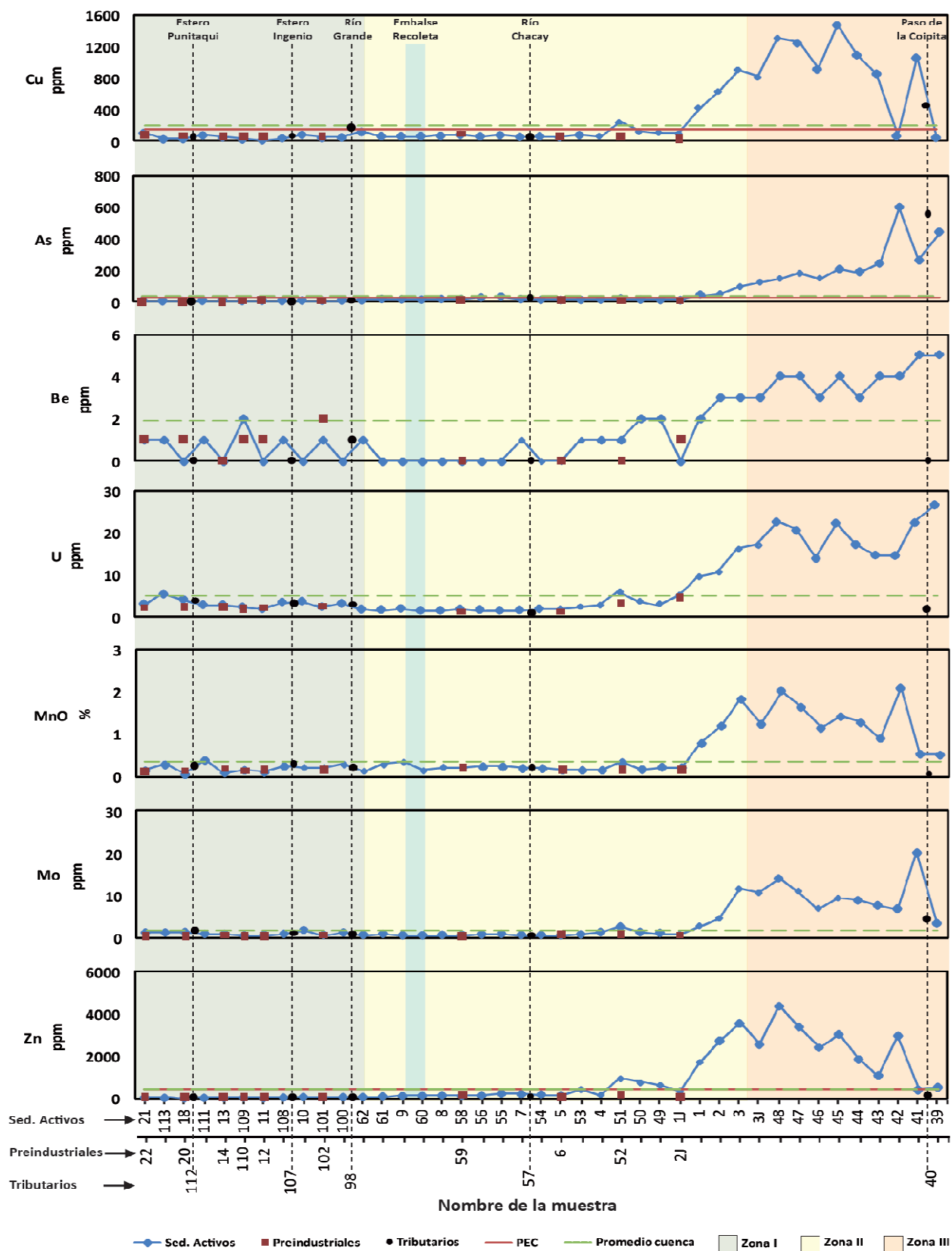


Figura 4.5: Eje Norte (D), Ríos Limarí - Hurtado.

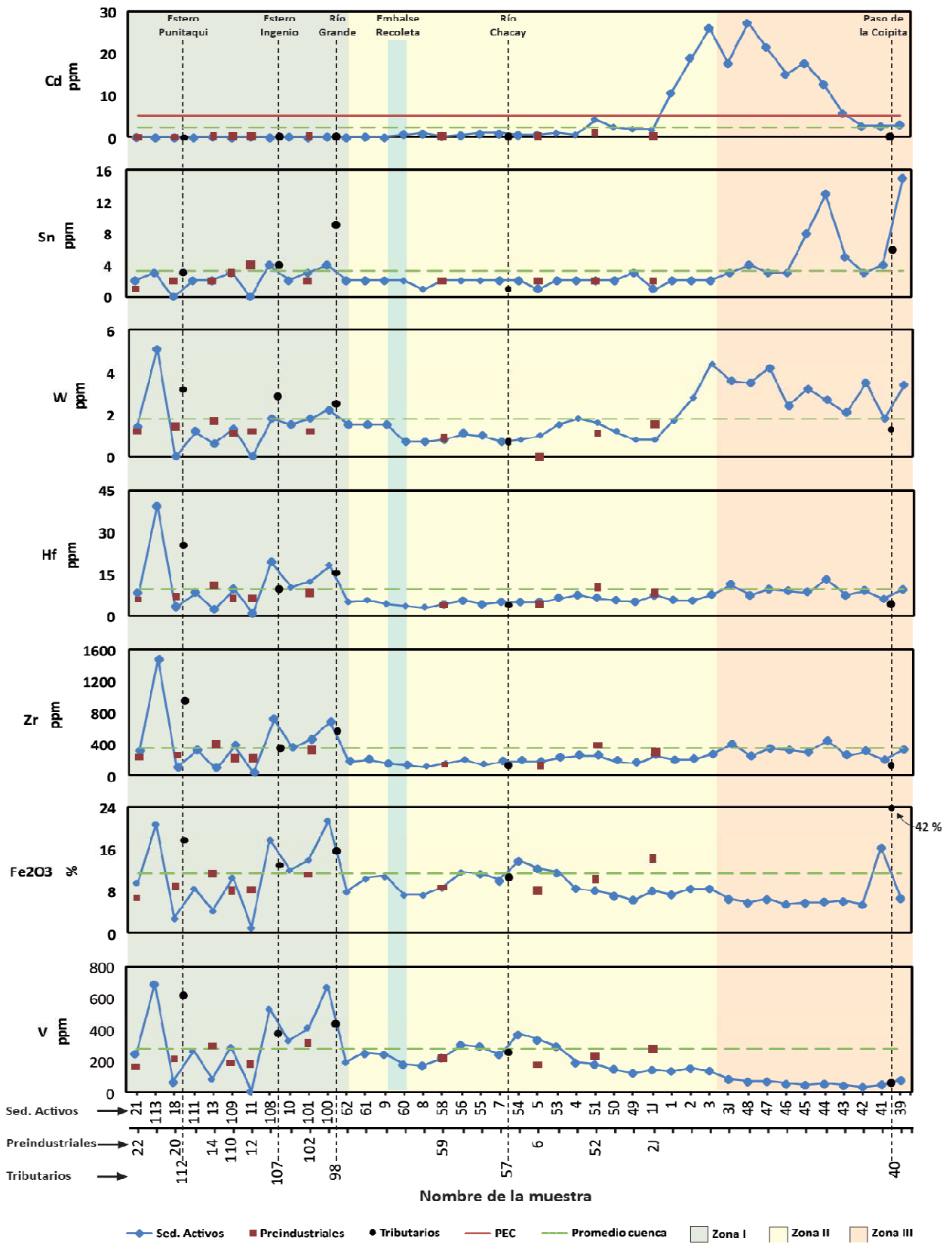


Figura 4.6: Eje Norte (E), Ríos Limarí - Hurtado.

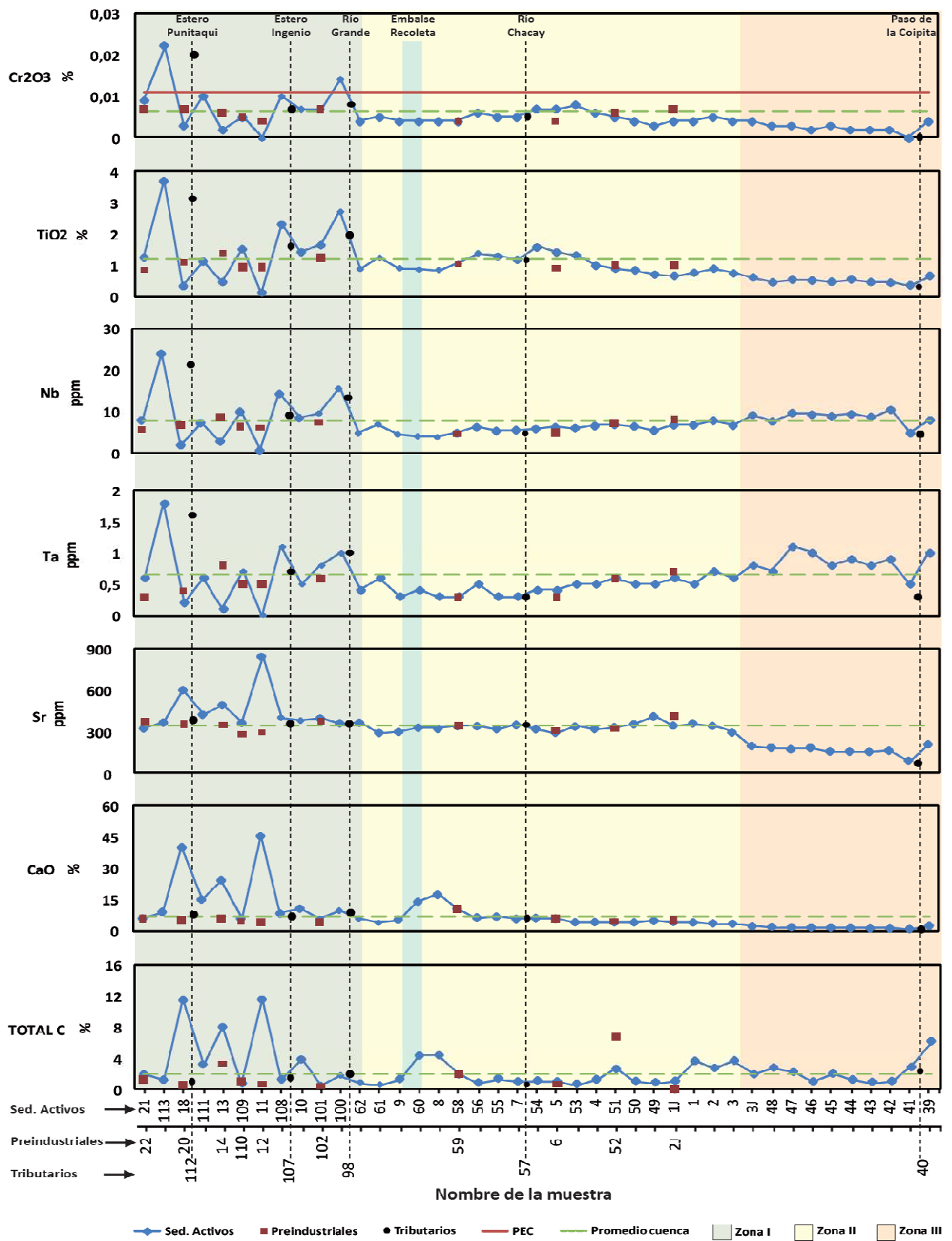


Figura 4.7: Eje Norte (F), Ríos Limarí - Hurtado.

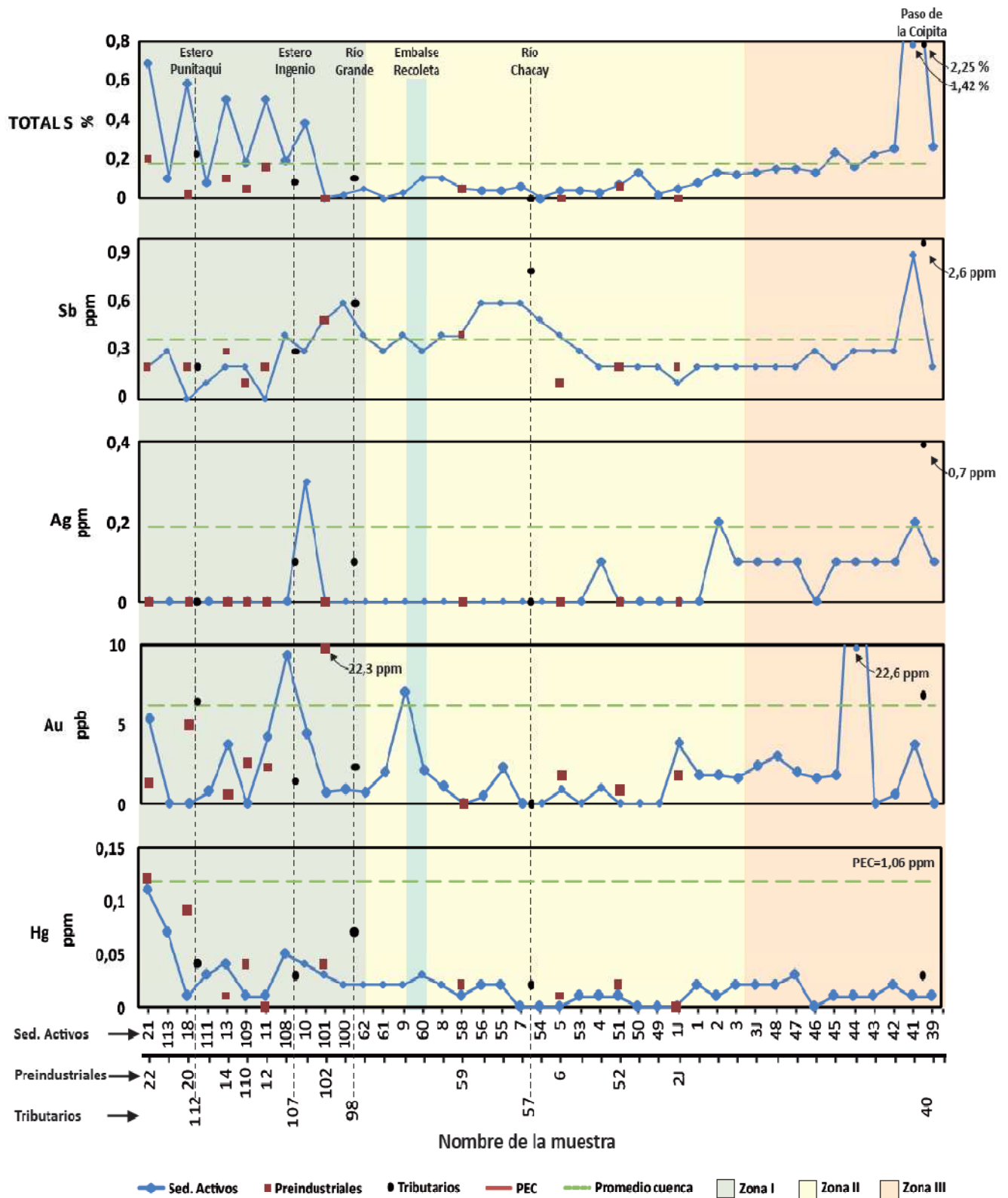


Figura 4.8: Eje Norte (G), Ríos Limarí - Hurtado.

4.2.2 Eje norte: Estero Ingenio

El Estero Ingenio es uno de los afluentes principales del curso medio del Río Limarí. La confluencia se encuentra a unos pocos kilómetros aguas abajo de la ciudad de Ovalle en una zona principalmente de carácter agrícola. Las aguas del Estero Ingenio drenan una sub-cuenca perteneciente a la "Zona I".

En la Figura 4.9, se presenta una selección de elementos, que manifiestan concentraciones alejados del promedio general de la cuenca, y que podrían afectar las concentraciones observadas en los sedimentos del Río Limarí.

Se puede observar un incremento en la concentración de Fe_2O_3 , Bi, Cu, Co, Ni, Sb, Ag, Au y Hg inmediatamente aguas abajo de la planta La Cocinera (Figura 4.9), pasando de concentraciones cercanas al promedio general, a concentraciones que llegan a triplicar la media, destacándose el caso del Cu que además supera el valor máximo medioambiental PEC. Con excepción del Fe_2O_3 y del Co, dichas concentraciones no se mantienen elevadas a lo largo del curso del estero, sino que disminuyen rápidamente a valores normales.

Otra característica observada, se manifiesta en el curso inferior del estero, unos pocos kilómetros antes de la confluencia con el Río Limarí. En esta zona, se produce un brusco incremento en las concentraciones de Sn, Hf, Zr, Fe_2O_3 , V, Cr_2O_3 , TiO_2 , Nb y Ta.

El incremento de las concentraciones de los elementos recién mencionados no se manifiesta en la muestra preindustrial recolectada en esa zona. Esta muestra se caracteriza por situarse levemente en un nivel inferior a la media de la cuenca (Figura 4.9).

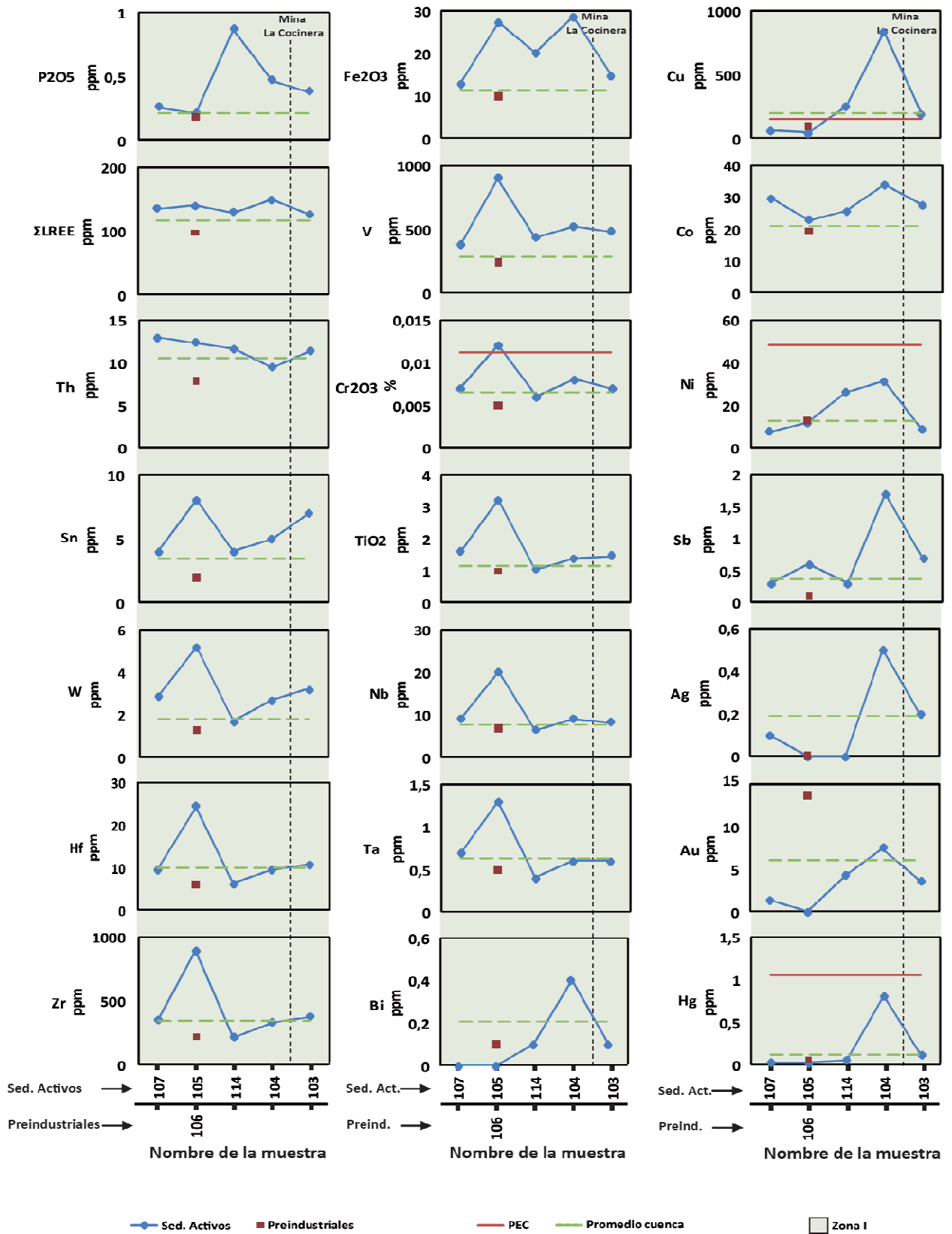


Figura 4.9: Eje Norte (H), Estero Ingenio.

4.2.3 Eje norte: Estero Punitaqui

Al igual que el caso del Estero Ingenio, el Estero Punitaqui se caracteriza por el desarrollo de la actividad minera en su curso superior. Destacándose la minería de larga data en la Quebrada Los Mantos, dedicada a la extracción de Au, Cu, Ag y Hg. El tramo inferior de esta sub-cuenca tiene un desarrollo principalmente del tipo agrícola-ganadero.

El Estero Punitaqui es el último afluente de importancia que tiene el Río Limarí. Su confluencia se encuentra en la parte baja de la cuenca justo antes de entrar a la franja montañosa costera denominada Altos de Talinay (Figura 1.2).

En la Figura 4.10, se muestra que el curso superior del Estero Punitaqui escurre sobre la denominada "Zona II", manifestando altos valores de Cu, Total S, Au y Hg.

La Quebrada Los Mantos (tributaria del Estero Punitaqui), también se ubica en la parte alta de esta sub-cuenca y drena directamente hacia el estero. En esta quebrada (Figura 1.2), fueron recolectadas muestras aguas abajo de tranques de relave pertenecientes a la ex mina Mantos de Punitaqui. Dichas muestras manifestaron los niveles más altos de toda la cuenca del Limarí en Au y Hg (123,4ppm y 5,2ppm respectivamente) y valores altos en Cu (335ppm). Las muestras recolectadas en esta quebrada sobrepasan al PEC tanto en Cu, como en Hg. Y en el caso del Hg se presenta con concentraciones aproximadamente 5 veces superiores al PEC.

Aguas abajo de la confluencia con la Quebrada Los Mantos (Figura 4.10), el Estero Punitaqui muestra un aumento principalmente en las concentraciones de Au y Hg, pero en concentraciones muy inferiores a las exhibidas en la quebrada. El Cu se mantiene con valores altos, pero no se observa una clara influencia por parte de la Quebrada Los Mantos.

El curso inferior del Estero Punitaqui (el cual escurre sobre la Fm. Confluencia) (Figura 4.10) presenta concentraciones muy bajas en Cu-Hg y concentraciones altas de P₂O₅ y Total C.

La señal geoquímica en el curso inferior de este estero (Figura 4.10) tiene un comportamiento similar al exhibido por el Río Limarí aguas abajo de la confluencia con el Estero Ingenio (Figura 4.9), manifestando un patrón con forma de "sierra" en donde las concentraciones de W, Hf, Zr, V, Cr₂O₃, TiO₂ y Nb se mueven en un amplio rango pasando de bajas concentraciones a concentraciones altas entre una muestra y otra, llegando a la confluencia con un valor alto. Además, las concentraciones de Sr, Total C y Total S, tienen un comportamiento especular (Figura 4.10) respecto a los elementos recién mencionados, llegando a la confluencia con un valor bajo o cercano a la media.

La muestra pre-industrial recolectada en el curso medio del estero (muestra 118, Figura 4.10), por lo general tiene concentraciones similares o inferiores que las que exhiben los sedimentos activos. Sin embargo, para el caso del Cu, Au y el Hg, las concentraciones son superiores a la media, e incluso son superiores a la correspondiente muestra de sedimento activo.

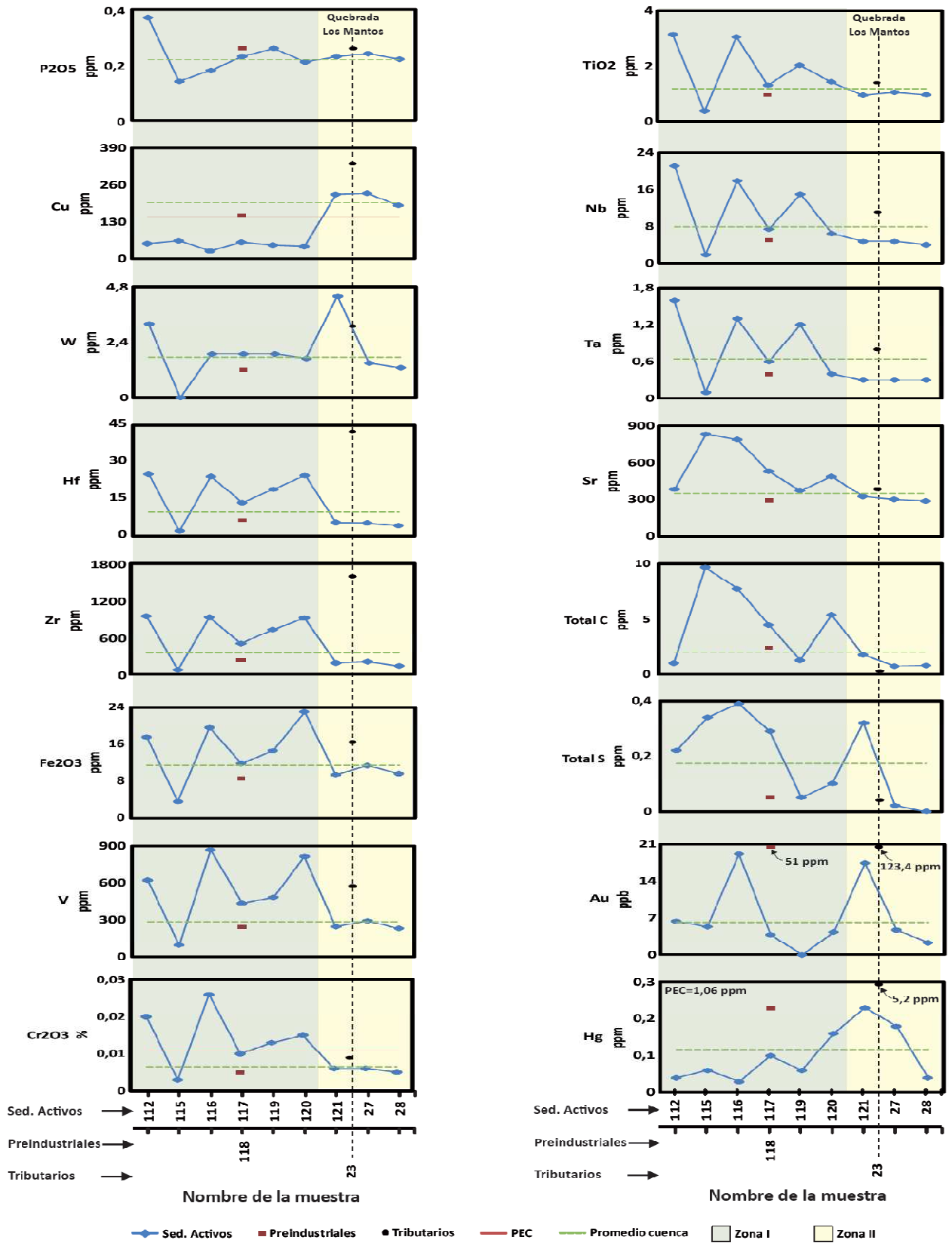


Figura 4.10: Eje Norte (I), Estero Punitaqui.

4.2.4 Eje Centro: Río Grande - Rapel - Los Molles

El eje central de la cuenca está compuesto por tres ríos que se van uniendo uno tras otro. Según la dirección de drenaje son: Río Los Molles - Río Rapel - Río Grande (Figura 1.2).

El Río Los Molles escurre desde la Cordillera de los Andes hasta la confluencia con el Río Palomo (Figura 1.2). En su totalidad fluye sobre la zona definida como "Zona III". La primera muestra, la que se ubica más hacia el este, manifiesta altas concentraciones de As, superiores al promedio de la cuenca y al PEC. También presenta altas concentraciones de Mo, Zn y Cd (Figuras 4.12 y 4.13). Las concentraciones de los elementos mencionados decaen rápidamente a valores normales en la siguiente muestra.

En la parte central del Río Los Molles se observa un pick en la señal (muestra 34), representada por los elementos: LREE, Th, HREE, Y, Se, Bi, As, Be, U, Sn, Hf, Zr, Nb y Ta (Figuras 4.11, 4.12 y 4.13).

En el Río Los molles se recolectaron 2 muestras pre-industriales las cuales exhiben valores concordantes a los de los sedimentos activos, con excepción del pick antes mencionado.

Del Río Palomo (tributario del Río Los Molles) (Figura 1.2), se recogió una muestra un par de kilómetros antes de la confluencia. Dicha muestra exhibe alta concentración en P_2O_5 , Cs, Ni, Se, Bi, Au (Figuras 4.11, 4.12, 4.14). Posteriormente, luego de la confluencia, en el Río Los Molles se manifiesta un significativo aumento en P_2O_5 , Ni, Au. Además también se observa que luego de la confluencia hay un fuerte aumento en As (superando el PEC, Tabla 2.2), Mo, Zn y Cd (Figuras 4.12 y 4.13).

Entre el Río Palomo (por el Este) y el Río Grande (por el Oeste), el Río Los Molles pasa a llamarse Río Rapel (Figura 1.2). En este tramo, el río fluye sobre lo que corresponde a la "Zona II" y presenta un río tributario de muy baja esorrentía en su curso medio (Río Tomes). La señal geoquímica por lo general tiene un aspecto relativamente plana con valores cercanos a la media. Se observa que antes de la confluencia con el Río Tomes

hay un leve aumento en las concentraciones de K_2O , Rb, Hf, Zr y Ag (Figuras 4.11, 4.13 y 4.14).

La muestra tomada del Río Tomes presenta valores muy similares a la de los sedimentos activos del Río Rapel. Sin embargo, aguas abajo de la confluencia se manifiesta un comportamiento muy irregular en el CaO, Total C y Total S (Figuras 4.13 y 4.14).

A continuación del Río Rapel, el muestreo continuó con los sedimentos fluviales del Río Grande. En forma previa, se recolectó una muestra del Río Grande antes de la confluencia con el Rapel. En los gráficos (Figuras 4.11, 4.12, 4.13 y 4.14) se observa que las concentraciones de dicha muestra presentan concentraciones en un rango muy cercano a la media de la cuenca.

El tramo del Río Grande que se ubica aguas arriba del Embalse La Paloma, presenta variaciones geoquímicas muy cercanas al promedio de la cuenca para la mayoría de los elementos. En este sector existe un río tributario de baja escorrentía: Río Ponio (Figura 1.2). Dicho río presenta valores por sobre la media en MgO, Cs y Pb (Figuras 4.11), sin embargo esos valores no repercuten en los sedimentos del Río Grande.

Inmediatamente aguas abajo del Embalse La Paloma, se observa un aumento (y posteriormente una rápida disminución) en las concentraciones de MgO, Ba, Sc, Cu, MnO, Mo, Sn, Au y Hg (Figuras 4.11, 4.12, 4.14). Por otra parte, los demás elementos no presentan mayores variaciones (o presentan leves disminuciones) entre un lado y el otro del embalse.

Entre el Embalse La Paloma y el tramo final del Río Grande, hay un curso de agua tributario muy débil: Quebrada Seca (Figura 1.2). La muestra tomada en Quebrada Seca presenta valores, por lo general, muy similares a los que se exponen el Río Grande.

Unos pocos kilómetros aguas abajo de la confluencia con la Quebrada Seca, el Río Grande ingresa en la "Zona I". En esta Zona se observa que la señal geoquímica toma

un aspecto de "sierra" manifestando abruptos cambios en las concentraciones entre muestras consecutivas, intercalando valores "normales" con valores bajos de Na_2O , Al_2O_3 , SiO_2 , K_2O , Rb, Total C y en forma inversa (especular) intercalando valores normales con valores altos de Co, Ni, Cu, Sn, Hf, Zr, Fe_2O_3 , V, Cr_2O_3 , TiO_2 , Nb, Ta, CaO (Figuras 4.11, 4.12 y 4.13).

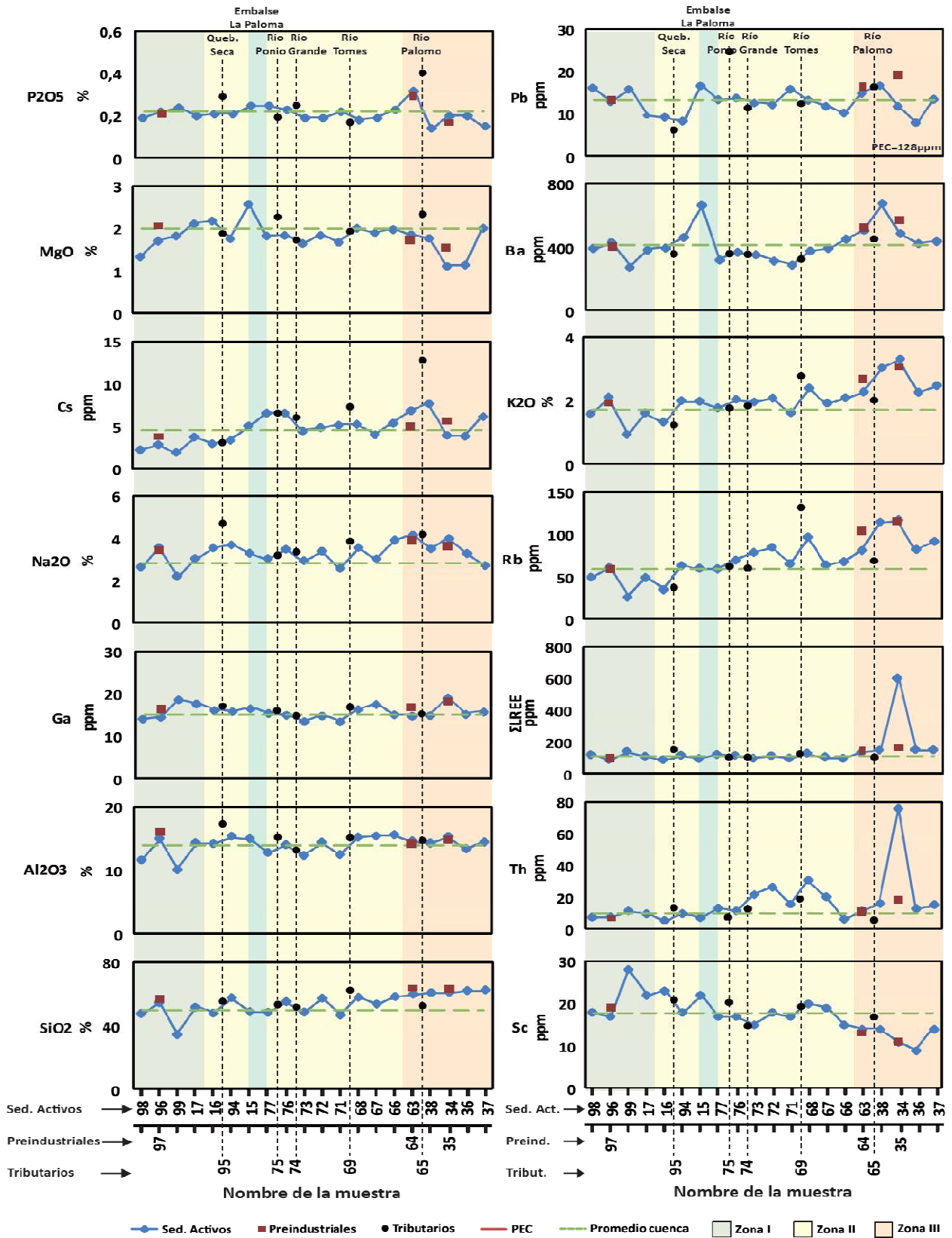


Figura 4.11: Eje Centro (A), Ríos Grande - Rapel - Los Molles.

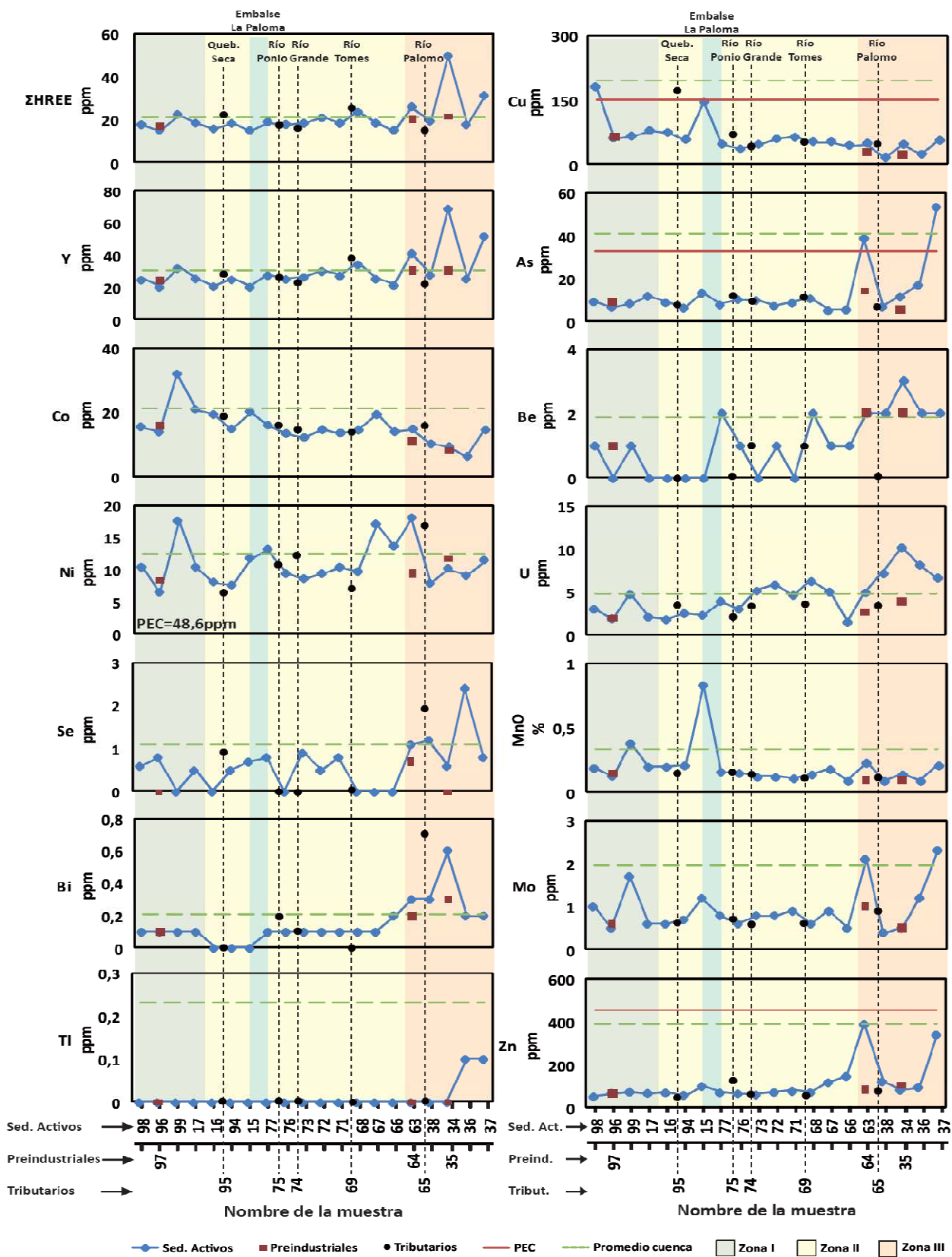


Figura 4.12: Eje Centro (B), Ríos Grande - Rapel - Los Molles.

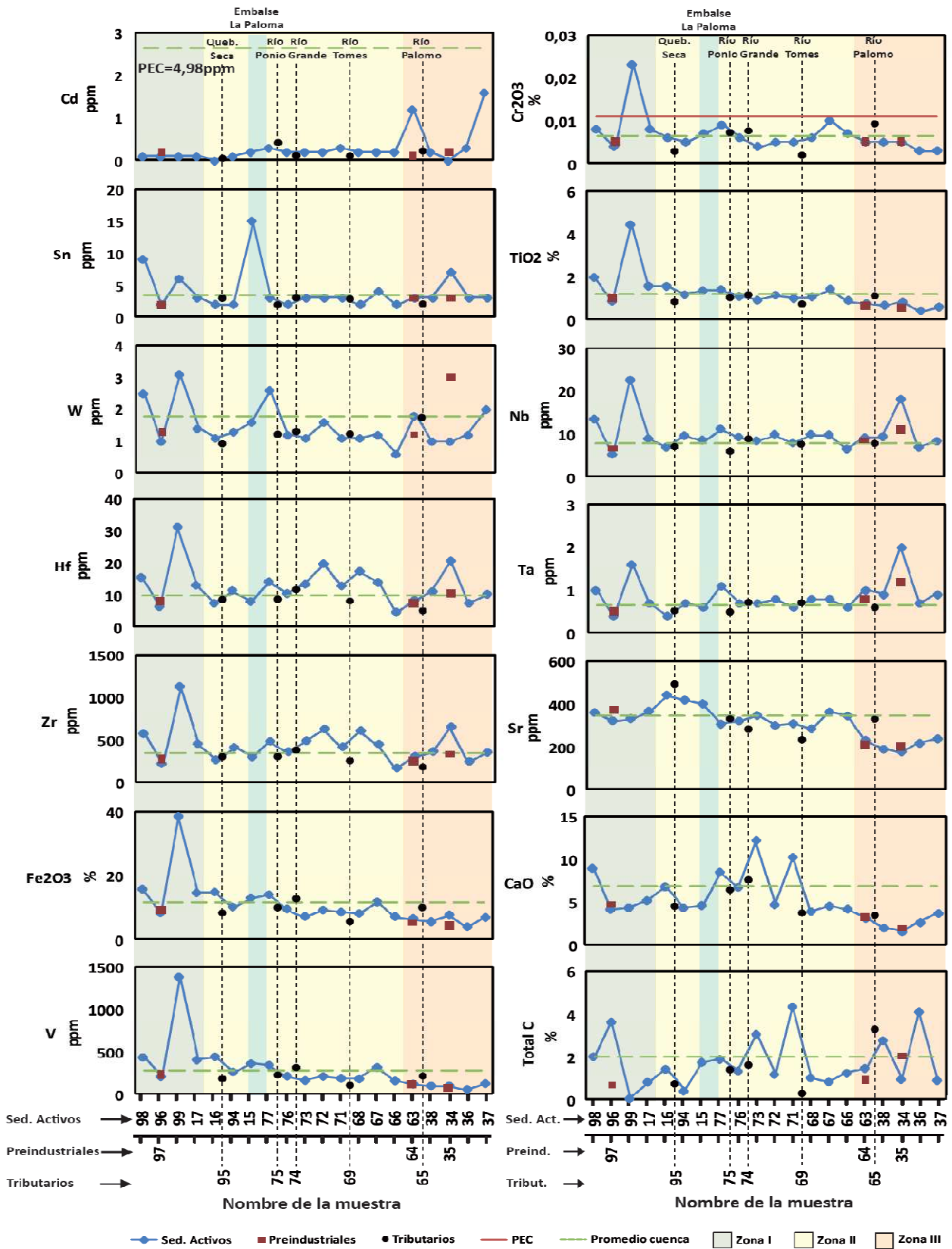


Figura 4.13: Eje Centro (C), Ríos Grande - Rapel - Los Molles.

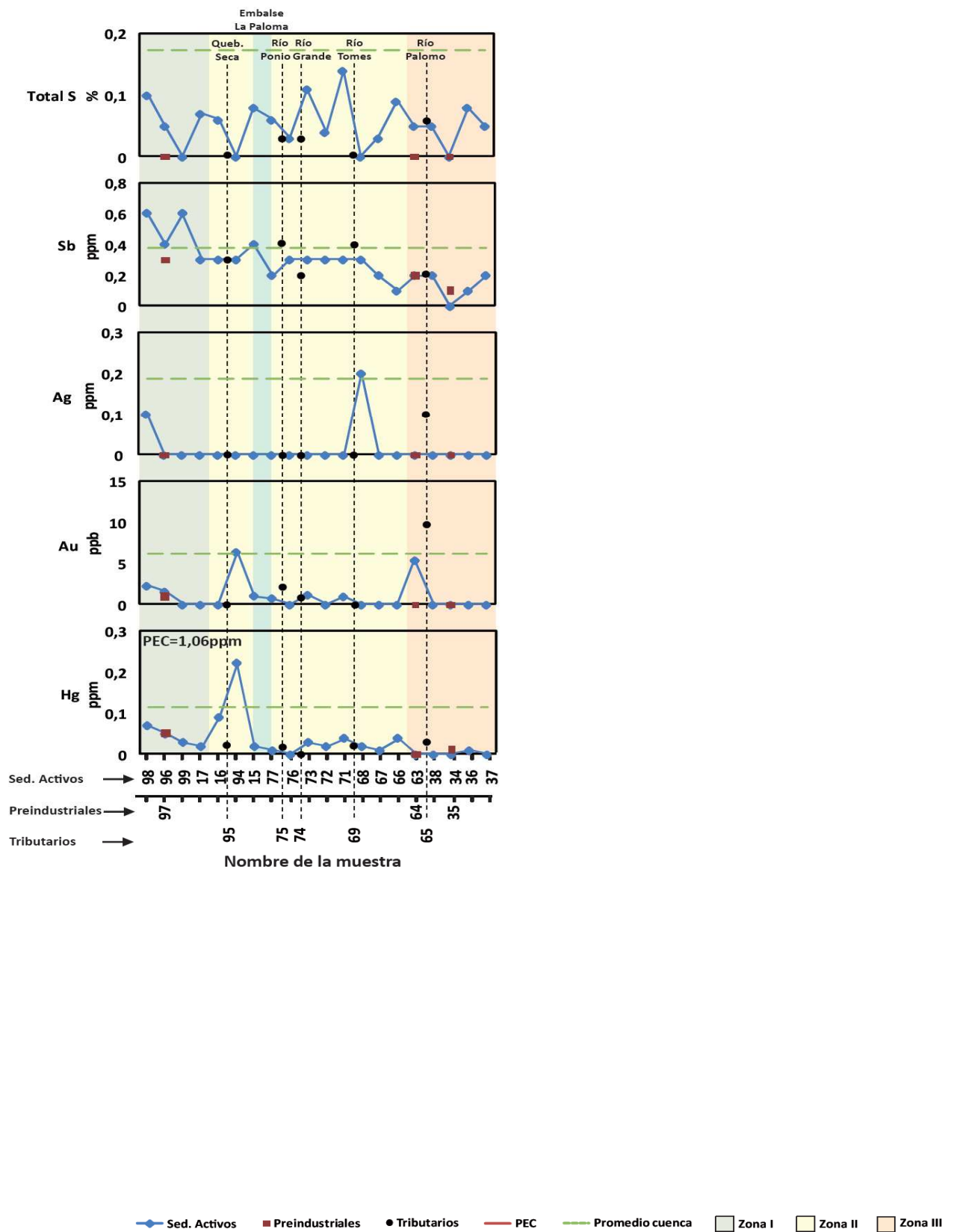


Figura 4.14: Eje Centro (D), Ríos Grande - Rapel - Los Molles.

4.2.5 Eje Sur: Río Guatulame - Cogotí

Tanto el Río Cogotí como el Guatulame se desarrollan sobre la denominada "Zona II". Se encuentran separados por el Embalse Cogotí y tiene una dirección de escorrentía diferente: el Río Cogotí lo hace este a oeste, mientras que el Guatulame lo hace de suroeste a noreste (Figura 1.2).

El Río Cogotí desde su nacimiento hasta el Embalse Cogotí, se caracteriza por presentar concentraciones muy bajas o cercanas a la media en la mayoría de los elementos (Figuras 4.16, 4.17 y 4.18). Los elementos que presentan concentraciones más altas corresponden a Pb y Sn (curso medio del Río Cogotí); Ba, Sb y Au (antes del Embalse Cogotí); y Total S (muestra más oriental) (Figuras 4.15, 4.17 y 4.18). El resto de los elementos siguen un patrón cercano a los valores medios. En cuanto a las muestras pre-industriales, éstas manifiestan concentraciones similares a las de los sedimentos activos actuales. Sin embargo en el caso del Pb y Sr las muestras pre-industriales muestran niveles más bajos que los actuales (Figuras 4.15 y 4.17). Y en el caso de la muestra pre-industrial 84 el Hf, Zr, Nb y Ta presentan valores más elevados que los actuales, sin embargo, en comparación con el resto de la cuenca, son valores inferiores al promedio (Figuras 4.15, 4.16 y 4.17).

Las muestras que se recolectaron directamente aguas abajo del Embalse Cogotí presentan un significativo aumento en las concentraciones (respecto a lo medido al otro lado del embalse) de P_2O_5 , LREE, Th, HREE, Y, U, W, Hf, Zr, Cr_2O_3 , Nb, Ta, Au y Hg (Figuras 4.15, 4.16, 4.17 y 4.18), pasando de concentraciones muy bajas a concentraciones dentro del promedio de la cuenca. Algunos elementos como el Co, Cu, MnO, Mo, W, Hf, Zr, Fe_2O_3 , V, Cr_2O_3 , TiO_2 , Ta y Hg, continuaron aumentando sus concentraciones aguas abajo, llegando en algunos casos, a valores mayores al promedio (Figuras 4.16, 4.17 y 4.18). Sin embargo, estas concentraciones disminuyen rápidamente a valores promedio antes de la confluencia con el Río Cárcamo.

Así como hay elementos que aumentaron su concentración al salir del Embalse Cogotí, también los hay los que disminuyeron: MgO, Pb, Cs, As, Sr y Sb (Figuras 4.15, 4.16, 4.17 y 4.18).

El Río Cárcamo (tributario del Río Guatulame) presenta concentraciones levemente superiores en Pb, Cs y Ag (Figuras 4.15 y 4.18), las cuales se ven reflejadas en los sedimentos del Río Guatulame mediante un aumento en las concentraciones de estos elementos (excepto Pb) inmediatamente aguas abajo de la confluencia. Posteriormente, de nuevo se observan concentraciones relativamente bajas en la mayoría de los elementos, con una señal geoquímica de aspecto "plano" o decreciente. En este tramo final del río, se recolectó también una muestra pre-industrial. Esta muestra tiene un comportamiento similar al manifestado por los sedimentos activos.

En cuanto al parámetro PEC en el Río Guatulame, éste se ve sobrepasado en Cu en el tramo ubicado entre el Embalse Cogotí y el Río Cárcamo (Figura 4.16). El Cu también sobrepasa el máximo PEC aguas abajo de la confluencia con el Río Cárcamo (Figura 4.16).

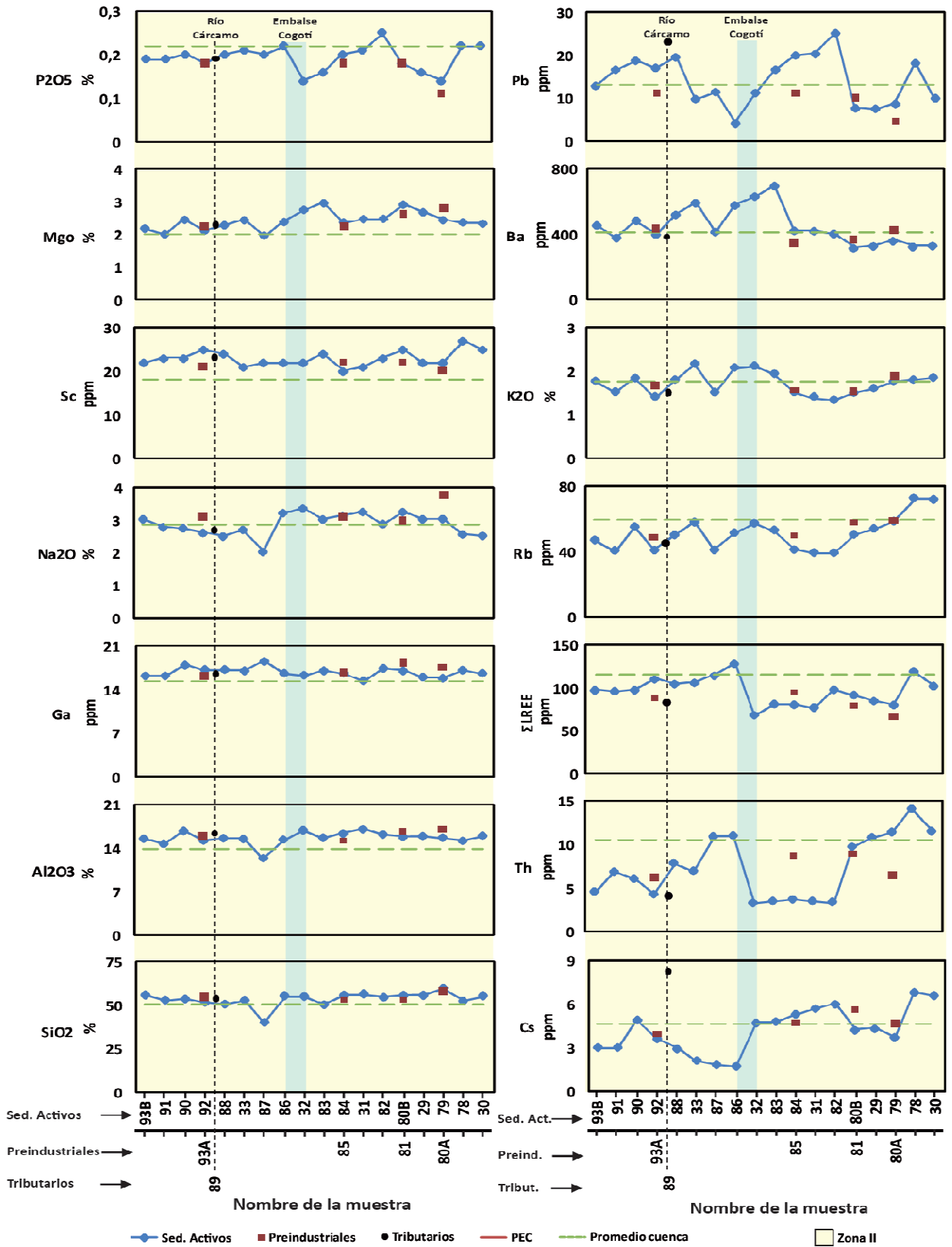


Figura 4.15: Eje Sur (A), Ríos Guatulame - Cogotí.

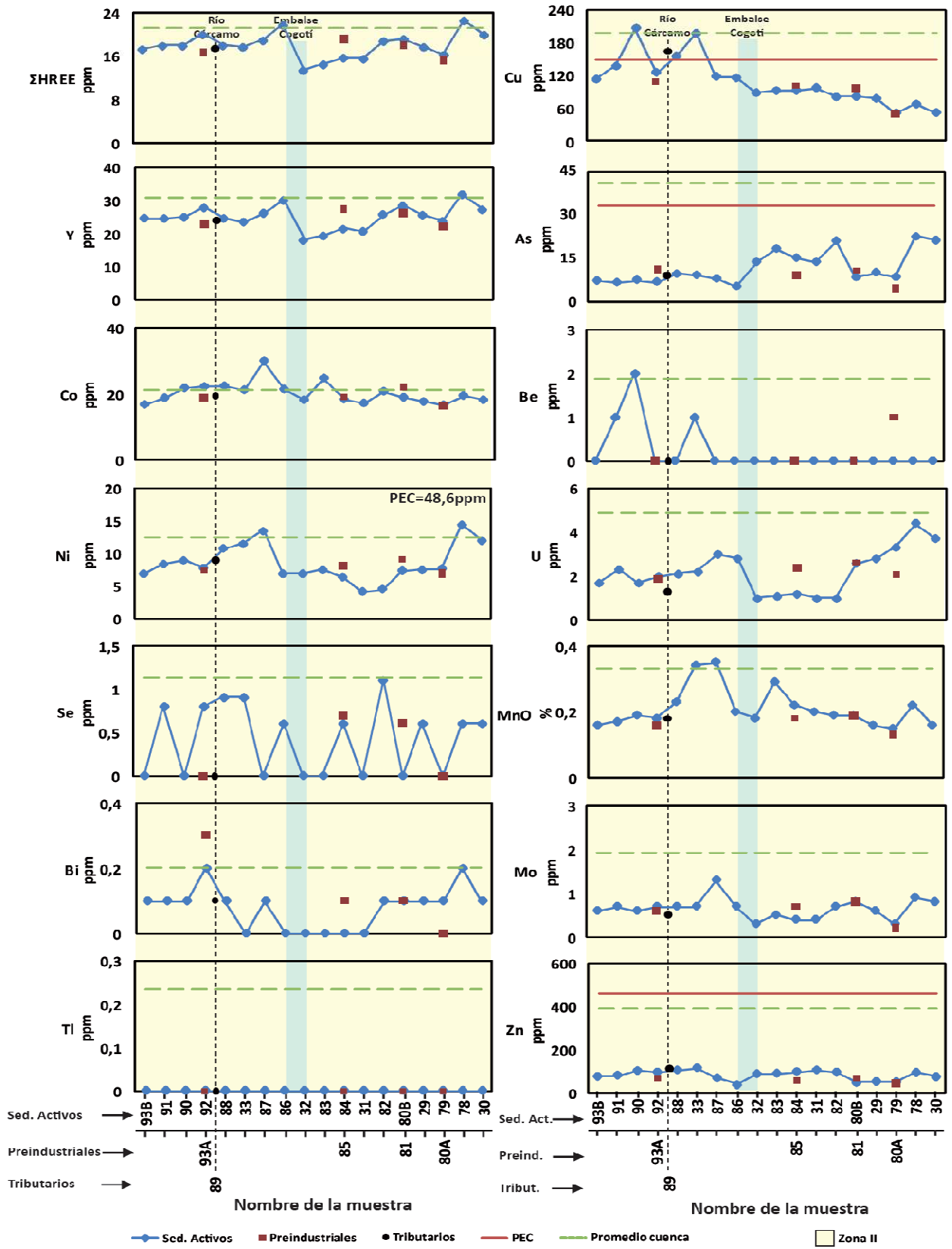


Figura 4.16: Eje Sur (B), Ríos Guatulame - Cogotí.

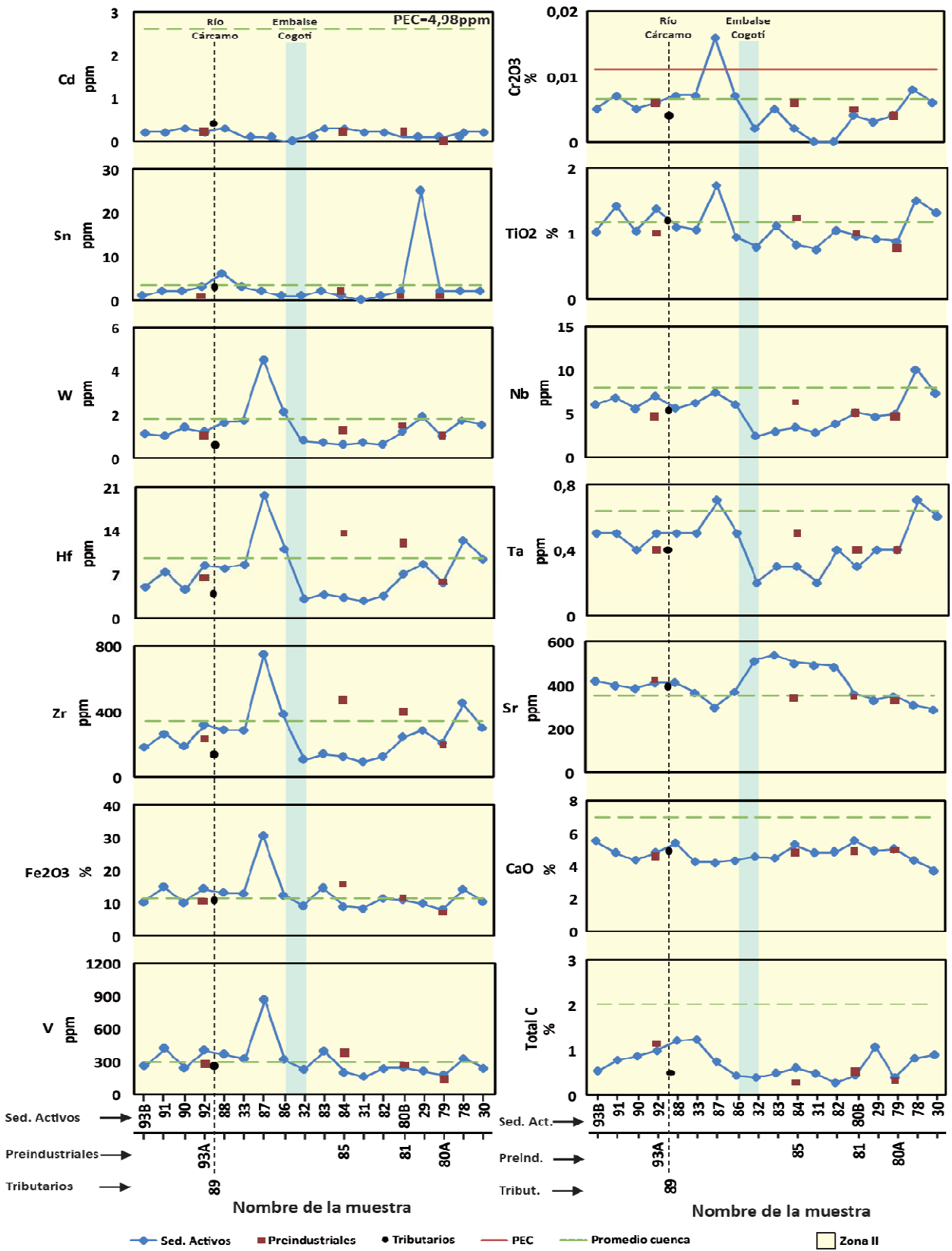


Figura 4.17: Eje Sur (C), Ríos Guatulame - Cogotí.

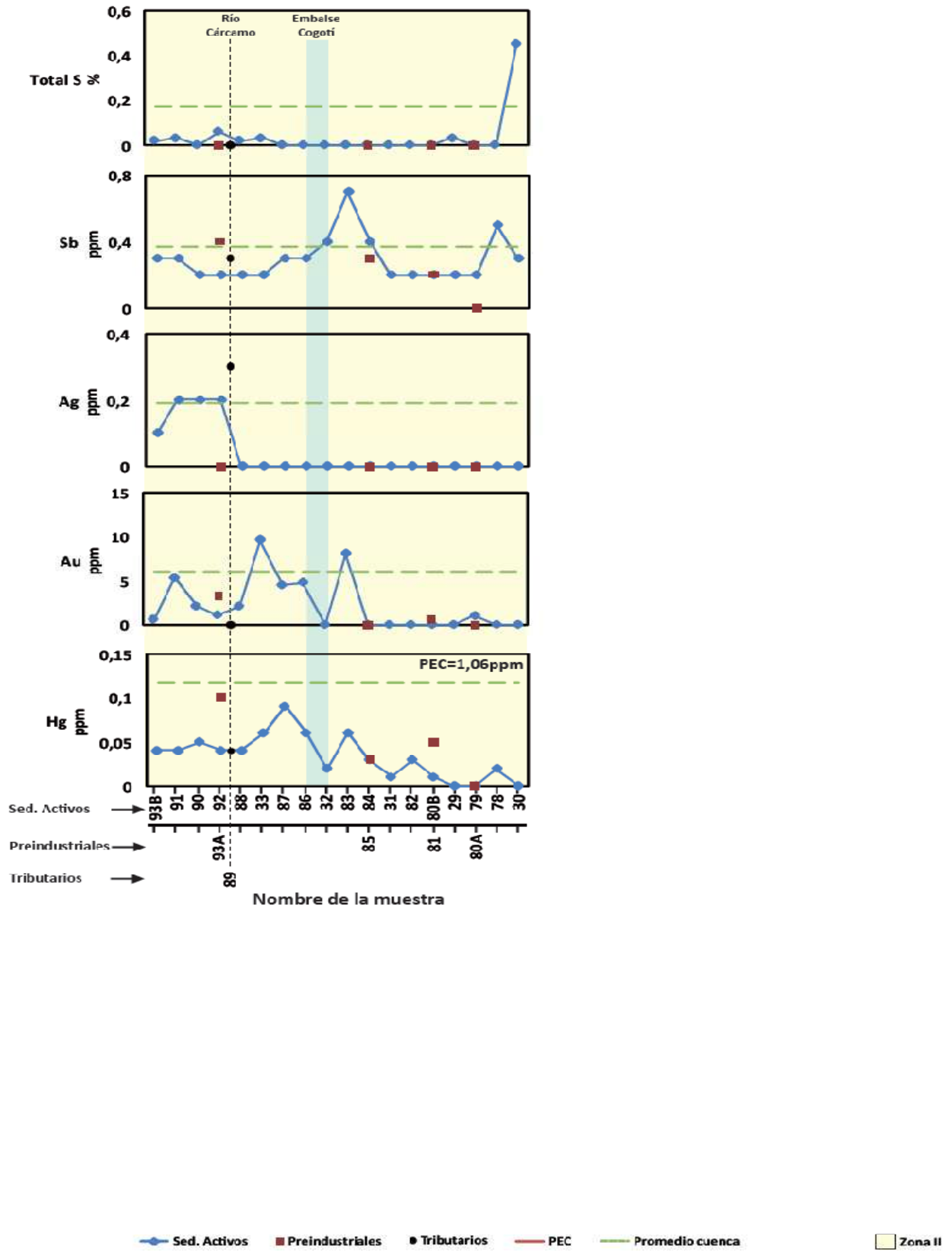


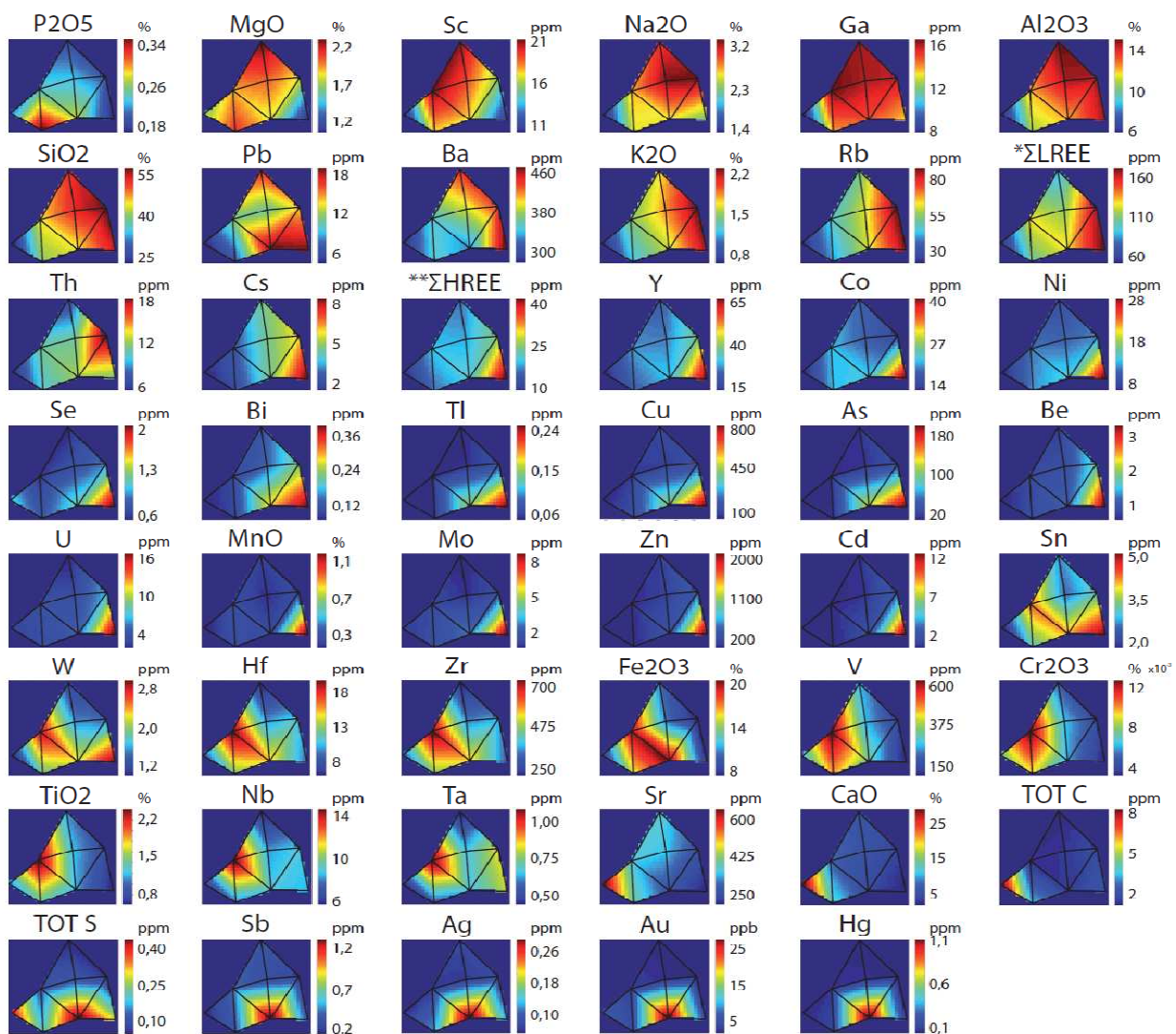
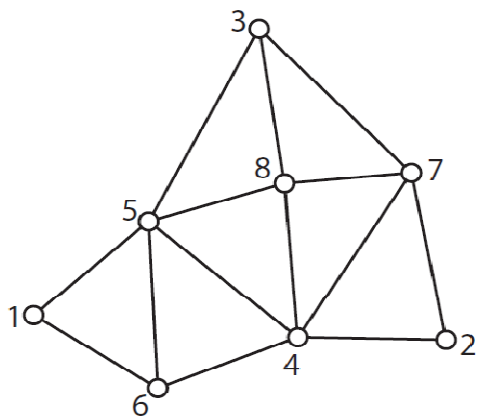
Figura 4.18: Eje Sur (D), Ríos Guatulame - Cogotí.

4.3 Redes neuronales artificiales

Como resultado de éste análisis se generó una red bidimensional compuesta de 8 nodos interconectados (Figura 4.19). Cada uno de estos nodos representa a un subconjunto de muestras con características químicas similares. La distancia que hay entre un nodo y otro está directamente relacionado con cuán similares (o diferentes) son unos de otros, es decir, mientras más alejados estén los nodos entre sí, más diferencias geoquímicas habrán entre las muestras que los componen.

Se observa que los elementos se distribuyen a lo ancho de la red (Figura 4.19), a través de una combinación de distintos nodos, y en la mayoría de los casos, dicha combinación manifiesta una clara tendencia hacia algún nodo en particular.

En forma complementaria a este análisis, son presentados los resultados numéricos asociados a cada nodo. Para ello, se calculó el valor promedio de cada elemento en cada nodo. Los resultados se exponen en la Tabla 4.2.



*ΣLREE=La+Ce+Pr+Nd+Sm
 **ΣHREE=Eu+Gd+Tb+Dy+Ho+Er+Tm+Yb+Lu

Figura 4.19: Red de Sedimentos Activos.

Nodo	No Muestras	P2O5	MgO	Sc	Na2O	Ga	Al2O3	SiO2	Pb	Ba	K2O	Rb	SLREE
1	5	0,20	1,63	7,80	1,04	6,16	4,46	18,05	3,30	263,20	0,50	17,30	35,08
2	12	0,16	0,94	9,83	2,18	13,41	14,88	55,17	18,25	488,25	2,24	88,07	177,08
3	35	0,19	2,43	21,60	3,01	16,34	15,40	52,10	16,19	458,40	1,67	51,92	86,88
4	4	0,30	1,97	17,75	2,33	15,00	11,87	40,97	20,70	291,00	1,54	64,60	125,79
5	9	0,24	1,85	21,78	2,66	16,92	11,82	43,42	10,21	337,11	1,39	43,78	134,80
6	6	0,38	2,16	17,50	2,63	14,08	10,97	40,61	5,70	358,83	1,21	39,82	105,00
7	9	0,20	1,75	14,89	3,48	16,03	14,67	59,43	12,93	438,67	2,47	96,38	185,77
8	25	0,23	2,02	18,68	3,37	15,95	14,81	53,69	9,91	394,64	1,85	62,07	111,83
Nodo	No Muestras	Th	Cs	SHREE	Y	Co	Ni	Se	Bi	Tl	Cu	As	Be
1	5	3,38	1,16	6,29	9,08	9,74	4,74	1,13	0,05	0,05	38,88	6,26	0,50
2	12	11,67	9,00	45,51	73,66	44,31	30,48	2,29	0,43	0,26	872,49	223,23	3,75
3	35	5,81	4,44	16,40	22,60	19,26	9,11	0,47	0,10	0,05	105,53	12,60	0,63
4	4	12,78	4,70	19,23	27,15	22,23	13,83	1,15	0,33	0,20	549,70	145,45	0,88
5	9	12,68	1,98	20,48	28,97	22,37	11,96	0,44	0,07	0,05	70,48	6,34	0,83
6	6	10,58	1,98	16,38	23,45	21,83	12,30	0,71	0,08	0,05	119,58	7,72	0,83
7	9	24,12	5,99	26,86	40,37	13,66	11,36	0,88	0,23	0,07	86,98	22,33	1,89
8	25	11,56	4,78	18,52	26,43	17,12	10,75	0,64	0,13	0,05	77,27	9,76	0,92
Nodo	No Muestras	U	MnO	Mo	Zn	Cd	Sn	W	Hf	Zr	Fe2O3	V	Cr2O3
1	5	2,78	0,13	0,92	19,80	0,11	1,30	0,65	6,52	245,10	6,31	226,00	0,01
2	12	18,29	1,31	9,53	2410,42	14,23	5,42	3,13	8,63	300,03	7,37	77,58	0,00
3	35	1,81	0,22	0,63	114,23	0,32	3,01	1,19	5,39	192,22	10,80	271,26	0,00
4	4	3,70	0,14	2,33	94,00	0,28	4,25	2,33	15,38	568,03	24,13	335,50	0,01
5	9	3,88	0,29	1,39	50,56	0,08	4,78	3,28	23,50	874,68	22,71	730,44	0,02
6	6	3,42	0,27	1,50	44,17	0,10	3,17	1,87	12,27	448,15	15,11	459,83	0,01
7	9	6,96	0,21	1,24	328,89	1,61	3,22	1,40	11,97	396,97	6,65	127,78	0,00
8	25	3,40	0,17	0,84	167,44	0,58	2,44	1,44	9,67	340,63	10,15	252,00	0,01
Nodo	No Muestras	TiO2	Nb	Ta	Sr	CaO	TOT C	TOT S	Sb	Ag	Au	Hg	
1	5	0,86	5,08	0,35	713,14	33,59	9,73	0,46	0,12	0,05	6,51	0,03	
2	12	0,56	8,42	0,82	195,00	1,84	2,37	0,28	0,29	0,11	3,47	0,01	
3	35	1,10	5,21	0,39	373,97	5,89	1,19	0,04	0,35	0,07	2,26	0,04	
4	4	1,08	8,73	0,60	240,63	3,72	1,40	0,60	1,85	0,43	42,65	1,74	
5	9	2,81	17,07	1,26	356,53	7,51	1,18	0,09	0,42	0,06	2,71	0,05	
6	6	1,29	7,35	0,52	403,22	12,57	3,50	0,19	0,33	0,12	3,53	0,09	
7	9	0,77	9,53	0,92	248,22	3,31	1,84	0,04	0,22	0,07	0,99	0,01	
8	25	1,15	8,08	0,65	353,77	5,69	1,49	0,10	0,26	0,06	1,77	0,03	

Tabla 4.2: Concentración Media de Cada Elemento por Nodo. Tabla complementaria al análisis por redes neuronales de la Figura 4.19. En la tabla se indica el nodo, la cantidad de muestras asociadas a dicho nodo y el valor promedio de cada elemento en cada nodo. Las barras de color rojo dispuestas sobre los valores, indican un orden jerárquico (mientras más larga la barra, mayor es el promedio de ese elemento en el nodo). Los valores están indicados en partes por millón (ppm) en el caso de los elementos traza, en partes por billón (ppb) en el caso del oro y en porcentajes en el caso de los elementos mayores (indicados en forma de óxidos).

A partir de los resultados obtenidos a través del análisis de redes neuronales (Figura 4.19) y la Tabla 4.2, se resumen los elementos más representativos de cada nodo (Tabla 4.3):

Nodo	Concentración	Elementos:																	
1	Alta	CaO	Sr	TOT C	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
2	Alta	MnO	Ba	Be	Co	Cs	Sn	U	Y	HREE	Mo	Cu	Zn	Ni	As	Cd	Bi	Tl	Se
3	Alta	Al ₂ O ₃	MgO	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	Alta	Fe ₂ O ₃	TOT S	Pb	Sb	Ag	Au	Hg	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	Alta	TiO ₂	Cr ₂ O ₃	Sc	Ga	Hf	Nb	Ta	V	W	Zr	-	-	-	-	-	-	-	-
6	Alta	P ₂ O ₅	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	Alta	SiO ₂	Na ₂ O	Rb	Th	LREE	K ₂ O	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	Intermedia	Na ₂ O	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	Sc	Ga	Rb	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabla 4.3: Elementos más representativos de cada nodo.

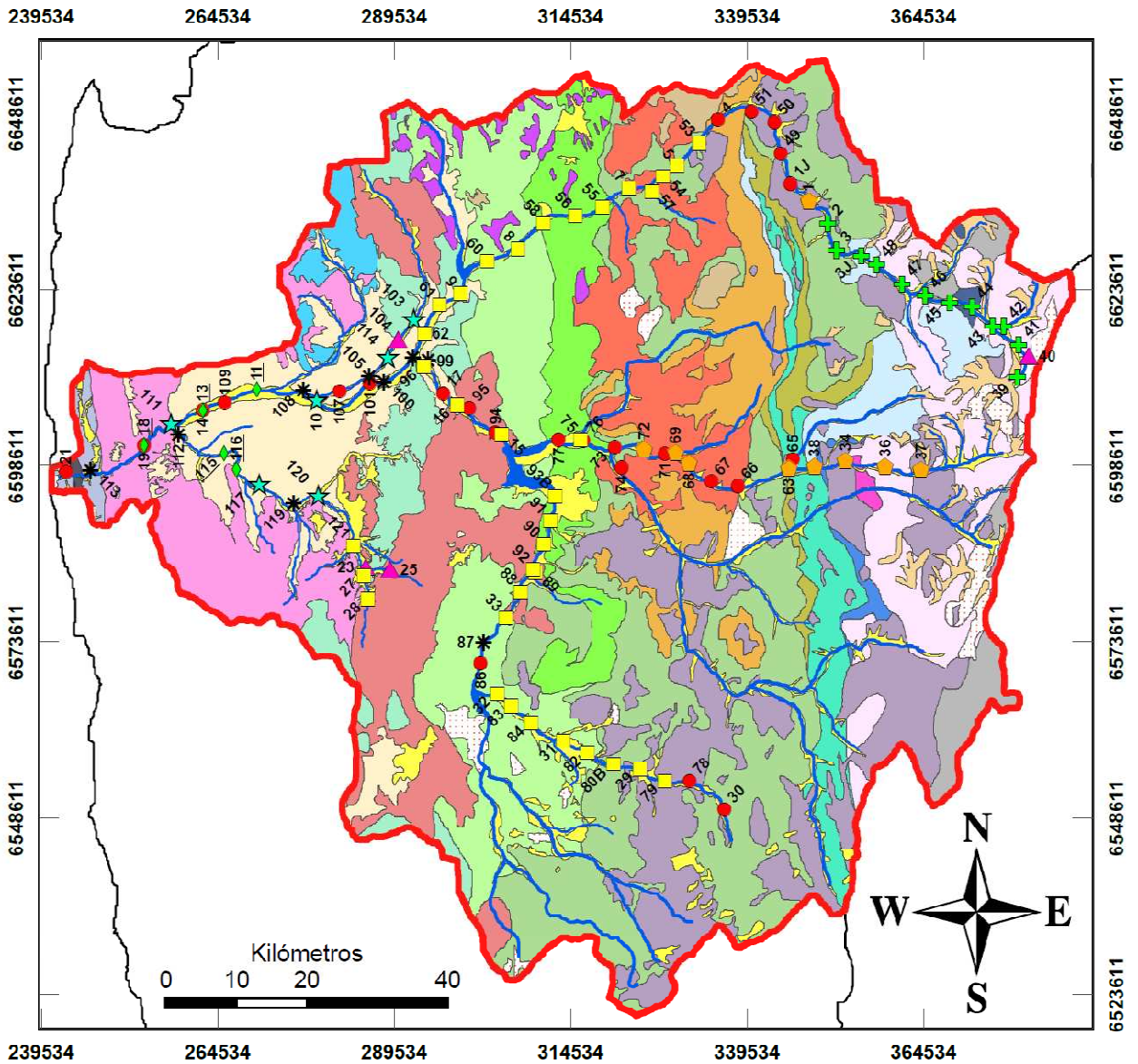
El análisis con redes neuronales también involucra la coordenada geográfica de cada muestra (Anexo B1), por los que se procedió a proyectar la ubicación de cada una de éstas sobre el mapa geológico, indicando claramente a que nodo pertenecen (Figura 4.20).

Los resultados revelan que por lo general las muestras asociadas a un mismo nodo presentan una distribución geográfica común (Figura 4.20):

- El curso superior del Río Hurtado se encuentra asociada a al nodo 2 (Figura 4.20), dicho nodo se caracteriza por presentar las mayores concentraciones en As, Cd, Se, Zn, Bi, Cu, MnO, Mo, U, Sn, Cs, Y, HREE, Co, Be, Ba, Tl y Ni .
- El tramo intermedia del Río Hurtado corresponde a una combinación de los nodos 7 y 8 (Figura 4.20), que se caracterizan por valores altos en Th, LREE y valores medios de Rb, SiO₂, Na₂O y K₂O.
- El eje central de la cuenca, en el tramo compuesto por los Ríos Rapel - Los Molles, también predomina una intercalación de los nodos 7 y 8 (Figura 4.20), sin embargo el tramo correspondiente al curso superior del Río Los Molles hasta la confluencia con el Río Palomo, se encuentra dominado por el nodo 7.
- La parte central de toda la cuenca, ocupando una amplia franja longitudinal con orientación norte-sur, domina la presencia del el nodo 3 (alto en Al₂O₃ y MgO) con algunas intercalaciones del nodo 8 (valores medios de, SiO₂, K₂O, Sc, Ga y Rb).

Esta franja abarca los Ríos Cogotí, Guatulame, curso inferior del Río Hurtado, Río Rapel y Río Grande (tramo Embalse La Paloma - Río Limarí) (Figura 4.20).

- El Río Limarí presenta un patrón más complejo alternando los nodos 1 (alto en Total C, CaO y Sr), 5 (alto en HF, V, Zr, Sc, Nb, Ga, Ta, W, Ti y Cr₂O₃), 6 (alto en P₂O₅) y 8 (valores medios de SiO₂, Na₂O, K₂O, Rb, Al₂O₃, MgO, Sc, Ga).
- En el curso superior del Río Limarí (hasta la confluencia con el Estero Ingenio), la geoquímica predominante se asocia a los nodos 5 y 8 (Figura 4.20). Entre el Estero Ingenio y el Estero Punitaqui dominan los nodos 1 y 8. El nodo 6 se manifiesta aguas arriba de la confluencia con el Estero Ingenio y en la confluencia con el Estero Punitaqui.
- El nodo con mayor distribución en toda la cuenca corresponde al nodo 8 (Figura 4.20), se puede observar de manera dispersa prácticamente en todos los cursos fluviales: curso medio del Río Hurtado, curso superior del Río Cogotí, Río Rapel, aguas abajo del Embalse La Paloma y Río Limarí. No se observa ni en el Estero Punitaqui ni en el curso superior del Río Hurtado.
- El nodo 4, que se caracteriza por sus elevados valores en Au, Hg, Sb, Ag y Pb, se manifiesta en algunos pocos lugares y en forma muy puntual: en la Quebrada Paso de La Coipita en el curso superior del Río Hurtado, en el curso medio del Estero Ingenio (aguas abajo de planta La Cocinera) y en la Quebrada Los Mantos en el curso superior del Estero Punitaqui (Figura 4.20).
- El Estero Punitaqui se caracteriza por la alternancia de los nodos 1 (alto en Total C, CaO y Sr), 5 y 6 su curso inferior y por los nodos 3 y 4 en su curso superior.
- El Estero Ingenio alterna los nodos 6 y 4 en el curso superior, y los nodos 8 y 5 en el curso inferior (Figura 4.20).
- El nodo 5 por lo general se manifiesta en forma puntual y dispersa en la parte baja de la cuenca (con excepción de un nodo que se encuentra inmediatamente aguas abajo del Embalse Cogotí). Se observa en el curso inferior del Río Grande, en la confluencia Río Grande - Río Hurtado, en el curso superior Río Limarí, en la confluencia Río Limarí - Estero Ingenio, en el curso inferior Estero Punitaqui, en el curso inferior Río Limarí y en el curso medio de los Esteros Ingenio y Punitaqui (Figura 4.20).



Características principales:

	nodo1	Valorea altos en: CaO - Total C - Sr
	nodo2	Valores altos en: Cu - As - Mo - U - Zn - MnO - Ba - Be - Co - Cs - Sn - Y - SHREE - Ni - Cd - Bi - Tl - Se
	nodo3	Valores altos en: Al2O3 - MgO
	nodo4	Valores altos en: Au - Hg - Ag - Fe2O3 - Total S - Pb - Sb
	nodo5	Valores altos en: Zr - TiO2 - Cr2O3 - Sc - Ga - Hf - Nb - Ta - V - W
	nodo6	Valores altos en: P2O5
	nodo7	Valores altos en: SiO2 - Na2O - K2O - Rb - Th - SLREE
	nodo8	Valores medios en: SiO2 - Na2O - K2O - Rb - Al2O3 - MgO - Sc - Ga

Distribución de nodos en la red:

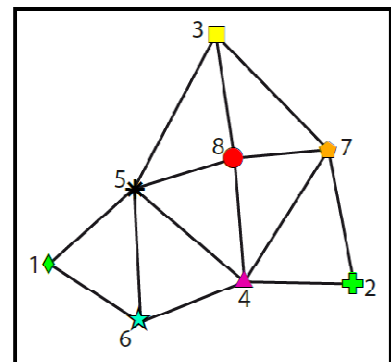


Figura 4.20: Distribución de nodos sobre la cuenca del Río Limarí.

Figura 4.20: Los nodos son proyectados sobre el mapa geológico de la cuenca. A cada nodo se le asignó un color y forma distintiva (diagrama de la esquina inferior derecha). Se resumen los elementos que presentan mayor concentración en cada nodo (esquina inferior izquierda). Los nombres de las muestras correspondientes al nodo 1 han sido subrayados en el mapa para facilitar su reconocimiento. En el Anexo B2 se indica la correlación detallada entre nodo y unidad geológica. Coordenadas en UTM.

4.4 Composición mineralógica de los sedimentos

Un complemento fundamental al análisis químico de los sedimentos, es conocer la composición mineralógica de las muestras estudiadas. Este dato es clave para entender que elementos provienen de procesos geológicos naturales y cuáles de procesos industriales (Higueras, 2004).

A continuación se describirán los resultados obtenidos para el análisis de la composición mineralógica, de 45 muestras seleccionadas.

En la Figura 4.21 se indica, sobre la red de drenaje principal, la ubicación exacta de las muestras seleccionadas para el análisis mineralógico.

Los resultados obtenidos se resumen las Tablas 4.4, 4.5, 4.6, 4.7 y 4.8. En estas tablas se muestra la existencia de los distintos grupos minerales presentes en cada curso fluvial. La disposición de las muestras es presentada en la misma dirección de escorrentía de los ríos: lado derecho de la tabla → aguas arriba, lado izquierdo → aguas abajo. Posteriormente en la Figura 4.22 se indica sobre el mapa geológico de la cuenca los sectores donde se detectaron minerales con contenido de Cu, Au, Ag, U, Hg y otros metales pesados (Pb, Zn, Ni, Co, As, Cd).

Las tablas detalladas de variación geográfica de la composición mineralógica, se adjuntan en el Anexo C. También se adjunta la lista de todos los minerales detectados mediante difracción de Rayos-X, con su correspondiente fórmula y clasificación geoquímica en el Anexo D.

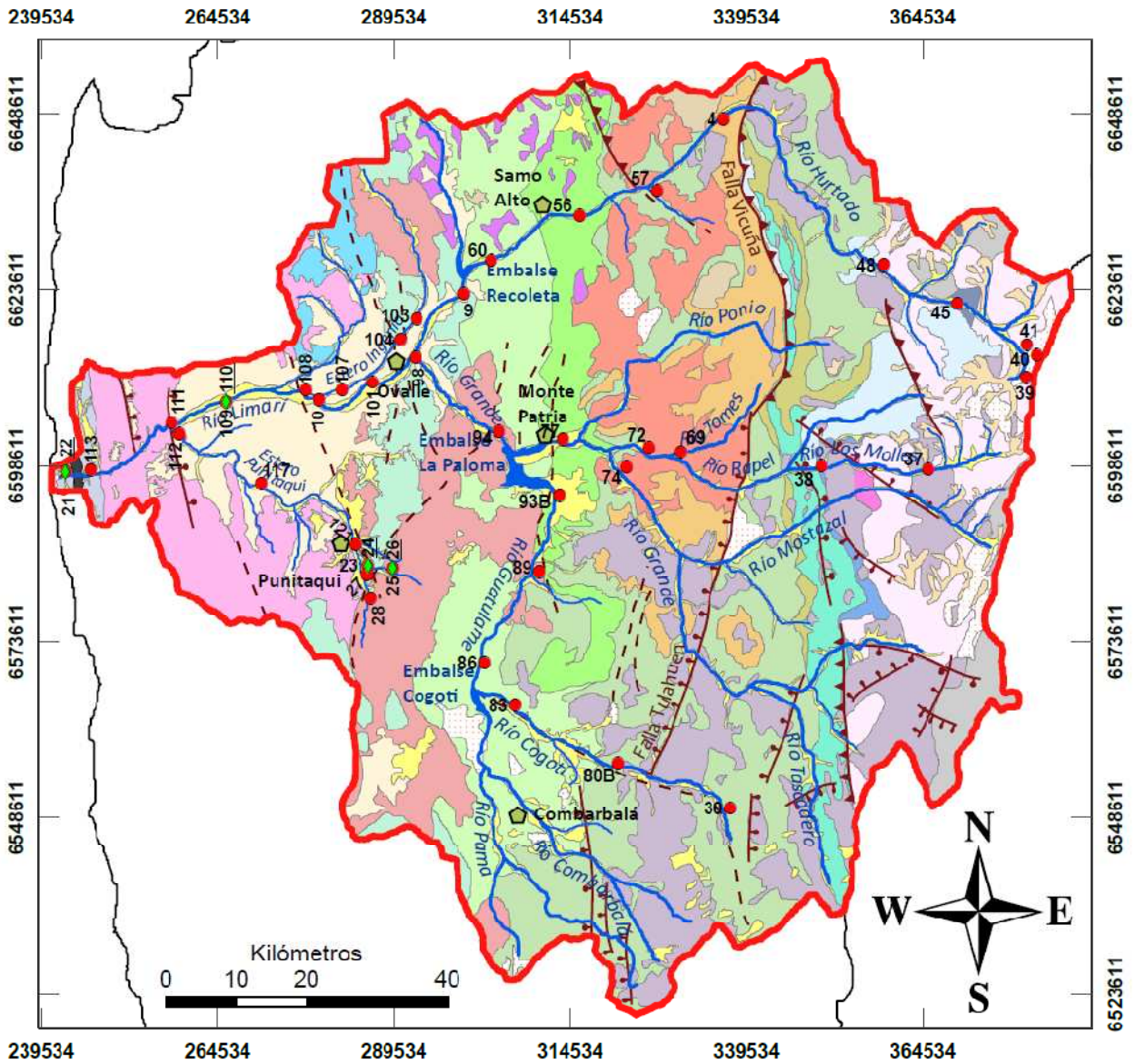


Figura 4.21: Ubicación muestras seleccionadas para análisis mineralógico. En la figura, se muestra la numeración correspondiente de cada muestra, en el caso de las muestras pre-industriales, su número se encuentra subrayado para diferenciarlo de la muestra de sedimentos actuales. Coordenadas en UTM.

Río		Limarí									Hurtado									
Mineral	Muestra	22*	21	113	111	110*	109	108	10	101	9	60	56	57	4	48	45	41	40	39
Cuarzo																				
Feldespatos																				
Zeolita																				
Filosilicatos																				
Anfíbolos																				
Piroxenos																				
Circon																				
Rutilo																				
Ox. de Hierro																				
Boratos																				
Calcita																				
Fosfatos																				
Halita																				
Metales Pesados (Pb-Zn-Ni-Co-As-Cd)																				
Minerales de Oro - Teluro																				
Minerales de Cobre																				
Minerales Plata																				
Minerales de Uranio																				

Tabla 4.4: Resumen mineralogía Ríos Limarí y Hurtado. (*) Muestra pre-industrial.

Río		Estero Ingenio		
Mineral	Muestra	107	104	103
Cuarzo				
Anfíbolos				
Filosilicatos				
Feldespatos				
Zeolitas				
Piroxenos				
Ox. de Hierro				
Fosfatos				
Calcita				
Rutilo				
Minerales de Cu - Ag				

Tabla 4.5: Resumen mineralogía Estero Ingenio.

Río		Estero Punitaqui			Queb. Los Mantos				Est. Punitaqui		
Mineral	Muestra	112	117	121	24*	23	26*	25	27	28	
Cuarzo											
Anfíbolos											
Filosilicatos											
Feldespatos											
Zeolitas											
Piroxenos											
Ox. De Hierro											
Calcita											
Bieberita (sulfato de Co)											
Minerales de Au											

Tabla 4.6: Resumen mineralogía Estero Punitaqui. (*) Muestra pre-industrial.

Río		Grande				Rapel	Tomes	Los Molles	
Mineral	Muestra	98	94	77	74	72	69	38	37
Cuarzo									
Feldespatos									
Anfíbolos									
Filosilicatos									
Zeolitas									
Piroxenos									
Ox. de Manganeso									
Calcita									
Teluros									
Minerales de Uranio									
Minerales de Hg									

Tabla 4.7: Resumen mineralogía Ríos Grande, Rapel, Los Molles.

Río		Guatulame			Cogotí		
Mineral	Muestra	93B	89	86	83	80B	30
Cuarzo							
Filosilicatos							
Feldespatos							
Anfíbolos							
Zeolitas							
Piroxenos							
Titanita							
Magnesita							
Hematita							
Bannermanita							
Polihalita							

Tabla 4.8: Resumen mineralogía Ríos Guatulame y Cogotí.

Los resultados obtenidos muestran la generalizada asociación de minerales silicatados formadores de rocas ígneas. En particular la asociación cuarzo-albita se observa en todos los sedimentos medidos, con excepción del curso superior del Río Hurtado. Además, dicha asociación se encuentra comúnmente acompañada de fillipsita (silicato perteneciente al grupo de las zeolitas), feldespatos (anortita, microclina, anortoclasa, labradorita) y filosilicatos del grupo de las arcillas (montmorillonita y montmorillonita-clorita). En las futuras descripciones no se mencionará la presencia de cuarzo, albita y fillipsita, se asumirá su existencia y se mencionará en el caso de no estar presente.

Río Hurtado (Tabla 4.4): El curso superior del Río hurtado (hasta la muestra 45, Figura 4.22) se caracteriza por presentar minerales ricos en metales pesados (anglesita, esfarelita, wairautita, awaruita, arsenolita, hawlayita), también por presentar minerales de oro-teluro (telurobismutita y anyuita), minerales de cobre (cuprita, woodwardite y whitneyite), minerales de plata (sternbergita) y minerales de uranio (billietita). Otros minerales detectados son algunos boratos (hexahidrobiorita y berborita), óxidos de hierro (agnetita) y silicatos como el circón y una variedad de alta temperatura del cuarzo asociado a ambientes volcánicos (cristobalita), y en el sector más bajo del curso superior, se detectaron anfíbolos (magnesio-hornblenda) e inosilicatos del grupo de las micas (flogopita) y del grupo de las cloritas (clinocloro). En este sector se destaca la ausencia de feldespatos.

En el curso medio e inferior del Río Hurtado (entre las muestras 4 y 9, Tabla 4.4) no se manifiestan los minerales antes mencionados (con excepción de la cristobalita y la anglesita en las primeras muestras). También se va incrementando la presencia de minerales máficos de la familia de las anfíbolos (ribekita, fluor-ribekita, ferro-hornblenda). En el tramo superior de este segmento se manifiesta nuevamente un grupo de minerales oro-teluro (montbrayita), de cobre (covelina) y de uranio (umohoita y fourmarierita) (Figura 4.22), acompañados de óxidos de Fe (hematita). Luego, en el tramo medio e inferior de este segmento destaca la presencia de la calcita. Se recolectó una muestra aguas abajo del Embalse Recoleta, la cual se compone principalmente de anfíbolos (ferro-hornblenda), óxidos de hierro (III), anortita y micas (Tabla 4.4).

Río Limarí (Tabla 4.4): En el tramo superior del Limarí (hasta la confluencia con el Estero Ingenio, muestras 10 y 101, Tabla 4.4) es continua la presencia de calcita y anfíbolos (edenita), seguida de feldespatos (microclina y anortoclasa) y una variedad criptocristalina del cuarzo (moganita).

En el curso intermedio del Río Limarí (entre el Estero Ingenio y el Punitaqui, muestras 108 a 111, Tabla 4.4), se puede observar que inmediatamente aguas abajo de la confluencia con el Estero Ingenio se manifiestan sedimentos con minerales del grupo de los fosfatos (gainesita, koninckita y brushita), de las arcillas (montmorillonita-clorita-vermiculita, illita) y piroxenos (clinofersilita, clinohipersteno y clinoenstatita). También en el sector de la confluencia con el Ingenio se detectó circón y en la confluencia con el Punitaqui calcita. Los feldespatos y anfíbolos son comunes en todo este trayecto. La muestra pre-industrial (muestra 110) se diferencia del resto de los sedimentos por su contenido de óxidos de Hierro III.

En el sector de la desembocadura del Limarí (muestras 113 a 21, Tabla 4.4), se destaca la presencia de circones y calcita. Los demás minerales observados pertenecen al grupo de los silicatos como los feldespatos (anortoclasa), anfíbolos (actinolita), piroxenos (enstatita) y micas (muscovita). La muestra preindustrial recolectada en la playa presenta actinolita, halita y tridimita (polimorfo de alta temperatura del cuarzo).

Esteros Ingenio (Tabla 4.5): En el Estero Ingenio se seleccionó una muestra aguas arriba de "La Cocinera" (muestra 103), una muestra inmediatamente aguas abajo (muestra 104) y una muestra antes de la confluencia con el Río Limarí (muestra 107). En el curso superior del estero, tanto aguas arriba como aguas abajo de La Cocinera, se detectaron minerales de cobre (covelina y cupropavonita) (Figura 4.22) acompañados de óxidos de hierro (hematita). En el curso inferior del estero se destaca la presencia de rutilo, calcita y fosfatos de aluminio. Entre los silicatos presentes (además del cuarzo y la albita), las anfíbolos, arcillas y feldespatos se detectaron a lo largo de todo el estero. Las zeolitas se concentran en el tramo superior y los piroxenos en el tramo inferior.

Estero Punitaqui (Tabla 4.6): Dentro del Estero Punitaqui se destaca la Quebrada Los Mantos (sector de mayor actividad minera en esta zona), por esta razón se seleccionaron muestras aguas arriba de la quebrada (muestras 27 y 28, Tabla 4.6), aguas abajo (muestras 112, 117 y 121) y en la quebrada misma (muestras 23, 24, 25 y 26, Tabla 4.6) y así poder ver el efecto de esta sobre los sedimentos del estero. La mineralogía de las muestras recolectadas aguas arriba de la Quebrada Los Mantos revela un contenido principal de de oxi-hidróxido de hierro (ferrihidrita) y silicatos del grupo de las arcillas (montmorillonita-clorita), de las micas (biotita, flogopita), de los feldespatos (albita-anortita) y de las anfíbolas (fluoro-edenita y ribekita).

Posteriormente, en la Quebrada Los mantos, se seleccionaron cuatro muestras (dos de sedimentos actuales y dos de sedimentos pre-industriales), las muestras fueron seleccionadas aguas arriba y aguas abajo de relaves procedentes de la ex mina Mantos de Punitaqui. La muestra de sedimentos recientes tomada aguas arriba (muestra 25, Tabla 4.6), revela la existencia calcita y silicatos: arcillas (montmorillonita-clorita, illita, montmorillonita), micas (fluoranita), anfíbolas (ribekita). La muestra preindustrial recolectada en la misma zona, revela un contenido mineral similar, pero en esta muestra además se detectaron piroxenos (donpeacorita). Posteriormente, aguas abajo de la mina (muestra 23, Tabla 4.6), los sedimentos activos presentan un contenido mineral parecido al observado aguas arriba, compuesto principalmente por silicatos del grupo de los feldespatos (albita-anortita, anortoclasa), anfíbolas (ribekita) y montmorillonita. La muestra pre-industrial de esta zona revela la presencia de un mineral de cobre (bieberita) junto a anfíbolas (actinolita), muscovita y cuarzo-albita.

Inmediatamente aguas abajo de la confluencia del Estero Punitaqui con la Quebrada Los Mantos (muestra 121, Tabla 4.6), se detectó un mineral de oro (montbrayita) (Figura 4.22) junto a filosilicatos (montmorillonita-clorita, fluoranita, vermiculita), anfíbolas (ribekita), zeolitas, cuarzo y albita. En el curso medio del Estero Punitaqui (muestra 117, Tabla 4.6) se hace presente la calcita, acompañada de arcillas (montmorillonita, clorita-vermiculita-montmorillonita) y anfíbolas (edenita). Finalmente, antes de llegar a la confluencia con el Río Limarí, continúan arcillas, junto a anfíbolas (kozulita), microclina, zeolitas y magnetita.

Ríos Grande - Rapel - Los Molles (Tabla 4.7): La primera muestra seleccionada pertenece al curso superior del Río Los Molles (muestra 37, Tabla 4.7), esta se recogió de un pequeño embalse correspondiente a la bocatoma de la central hidroeléctrica Los Molles. Los minerales detectados en esta muestra se destacan por la presencia de minerales de uranio (upalita) (Figura 4.22), telurios (telurobismutita) y óxidos de manganeso, acompañados de silicatos albita-anortita y anfíbolos (ribekita). No se detectó fillipsita en este sector. Varios kilómetros aguas abajo, se seleccionó otra muestra del mismo río (muestra 38, Tabla 4.7), se detectaron principalmente silicatos: anfíbolos (fluoro-edenita), filosilicatos (montmorillonita - clorita, biotita), feldespatos (microclina) y zeolita (fillipsita).

Antes de la confluencia con el Río Rapel, se seleccionó una muestra de un río tributario (muestra 69, Río Tomes), la mineralogía de esta muestra es similar a la anterior ya que se compone de los mismos grupos minerales: anfíbolos, arcillas, feldespatos y zeolitas. Se diferencia de la muestra anterior por la presencia de muscovita.

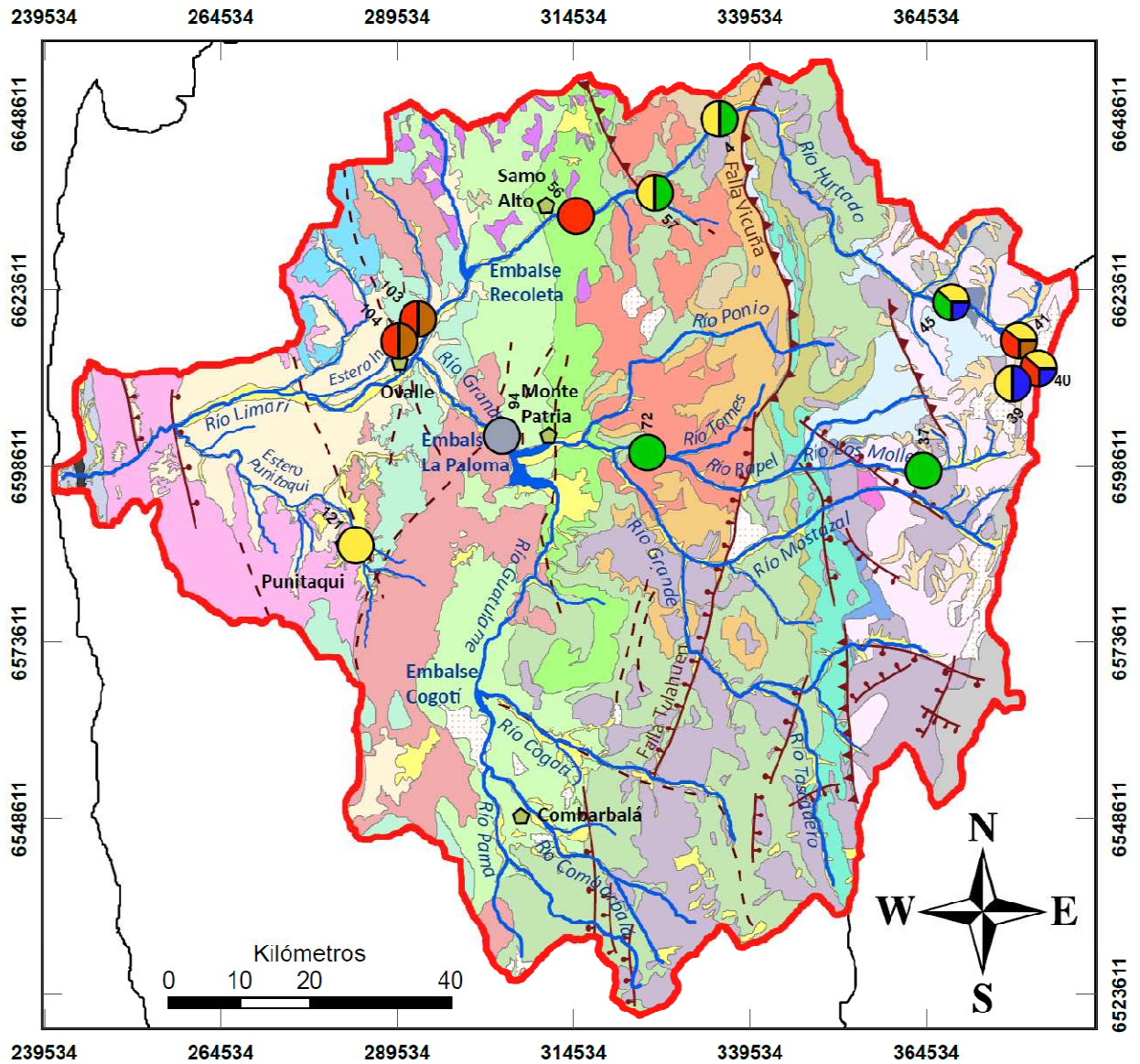
En el Río Rapel, luego de la confluencia con el Río Los Molles (muestra 72, Tabla 4.7), se detectó un mineral de uranio (clarkeita) (Figura 4.22) y silicatos como en las muestras anteriores, sin embargo ahora se hace presente el grupo de los piroxenos (enstatita).

Antes de la confluencia con el Río Rapel se seleccionó una muestra procedente del Río Grande (muestra 74, Tabla 4.7). Los sedimentos de dicha muestra están formados (además de cuarzo-albita) por silicatos del grupo de las zeolitas (fillipsita), de las arcillas (montmorillonita-clorita), de los feldespatos (anortoclasa) y de las anfíbolos (fluorribekita), también presenta calcita. Posteriormente, luego de la confluencia con el Río Rapel, llegando al Embalse La Paloma (muestra 77, Tabla 4.7), se observa que se mantiene la presencia de la calcita y de los silicatos, a los cuales se suman los piroxenos (enstatita) y micas (muscovita y clorita). Las dos muestras siguientes fueron seleccionadas aguas abajo del Embalse La Paloma y antes de la confluencia con el Río Limarí. La muestra ubicada inmediatamente aguas abajo del embalse (muestra 94, Tabla 4.7) presenta un mineral de mercurio (calomel) (Figura 4.22) acompañado de los

mismos silicatos que se fueron observando, con excepción de las zeolitas. Al llegar a la confluencia con el Limarí, se destaca la presencia de calcita, arcillas (montmorillonita) y zeolitas.

Ríos Guatulame - Cogotí (Tabla 4.8): En el eje correspondiente a los Ríos Cogotí-Guatulame, se seleccionaron tres muestras aguas arriba del Embalse Cogotí y tres muestras aguas abajo del embalse (Figura 4.21). Al igual que los demás ríos en la cuenca, estos ríos exhiben la constante presencia de cuarzo-albita (la fillipsita no se detectó en el curso superior y medio del Guatulame). Los sedimentos del Río Cogotí están compuestos principalmente por silicatos del grupo de las micas (muscovita, saponita, flogopita, vermiculita), arcillas (montmorillonita-clorita), anfíbolos (edenita, ferroactinolita, fluorribekita), piroxenos (augita), plagioclasas (anortita) y carbonatos (magnesita) en la muestra más cercana al embalse (Tabla 4.8).

Inmediatamente aguas abajo del Embalse Cogotí (muestra 86, Tabla 4.8), se detectó titanita, arcillas (montmorillonita), anfíbolos y feldespatos. Posteriormente, en el curso central de este río (muestra 89, Tabla 4.8), se destaca la presencia de hematita, polihalita (sulfato de K-Ca-MgO), bannermanita (hidróxido de V) y piroxenos (clinohipersteno), junto a arcillas y feldespatos (labradorita). Finalmente, al llegar al Embalse La Paloma (muestra 93B, Tabla 4.8), los sedimentos exhiben fillipsita, piroxenos (clinohipersteno), feldespatos (anortoclasa), filosilicatos, y anfíbolos (fluoro-edenita).



Simbología

- Capital Comunal
- Límite cuenca río Limari
- Ríos y esteros principales
- Falla Inversa
- Falla Normal
- Falla Cubierta o Inferida

Minerales de:

- Oro
- Cobre
- Plata
- Uranio
- Mercurio
- Metales pesados (Pb-Zn-Ni-Co-As-Cd)

Figura 4.22: Ubicación de minerales con contenido de metales preciosos y metales pesados. Se indica el número de la muestra correspondiente. Coordenadas en UTM.

5 Discusiones

5.1 Geoquímica exógena

En el ciclo geoquímico exógeno, los componentes minerales de las rocas sufren un proceso de meteorización, erosión, transporte y depositación (y diagénesis en algunos casos). Dichos procesos están controlados por la acción directa de los agentes atmosféricos (Rose, et al, 1980).

Desde el punto de vista termodinámico, la meteorización es la respuesta de las rocas a las nuevas condiciones de presión, temperatura y ambiente químico. En este contexto, toma importancia la serie de Bowen en relación con la estabilidad de las distintas fases minerales. Es decir, aquellos minerales que cristalizan primero (ej. olivino, albita) presentan menos estabilidad, en cambio los que cristalizan tardíamente (ej. cuarzo, muscovita) son más estables (Guerra, 2006).

La meteorización de las rocas puede ocurrir por procesos físicos (que no implican cambios químicos ni mineralógicos), por procesos químicos (implica cambios en la composición química y mineralógicos) y por procesos biológicos (combinación de los dos procesos anteriores).

Los productos de la meteorización pueden generar:

- Minerales primarios: resistentes a la meteorización (resistatos), mantienen su composición original, por ejemplo: cuarzo, magnetita, circón, granate, casiterita, rutilo, wolframita, cromita.
- Especies solubles: cationes o aniones en solución.
- Minerales secundarios (neoformados): nuevos minerales como producto de las reacciones de disolución, hidratación, hidrólisis, carbonatización, intercambio iónico, oxidación.
- Compuestos orgánicos: compuestos formados por la degradación biológica y química de restos de animales y plantas.

- Coloides: sustancias no solubles, pero tan finamente dispersas que pueden ser transportadas en suspensión.

La movilidad de los elementos está altamente ligada a la resistencia que presentan los minerales a meteorización tanto física como química. En el caso de los elementos traza, estos pueden formar parte de minerales primarios y moverse junto a ellos, o pueden ser liberados de la estructura cristalina a través de los procesos de meteorización y formar parte de minerales secundarios siendo adsorbidos por arcillas, óxidos de Fe, óxidos de Mn, por materia orgánica o por partículas coloidales. También pueden ser removidos de la solución acuosa a través de la captura por parte de plantas y organismos (Guerra, 2006).

5.2 Control de calidad de datos

Mediante el control de calidad de datos, realizado en el capítulo 3, se obtuvo el valor del error asociado a la medición de cada elemento. Los casos que presentaron el mayor error fueron: Sn (24,50%), U (27,01%), Th (44,26%) y W (70,89%). Además se obtuvo una lista de elementos que se presenta en concentraciones tan bajas (cercasas o inferiores al límite de detección), que no se les pudo determinar el error asociado: Ag, Be, Bi, Se y Tl.

Los elementos con mayor error (Sn, U, Th y W), sólo serán considerados en las discusiones en los casos que la elevada concentración observada (superior a la media), sea concordante con la mineralogía.

En el caso de los elementos que no se conoce el error (Ag, Be, Bi, Se y Tl), serán mencionados cuando su ocurrencia represente una anomalía dentro de la cuenca.

5.3 Río Hurtado

Los resultados exhibidos muestran una fuerte anomalía geoquímica en el cauce superior del río (Figura 4.20, asociado a los nodos 2 y 4). Dicha anomalía está caracterizada por valores altos en Cu, As, Ni, Zn, Cd, Mo, HREE, Y, Co, Au, Ag, Total

S, Mn, Fe₂O₃, U, Sb, LREE, Se, Bi, Be y Tl. Llegando a mostrar concentraciones muchas veces superiores al promedio de la cuenca (Figuras 4.3, 4.4, 4.5, 4.6 y 4.8).

Encontrar valores tan altos en metales pesados en los sedimentos de ríos podría asociarse a residuos procedentes de labores mineras (Oyarzún et. al., 2003). Sin embargo en esta zona, no se desarrolla ninguna actividad minera de importancia, por el contrario, la principal actividad es de origen agrícola-ganadero.

La principal evidencia de minería corresponde al prospecto de nombre Coipita (Figura 5.1) ubicado en la zona cordillerana cercana al límite fronterizo a más de 4000m de altitud (Figura 1.2). Este prospecto se sitúa en una zona de alteración hidrotermal del tipo cuarzo-sericita desarrollada sobre granitoides paleozoicos (Unidad El Volcán) y riolitas de la Formación Pastos Blancos. En la Coipita se han detectado algunas vetas de enargita, pirita maciza y ganga de cuarzo, alunita y baritina. La mineralización en los núcleos de las zonas alteradas, ha sido catalogada como epitermal del tipo ácido-sulfato (Mpodosis, et. al. 1988).

Las aguas de la Quebrada Paso de la Coipita (Figura 5.2) escurren directamente sobre esta zona de alteración y convergen con el del Río Hurtado en sus nacientes (Figura 4.20, muestra 40). Estos antecedentes permiten interpretar que la zona de alteración afecta de manera significativa los sedimentos del cauce superior del Río Hurtado, siendo la principal responsable de la anomalía geoquímica observada.



Figura 5.1: Zona de alteración hidrotermal en las nacientes del Río Hurtado. En esta zona de alteración se emplaza el prospecto Coipita. La fotografía asociada a la muestra 39 (Figura 4.20).



Figura 5.2: Quebrada "Paso de la Coipita". Sus aguas convergen directamente en el Río Hurtado. Se observa una pátina rojiza cubriendo los clastos. Fotografía asociada a muestra 40 (Figura 4.20).

La dispersión de metales pesados detectada en este sector es de gran magnitud, observándose aún en sedimentos varios kilómetros aguas abajo. Estudios recientes realizados en la zona (Oyarzun R, et. al., 2010), proponen que los procesos químicos involucrados en los eventos de alteración son los responsables de este fenómeno. Estos procesos se resumen en: existencia de una fuerte hidrólisis durante la etapa de alteración hidrotermal que llevó a la destrucción de los feldespatos dejando como producto minerales como la sericita (Reacción 1), caolinita (Reacción 2) y alunita (Reacción 3). Luego, dado que los yacimientos epitermales de alta sulfuración son ricos en sulfuros primarios, cuando ocurre la oxidación de la pirita (Reacción 4), no quedan minerales como los feldespatos que puedan reaccionar con los fluidos ácidos que son generados. Esto favorece fuertemente la lixiviación de metales pesados y metaloides e incrementa notablemente su movilidad, por ejemplo, aumenta la movilidad del cobre a partir de la calcopirita (Reacción 5) o del cobre y arsénico a partir de la enargita (Reacción 6).

Reacciones químicas mencionadas:

- (1) $3\text{KAlSi}_3\text{O}_8 + 2\text{H}^+ \rightarrow \text{KAl}_3\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2 + 6\text{SiO}_2 + 2\text{K}^+$
- (2) $2\text{KAl}_3\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2 + 2\text{H}^+ + 3\text{H}_2\text{O} \rightarrow 3\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4 + 2\text{K}^+$
- (3) $\text{KAl}_3\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2 + 4\text{H}^+ + 2(\text{SO}_4)^{2-} \rightarrow \text{KAl}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6 + 3\text{SiO}_2$
- (4) $4\text{FeS}_2 + 10\text{H}_2\text{O} + 15\text{O}_2 \rightarrow 4\text{FeOOH} + 16\text{H}^+ + 8(\text{SO}_4)^{2-}$
- (5) $\text{CuFeS}_2 + \text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{CuSO}_4 + \text{FeSO}_4 + 2\text{H}_2\text{O} + 2\text{S}$
- (6) $\text{Cu}_3\text{AsS}_4 + 2.75\text{O}_2 + 3\text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow 3\text{CuSO}_4 + 4\text{S} + \text{H}_3\text{AsO}_4 + 1.5\text{H}_2\text{O}$

Los minerales detectados en la zona, corroboran la anomalía geoquímica mostrando una abundancia de minerales con elevados contenidos en metales y metaloides (Cu, Au, Ag, U, Zn, Ni, Co, AS y Cd). Estos minerales se presentan en forma de aleaciones nativas (anyuilita, woodwardita, wairauita, awaruita), como sulfuros (esfalerita y sternbergita) y como minerales neoformados en forma de óxidos, hidróxidos, sulfatos y boratos (Tabla 4.4 y Anexo C1).

Aguas abajo, en el curso medio del río se observa un cambio geológico importante: el paso desde rocas sedimentarias e intrusivas paleozoicas a rocas volcánicas cretácicas.

Sin embargo, este marcado cambio litológico del basamento, no se ve inmediatamente reflejado en un cambio en la composición química de los sedimentos fluviales, tal como lo indica la distribución de los nodos en ese sector (Figura 4.20).

Al analizar los gráficos univariados de variación geográfica (Figuras 4.2 a 4.8) se observa que la zona comprendida entre las muestras 48 y 1J (zona de contacto entre las unidades paleozoica y las cenozoicas, Figura 3.1), corresponde a una zona de transición, en donde la señal geoquímica se caracteriza por un descenso constante de las concentraciones en metales característicos del curso superior. Este traslape entre los límites litológicos y los límites geoquímicos indicados por los nodos, se puede explicar como consecuencia de la geomorfología de la cuenca: existe un quiebre entre la Alta montaña y la Montaña media definido por la Falla Vicuña, lo que se manifiesta mediante un cambio en la pendiente del cauce. Entonces las aguas que venían con alta energía (alta pendiente), transportan y dispersan los elementos pesados aguas abajo, más allá de la zona donde disminuye la pendiente. Luego, a partir de la muestra J1, es posible hacer una correlación directa nodo-roca, al menos durante el curso medio e inferior del Río Hurtado (Figura 4.20).

La mineralogía presente en esta zona (curso medio) (Tabla 4.4 y Anexo C1) manifiesta cambios asociados a los procesos de alteración supérgena, donde las anfíbolos y piroxenos, procedentes de las formaciones volcánicas andesíticas-basálticas, pasan a formar el grupo de las cloritas y los feldespatos el grupo de las arcillas.

La correlación entre composición litológica y composición geoquímica es concordante en este tramo del río (curso medio). Esto queda representado principalmente a través de la distribución geográfica de los nodos 3 y 8 (Figura 4.20). Sin embargo se observaron algunos valores elevados (pero inferiores al PEC, Tabla 2.2) en Pb y Sb (Figuras 4.3 y 4.8), que no fueron manifestados en los nodos. En particular el aumento en las concentraciones de estos elementos, se observó inmediatamente aguas abajo de la confluencia con el Río Chacay (río que presentaba valores altos en estos elementos).

La sub-cuenca del Río Chacay atraviesa de NE a SW las siguientes unidades: Fm. Viñita, Intrusivos del Cretácico Superior tardío y Fm. Los Elquinos (Figura 3.1). En su

curso superior, son abundantes los yacimientos mineros vetiformes asociados al sistema de falla Vicuña, destacándose los yacimientos de Au, Cu, Ag y Pb (Figura 3.3). La suma de factores tanto naturales como antropogénicos son los responsables de los valores Pb y Sb observados. Esta afirmación se basa en que los valores de Pb y Sn son altos respecto a la cuenca del Limarí, pero están dentro de un rango esperable para el tipo de roca presente.

Otros elementos que se salen de la media en el curso medio del Río Hurtado, son el CaO y el Total C. Este resultado se corrobora con la mineralogía, la cual indica la presencia de calcita en la zona (Tabla 4.4). Este aumento se manifiesta principalmente hasta aproximadamente 6 km aguas arriba del Embalse Recoleta (Figura 4.7). Lo cual permite correlacionarlo con la zona de inundación del embalse, donde de manera intermitente (meses o algunos pocos años), el embalse alcanza su máximo.

No se observa un gran contraste entre las concentraciones de los elementos aguas arriba y aguas abajo del Embalse Recoleta. Sin embargo, la concentración de algunos elementos pesados se ve levemente aumentada o disminuida. El caso más destacado es el aumento del Ba, el cual muestra el valor más alto en toda la cuenca. Este valor coincide con la minería no-metálica que se desarrolla en la zona, asociada a la extracción de Baritina (Figura 3.4).

El hecho de que algunos elementos (Pb, Cs, Se, Cd, CaO, Total C) disminuyan su concentración aguas abajo del Embalse Recoleta (Figuras 4.3 4.4, 4.6 y 4.7) se asocia a la capacidad que tienen los embales a precipitar elementos por un efecto gravitacional debido a la baja energía que presentan sus aguas (Galleguillos, 2008).

Los minerales observados aguas abajo del embalse, se relacionan tanto con las rocas de la Fm. Arqueros (cuarzo, albita, ferrohornblenda), como con sus correspondientes minerales de alteración supérgena (óxido de hierro III y saponita) (Tabla 4.4 y Anexo C1).

5.4 Río Limarí

El Río Limarí, a diferencia de los demás ríos de la cuenca, no escurre directamente sobre unidades volcánicas o intrusivas, sino que lo hace sobre una unidad de roca sedimentaria definida como Fm. Confluencia (Figura 3.1). Además, la forma del valle que lo contiene se caracteriza por ser amplio y de muy baja pendiente, favoreciendo la formación de patrones anastomosados en la morfología del río.

En este río son comunes las zonas de baja energía donde se acumulan sedimentos finos y materia orgánica.

El valle del Río Limarí, al ser más amplio que los demás ríos de la cuenca, permite un extenso desarrollo de la agricultura, trayendo consigo un mayor número de centros poblados de los cuales se destaca Ovalle en el tramo superior.

Otra característica relevante observada en este río es la presencia de dos afluentes de importancia: en el curso medio el Estero Ingenio y en el curso inferior el Estero Punitaqui. Estos afluentes presentan antecedentes históricos de perturbaciones ambientales asociados a la actividad minera.

En este contexto se observó un patrón geoquímico y mineralógico diverso, que corresponde tanto a los elementos y minerales propios de esta sub-cuenca, como los que son transportados y depositados por los ríos tributarios que la conforman. A todo esto, se le suman elementos residuales relacionados con la agricultura, industria, minería y centros poblados

De la Figura 4.20, se puede interpretar que la señal química que es propia del Río Limarí, es la que se relaciona al nodo 5 (valores altos en Zr - TiO₂ - Cr₂O₃ - Sc - Ga - Hf - Nb - Ta - V - W). Esta señal comienza inmediatamente en la confluencia de los Ríos Grande y Hurtado y se manifiesta de manera intermitente a lo largo de su curso, cambiando en las confluencias con los esteros y en las zonas de muy baja energía donde se acumulan sedimentos muy finos en forma de fango.

La presencia del nodo 8 en el Río Limarí (Figura 4.20), se asocia principalmente al material transportado de las sub-cuencas de los Ríos Hurtado y Grande. El nodo 8 representa a un grupo de muestras con valores intermedios en elementos como el SiO_2 - Na_2O - K_2O - Rb - Al_2O_3 - MgO - Sc - Ga. Es muy similar químicamente con el nodo 7 sin embargo, se presenta con un mayor contenido de filosilicatos del grupo de las micas y las arcillas (montmorillonita, muscovita, saponita). Las muestras que se agrupan en el nodo 8 tiende a acumularse en zonas de baja energía asociándose frecuentemente al nodo 1 (alto en CaO - Total C - Sr).

Las muestras que se agrupan en el nodo 1 (Figura 4.20) fueron recolectadas donde el río presentaba niveles energéticos muy bajos, y se distribuyen principalmente en la parte media e inferior. Estas fueron recolectadas de pozones con abundante material orgánico tanto vegetal como animal. Este ambiente de baja energía es ideal para la acumulación de sedimentos finos como las arcillas y compuestos húmicos.

Por último, otro nodo que se detectó en el Limarí fue el nodo 6 (Figura 4.20), el cual se manifiesta en el curso inferior y en sectores aledaños a las confluencias de los Esteros Ingenio y Punitaqui. El nodo 6 se asocia a elevadas concentraciones de fosfatos. No es raro que este nodo aparezca acá ya que los fosfatos están fuertemente relacionados con la agricultura (son utilizados como fertilizantes) y esta zona es precisamente donde la agricultura toma mayor importancia a través de diversos tipos de plantaciones.

Una observación realizada a partir de los gráficos univariados de variación geográfica, resaltó el hecho de que el patrón geoquímico de múltiples elementos, observados entre los Esteros Ingenio y Punitaqui, manifestaba un aspecto de "sierra" en contraposición a lo observado en los sedimentos pre-industriales los cuales tienen un comportamiento "plano" (Figuras 4.2, 4.3, 4.4, 4.6, 4.7 y 4.8). Dicha discrepancia podría estar asociada a los cambios en los patrones hidrodinámicos en el cauce inferior del río asociado al fuerte desarrollo de la agricultura impulsada por la construcción del sistema de embalses: los embalses tienen en la actualidad un control fundamental sobre el caudal, el cual está completamente regulado con el propósito de aprovechar al máximo el recurso hídrico para fines agrícolas. Esto repercute en una menor escorrentía a través

del cauce principal, favoreciendo el estancamiento y acumulación de sedimentos finos formados por materia orgánica, limos y arcillas. Luego, este tipo de sedimentos tienen la capacidad formar complejos con los metales pesados afectando su movilidad (Weng, 2002).

Otras observaciones puntuales hacen referencia al efecto tributario que se detectó aguas abajo de la confluencia con el Río Grande, lo que se tradujo en un leve incremento en la concentración de Pb, LREE, Sn, Hf, Zr, Fe, V, Cr₂O₃, TiO₂, Nb y Ta (Figuras 4.3, 4.6 y 4.7). Estos valores pueden asociarse a la existencia de labores mineras de Cu y Pb ubicadas en el curso inferior del Río Grande (Figura 3.3). Luego, en las cercanías de Ovalle se detectó un incremento en P₂O₅, Total S, Ag y Au (Figuras 4.2 y 4.8), probablemente asociado a la superposición actividades agrícolas y mineras (Figura 3.3).

Aguas abajo del Estero Ingenio se detectó un efecto tributario, el cual influye sobre los sedimentos del Limarí elevando las concentraciones de algunos elementos como: Sc, Ga, LREE, Th, Sn, Cr₂O₃, TiO₂, Nb, Ta (Figuras 4.2, 4.3, 4.6 y 4.7), efecto asociado a las actividades mineras y agrícolas allí desarrolladas (Figura 3.3).

En el sector de los Altos del Talinay, se manifiestan altas concentraciones de MgO, Sc, Th, Cr₂O₃, TiO₂, Nb, Ta, Hf, Zr, Fe₂O₃, V y Total S atribuibles a la erosión natural de las rocas presentes. En este sector el río corta transversalmente este cordón montañoso conformado por rocas cristalinas ígneas y metamórficas.

5.5 Estero Ingenio

Este estero siendo un afluente secundario del Río Limarí, fue seleccionado por el hecho de que en su curso medio, en la ribera occidental, opera la planta de tratamiento de metales La Cocinera, perteneciente a la filial Panulcillo (Figura 5.3). Esta Planta se encuentra ubicada a una corta distancia del Estero Ingenio, y tanto sus tranques de relave como pilas de lixiviación podrían presentar infiltraciones de metales pesados a los suelos y napas freáticas que están en contacto directo con el estero (Figura 5.4).

La planta La Cocinera, presenta antecedentes históricos de eventos catastróficos como el del terremoto del 14 de octubre de 1997, cuando se produjo una falla por licuación y deslizamiento en uno de sus tranques de relave (Espinace, 2004).



Figura 5.3: Planta La Cocinera en Estero Ingenio. Se evidencia una estrecha interacción entre agricultura y minería: pilas de lixiviación a escasa distancia de centros agrícolas.

Los resultados del estudio muestran una clara diferencia geoquímica en los sedimentos que se encuentran aguas arriba y aguas abajo de la planta, esto se observa tanto en la Figura 4.20 como en Gráfico 4.9. La composición geoquímica que representa a la muestra tomada inmediatamente aguas abajo de la planta La Cocinera se asocia al nodo 4 (Figura 4.20), que es el mismo observado en el cauce superior del Río Hurtado (Figura 4.20, muestra 40), el cual se caracteriza por presentar concentraciones elevadas en metales como Au, Hg, Ag, Fe, Total S, Pb y Sb. Luego observando el gráfico univariable de variación geográfica (Figura 4.9) queda claro que además existe un fuerte incremento en Cu, Ni, Sb y Bi, destacándose el caso del Cu, el cual supera varias veces el promedio de la cuenca y del PEC. El análisis mineralógico (Tabla 4.5 y Anexo C2) detectó la presencia de covelina lo cual corrobora la presencia de cobre en la zona.



Figura 5.4: Imagen satelital (imagen Google Earth orientada hacia el norte) de la planta La Cocinera. Se observa que las aguas del Estero Ingenio adquieren un color anaranjado aguas abajo de la planta, fenómeno probablemente asociado a de los drenajes de esta. Estas aguas riegan posteriormente un sector agrícola. La muestra 104 fue recolectada en este sector.

Aproximadamente 5 km aguas abajo de la planta, las concentraciones de los elementos antes mencionados vuelven a valores "normales" (Figura 4.9), por lo se puede decir que el fenómeno observado tiene una dispersión local (no como lo observado en el cauce superior del Río Hurtado) y que su origen se relaciona por sobre todo a la actividad minera.

Finalmente el patrón químico en el curso inferior del Estero Ingenio cambia. Los metales procedentes del la planta La Cocinara presentan concentraciones muy bajas mientras que las concentraciones de P_2O_5 , LREE, V, TiO_2 , Co, Hf, Zr, Fe_2O_3 , Cr_2O_3 , y Ta se incrementan abruptamente (y luego disminuyen de la misma forma) alcanzando la confluencia con el Río Limarí con valores levemente sobre la media (Figura 4.9).

La elevada presencia de P_2O_5 al igual como ocurre en el Río Limarí, puede estar relacionada a la agricultura y el uso de fertilizantes. Los demás elementos con concentraciones, no se manifestaron en la muestra pre-industrial. Esto se puede interpretar como una consecuencia de las actividades antropogénicas, por ejemplo la remoción de tierra (asociado a pequeñas labores mineras, Figura 3.3) que liberan minerales residuales de la Fm. Confluencia.

5.6 Estero Punitaqui

Corresponde al último de los afluentes de importancia en el Río Limarí. El patrón geoquímico de sus sedimentos fluviales es variado (Figura 4.20), lo cual tiene relación tanto con la variación geológica presente como con las diversas actividades que se desarrollan en sus riveras. El curso superior del estero escurre de manera muy próxima a su basamento rocoso conformado por intrusivos del Cretácico Inferior (Figura 3.1). En este sector la minería metálica tuvo un importante desarrollo en la Quebrada Los Mantos y en el sector Delirio (Figura 3.3). Posteriormente el curso medio e inferior el estero escurre sobre la unidad sedimentaria Fm. Confluencia (Figura 3.1) en donde se destacan las actividades del tipo agrícola-ganadero.

La señal geoquímica y mineralógica de la parte superior del estero es concordante con lo observado en la mayoría de los ríos que forman parte de la Zona II: un predominio del nodo 3 (Figura 4.20), el cual se que se asocia al "background" propio de las rocas no alteradas que componen la franja central de la cuenca. Sin embargo, en el sector de la Quebrada Los Mantos la composición geoquímica se asocia al nodo 4 (Figura 4.20), similar a lo observado en las nacientes del Río Hurtado (Figura 4.20, muestra 40) y aguas abajo de la planta La Cocinera (Figura 4.20, muestra 104). Las muestras que fueron recolectadas en la Quebrada Los Mantos se ubicaban aguas arriba y aguas abajo de pilas de escombros y tranques de relave construidos en las laderas de la quebrada (Figura 5.5). Las concentraciones de elementos exhibidos en esta quebrada, muestran niveles altísimos de Hg, seguido de Au y Cu (Figura 4.10) que corresponden precisamente a los elementos explotados en los yacimientos aquí presentes.

Aguas abajo de la confluencia de la Quebrada Los Mantos con el Estero Punitaqui se observa un pequeño efecto tributario caracterizado por un leve aumento en las concentraciones de Hg, Au (Figura 4.10). Un dato importante a considerar es el hecho de que en el momento en que fueron recolectadas estas muestras, tanto la Quebrada Los Mantos como el cauce superior del Estero Punitaqui se encontraban secos, por lo que las muestras fueron tomadas de sedimentos activos recientes. En una estación lluviosa el efecto tributario observado probablemente habría sido mayor debido a la capacidad que tiene el agua de movilizar sedimentos.

Entre el curso superior del estero y el curso medio hay una transición geológica (Figura 3.1) que se ve reflejada en la señal química (Figura 4.10). Esta transición se caracteriza por un marcado descenso del Cu y aumento en Hf, Fe₂O₃, V, Cr₂O₃, TiO₂, Nb, Ta, Sr, Total C y P₂O₅.



Figura 5.5: Quebrada Los Mantos en la localidad de Punitaqui. Numerosas pilas de escombros se acumulan a ambos lados de la quebrada y a escasa distancia del cauce principal.

En el curso medio e inferior del estero el agua escurre lentamente, la vegetación es exuberante en ambas riveras y las zonas agrícolas son frecuentes. Estos elementos contribuyen con abundante material orgánico sobre los sedimentos, lo que queda manifestado por las elevadas concentraciones de Total C (Figura 4.20 y Figura 4.10). Además, la señal química y mineralógica en este tramo es similar a la observada en el curso inferior del Río Limarí, manifestando altas concentraciones en fosfatos (probablemente asociados a las actividades agrícolas presentes) e intercalaciones con el nodo 5 (asociado a los minerales resistatos, que son comunes en la Fm. Confluencia: cuarzo, circón, rutilo, magnetita - Anexos C1, C2, C3 y C4).

La muestra pre-industrial (muestra 118) recogida en el curso medio del estero mostró tener elevadas concentraciones de Cu, Au y Hg. Concentraciones incluso superiores a las actuales. Este nuevo factor permite interpretar que la dispersión de estos minerales corriente abajo, tiene una larga data, previa a las actividades mineras. Esto sugiere que el fenómeno tiene un origen natural en la zona, producto de la denudación de las zonas mineralizadas ubicadas en la cabecera del Estero Punitaqui.

5.7 Río Los Molles-Rapel

La primera muestra recolectada en el Río Los Molles presenta altas concentraciones de As, Zn, Cd y Mo (Figuras 4.12 y 4.13). Estas altas concentraciones se relacionan probablemente con una parte distal de la zona de alteración hidrotermal observada en las nacientes del Río Hurtado, sin embargo aquí no se propagan tan extendidamente aguas abajo.

Las rocas que conforman esta sub-cuenca se encuentran en un estado no-alterado lo cual se ve reflejado inmediatamente en la Figura 4.20, la cual clasifica este río entre los nodos 7 y 8. Justamente, estos nodos concentran los principales elementos que componen los minerales formadores de rocas ígneas. Esto es corroborado por la mineralogía que presenta, principalmente compuesta por minerales como cuarzo, plagioclasas, anfíbolos y feldespato-k (Tabla 4.7).

A partir de la distribución de nodos (Figura 4.20) se observa una transición del nodo 7 al nodo 8. Geoquímicamente el cambio es leve ya que el nodo 8 presenta gran parte de los elementos del nodo 7 (pero en una concentración menor). El significado de dicha transición es un importante cambio geológico: el paso de rocas intrusivas paleozoicas a rocas volcánicas mesozoicas.

En tramo correspondiente al Río Los Molles se observó un pick en la muestra 34 de LREE, HREE, Y, Se, Bi, As, Be, U, Sn, Hf, Zr, Nb y Ta (Figuras 4.11, 4.12 y 4.13). Esta muestra se encuentra inmediatamente aguas abajo de una zona de contacto entre la Superunidad Elqui y la Superunidad Ingaguás afectadas por un sistema de fallas

locales. El mayor grado de debilidad en la roca, facilita su alteración y consiguiente liberación de estos elementos (comunes en este tipo de rocas ígneas).

Se detectó la presencia de un mineral de uranio (richietita) en esta zona, que corrobora en cierta medida al análisis químico.

Luego de la confluencia con el Río Palomo se observó un aumento en P_2O_5 , As, Ni, Au, Mo, Zn y Cd (Figuras 4.11, 4.12 y 4.14). Lo más probable es que estos elementos (a excepción del P_2O_5 ,) hayan sido transportados por el Río Palomo, desde sus nacientes en una zona próxima a la zona de alteración hidrotermal ubicada en la alta cordillera entre el Río Los Molles y el Río Hurtado. El caso del P_2O_5 , se puede asociar a la agricultura que se desarrolla en el curso inferior de este río.

Entre el Río Palomo y el Tomes (Figura 1.2) se observó un aumento en K_2O , Rb, Hf, Zr y Ag (Figuras 4.11, 4.13 y 4.14), esto es concordante con las labores mineras de Ag que se desarrollan sobre la falla Tulahuén (Figura 3.3).

Aguas abajo, el Río Tomes aporta sedimentos al río sin generar mayores efectos ya que escurre sobre la misma unidad geológica que el Río Rapel, y las condiciones en que se encuentran ambos ríos en cuanto a geología y actividades humanas son similares. Lo mismo se observó a partir de la muestra recolectada en el Río Grande antes de la confluencia con el Río Rapel. Por último, Río Ponio (último tributario antes del Embalse La Paloma), el cual manifiesta altos valores en Pb (Figura 4.11) asociados a la minería de Pb que se desarrolla en su curso medio (Figura 3.3), tampoco genera un efecto tributario significativo sobre el Río Grande.

5.8 Río Grande

El Río Grande es el río más importante y de mayor caudal dentro de la cuenca, sin embargo no fue seleccionado en este estudio debido a que su escorrentía tiene dirección S-N a SE-NW cortando en su recorrido una pobre cantidad de unidades geológicas diferentes. Solo se consideró el tramo comprendido luego de la confluencia

con el Río Rapel hasta la confluencia con el Río Hurtado para dar origen al Río Limarí (Figura 1.2).

Al contrario de lo que se esperaría encontrar en los sedimentos a la salida del Embalse La Paloma (disminución en elementos pesados), se observó un aumento en las concentraciones altas de MgO, Cu, Mn, Au, Hg, Ba, Sc, Sn (Figuras 4.11, 4.12 y 4.14). Este fenómeno es de carácter muy local ya que estas altas concentraciones no se propagan aguas abajo. Probablemente está relacionado con actividades humanas como la pequeña minería del Cu desarrollada en este sector (Figura 3.3).

El mismo efecto observado en el curso inferior del Río Limarí y del Estero Punitaqui, se observó en este río: la señal geoquímica se vuelve irregular en su curso inferior, justo antes de la confluencia con el Río Hurtado (Figuras 4.11, 4.12 y 4.13). Como se dijo anteriormente, este efecto probablemente está asociado a los cambios en el régimen hidrodinámico natural generados por el actual sistema de embalses, el cual se manifiesta en las zonas de baja energía donde se acumulan sedimentos finos.

En el tramo estudiado, el Río Grande transcurre por las mismas unidades geológicas presentes en el curso inferior del Río Hurtado (Fm. Quebrada Marques y Fm. Arqueros), sin embargo en el caso del Río Grande, dichas unidades se encuentran intruidas por cuerpos graníticos del cretácico inferior. De este modo, la geoquímica aquí observada es levemente diferente. Esto queda representado en la Figura 4.20, en donde se puede observar una intercalación entre el nodo 3 con el nodo 8.

5.9 Río Cogotí

El Río Cogotí presenta un patrón geoquímico relativamente constante con valores inferiores o cercanos al promedio de la cuenca (Figuras 4.16, 4.17 y 4.18). En la Figura 4.20, se observa un cambio en la composición geoquímica en la cabecera del río. Este cambio puede estar asociado a la variación litológica que se presenta al pasar de los cuerpos intrusivos cenozoicos a las unidades volcanoclásticas del cretácico superior.

El Río Cogotí, en su curso medio, recibe aguas de quebradas en ambas riberas. Estas quebradas nacen en zonas con alteración hidrotermal donde se desarrollan pequeñas labores mineras (Figura 3.3): por el norte se encuentra el distrito minero San Lorenzo que consiste en una corrida de vetas de Cu-Pb, Au y Cu-Au-Ag de desarrollo local; por el sur se encuentra el distrito minero Cogotí que corresponde a minas vetiformes de Cu-Au emplazadas en la Fm. Quebrada Marquesa, en los bordes de un gran plutón pórfido andesítico. El aporte de estas quebradas se ve reflejado en el Río Cogotí mediante un ligero aumento en la concentración de Pb, Au, Sb, Sn y Ba que disminuye rápidamente antes de llegar al Embalse Cogotí.

5.10 Río Guatulame

La geoquímica del primer tramo del Río Guatulame es levemente diferente a la observada en el Río Cogotí (Figura 4.20). Se detectó que aguas abajo del embalse hay un aumento en Au, Hg, Cu (superior al PEC, Tabla 2.2), W, Co, Mo, MnO, Fe₂O₃, REE, Y, Hf, Zr, Cr₂O₃, Nb, Ta (Figuras 4.15, 4.16, 4.17 y 4.18). Esto se asocia a una importante zona de alteración hidrotermal ubicada en el margen occidental del Embalse Cogotí (Figura 3.1) donde se desarrollan labores mineras de pequeña escala (Figuras 3.3 y 3.4). Esta zona de alteración corresponde al distrito minero Cerro Botija, donde dominan los yacimientos estratiformes y vetas de Cu asociados con Ag, W y Au. Otros yacimientos en el área son los estratiformes de hierro y los no-metálicos de feldespato potásico y baritina.

Las elevadas concentraciones de Cu observadas en el curso medio y final del Río Guatulame (Figuras 4.16, 4.17 y 4.18), se asocian principalmente a las labores mineras observadas en el área, siendo particularmente numerosas en la sub-cuenca del Río Cárcamo (yacimientos de Cu, Ag y Pb, Figura 3.3). En cuanto a la mineralogía de esta sub-cuenca, se observan principalmente minerales formadores de rocas ígneas (cuarzo, albita, feldespato-K), minerales resistentes a la erosión (asociados a los elementos del nodo 5) y arcillas como la montmorillonita y la illita.

5.11 Calidad ambiental de los sedimentos

En la mayoría de los ríos, esteros y quebradas estudiadas se detectaron elementos en concentraciones lo suficientemente altas como para superar el máximo establecido por el parámetro internacional PEC (Tabla 2.2).

Para este estudio, dado que en el análisis químico se midió Cr_2O_3 y que el PEC establece un máximo para el Cr, solo se consideró el 68,4% de la concentración de Cr_2O_3 . Lo cual corresponde al porcentaje en peso del Cr dentro de la molécula.

El contaminante más común es en la cuenca es el cobre, se encuentra en casi todos los cursos fluviales. En la Tabla 5.1 se resumen que contaminantes fueron encontrados en cada río:

	Cu	Pb	Zn	Ni	As	Cd	Hg	Cr
Hurtado	■		■		■	■		
Los Molles					■			
Guatulame	■							
Grande	■							■
Limari								■
Ingenio	■							
Punitaqui	■						■	■

Tabla 5.1: Contaminantes detectados en cada río estudiado.

Las zonas donde es sobrepasado el PEC se detallan en la Tabla 5.2 y en la Figura 5.6. Los resultados coinciden principalmente con los lugares donde el análisis con redes neuronales (Figura 4.20) ubicó a los nodos 2 y 4:

- Quebrada Los Mantos en el tramo superior del Estero Punitaqui: este sector se caracteriza por haber presentado una intensa actividad minera de carácter histórico. La minería se enfocaba en la extracción de (oro-cobre-mercurio), lo cual se ve manifestado en los sedimentos mostrando altos niveles de Cu-Hg. Aguas abajo, en los alrededores del pueblo Punitaqui, también se detectaron altos niveles de Cu en los sedimentos fluviales.

- Estero Ingenio: alrededores de la planta La Cocinera. Los altos niveles de Cu observados en los sedimentos afectan principalmente a la comunidad de Lagunillas y El Tulahuén.
- Curso superior del Río Hurtado: en las nacientes del río se observa una zona de intensa alteración hidrotermal. Las aguas que bajan por la Quebrada Paso de la Coipita (dentro del prospecto Coipita) presentan contaminación por Cu, Zn, As y Cd. La dispersión de estos metales se observa en gran parte dentro del curso superior del río el cual escurre principalmente dentro de una zona despoblada (terrenos pertenecientes a la propiedad privada de nombre Hacienda Los Bosques). Estos terrenos son utilizados con fines agrícolas en la parte más baja y con fines ganaderos (ganado caprino) en la parte alta (durante el verano). Posteriormente, afuera de los terrenos de la hacienda, los centros poblados que son afectados por estos metales corresponden a las localidades de Pabellón (Cu, AS, Zn y Cd), Las Breas (Zn), El Bosque (Zn), Chañar (Zn y Cu) y Hurtado (Cu y Zn).

Los demás sectores donde se ve sobrepasado el PEC se reparten por diversas zonas dentro de la cuenca siendo los principales contaminantes el Cu, el Cr y el As (Tabla 5.2 y Figura 5.6):

Arsénico:

- Río Los Molles: Se detectó en el curso superior y medio del río (sector Bocatoma y Las Mollacas respectivamente), probablemente proveniente de las zonas de alteración hidrotermal observadas en la alta Cordillera.

Cobre:

- Estero Punitaqui: Sector Delirio, aguas arriba de la confluencia con la Quebrada Los Mantos, esta localidad tuvo un importante desarrollo de la minaría del Ag, Cu y Hg, actualmente la mina del mismo nombre se encuentra fuera de operaciones (Figura 3.3).
- Río Guatulame: curso medio del río, afectando principalmente las localidades de San Marcos, Chañar Alto, San Lorenzo y Guatulame. Probablemente asociado a la oxidación vetas mineralizadas sumado a las labores mineras que se encuentran

tanto en el margen occidental del Embalse Cogotí como a las que se concentran en los alrededores del Río Cárcamo (Figura 3.3).

- Río Grande: curso inferior del río (aguas abajo del Embalse La Paloma) en la localidad de Sotaqui. Probablemente asociado a la oxidación de vetas mineralizadas y a la pequeña minería del cobre (Figura 3.3).

Cromo:

- Estero Punitaqui: en el curso medio e inferior del estero se midieron altos valores en las localidades de Chalinga y Salala.
- Río Grande: en Sotaqui en el sector de la confluencia con el Río Grande.
- Río Limarí: sector desembocadura (Talinay).

En la naturaleza el cromo se encuentra formando parte de la cromita, mineral perteneciente al grupo del espinel. Es común en rocas intrusivas ultramáficas y en rocas metamórficas serpentinizadas. De acuerdo con las características litológicas de la cuenca, la cromita podría presentarse en los basaltos de olivino de las formaciones del Quebrada Marquesa (Kt. Inf) y Arqueros (Kt.Inf), en los intrusivos hipabisales del Cretácico Superior Temprano y en las metabasitas del Complejo Metamórfico del Choapa (Figuras 3.1 y 3.2). Este tipo de rocas se correlaciona con las localidades donde se detectaron niveles elevados de cromo (con excepción del Estero Punitaqui). Por esta razón, el efecto natural asociado debe ser considerado. Por otro lado, los factores antópogénicos asociados al cromo tienen relación con las descargas urbanas y la basura (comercial y doméstica) que es arrojada dentro del canal. Entre las diversas aplicaciones del cromo se destacan usos en curtientes, pigmentos y conservantes textiles, aleaciones, pinturas anti-incrustantes, catalizadores, agentes anticorrosivos, lodos de perforación, baterías de alta temperatura, fungicidas, conservantes de madera, recubrimientos metálicos y electrogalvanizados (Arauzo, et.al., 2003).

La solubilidad del cromo está limitada por la formación de diversos tipos de óxidos e hidróxidos. También presenta una fuerte tendencia a formar complejos estables con especies orgánicas e inorgánicas cargadas negativamente. Debido a esto, el cromo no migra de manera significativa en el rango de pH cubierto por las aguas naturales, sino

que precipita rápidamente y se adsorbe en partículas en suspensión y sedimentos del fondo. El cromo transportado por la corriente es fácilmente adsorbido por la abundante presencia de limos y materia orgánica acumulados en el medio intersticial, en el que además se favorece la acumulación de las partículas en suspensión transportadas por el río, con cromo ya adsorbido (Arauzo, et.al., 2003).

			Cu	Pb	Zn	Ni	As	Cd	Hg	Cr
		PEC	149	128	459	48,6	33	4,98	1,06	111
Río	Localidad	ID Muestra	Cu	Pb	Zn	Ni	As	Cd	Hg	Cr
Hurtado	Hacienda el Bosque	39	-	-	525	-	440,3	-	-	-
Hurtado	Hacienda el Bosque	40	452,9	-	-	-	556,4	-	-	-
Hurtado	Hacienda el Bosque	41	1063,7	-	-	-	262,3	-	-	-
Hurtado	Hacienda el Bosque	42	-	-	2969	-	598,2	-	-	-
Hurtado	Hacienda el Bosque	43	860,7	-	1093	-	241,9	5,8	-	-
Hurtado	Hacienda el Bosque	44	1098,2	-	1858	-	188,6	12,7	-	-
Hurtado	Hacienda el Bosque	45	1481,1	-	3041	-	204,5	17,6	-	-
Hurtado	Hacienda el Bosque	46	917,5	-	2418	-	148,7	15	-	-
Hurtado	Hacienda el Bosque	47	1251,7	-	3391	-	178,8	21,5	-	-
Hurtado	Hacienda el Bosque	48	1313,8	-	4374	-	147,2	27,2	-	-
Hurtado	Hacienda el Bosque	J3	819,7	-	2558	-	122,4	17,6	-	-
Hurtado	Hacienda el Bosque	3	909,9	-	3556	-	94	26	-	-
Hurtado	Pabellón	2	634,8	-	2737	-	51,9	18,9	-	-
Hurtado	Las Breas	1	427,6	-	1719	-	43,9	10,6	-	-
Hurtado	El Bosque	49	-	-	617	-	-	-	-	-
Hurtado	Chañar	50	-	-	735	-	-	-	-	-
Hurtado	Hurtado	51	239	-	937	-	-	-	-	-
Punitaqui	Queb. Los Mantos	23	335,2	-	-	-	-	-	5,02	-
Punitaqui	Queb. Los Mantos	25	576	-	-	-	-	-	1,11	-
Punitaqui	Delirio	28	187,3	-	-	-	-	-	-	-
Punitaqui	Punitaqui	27	230,4	-	-	-	-	-	-	-
Punitaqui	Punitaqui	121	226,4	-	-	-	-	-	-	-
Punitaqui	Chalinga	116	-	-	-	-	-	-	-	178
Punitaqui	Salala	112	-	-	-	-	-	-	-	137
Guatulame	San Marcos	33	195,4	-	-	-	-	-	-	-
Guatulame	Chañaral Alto	88	154,1	-	-	-	-	-	-	-
Guatulame	San Lorenzo	89	164	-	-	-	-	-	-	-
Guatulame	Guatulame	90	205,3	-	-	-	-	-	-	-
Los Molles	Bocatoma	37	-	-	-	-	53	-	-	-
Los Molles	Las Mollacas	63	-	-	-	-	38,7	-	-	-
Grande	Sotaqui	95	171,5	-	-	-	-	-	-	-
Grande	Sotaqui	98	179,6	-	-	-	-	-	-	-
Grande	Sotaqui	99	-	-	-	-	-	-	-	157
Limari	Talinay	113	-	-	-	-	-	-	-	151
Ingenio	Lagunillas	103	193,9	-	-	-	-	-	-	-
Ingenio	Lagunillas	104	834,7	-	-	-	-	-	-	-
Ingenio	El Tulahuen	114	256,9	-	-	-	-	-	-	-

Tabla 5.2: Detalle de localidades donde la concentración de metales supera el máximo establecido por el parámetro PEC. Los valores de concentración de los elementos están expresados en ppm. Las casillas que están sin información presentan valores inferiores al PEC.

5.12 Fuentes de error y métodos de mitigación

5.12.1 Muestreo

Para evitar medir anomalías no representativas (por ejemplo, un pequeño filón mineralizado), las muestras fueron recolectadas de una zona amplia. La muestra final se compone de un conjunto de sub-muestras que incluyen sedimentos de ambas riveras y de su curso central, las cuales posteriormente fueron homogenizadas en su propia bolsa. Luego en el laboratorio, nuevamente fueron homogenizadas mediante los distintos procesos de tamizaje.

En el caso de las muestras pre-industriales, estas fueron recolectadas de terrazas fluviales laterales a los cursos principales. Para la extracción de estas muestras se procedió a hacer un "raspado" de pared de los sedimentos expuestos. El raspado se realizó cubriendo la pared tanto en eje vertical como en el horizontal, tratando de cubrir un área amplia. En este tipo de muestras, siempre fueron observados agentes biológicos interactuando con los sedimentos, por lo que fue inevitable incluir restos orgánicos (raíces, hojas, ramas, insectos, etc.) en los sedimentos recolectados.

Debido a que en numerosas ocasiones, los accesos al río fueron muy limitados debido a lo escarpado del terreno en la zona cordillerana, o a la presencia de extensos campos (con acceso restringido) en la parte baja de la cuenca, muchas muestras tuvieron que ser recolectadas en sectores aledaños a cruces de río: puentes de madera, hormigón, fierro o simples pasos vehiculares directamente sobre el lecho. Debido a que la dispersión de contaminantes es favorable en la dirección de escorrentía, la muestra fue recolectada en la dirección contraria, es decir, aguas arriba del cruce en cuestión.

Otro factor importante a considerar es la fecha en que se realizó la recolección de muestras. Las muestras fueron recolectadas durante la estación seca (verano, enero del 2010), y como se explicó anteriormente, los ríos que componen la cuenca tienen un régimen de alimentación pluvial, nival y mixta. Este factor repercute principalmente en las quebradas que componen la parte baja de la cuenca, donde el principal aporte es de origen pluvial. Por esta razón muchas muestras recolectadas en este sector y que

fueron consideradas como sedimentos activos, no fueron recogidas de un cauce con agua, sino que se recolectaron de lechos secos de cauces activos recientes.

5.12.2 Preparación de las muestras

En esta etapa, la fuente de error se asocia a los procesos de tamizaje y molienda, los cuales pueden generar contaminación cruzada de muestras. Para evitar al máximo dicho error, se procedió a limpiar cada instrumento que estuvo en contacto directo con las muestras con una pistola de aire comprimido, y en el caso de los tamices # 80, fueron remojados en una cámara de ultrasonido durante media hora y posteriormente fueron enjuagados meticulosamente bajo un chorro de agua. Luego, estos tamices no fueron reutilizados hasta que se encontraron completamente secos.

5.12.3 Análisis geoquímico

El control de calidad de los resultados se realizó comparando los distintos resultados que arrojaron algunas muestras duplicadas y luego a partir de estos resultados se obtuvo una regresión lineal con su correspondiente coeficiente de determinación (R^2).

Un mayor número de muestras duplicadas habría arrojado un valor de R^2 más certero. En promedio se obtuvieron valores 8 duplicados por cada elemento.

5.12.4 Análisis mineralógico

Los resultados mineralógicos entregados por el equipo de Rayos-X (PANalytical, modelo X'Pert PRO) del laboratorio del SERNAGEOMIN, son entregados en forma gráfica, los cuales requieren de una correcta interpretación por parte de expertos calificados mediante la utilización de un software especializado. El error asociado a este procedimiento se puede considerar humano dentro de un pequeño rango, ya que el software propone los resultados posibles y el operador debe discriminar cuales se alejan (o no) de lo posible, dado el ambiente geológico al que pertenecen las muestras.

5.12.5 Redes neuronales

Una característica del tratamiento de datos mediante redes neuronales, en este caso, no supervisadas, es que el crecimiento de la red ocurre de forma autónoma, sin la

intervención del operador. Sin embargo, para detener el crecimiento de la red, se debe introducir la cantidad de nodos que se crearán de manera previa. El número de nodos introducidos por el operador dependerá de los resultados que se van observando mediante la repetición del análisis para distintas cantidades de nodos. El criterio utilizado en este estudio, fue detener el análisis cuando los resultados se hacían recursivos y muchos elementos tenían el mismo nodo en común.

En este contexto hubo dos resultados posibles, uno con 7 nodos y otro con 8 nodos. El resultado con 7 nodos fue menos recursivo que el de 8, sin embargo se optó por el de 8 ya que permitía discriminar de manera más detallada la señal geoquímica de los diversos ríos que componen la cuenca (el de 7 nodos asociaba demasiadas muestras a un mismo nodo).

5.12.6 Gráficos univariados de variación geográfica

Dado que la mayoría de los elementos incorporados a los gráficos son de carácter numérico, el error asociado a ellos es dado por la estadística que se entrega en la Tabla 4.1. Sin embargo, la información litológica es solo una simplificación de lo que se observa en la cuenca. Se propuso con el fin de dar una idea general del ambiente al que pertenece cada muestra, los límites entre estas zonas geológicas también son aproximaciones y pueden variar levemente.

5.12.7 Tablas mineralógicas

La principal dificultad en el análisis de estas tablas y una potencial fuente de error, se asocia a la baja densidad de muestras. El análisis mineralógico consta de un número muy inferior de muestras, respecto al análisis geoquímico. Las muestras seleccionadas para este análisis son representativas de zonas bastante extensas las cuales podrían tener una composición mineralógica diferente. Además, dado que la movilidad de los minerales depende de variados factores, es posible que algunos minerales se concentren o empobrezcan en distintas zonas (lejos o cerca de su lugar de origen), haciendo que los resultados no reflejen fielmente la realidad.

6 Conclusiones

A través de los resultados de los análisis químicos y mineralógicos se estableció la línea de base de los sedimentos fluviales activos que componen la cuenca del Río Limarí. Mediante del análisis esta línea de base, se realizó una caracterización geoquímica de que corroboró la hipótesis: los sedimentos finos (en la fracción $<180 \mu\text{m}$) reflejaron tanto factores naturales como antrópicos incidentes en el sistema fluvial. Los factores naturales se relacionan con la influencia que tiene la composición química del basamento rocoso sobre los sedimentos, y con el efecto tributario que se produce en las confluencias con ríos, quebradas y esteros. Los factores antropogénicos se relacionan con actividades agroindustriales, mineras, urbanización y la presencia del sistema de embalses.

6.1 Redes neuronales

La caracterización geoquímica de los diversos cursos fluviales se estableció a partir del tratamiento de datos mediante redes neuronales artificiales del tipo no-supervisadas. Este análisis agrupó todos los cursos fluviales según 8 características principales (8 nodos, Figura 4.20):

- Nodo 1: zonas de baja energía, alta vegetación, amplio desarrollo de la actividad agrícola y ganadera. Se favorece la depositación de sedimentos finos y acumulación de materia orgánica.
- Nodo 2: anomalía geoquímica del Río Hurtado que es generada por la fuerte dispersión de metales a partir de las zonas de alteración hidrotermal ubicadas en la Alta Cordillera.
- Nodo 3: background geoquímico de las rocas volcánicas no alteradas que conforman la zona central-inferior de la cuenca. Se manifiesta principalmente en el sector definido como montaña media.
- Nodo 4: zonas con elevadas concentraciones de metales pesados, se manifiesta en sectores donde la actividad minera tiene un importante impacto sobre el ambiente. También se manifiesta de forma natural en zonas de alteración hidrotermal con enriquecimiento en metales pesados.

- Nodo 5: zona donde se acumulan minerales resistentes a la erosión (resistatos). Principalmente asociado a las rocas sedimentarias continentales clásticas de la Formación Confluencia.
- Nodo 6: zona donde la agricultura tiene un impacto importante sobre los sedimentos. Principalmente a través del uso de fertilizantes a base de fosfatos.
- Nodo 7: background geoquímico de las rocas que conforman la alta cordillera y zona central-superior de la cuenca.
- Nodo 8: similar químicamente con el nodo 7, presenta una mineralogía con mayor cantidad de filosilicatos (micas y arcillas). Los sedimentos asociados a este nodo son transportados desde la Cordillera y se acumula en las zonas de baja energía en la parte baja de la cuenca.

6.2 Río Hurtado

Los sedimentos del curso superior del Río Hurtado presentan un fuerte enriquecimiento en Cu, As, Ni, Zn, Cd, Mo, HREE, Y, Co, Au, Ag, Total S, MnO, Sn y Fe₂O₃, Se, Bi, Tl, Be, U, LREE, K₂O, Cs, Sb (Figuras 4.3, 4.4, 4.5, 4.6 y 4.8), respecto a los demás ríos de la cuenca. El origen de estos elementos se relaciona con una zona de alteración hidrotermal ubicada en la Alta Cordillera correspondiente a la franja metalogénica del Neógeno. No hay actividades mineras de importancia en esta zona (solo se detectaron prospectos) (Figura 1.2 y 3.3), por lo que el fenómeno observado tiene un origen de carácter natural. Los procesos que controlan la tan extendida dispersión de metales pesados río abajo, se relaciona con procesos químicos y físicos. Los procesos químicos se asocian con los eventos involucrados desde las etapas iniciales de alteración (hidrólisis y destrucción de feldspatos) hasta las más recientes (oxidación de sulfuros). Los procesos físicos se relacionan con los mayores niveles energéticos que presenta curso superior del río, relacionado con una zona de mayor pendiente, lo cual favorece el transporte de elementos pesados.

El cambio geológico y geomorfológico que existe entre el curso superior y el curso medio del río (definido por la Falla Vicuña, Figura 3.1), también representa un cambio químico. Y en conjunto, estos factores controlan la movilidad de los metales

dispersados, los cuales disminuyen rápidamente su concentración a valores medios en unos pocos kilómetros (Figuras 4.3, 4.4, 4.5, 4.6 y 4.8).

En el curso medio del río, los aportes procedentes del Río Chacay, en el cual existen algunas pequeñas labores mineras (Figura 3.3), generan un incremento en los niveles de Pb y Sb pero sin alcanzar niveles tóxicos (Figuras 4.3 y 4.8).

El curso inferior del río se ve controlado por el Embalse Recoleta. El cual influye captando los elementos pesados provenientes de la Cordillera, y modificando los patrones hidrodinámicos naturales de sedimentación aguas abajo. Esto ocurre a causa del estricto control que se tiene sobre el caudal que es liberado.

Los niveles de Ba son muy altos luego del Embalse Recoleta, lo que es concordante con la minería no-metálica (baritina) aquí presente (Figura 3.3).

6.3 Río Limarí

El Río Limarí escurre principalmente sobre una formación de sedimentos continentales clásticos, a lo largo de un valle amplio y de baja pendiente (Figuras 1.3 y 3.1). Su patrón geoquímico es diverso ya sus sedimentos corresponden a la sumatoria de los sedimentos transportados por los diversos ríos que componen la cuenca.

En este valle, existe un extenso desarrollo de la agricultura acompañada de numerosos centros poblados. Aquí, la agricultura debe convivir con aportes fluviales procedentes de zonas donde existen numerosos yacimientos metálicos: Estero Ingenio (en su curso medio) y Estero Punitaqui (en su curso inferior) (Figura 3.3). Sin embargo, no se detectaron efectos tributarios adversos, asociados a minería, provenientes de estos esteros.

Se destaca la presencia de altos valores de carbono (asociado a los bajos niveles energéticos que favorecen la acumulación de materia orgánica) y fosfatos (asociados al uso de fertilizantes en la agricultura) (Figura 4.20).

La señal química de este río, se encuentra fuertemente afectada por el sistema de embalses, los cuales han modificado los patrones hidrodinámicos naturales. Esto repercute en la esorrentía y favorece la acumulación de sedimentos finos (los cuales tienden a precipitar metales pesados mediante la formación de complejos).

6.4 Estero Ingenio

Afluyente secundario del Limarí, en su curso medio opera la planta de tratamiento de metales La Cocinera (Figura 1.2, 5.3 y 5.4). Dicha planta presenta tranques de relave y pilas de lixiviación a corta distancia del estero. Los efectos de la Planta, sobre los sedimentos del estero, se relacionan con un fuerte incremento en las concentraciones (inmediatamente aguas abajo) de Cu, Hg, Ni, Sb, Bi, Fe, Au y Ag (Figura 4.9).

El efecto observado aguas abajo de la Planta, no se mantiene más allá de 3 a 5 kilómetros, momento en que la mayoría de los elementos mencionados alcanza valores normales (relativos a la cuenca), sin llegar a afectar los sedimentos del Río Limarí, pero sí los sedimentos de las localidades más cercanas (Figura 4.9).

6.5 Estero Punitaqui

Último de los afluentes de importancia del Río Limarí (Figura 1.2). Presenta un patrón geoquímico variado como consecuencia de las variaciones geológicas como de las actividades que allí se desarrollan. El curso superior del estero escurre sobre intrusivos del Cretácico Inferior (Figura 3.1), donde la minería se desarrolló en torno a yacimientos de Au-Hg-Cu (Figura 3.3). El curso medio e inferior del estero escurre sobre la Fm. Confluencia (Figura 3.1), donde la principal actividad es la agricultura.

La influencia que tiene la minería sobre los sedimentos de la cuenca se ve principalmente en el sector Quebrada Los Mantos (Figura 3.3 y 5.5), donde se manifiestan niveles de Hg muy elevados, seguidos de Cu y Au. Estos niveles disminuyen rápidamente, pero aún así logran afectar a la comuna de Punitaqui donde se detectaron niveles altos de Cu (Figura 4.10).

Los sedimentos pre-industriales también presentan elevadas concentraciones de Cu, Au y Hg, lo que sugiere que la dispersión de estos elementos también tiene una componente de origen natural.

Morfológicamente, el curso medio e inferior del río son de baja pendiente (Figura 1.3), esto facilita la acumulación de sedimentos finos, los cuales en esta zona se caracterizan por la fuerte presencia de material orgánico. Esto queda manifestado en elevados niveles de carbono total detectados. Otros elementos destacados en este tramo del estero son el P_2O_5 , relacionado con el uso de fertilizantes en las actividades agrícolas y el Cr, relacionado con desechos industriales y urbanos (Figura 4.10).

6.6 Río Los Molles-Rapel

En el curso superior del Río Los Molles se detectaron altas concentraciones de As, Zn, Cd y Mo (Figuras 4.12 y 4.13) probablemente asociadas a la zona de alteración hidrotermal observada en las nacientes del Río Hurtado (Figura 3.1). La dispersión de estos elementos es muy local y no afecta a las aguas río abajo. Solo se detecta un nuevo aumento en As (acompañado de Ni y Au) luego de la confluencia con el Río Palomo, el cual nace en un sector próximo a la zona de alteración antes mencionada (Figura 3.1).

El Río Rapel, manifiesta valores altos en Ag (Figura 4.14), luego de pasar sobre la falla Tuluahuén, sector donde además se emplazan algunas labores mineras asociadas a este elemento (Figura 3.3).

No se observó ningún efecto tributario significativo proveniente de los Ríos Tomes, Grande y Ponio, sobre los sedimentos de este río.

6.7 Río Grande

Se detectó que aguas abajo del Embalse La Paloma existe un incremento en elementos metálicos como MgO, MnO, Hg, Au, Sc, Sn y Ba (Figuras 4.11 a 4.14). Dado que los embalses tienen la capacidad de retener elementos pesados, estos elementos no deben provenir de la cuenca que es drenada aguas arriba, sino que deben tener un

origen local y asociarse a las labores de la pequeña minería que se desarrolla en el sector (Figura 3.3).

A pesar de escurrir sobre las mismas unidades geológicas que el tramo inferior del Río Hurtado, la señal química de este río es levemente diferente ya que las rocas se encuentran intruidas por cuerpos graníticos del Cretácico Inferior (Figuras 3.1 y 4.20).

6.8 Río Cogotí

Las rocas del curso superior del Río Cogotí, a diferencia de los otros ríos estudiados, se caracterizan por presentar rocas casi sin alteración, por lo que la señal química es muy fiel a la composición litológica, sin manifestar enmascaramientos producto de la dispersión de elementos de fuentes lejanas ni contaminación producto de actividades humanas (Figura 4.20).

Por lo general, los valores de la mayoría de los elementos se encuentran dentro (o bajo) el promedio de la cuenca (Figuras 4.15 a 4.18).

En el curso medio e inferior se detectan aportes en ambas riberas provenientes de zonas de alteración donde se desarrollan pequeñas labores mineras de Cu, Pb, Au y Ag (Figura 3.3). Estos aportes repercuten mediante un pequeño aumento en Pb, Au, Sb, Sn y Ba, que disminuye rápidamente antes de llegar al Embalse Cogotí (Figuras 4.15, 4.17 y 4.18).

6.9 Río Guatulame

La geoquímica del curso superior del Río Guatulame, inmediatamente aguas abajo del Embalse Cogotí, manifiesta un significativo aumento en la concentración de Cu, seguido de Hg, Au, W, Co, Mo, MnO, Fe, REE, Y, Hf, Cr₂O₃, Nb y Ta (Figuras 4.15 a 4.18). Estos valores se asocian a la zona de alteración hidrotermal presente en el margen occidental del embalse (Figura 3.1) donde se desarrollan yacimientos de Cu y Fe acompañados de Ag, W y Au (Figura 3.3).

En el curso medio e inferior del río nuevamente se manifiestan concentraciones elevadas de Cu, las que se pueden asociar a las numerosas labores mineras presentes en el área (principalmente en la sub-cuenca del Río Cárcamo) (Figura 3.3).

6.10 Efectos de la minería

La contaminación por metales pesados en los sedimentos fluviales, en la mayoría de los casos es de un carácter mixto. Es decir se produce tanto como un efecto natural: lixiviación de vetas mineralizadas como producto de la oxidación de minerales como la pirita, o denudación de zonas de alteración causada por los agentes erosivos; como un efecto de origen humano: en la parte central de la cuenca se encuentran numerosos yacimientos metálicos y plantas de beneficio que son explotados por la pequeña y mediana minería (Figura 3.3), estos yacimientos siempre se encuentran asociados a materiales de descarte (Figuras 5.3, 5.4 y 5.5), los cuales, al igual que las vetas mineralizadas, sufren procesos de lixiviación, adicionando cobre y otros metales pesados a los cauces. Fenómeno que se intensifica en años lluviosos.

6.11 Sistema Paloma

El Río Limarí se encuentra fuertemente regulado por tres embalses: Recoleta, La Paloma y Cogotí (Figura 1.2). Estos embalses influyen en el transporte de sedimentos principalmente a través de la decantación (gravitacional) de elementos pesados provenientes de los ríos que los alimentan. Otro efecto importante, se relaciona con cambios en el régimen hidrodinámico natural del río, que afecta específicamente a los sedimentos aguas abajo de los embalses. Este efecto se observa en la actualidad como una señal geoquímica compleja en la mayoría de los elementos principalmente en las zonas de baja energía. En estas zonas, tienden a acumularse sedimentos finos y materia orgánica, los cuales interactúan con metales, haciéndolos precipitar mediante la formación de complejos.

6.12 Calidad ambiental del sedimento

Las elevadas concentraciones de metales pesados en los sedimentos fluviales, en la cuenca del Limarí, pueden tener un origen natural (cabecera del Río Hurtado), un origen antropogénico (planta La Cocinera) o un origen mixto (cabecera Estero Punitaqui). Siendo cualquiera el origen, las concentraciones en metales pesados que se alcanzan son preocupantes.

Según el análisis de calidad ambiental de los sedimentos, elementos como el Cu, Cd, Hg, As, Zn y Cr, presentan concentraciones superiores a las máximas recomendados para la salud del medio ambiente (Tabla 5.2), razón por la cual existe una alta probabilidad de que los ecosistemas asociados a estos ríos se vean afectados en forma negativa (Figura 5.6):

- Curso superior del Río Hurtado presenta contaminación por Cu, As, Cd y Zn.
- Curso superior y medio del Río los Molles presenta contaminación por As.
- Curso medio del Río Guatulame presenta contaminación por Cu.
- Curso inferior del Río Grande presenta contaminación por Cu y Cr.
- Curso inferior del Río Limarí presenta contaminación por Cr.
- Curso medio de Estero Ingenio (aguas abajo de planta La Cocinera) presenta contaminación por Cu.
- Curso superior del Estero Punitaqui presenta contaminación por Cu y Hg, curso medio e inferior presenta contaminación por Cr.

6.13 Recomendaciones

Las elevadas concentraciones de elementos como el Cu, Cd, Hg, As, y Cr en los sedimentos fluviales representa una amenaza tanto para los ecosistemas como para la salud pública, por lo que se sugiere un estudio a menor escala con el fin de identificar las principales fuentes. En este sentido los datos entregados en este estudio pueden servir como punto de inicio a un futuro monitoreo.

7 Referencias Bibliográficas

- Acme Labs, Acme Analytical Laboratories (Vancouver) Ltd., Price Brouchure 2009.
- Arauzo M, Rivera M, Valladolid M, Noreña C, Cedenilla O. Contaminación por cromo en el agua intersticial, en el agua del cauce y en los sedimentos del Río Jarama. Revista Limnética, 22 (3-4), páginas 85-98, 2003.
- Birch, GF, Robertson, E, Taylor, SE, McConchie, DM. The use of sediments to detect human impact on the fluvial system. Environmental Geology 1999; 3:1015–1028.
- 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.
- Cartas de levantamiento topográfico del IGM (Instituto Geográfico Militar) - Chile, escala 1:50000. Hojas nº 67 Tongoy, nº 68 Embalse Recoleta, nº 69 Pichasca, nº 70 Hurtado, nº 74 Salala, nº 75 San Julián, nº 76 Ovalle, nº 77 Monte Patria, nº 78 Central Los Molles, nº 79 Cordillera La Doña Rosa, nº 81 Peña Blanca, nº 82 Punitaqui, nº 83 Mantos de Punitaqui, nº 84 Guatulame, nº 85 El Maqui, nº 86 Paso de Los Azules, nº 3 Combarbalá, nº 4 Cogotí, nº 5 Las Ramadas.
- Censo Nacional Agropecuario y forestal 2007; Resultados por comuna; Cuadro 6: Superficie total sembrada o plantada por grupo de cultivos, según región, provincia y comuna; INE 2007.
- Conaway, C, Pride, D, Faure, G, Tettenhorst, R. Mineralogical and geochemical investigation of sediment in the Snake River arm of the Dillon Reservoir, Summit County, Colorado, USA. Lakes & Reservoirs: Research and Management 2005; 1:235–242.
- Diario El Ovallino, 20 enero 2010. URL:
http://www.elovallino.cl/index.php?option=com_content&view=article&id=1854:en-u25-millones-es-rematada-minera-punitaqui&catid=9:dinero&Itemid=469
- Dirección General de Aguas (DGA), Ministerio de Obras Públicas, Gobierno de Chile. Diagnóstico y Clasificación de los Cursos de Agua Según Objetivos de Calidad. Cuenca del Río Limarí, 2004.

- Dirección General de Aguas (DGA), Ministerio de Obras Públicas, Gobierno de Chile. Evaluación de los recursos hídricos subterráneos de la cuenca del Río Limarí. Informe Técnico, Departamento de administración de recursos hídricos; S.D.T. N°268, 2008.
- Emparan C, Pineda G. Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica N° 96. Geología del Área Andacollo-Puerto Aldea, Región de Coquimbo. Escala 1:100000, 2006.
- Espinace, R, Villavicencio, G. Seminario: Innovación en el control de operación y abandono de tranques de relave. Metodología integrada para rehabilitar rellenos sanitarios y tranques de relave. Pontificia Universidad Católica de Valparaíso. Proyecto FONDEF 0011101, EXPOMIN 2004.
- Fritzke, B. Growing cell structures - A self-organizing network for unsupervised and supervised learning. Neural Networks 1993; 7: 1441–1460.
- Gajardo, A, López, M. Yacimientos de rocas y minerales industriales de la IV región de Coquimbo. Carta geológica de Chile. Serie recursos minerales y energéticos. N° 11. Escala 1:500000, 2004.
- Gajardo, A. Mapa metalogénico de las hojas Ovalle e Illapel, IV región: yacimientos minerales metálicos y no metálicos. Escala 1:250.00. Santiago, IIG, IREN, 1977.
- Galleguillos, G, Oyarzún, J, Maturana, H, Oyarzún, R. Retención de arsénico en embalses: el caso del Río Elqui, Chile. Ingeniería hidráulica en México, Vol. XXIII, núm. 3, pp. 29-36. Julio-Septiembre de 2008.
- 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.
- Griem-Klie. Exploraciones mineras. Cap 3 Método geoquímico de exploración. Departamento de Minas, Área Geología, Universidad de Atacama. Geovirtual 2009. URL: <http://www.geovirtual.cl/EXPLORAC/TEXT/03000g~1.htm>
- Guerra, Nelson. Apuntes de Clases. Geoquímica Exógena. Universidad Católica del Norte, 2006.
- Hellyer, G. Ten Mile River Watershed-Massachusetts: An Assessment of Sediment Chemistry and Ecotoxicity. US Environmental Protection Agency Report2000; URL:

<http://www.epagov/Region1/lab/reportsdocuments/tenmile/WatershedEcotoxicityReportpdf.>, March 2008.

- Higuera, P , Oyarzún, R, Oyarzún, J, Lillo, J Maturana, H, Morata, D. Environmental assessment of copper–gold–mercury mining in the Andacollo and Punitaqui districts, northern Chile. *Applied Geochemistry* 2004; 19:1855 -1864.
- Instituto Nacional de Estadística (INE); Población total por sexo e índice de masculinidad según región y área urbana-rural. Censo 2002.
- Lacassie, J P, Roser, BP, Ruiz del Solar, J, Hervé, F. Visualization of geochemical datasets by using neural networks: a novel perspective for sedimentary provenance analysis. *Sedimentary Geology* 2004b; 16:175–191.
- 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, J P. Estudio mineralógico y geoquímico y del sistema fluvial del Río Rapel, VI Región, Chile. Sernageomin 2008.
- 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.
- MacDonald, D, Ingersoll, C, Berger, T. Development and evaluation of consensusbased 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, A, Lechler, PJ, Miller, JR, Turner, JN. A geomorphological approach to the management of rivers contaminated by metal mining. *Geomorphology* 2006; 7:423-447.
- Maksaev V. Reseña metalogénica de Chile y de los procesos que determinan la metalogénesis andina. Universidad de Chile, Departamento de Geología, 2001.
- Mpodozis C, Cornejo P. Carta Geológica de Chile Nº 68. Hoja Pisco Elqui, IV Región de Coquimbo. Escala 1:250000, 1988.

- 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, Paulo, A, 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 Environ* 2003; 2:155-161.
- Oyarzún, R, Higuera, P, Lillo, J, Oyarzún, J, Maturana, H. Investigando temas minero-ambientales en el norte de Chile: más allá de los megaproyectos, la investigación formateada y la retórica ambientalista. *Tierra y tecnología*, nº 37, 81-90. Primer semestre de 2010.
- Oyarzún, 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 processes. *Journal of Geochemical Exploration* 2004; 8:53-64.
- 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.
- Oyarzún, R, Oyarzún, J, Lillo, J Maturana, H, Higuera, P. Strong Metal Anomalies in Stream Sediments from Semiarid Watersheds in Northern Chile: When Geological and Structural Analyses Contribute to Understanding Environmental Disturbances. *International Geology Review*, Vol. 48, 2006, p. 1133-1144.
- Oyarzún, Ricardo. Estudio de caso: Cuenca del Limarí, Región de Coquimbo, CHILE. *Compilación Resumida de Antecedentes Centro de Estudios Avanzados en Zonas Áridas - Universidad de la Serena (CEAZA-ULS)*, 2010.
- Pineda F. Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica Nº 116. Geología del Área Monte Patria-El Maqui, Región de Coquimbo. Escala 1:100000, 2008.
- Pineda G, Emparan C. Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica Nº 97. Geología del Área Vicuña-Pichasca, Región de Coquimbo. Escala 1:100000, 2006.
- Rivano G, Sepulveda P. Carta Geológica de Chile Nº 69. Hoja Illapel, Región de Coquimbo. Escala 1:250000, 1991.

- Rodríguez, Hernán. Declaración de Impacto Ambiental - Plan Regulador Intercomunal Provincia de Limarí, IV Región de Coquimbo, 2009.
- Rose Arthur W., Hawkes Herbert E., Webb John S. Geochemistry in mineral exploration. Academic Press, 2nd edición, 1980.
- Salas, Rodrigo. Redes Neuronales Artificiales. Departamento de computación, Universidad de Valparaíso, [s.a].
- SEREMI de Vivienda y Urbanismo, MINVU, Región de Coquimbo. Plan regulador intercomunal provincia de Limarí. Declaración de impacto ambiental, 2009.
- Superintendencia de Servicios Sanitarios (SISS). Informe anual de coberturas urbanas de servicios sanitarios 2009.
- Thomas Bohnhorst, Herbert. Geología de la Hoja de Ovalle, Provincia de Coquimbo. Instituto de Investigaciones Geológicas, Chile. Boletín N°23, 1967.
- Ulriksen, C. Mapa Metalogénico de Chile entre los 18° y 34° S. Servicio Nacional de Geología y Minería, Boletín 42, 1990.
- Weng, L, Temminghoff, E, Lofts, S, Tipping, E, Van Riemsdijk, W. Complexation with dissolved organic matter and solubility control of heavy metals in a sandy soil. Environ. Sci. Technol, 36, 4804-4810, 2002.

Anexo A

Resultados de análisis químico

Muestra	J1	J2	1	2	3	J3	4	5	6	7	8	9
UTM-E	345574	345574	348215	350892	352099	355614	335282	329524	329524	322680	306963	298881
UTM-N	6638604	6638604	6636204	6632904	6629111	6628319	6647740	6641096	6641096	6637872	6629353	6623018
Elementos Mayores %												
SiO2	57,19	54,16	51,68	52,06	49,08	57,47	56,76	51,86	52,79	53,98	38,79	48,52
Al2O3	16,38	15,43	15,36	15,44	15,46	15,14	15,69	14,33	16,37	15,49	11,67	15,53
Fe2O3	8,14	14,31	7,43	8,55	8,56	6,59	8,61	12,35	8,13	10,07	7,34	10,8
MgO	1,87	1,99	1,96	1,8	1,36	1,16	2,35	1,93	2,4	2,2	1,83	2,5
CaO	4,23	4,8	4,02	3,55	3,39	2,14	4,19	5,87	5,78	5,7	17,44	5,35
Na2O	3,71	3,5	2,76	2,63	2,14	2,42	3,25	3,36	2,85	2,97	2,26	2,55
K2O	2,12	1,86	1,76	1,88	1,81	2,3	1,88	1,68	1,49	1,47	1,22	2,53
TiO2	0,66	1,01	0,76	0,89	0,74	0,61	0,99	1,42	0,92	1,18	0,85	0,91
P2O5	0,26	0,23	0,26	0,24	0,2	0,17	0,2	0,19	0,24	0,19	0,17	0,22
MnO	0,21	0,17	0,78	1,19	1,82	1,23	0,15	0,15	0,17	0,19	0,22	0,34
Cr2O3	0,004	0,007	0,004	0,005	0,004	0,004	0,006	0,007	0,004	0,005	0,004	0,004
Elementos Traza (ppm)												
Sc	14	18	15	15	13	11	19	17	18	20	16	23
Ba	466	432	412	476	451	494	400	464	394	411	371	841
Be	0,5	1	2	3	3	3	1	0,5	0,5	1	0,5	0,5
Co	14,7	16,7	25	47,4	64,2	42,7	16,7	18,2	19,2	18,2	14,3	21,5
Cs	4	3,5	7,7	10,2	8,7	9,7	5	4,5	4,5	5,7	5,1	3,6
Ga	15,7	17,3	15,3	16,6	15,2	15,3	16,7	16,1	16,6	17,5	12,4	17,8
Hf	7,3	8,2	5,7	5,4	7,6	11,3	7,4	5	4,4	5	3,1	4,2
Nb	6,8	8,2	6,8	7,9	6,7	9,2	6,6	6,3	5	5,6	3,9	4,6
Rb	63,4	57,2	68	71	67,3	91,8	63,4	53,3	44,3	49	40,7	83,5
Sn	1	2	2	2	2	3	2	1	2	2	1	2
Sr	347,6	409,2	363,9	345,6	297,5	199,9	324,3	296,2	311,1	352,5	324,7	301,6
Ta	0,6	0,7	0,5	0,7	0,6	0,8	0,5	0,4	0,3	0,3	0,3	0,3
Th	19,1	24,7	9	10,3	8,8	14,3	8,2	5	4,3	4,2	3,5	7,4
U	5,1	4,7	9,5	10,6	16,2	17,1	2,7	1,8	1,2	1,5	1,4	1,9
V	147	281	140	158	141	88	192	336	177	244	175	245
W	0,8	1,5	1,7	2,8	4,4	3,6	1,8	1	0,25	0,7	0,7	1,5
Zr	263,6	297	192,2	210,3	266,2	396,5	256,5	173,3	129,5	178,9	112	146,7
Y	25,8	26,6	42,6	55,7	64,8	69,6	25,5	20,2	20,4	22,4	17,8	20,3
La	24,1	34	22	27,4	27,8	37,7	18,6	16,9	14,7	15,7	12,3	18,7
Ce	53,3	76,5	52,2	62,8	66,1	87,4	42,6	36	35,2	35,4	29,5	44
Pr	6,52	8,97	6,75	8,05	8,42	10,66	5,39	4,85	4,46	4,72	3,73	5,42
Nd	25,5	34,6	28,6	35,8	36,7	44,6	21,8	20,7	18,2	19,3	15,1	22,1
Sm	5,09	6,29	7,01	8,56	9,84	10,59	4,87	4,27	3,92	4,31	3,57	4,72
Eu	1,25	1,54	1,74	1,94	2,15	1,92	1,21	1,18	1,21	1,27	0,98	1,2
Gd	5,23	5,78	8,14	9,94	11,94	12,5	4,6	4,06	3,91	4,31	3,5	4,35
Tb	0,81	0,88	1,33	1,63	1,96	2,07	0,75	0,64	0,63	0,68	0,58	0,65
Dy	4,5	4,73	7,51	8,84	10,83	11,08	4,15	3,79	3,42	3,91	3,31	3,63
Ho	0,85	0,92	1,42	1,79	1,97	2,2	0,86	0,7	0,7	0,74	0,62	0,69
Er	2,47	2,77	4,03	4,82	5,63	6,24	2,57	2,06	2,13	2,3	2,01	2,08
Tm	0,38	0,4	0,55	0,7	0,78	0,87	0,39	0,33	0,3	0,33	0,28	0,31
Yb	2,45	2,73	3,39	4,16	4,74	5,56	2,49	1,98	1,92	2,07	1,87	2,02
Lu	0,39	0,41	0,52	0,62	0,72	0,82	0,39	0,31	0,32	0,35	0,27	0,32
TOT C (%)	1,03	0,15	3,62	2,72	3,68	1,91	1,23	0,96	0,68	0,96	4,39	1,29
TOT S (%)	0,05	0,01	0,08	0,13	0,12	0,13	0,03	0,04	0,01	0,06	0,1	0,03
Mo	0,7	0,6	2,7	4,5	11,5	10,6	1,2	0,5	0,9	0,6	0,6	0,5
Cu	101,7	37	427,6	634,8	909,9	819,7	67,9	52	57,2	58,5	72,9	66,7
Pb	8,1	12	13,5	16,3	19,5	16,5	10,8	12	9	18,1	25,7	13,2
Zn	347	81	1719	2737	3556	2558	171	153	69	203	146	122
Ni	11	10	19,9	33,9	37,5	27,9	11,2	12,2	12,3	10	9,5	10,1
As	10,6	8,4	43,9	51,9	94	122,4	13	11,4	11,2	16,3	17,2	14,6
Cd	1,8	0,3	10,6	18,9	26	17,6	0,7	0,6	0,1	0,9	0,9	0,05
Sb	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,4	0,1	0,6	0,4	0,4
Bi	0,1	0,2	0,2	0,3	0,4	0,4	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1
Ag	0,05	0,05	0,05	0,2	0,1	0,1	0,1	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Au (ppb)	3,8	1,8	1,8	1,8	1,6	2,4	1	0,9	1,8	0,25	1,1	7
Hg	0,005	0,005	0,02	0,01	0,02	0,02	0,01	0,005	0,01	0,005	0,02	0,02
TI	0,05	0,05	0,1	0,2	0,2	0,2	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Se	0,25	0,25	0,8	1,3	1,7	1,7	0,25	0,25	0,25	0,6	0,7	0,25

Anexo A1: Resultados de análisis químico - Muestras J1 a 9. (Datum UTM: Psad-56).

Muestra	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
UTM-E	278507	269988	269988	262335	262335	304662	298361	296443	254040	254040	254040	242953
UTM-N	6607885	6609388	6609388	6606443	6606443	6602984	6607222	6608812	6601547	6601547	6601547	6597708
Elementos Mayores %												
SiO ₂	44,91	9,43	54,13	31,16	50,4	49,11	48,03	51,7	12,64	56,71	57,13	50,59
Al ₂ O ₃	11,83	1,55	17,25	7,92	13,87	14,95	14,18	14,3	2,69	15,86	15,67	14,16
Fe ₂ O ₃	12,06	1,08	8,21	4,3	11,28	12,75	14,67	14,44	2,91	7,63	8,77	9,68
MgO	1,66	0,84	2,07	1,62	1,96	2,58	2,19	2,12	1,31	2,45	2,41	3,05
CaO	10,65	45,76	3,87	24,4	5,66	4,66	6,81	5,21	40,39	6,75	5,25	5,93
Na ₂ O	2,65	0,42	3,16	1,65	3,1	3,31	3,56	3,06	0,53	3,76	3,56	3,38
K ₂ O	1,41	0,2	1,74	0,93	1,9	1,96	1,31	1,59	0,31	1,72	1,81	1,74
TiO ₂	1,43	0,12	0,93	0,46	1,39	1,35	1,56	1,57	0,33	0,99	1,09	1,25
P ₂ O ₅	0,3	0,33	0,23	0,2	0,25	0,25	0,21	0,2	0,14	0,29	0,24	0,29
MnO	0,21	0,1	0,17	0,09	0,18	0,83	0,2	0,2	0,05	0,13	0,14	0,14
Cr ₂ O ₃	0,007	0,001	0,004	0,002	0,006	0,007	0,006	0,008	0,003	0,007	0,007	0,009
Elementos Traza (ppm)												
Sc	17	2	19	10	19	22	23	22	5	20	21	23
Ba	408	211	470	362	388	659	397	385	251	389	391	296
Be	0,5	0,5	1	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1	1	1
Co	14,4	1,9	16,1	8,6	15,6	20,2	19,3	20,9	5,1	15,4	16,8	19,9
Cs	2,7	0,4	4,7	2,7	3,4	5,1	3	3,8	0,8	2,9	3,4	3,7
Ga	14,1	2	17,7	8,7	15,5	16,7	16,3	17,8	3,7	15,7	16,5	16,3
Hf	10,1	0,9	6,4	2,3	11	7,8	7,3	12,9	3,2	8,8	7	8,2
Nb	8,5	0,7	6,1	2,9	8,6	8,5	6,8	8,8	2	6,8	6,9	8
Rb	45,4	6,2	59,2	31,3	55,4	60,7	36	50	11,3	57,2	62,4	66,4
Sn	2	0,5	4	2	2	15	2	3	0,5	2	2	2
Sr	383,8	846,5	299,3	496,4	352,3	400,4	441,2	366,2	604,9	411,2	362,2	326,8
Ta	0,5	0,05	0,5	0,1	0,8	0,6	0,4	0,7	0,2	0,5	0,4	0,6
Th	8,5	0,9	8,3	3,7	9,1	7,3	5,5	9,7	2,6	8,6	12,2	10,7
U	3,6	1,8	2,1	2,8	2,4	2,4	1,9	2,2	4,1	2,2	2,5	3
V	332	11	184	89	299	363	445	406	70	199	215	249
W	1,5	0,25	1,2	0,6	1,7	1,6	1,1	1,4	0,25	1,1	1,4	1,4
Zr	355,6	32,6	224	94,9	397	292,6	258,8	447,4	98,3	327,1	266,6	310,6
Y	21,7	2,9	21,4	11,5	22,5	20,7	21,1	26	5	26,1	26,1	25,9
La	20,4	2,1	17,9	8,7	21,1	18,8	17,5	22,1	4,1	24	23,2	21,1
Ce	46,8	4,8	43,3	19,8	47,9	43,5	40,1	50,1	9,9	54,6	52,7	50,7
Pr	5,61	0,63	5,11	2,57	5,82	5,38	5,23	6,23	1,19	6,97	6,68	6,43
Nd	21,8	2,3	20,1	11,1	22,1	23,7	21,8	25,3	5,2	30,2	27,6	25,8
Sm	4,42	0,57	4,41	2,15	4,66	4,56	4,75	5,26	1,04	5,92	5,68	5,34
Eu	1,05	0,14	1,12	0,6	1,16	1,14	1,29	1,24	0,24	1,37	1,33	1,2
Gd	4,25	0,66	4,08	2,15	4,36	4,09	4,15	4,89	1,03	5,16	5,16	4,94
Tb	0,69	0,09	0,67	0,34	0,69	0,64	0,66	0,78	0,15	0,81	0,8	0,79
Dy	3,73	0,43	3,9	1,87	3,89	3,45	3,73	4,19	0,75	4,26	4,51	4,34
Ho	0,76	0,1	0,76	0,42	0,79	0,7	0,74	0,91	0,17	0,84	0,9	0,93
Er	2,28	0,32	2,26	1,18	2,35	2,15	2,3	2,63	0,53	2,4	2,69	2,63
Tm	0,35	0,05	0,34	0,17	0,38	0,32	0,34	0,42	0,07	0,37	0,4	0,39
Yb	2,27	0,28	2,2	1,22	2,43	2,07	2,11	2,79	0,55	2,44	2,58	2,47
Lu	0,36	0,05	0,34	0,19	0,38	0,34	0,34	0,44	0,09	0,39	0,4	0,39
TOT C (%)	3,84	11,63	0,65	8,06	3,3	1,78	1,47	0,88	11,54	0,56	0,51	1,89
TOT S (%)	0,38	0,5	0,16	0,5	0,1	0,08	0,06	0,07	0,58	0,02	0,02	0,68
Mo	1,7	0,6	0,4	0,8	0,6	1,2	0,6	0,6	1,2	0,3	0,5	1,1
Cu	86,8	19	59,1	51,9	62,1	144,5	74	78,5	32,8	51,2	70,9	108,1
Pb	6,6	2,1	11,4	8,6	9,4	16,7	9,3	9,7	1,3	4,3	7,3	5,8
Zn	74	15	67	41	61	103	73	71	10	31	49	51
Ni	8	1,6	9,1	5,2	7,6	11,7	8	10,3	1,4	7,4	8,9	12,5
As	7,9	7,1	18,6	8,5	6,8	13,6	9,1	12,1	5,8	3,8	6,1	5,5
Cd	0,2	0,2	0,1	0,2	0,2	0,2	0,05	0,1	0,05	0,05	0,05	0,1
Sb	0,3	0,05	0,2	0,2	0,3	0,4	0,3	0,3	0,05	0,2	0,2	0,2
Bi	0,1	0,05	0,1	0,05	0,1	0,05	0,05	0,1	0,05	0,05	0,05	0,05
Ag	0,3	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Au (ppb)	4,4	4,2	2,3	3,7	0,6	1,1	0,25	0,25	0,25	4,1	5	5,3
Hg	0,04	0,01	0,005	0,04	0,01	0,02	0,09	0,02	0,01	0,04	0,09	0,11
Tl	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Se	0,7	1,2	0,25	2,4	0,7	0,7	0,25	0,5	1,1	0,25	0,5	0,7

Anexo A2: Resultados de análisis químico - Muestras 10 a 21.

Muestra	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33
UTM-E	242953	285409	285409	288880	288880	285151	285725	324253	336257	313449	304043	305290
UTM-N	6597708	6584276	6584276	6583920	6583920	6582998	6579708	6555610	6549914	6559666	6566278	6576973
Elementos Mayores %												
SiO2	47,45	52,02	48,16	47,35	53,11	50,34	51,42	55,2	55	56	54,69	52,46
Al2O3	13,39	14,12	18,5	15,81	16,75	16,83	17,13	15,93	16	17,06	16,89	15,48
Fe2O3	6,78	16,53	13,74	9,31	9,98	11,38	9,7	9,9	10,39	8,27	9,12	12,9
MgO	3,18	2,49	2,3	3,34	2,65	3,99	4,03	2,67	2,32	2,46	2,75	2,43
CaO	5,76	4,94	3,74	5,38	4,32	4,02	3,98	4,91	3,73	4,79	4,55	4,26
Na2O	6,56	3,53	2,45	1,76	3,03	3,38	3,56	3,02	2,52	3,24	3,35	2,7
K2O	1,58	1,46	1,46	2,13	1,76	1,87	1,99	1,58	1,83	1,39	2,1	2,15
TiO2	0,85	1,39	1,11	1,25	1,25	1,04	0,95	0,92	1,32	0,76	0,8	1,06
P2O5	0,27	0,26	0,32	0,27	0,17	0,24	0,22	0,16	0,22	0,21	0,14	0,21
MnO	0,12	0,14	0,13	0,17	0,13	0,19	0,2	0,16	0,16	0,2	0,18	0,34
Cr2O3	0,007	0,009	0,007	0,003	0,005	0,006	0,005	0,003	0,006	0,001	0,002	0,007
Elementos Traza (ppm)												
Sc	19	23	27	25	26	28	28	22	25	21	22	21
Ba	308	305	286	328	310	474	499	330	332	421	632	593
Be	1	0,5	0,5	0,5	1	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1
Co	17,6	23,3	19,8	28,5	20,4	28,4	24,9	17,5	18	17	18	21
Cs	3,3	1,7	2,7	6,2	3,7	2,2	2	4,3	6,6	5,7	4,7	2,1
Ga	14,5	17,8	22,1	19,8	20,1	19,2	18,1	16	16,6	15,4	16,3	17
Hf	6	42,5	27,5	5,4	13,2	5,3	4,2	8,7	9,5	2,8	3,1	8,6
Nb	5,7	11,1	9,3	10,3	10,1	4,7	4	4,6	7,3	2,8	2,4	6,2
Rb	55,7	45,3	59,5	115,1	76,8	62,1	63,1	53,8	71,4	39,1	57,1	57,7
Sn	1	4	2	2	2	3	2	25	2	0,5	1	3
Sr	371,4	385,5	298,7	250,6	361,6	301,6	288,9	331,2	288	492,7	512,7	367,3
Ta	0,3	0,8	0,6	0,7	0,8	0,3	0,3	0,4	0,6	0,2	0,2	0,5
Th	14,2	22,3	14,2	13,2	15,3	7,7	7,1	10,8	11,5	3,4	3,2	6,9
U	2,2	5,3	4,3	3,7	3,7	2	1,9	2,8	3,7	1	1	2,2
V	167	574	401	189	281	291	228	213	234	160	226	323
W	1,2	3,1	1,8	2,2	1,7	1,5	1,3	1,9	1,5	0,7	0,8	1,7
Zr	241,8	1593,5	1070,9	207,6	498	208,7	139,5	281,1	296,1	90,3	103,9	280,9
Y	23,8	36,8	33,1	29,5	32,6	25,9	22,9	25,6	27,2	20,7	18	23,6
La	20,5	29,3	25,4	25,7	30,9	19,2	17,4	15,4	19,3	13,8	12,6	20,7
Ce	48	73,2	60,8	63,4	72,4	45,4	41,8	37,8	46,8	32,9	29,4	47,1
Pr	6,1	9,6	8,06	7,85	9,13	5,98	5,59	4,89	5,91	4,49	3,9	6,24
Nd	25	41,7	33	32,1	37,8	25,4	24,2	21	24,4	20,5	17,4	26,1
Sm	5,25	8,32	7,23	6,87	7,76	5,68	5,41	4,68	5,34	4,42	3,72	5,46
Eu	1,18	1,51	1,41	1,25	1,53	1,41	1,31	1,04	1,32	1,33	1,17	1,34
Gd	4,64	7,32	6,29	5,87	6,94	5,08	4,63	4,26	5,01	4,06	3,47	4,75
Tb	0,75	1,07	0,96	0,9	1,04	0,8	0,74	0,73	0,81	0,67	0,56	0,76
Dy	4,03	5,87	5,41	4,8	5,42	4,5	3,92	4,22	4,94	3,66	3,22	4,09
Ho	0,82	1,27	1,09	0,98	1,15	0,95	0,8	0,91	1,01	0,75	0,63	0,85
Er	2,3	3,93	3,46	2,89	3,29	2,74	2,39	2,76	2,99	2,2	1,88	2,48
Tm	0,35	0,6	0,51	0,44	0,52	0,39	0,38	0,42	0,45	0,34	0,29	0,38
Yb	2,25	4,11	3,53	2,88	3,38	2,62	2,49	2,93	3,03	2,23	1,94	2,66
Lu	0,34	0,69	0,57	0,45	0,54	0,39	0,38	0,46	0,45	0,35	0,29	0,41
TOT C (%)	1,33	0,29	0,33	2,37	0,79	0,76	0,82	1,06	0,89	0,47	0,38	1,23
TOT S (%)	0,2	0,04	0,02	0,06	0,01	0,02	0,01	0,03	0,45	0,01	0,01	0,03
Mo	0,4	1,6	0,5	0,7	0,5	0,7	0,5	0,6	0,8	0,4	0,3	0,7
Cu	75,1	335,2	157,6	576	183,8	230,4	187,3	77,7	52,1	97,2	87,9	195,4
Pb	5,9	10,6	5,7	10,4	5,2	3,1	2,3	7,5	9,9	20,3	11,2	9,7
Zn	42	32	37	76	44	56	61	54	74	104	87	114
Ni	10,5	8,8	9,9	12,5	9,6	12,1	12,6	7,4	12	4	6,8	11,5
As	4,2	6	3,4	6,8	3,4	4	3,3	10	21,3	13,7	13,7	9,1
Cd	0,05	0,2	0,05	0,2	0,05	0,05	0,05	0,1	0,2	0,2	0,1	0,1
Sb	0,2	2,5	0,1	0,6	0,3	0,2	0,05	0,2	0,3	0,2	0,4	0,2
Bi	0,05	0,2	0,1	0,2	0,05	0,1	0,1	0,1	0,1	0,05	0,05	0,05
Ag	0,05	0,2	0,05	0,3	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Au (ppb)	1,3	123,4	11,5	32,9	10	4,7	2,3	0,25	0,25	0,25	0,25	9,6
Hg	0,12	5,02	0,12	1,11	0,27	0,18	0,04	0,005	0,005	0,01	0,02	0,06
TI	0,05	0,05	0,05	0,3	0,1	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Se	1	0,5	0,25	0,5	0,25	0,25	0,25	0,6	0,6	0,25	0,25	0,9

Anexo A3: Resultados de análisis químico - Muestras 22 a 33.

Muestra	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45
UTM-E	353414	353414	359024	364087	349026	377774	379304	377894	375837	374214	371301	368180
UTM-N	6599382	6599382	6598567	6598091	6598562	6611052	6614162	6615700	6618347	6618361	6621076	6621668
Elementos Mayores %												
SiO ₂	61,01	63,23	61,97	62,36	60,62	55,59	21,9	33,24	61,48	61,47	61,71	57,08
Al ₂ O ₃	15,26	14,82	13,4	14,42	14,27	11,33	5,6	17,65	14,28	15,08	14,17	15,18
Fe ₂ O ₃	7,52	4,59	3,8	6,69	5,36	6,73	42,09	16,37	5,49	6,15	6,09	5,87
MgO	1,13	1,54	1,16	2,02	1,78	0,95	0,33	0,43	0,67	0,71	0,72	0,73
CaO	1,63	1,99	2,72	3,75	2,09	2,35	0,48	0,81	1,05	1,09	1,29	1,45
Na ₂ O	4	3,65	3,3	2,73	3,52	2,37	0,73	1,16	2,25	2,34	2,3	2,05
K ₂ O	3,29	3,06	2,24	2,45	3,01	2,22	1,16	1,37	2,52	2,64	2,58	2,35
TiO ₂	0,82	0,55	0,41	0,6	0,68	0,66	0,32	0,36	0,44	0,46	0,55	0,47
P ₂ O ₅	0,2	0,17	0,2	0,15	0,14	0,23	0,21	0,13	0,12	0,14	0,13	0,12
MnO	0,14	0,1	0,09	0,21	0,09	0,51	0,05	0,53	2,08	0,9	1,27	1,41
Cr ₂ O ₃	0,005	0,005	0,003	0,003	0,005	0,004	0,001	0,001	0,002	0,002	0,002	0,003
Elementos Traza (ppm)												
Sc	11	11	9	14	14	9	5	6	10	9	9	9
Ba	487	574	424	438	670	436	185	229	644	509	516	499
Be	3	2	2	2	2	5	0,5	5	4	4	3	4
Co	9,3	8,3	6,3	14,5	10,2	41,1	3,2	27,9	37,3	31,3	43,6	44,4
Cs	4	5,6	3,9	6,2	7,7	6,7	8,7	6,1	11,6	10,2	8,9	9
Ga	19,2	18,3	15,4	15,9	15,1	12,6	6,7	7,5	13,6	12,7	13,6	12,2
Hf	20,5	10,4	7,3	10,1	10,9	9,4	4,1	6	9,1	7,3	13	8,6
Nb	18,1	11	6,8	8,2	9,3	8	4,5	4,9	10,5	8,8	9,4	8,9
Rb	116,4	115,9	82,4	91,7	114,1	95	51,8	57,2	94	103,1	102,6	94,7
Sn	7	3	3	3	3	15	6	4	3	5	13	8
Sr	178	205	217	237,9	189,5	211,8	75,2	91,6	165,7	157,6	159,4	160
Ta	2	1,2	0,7	0,9	0,9	1	0,3	0,5	0,9	0,8	0,9	0,8
Th	75,8	18,5	12,9	15,4	16,3	11,9	6,1	7,3	12,7	11,7	15,6	11,6
U	10,2	4	8,2	6,7	7,2	26,8	1,9	22,5	14,6	14,7	17,3	22,4
V	103	71	60	129	102	82	61	56	40	48	60	52
W	1	3	1,2	2	1	3,4	1,3	1,8	3,5	2,1	2,7	3,2
Zr	646,9	339,5	241,7	348,1	356,7	326,8	138,3	195,2	309,5	259,6	438,9	293,2
Y	69,2	30,6	25,8	52,3	28,2	74,7	13,1	37,5	105,2	71,7	84,8	88,1
La	129,6	37,5	32,9	31,6	32,9	28,3	12	16,6	50,2	34,4	42,2	36,4
Ce	289,3	80,5	72	68,8	70,5	64,3	24,9	43,9	114,3	82,1	100,9	85,1
Pr	32,93	9,29	8,34	8,44	8,15	8,05	3,04	5,5	14,59	10,35	12,45	11,03
Nd	127,7	34,8	32,6	34,1	31,4	34,1	13,1	25,2	64,2	46,3	52,4	50,2
Sm	21,62	6,49	5,92	7,36	5,84	7,58	2,66	7,52	14,88	11,59	12,92	12,61
Eu	1,68	1,11	1,02	1,14	1,11	1,15	0,37	1,21	2,83	2,11	2	2,27
Gd	15,17	5,54	4,89	8,06	4,86	9,79	2,37	8,18	18	13,25	14,77	15,64
Tb	2,31	0,96	0,8	1,37	0,84	1,77	0,42	1,42	3,01	2,24	2,48	2,59
Dy	12,29	5,38	4,43	8,03	4,63	10,46	2,34	7,56	16,78	12,35	13,93	14,29
Ho	2,33	1,06	0,84	1,69	0,91	2,23	0,47	1,46	3,44	2,43	2,82	2,78
Er	6,8	3,22	2,47	4,91	2,86	6,49	1,46	4,17	9,33	6,71	7,85	7,78
Tm	1,04	0,5	0,37	0,72	0,44	0,89	0,23	0,61	1,28	0,96	1,12	1,08
Yb	7,1	3,41	2,37	4,58	3,03	5,52	1,39	4,19	7,95	5,98	6,97	6,71
Lu	1,06	0,5	0,35	0,68	0,46	0,82	0,21	0,59	1,16	0,88	1,04	0,96
TOT C (%)	1	2,06	4,11	0,95	2,79	6,21	2,36	2,85	1,01	0,9	1,21	2
TOT S (%)	0,01	0,01	0,08	0,05	0,05	0,26	2,25	1,42	0,25	0,22	0,16	0,23
Mo	0,5	0,5	1,2	2,3	0,4	3,3	4,6	20,1	6,8	7,6	8,8	9,3
Cu	47	24,9	23,9	55,7	15,9	48,5	452,9	1063,7	70,3	860,7	1098,2	1481,1
Pb	11,8	19,2	8	13,5	16,8	19,5	26,6	17,5	16,5	17,5	17,8	18,2
Zn	86	107	98	340	124	525	117	405	2969	1093	1858	3041
Ni	10,1	11,7	9	11,4	7,8	32,7	2,6	7,3	45,5	19,7	24,3	28,7
As	11,9	5,9	17,1	5,3	7,2	440,3	556,4	262,3	598,2	241,9	188,6	204,5
Cd	0,05	0,2	0,3	1,6	0,2	3,1	0,3	2,7	2,7	5,8	12,7	17,6
Sb	0,05	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	2,6	0,9	0,3	0,3	0,3	0,2
Bi	0,6	0,3	0,2	0,2	0,3	0,8	0,5	0,3	0,4	0,4	0,4	0,4
Ag	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,1	0,7	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1
Au (ppb)	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	6,8	3,7	0,6	0,25	22,6	1,8
Hg	0,005	0,01	0,01	0,005	0,005	0,01	0,03	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01
Tl	0,05	0,05	0,1	0,1	0,05	0,1	0,4	0,4	0,2	0,3	0,3	0,3
Se	0,6	0,25	2,4	0,8	1,2	4,9	2,8	2,5	2,7	2	1,7	2,8

Anexo A4: Resultados de análisis químico - Muestras 34 a 45.

Muestra	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57
UTM-E	364681	361404	357757	344209	343332	340103	340103	332633	327508	318952	315086	325962
UTM-N	6622636	6624304	6627051	6642930	6647320	6648824	6648824	6644302	6639574	6635247	6634060	6637473
Elementos Mayores %												
SiO ₂	62,19	56,18	54,51	58,23	58,72	52,6	48,46	55,58	50,3	51,68	52,88	53,5
Al ₂ O ₃	14,55	15,1	15,23	17,03	15,99	15,15	13,52	15,14	14,45	14,38	14,91	15,59
Fe ₂ O ₃	5,59	6,54	5,88	6,42	7,18	8,21	10,25	11,57	13,82	11,37	11,7	10,65
MgO	0,86	0,89	0,95	1,99	1,92	2,08	2,09	2,25	2,13	2,18	2,24	2,42
CaO	1,53	1,63	1,78	4,87	4,04	4,05	4,6	4,1	6,13	6,72	6,34	5,75
Na ₂ O	2,35	2,1	2,1	3,91	3,34	3,04	3,01	3,13	3,1	2,57	3,01	2,67
K ₂ O	2,62	2,36	2,2	1,98	2,03	1,78	1,77	1,63	1,45	1,47	1,45	1,5
TiO ₂	0,51	0,54	0,45	0,7	0,84	0,89	1,02	1,32	1,58	1,28	1,39	1,16
P ₂ O ₅	0,14	0,15	0,14	0,18	0,18	0,23	0,27	0,17	0,19	0,18	0,19	0,18
MnO	1,14	1,63	2,02	0,22	0,17	0,33	0,16	0,15	0,19	0,23	0,23	0,19
Cr ₂ O ₃	0,002	0,003	0,003	0,003	0,004	0,005	0,006	0,008	0,007	0,005	0,006	0,005
Elementos Traza (ppm)												
Sc	9	9	9	15	16	16	17	19	19	21	23	21
Ba	554	535	516	426	435	385	343	373	396	428	401	468
Be	3	4	4	2	2	1	0,5	1	0,5	0,5	0,5	0,5
Co	39,3	51,3	61,2	16,2	17,8	21,1	16,9	19,4	20,5	20,4	18,6	20,2
Cs	9,5	8,8	8,6	4,9	5,8	5,7	3	5	4,2	6,1	4,4	8,1
Ga	14,2	14,2	13,2	15,8	16,2	15,1	14,1	16,2	15,6	15,8	16,5	16,4
Hf	9	9,5	7,3	5	5,6	6,5	10,1	6,4	4,9	4	5,4	3,9
Nb	9,3	9,7	7,7	5,5	6,5	6,9	7,1	6,1	5,9	5,4	6,3	4,8
Rb	100,9	92,1	87,1	57	69,7	64,2	58,5	52,2	46,6	49,7	47,8	53,5
Sn	3	3	4	3	2	2	2	2	2	2	2	1
Sr	187,2	175,6	188,1	413,2	358,5	336,5	325,2	340,7	323,1	323,9	343,1	351,2
Ta	1	1,1	0,7	0,5	0,5	0,6	0,6	0,5	0,4	0,3	0,5	0,3
Th	12,8	13,3	9,7	7,1	11	9,9	11,7	6,6	5,4	4,5	5,2	4,1
U	13,9	20,7	22,7	3	3,6	5,8	3,4	2,3	1,8	1,4	1,6	1,1
V	59	74	73	128	153	182	231	295	371	297	306	259
W	2,4	4,2	3,5	0,8	1,2	1,6	1,1	1,5	0,8	1	1,1	0,7
Zr	319,4	339,9	244,8	162,5	189,7	256,2	383,2	229,6	189,8	142,2	197,4	138,9
Y	67,1	81,4	83,3	25	27,7	34,3	24	23,9	20,9	22,6	24,3	21,2
La	37,3	38,4	29	17,8	20,9	20,5	20,5	17,5	15	14,8	17,1	14,3
Ce	84,9	89,2	67,4	40,5	45,9	46,7	46,6	38,4	33,5	33,3	38,5	33,9
Pr	10,29	11,04	8,94	5,16	5,77	6,05	5,67	5,06	4,45	4,4	5,01	4,31
Nd	43,3	48,2	41,1	21,8	24,9	26,2	23,3	22,2	19,1	18,8	21,9	18,3
Sm	10,2	11,95	11,13	4,72	5,17	5,97	4,74	4,58	4,25	4,24	4,76	4,15
Eu	1,79	2,11	2,17	1,2	1,28	1,35	1,12	1,18	1,21	1,18	1,3	1,2
Gd	11,49	14,49	14,37	4,67	5,14	6,39	4,34	4,36	4,07	4,1	4,56	4,05
Tb	1,95	2,39	2,39	0,76	0,83	1,02	0,71	0,74	0,65	0,67	0,74	0,65
Dy	10,96	13,2	12,72	4,22	4,57	5,57	3,91	4,13	3,7	3,8	4,16	3,61
Ho	2,21	2,63	2,51	0,82	0,92	1,08	0,8	0,83	0,76	0,77	0,87	0,77
Er	6,17	7,43	7	2,43	2,65	3,09	2,46	2,42	2,18	2,28	2,56	2,24
Tm	0,89	1,04	0,98	0,35	0,38	0,48	0,38	0,37	0,33	0,35	0,37	0,34
Yb	5,54	6,49	5,85	2,31	2,49	2,95	2,33	2,3	2,01	2,2	2,34	2,24
Lu	0,82	0,94	0,86	0,35	0,38	0,43	0,37	0,36	0,31	0,34	0,38	0,34
TOT C (%)	0,96	2,2	2,77	0,86	1,02	2,6	6,83	0,66	1,08	1,36	0,83	0,66
TOT S (%)	0,13	0,15	0,15	0,02	0,13	0,07	0,06	0,04	0,01	0,04	0,04	0,01
Mo	6,9	11	14	1	1,2	2,5	0,9	0,7	0,6	0,8	0,7	0,6
Cu	917,5	1251,7	1313,8	115,8	126,2	239	62,2	82,9	66,6	81	65,6	56,8
Pb	19,9	20,5	19,3	6,1	8,8	9	8,9	7,6	10	43	31,2	32,7
Zn	2418	3391	4374	617	735	937	142	425	186	241	144	106
Ni	26,9	34,9	46,4	10	12,3	15,8	7,7	12,9	12,6	10	10,1	10,3
As	148,7	178,8	147,2	11,2	13,3	19,8	7,2	11,9	11,6	32,2	25,8	26,7
Cd	15	21,5	27,2	2,1	2,6	4,4	1,1	1,1	0,6	0,9	0,5	0,2
Sb	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,5	0,6	0,6	0,8
Bi	0,4	0,5	0,4	0,1	0,2	0,2	0,2	0,1	0,2	0,2	0,1	0,05
Ag	0,05	0,1	0,1	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Au (ppb)	1,6	2	3	0,25	0,25	0,25	0,9	0,25	0,25	2,3	0,5	0,25
Hg	0,005	0,03	0,02	0,005	0,005	0,01	0,02	0,01	0,005	0,02	0,02	0,02
TI	0,3	0,3	0,3	0,05	0,05	0,1	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Se	0,9	2,6	2,7	0,6	0,25	1,2	0,6	0,25	0,25	0,7	0,25	0,25

Anexo A5: Resultados de análisis químico - Muestras 46 a 57.

Muestra	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69
UTM-E	310583	310583	302625	295865	293764	345369	345369	345965	338174	334388	331241	329325
UTM-N	6633026	6633026	6627582	6621372	6617321	6598260	6598260	6599572	6595709	6596352	6599040	6600482
Elementos Mayores %												
SiO ₂	49,93	49,97	42	52,42	57,16	59,74	63,59	52,12	58,15	53,74	57,79	62,45
Al ₂ O ₃	13,56	13,62	13,09	16,97	15,39	14,55	14,17	14,54	15,52	15,33	15,15	15,23
Fe ₂ O ₃	8,64	8,63	7,33	10,45	7,95	6,36	5,44	9,57	6,96	11,54	7,96	5,78
MgO	1,94	1,94	1,85	2,36	1,77	1,87	1,72	2,35	1,99	1,91	2,02	1,93
CaO	10,6	10,55	13,94	3,85	5,79	3,19	3,29	3,62	4,26	4,6	3,97	3,7
Na ₂ O	3,02	3,01	2,53	2,55	3,9	4,16	3,89	4,19	3,93	3,05	3,57	3,88
K ₂ O	1,45	1,44	1,34	1,66	1,99	2,25	2,68	2,01	2,07	1,9	2,37	2,77
TiO ₂	1,05	1,04	0,86	1,24	0,88	0,75	0,66	1,12	0,89	1,43	1,06	0,74
P ₂ O ₅	0,18	0,18	0,17	0,21	0,2	0,32	0,29	0,4	0,23	0,19	0,18	0,17
MnO	0,21	0,21	0,14	0,28	0,13	0,23	0,1	0,11	0,09	0,18	0,14	0,11
Cr ₂ O ₃	0,004	0,004	0,004	0,005	0,004	0,005	0,005	0,009	0,007	0,01	0,006	0,002
Elementos Traza (ppm)												
Sc	18	18	16	21	17	14	13	17	15	19	20	19
Ba	398	387	410	572	503	505	523	441	451	395	379	315
Be	0,5	0,5	0,5	0,5	1	2	2	0,5	1	1	2	1
Co	14,6	15	15,2	19,3	12,5	14,8	11	15,8	14	19,3	14,5	13,7
Cs	4,5	4,1	6,1	5,4	3	6,9	5	12,7	5,4	4,1	5,3	7,3
Ga	14,1	14,1	12,9	17,7	14,5	14,9	16,8	15,6	15,3	17,7	16,5	17
Hf	4	3,8	3,4	5,6	4,9	8,3	7,5	4,9	4,5	13,8	17,2	8,1
Nb	4,9	4,7	4,1	7	4,9	9	8,5	7,9	6,4	9,7	9,8	8
Rb	48,8	46,4	46,4	60,8	58,1	81,4	104,6	68,5	68,3	64,5	96,7	131,7
Sn	2	2	2	2	2	3	3	2	2	4	2	3
Sr	343,1	344,7	332,6	294,7	367,6	231,1	209,6	329,7	344,2	362,6	285,1	232,4
Ta	0,3	0,3	0,4	0,6	0,4	1	0,8	0,6	0,6	0,8	0,8	0,7
Th	4	4,1	3,6	6	5,3	11,5	11,6	5,2	6,4	20,3	30,8	18,9
U	1,7	1,3	1,4	1,6	1,7	5	2,7	3,2	1,6	5,1	6,3	3,6
V	224	222	181	250	196	122	119	227	160	319	183	98
W	0,8	0,9	0,7	1,5	1,5	1,8	1,2	1,7	0,6	1,2	1,1	1,2
Zr	148,6	143,5	128,5	201,4	177,5	300,7	260,9	173,6	163,9	442,1	601,3	262,9
Y	20,4	19,3	17,3	21,3	18,9	41,6	30,9	21,9	21,7	25,8	34,8	38,2
La	14,3	14,7	11,8	17,8	16,6	28	33,2	21,3	20,7	22,7	25,7	23,7
Ce	33,1	33,7	27,7	41,8	37,8	62	68,7	46,5	43,5	49,6	60,4	59,9
Pr	4,23	4,31	3,53	5,02	4,81	7,26	8,16	5,68	5,47	5,99	7,39	7,31
Nd	18,1	18,4	14,9	21,7	19,9	29,2	31,1	23,9	22,9	23,7	29,7	30,4
Sm	4	4,07	3,47	4,75	4,34	6,5	5,68	4,62	4,35	4,68	5,9	6,31
Eu	1,12	1,12	0,98	1,2	1,17	1,3	1,19	1,35	1,16	1,21	1,11	0,94
Gd	3,84	3,79	3,4	4,21	3,95	6,82	5,3	4,3	3,95	4,57	5,7	6,28
Tb	0,62	0,6	0,55	0,68	0,64	1,18	0,88	0,68	0,63	0,76	0,96	1,08
Dy	3,48	3,33	3,08	3,78	3,55	6,56	4,98	3,78	3,84	4,43	5,7	6,3
Ho	0,71	0,69	0,63	0,8	0,69	1,35	1,04	0,74	0,71	0,9	1,19	1,27
Er	2,13	2,16	1,94	2,34	2	3,99	3,01	2,15	2,08	2,68	3,56	4,01
Tm	0,33	0,3	0,29	0,34	0,31	0,59	0,46	0,33	0,33	0,43	0,6	0,63
Yb	2,13	1,95	1,75	2,2	1,94	3,64	3,14	2,01	2,01	2,85	4,03	4,12
Lu	0,32	0,31	0,28	0,35	0,3	0,55	0,47	0,31	0,3	0,45	0,61	0,63
TOT C (%)	1,91	2,04	4,33	0,56	0,84	1,51	0,95	3,28	1,29	0,89	1,07	0,31
TOT S (%)	0,05	0,05	0,1	0,01	0,05	0,05	0,01	0,06	0,09	0,03	0,01	0,01
Mo	0,6	0,5	0,5	0,8	0,6	2,1	1	0,9	0,5	0,9	0,6	0,6
Cu	85,7	89,6	69,1	67,5	119,3	49,2	29,3	44,2	44,7	53,2	53	51,1
Pb	21	19	20,9	15,3	9,4	14,9	16,5	15,4	10,3	11,8	13,3	12,4
Zn	125	118	135	99	71	390	84	78	149	120	74	54
Ni	7,7	7,7	7,6	11,7	7	18	9,4	16,6	13,6	17	9,6	7,1
As	17,1	15,7	13,3	17,3	9,3	38,7	14,4	6,8	5,9	5,5	11	10,6
Cd	0,3	0,3	0,8	0,2	0,05	1,2	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1
Sb	0,4	0,4	0,3	0,3	0,4	0,2	0,2	0,2	0,1	0,2	0,3	0,4
Bi	0,05	0,1	0,1	0,2	0,1	0,3	0,2	0,7	0,2	0,1	0,1	0,05
Ag	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,1	0,05	0,05	0,2	0,05
Au (ppb)	0,25	0,25	2,1	2	0,7	5,4	0,25	9,6	0,25	0,25	0,25	0,25
Hg	0,01	0,02	0,03	0,02	0,02	0,005	0,005	0,03	0,04	0,01	0,02	0,02
TI	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Se	0,7	0,5	0,8	0,25	0,5	1,1	0,7	1,9	0,25	0,25	0,25	0,25

Anexo A6: Resultados de análisis químico - Muestras 58 a 69.

Muestra	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80A	80B
UTM-E	329325	327797	324867	320725	321680	315865	316285	312745	331310	327812	327812	320522
UTM-N	6600482	6600311	6601022	6601174	6598310	6602298	6602217	6602260	6553901	6553843	6553843	6556267
Elementos Mayores %												
SiO ₂	59,43	46,88	57,28	48,85	51,53	53,67	55,12	48,63	52,03	59,32	57,57	55,13
Al ₂ O ₃	15,89	12,54	14,38	12,41	13,23	15,23	14,01	12,84	15,14	15,67	16,9	15,79
Fe ₂ O ₃	7,33	8,37	8,99	7,01	12,5	9,55	9,36	13,85	14,29	8,1	7,12	10,98
MgO	1,79	1,69	1,85	1,66	1,74	2,26	1,85	1,84	2,36	2,43	2,79	2,91
CaO	3,03	10,17	4,76	12,11	7,57	6,35	6,74	8,48	4,35	5,01	4,98	5,5
Na ₂ O	3,42	2,6	3,41	2,96	3,35	3,15	3,5	3,06	2,56	3,03	3,77	3,24
K ₂ O	2,79	1,6	2,06	1,94	1,84	1,76	2,02	1,75	1,78	1,74	1,89	1,48
TiO ₂	0,92	0,99	1,15	0,9	1,11	1,07	1,08	1,4	1,5	0,88	0,77	0,96
P ₂ O ₅	0,2	0,22	0,19	0,19	0,25	0,19	0,23	0,25	0,22	0,14	0,11	0,18
MnO	0,13	0,11	0,12	0,12	0,14	0,16	0,15	0,16	0,22	0,15	0,13	0,19
Cr ₂ O ₃	0,004	0,005	0,005	0,004	0,008	0,007	0,006	0,009	0,008	0,004	0,004	0,004
Elementos Traza (ppm)												
Sc	19	17	18	15	15	20	17	17	27	22	20	25
Ba	323	293	318	355	353	346	371	324	326	361	419	317
Be	1	0,5	1	0,5	1	0,5	1	2	0,5	0,5	1	0,5
Co	15,3	13,6	14,6	12,2	14,6	16,1	13,4	16	19,3	16,5	16,7	18,8
Cs	8,1	5,2	4,9	4,5	6,1	6,4	6,6	6,6	6,8	3,7	4,6	4,2
Ga	17,8	13,6	15	13,7	14,9	15,7	15,2	15,6	17,1	15,8	17,5	17
Hf	17,1	12,7	19,6	13,2	11,3	8,5	10,3	14	12,5	5,6	5,8	7,1
Nb	9,6	7,8	9,8	8,3	8,8	6,2	9,2	11,1	10	4,9	4,7	5,1
Rb	128,4	65,8	85	78,9	60,6	61,8	70	60,1	72,3	58,2	58,9	50,2
Sn	4	3	3	3	3	2	2	3	2	2	1	2
Sr	226,2	308,5	299,1	346,3	288,1	336,3	320,7	306,4	310,5	350,8	328,6	361,6
Ta	0,7	0,6	0,8	0,7	0,7	0,5	0,7	1,1	0,7	0,4	0,4	0,3
Th	37,1	15,8	26,5	21,8	13,3	7,5	11,6	13,2	14,1	11,4	6,4	9,7
U	7,1	4,7	5,9	5,2	3,3	2,1	3,1	4	4,4	3,3	2,1	2,6
V	145	188	213	164	306	229	216	347	323	178	134	244
W	2,2	1,1	1,6	1,1	1,3	1,2	1,2	2,6	1,7	1	1	1,2
Zr	569,9	410,7	622,2	483	379,1	325,6	355,3	475,2	449	203,2	197,5	241,1
Y	41,6	27,6	30,6	26,9	23,3	25,3	25,7	27,9	31,8	23,8	22,3	28,4
La	27,8	19,6	23,2	19,7	21	16,8	24	25,1	22,7	14,9	12,8	17,1
Ce	65,7	45,2	53	45,8	45,4	39,2	54,8	56,4	54,1	35,1	30,2	41,3
Pr	8,13	5,59	6,59	5,66	5,6	5,11	6,61	6,77	6,87	4,63	3,86	5,34
Nd	33	23	25,5	22	21,6	20,6	26,1	27,4	29,9	20,2	15,7	22,4
Sm	6,39	4,72	5,37	4,68	4,29	4,58	5,03	5,1	5,92	4,34	3,8	4,88
Eu	1,07	1,07	1,07	0,89	0,94	1,16	1,07	1,07	1,45	1,08	0,92	1,13
Gd	6,35	4,54	5,05	4,46	4,14	4,38	4,42	4,72	5,72	4,11	3,64	4,88
Tb	1,09	0,77	0,86	0,75	0,69	0,72	0,74	0,8	0,94	0,69	0,64	0,81
Dy	6,3	4,35	5,04	4,38	3,86	4,34	4,5	4,36	5,51	4,03	3,53	4,73
Ho	1,44	0,97	1,02	0,92	0,8	0,87	0,87	0,89	1,1	0,81	0,78	0,98
Er	4,24	2,75	3,07	2,85	2,36	2,68	2,59	2,85	3,42	2,42	2,25	2,75
Tm	0,67	0,45	0,51	0,47	0,38	0,43	0,42	0,49	0,52	0,39	0,37	0,46
Yb	4,63	2,87	3,59	3,04	2,55	2,76	2,67	3,18	3,46	2,39	2,64	3,03
Lu	0,7	0,46	0,55	0,48	0,4	0,43	0,42	0,5	0,52	0,39	0,39	0,47
TOT C (%)	0,57	4,34	1,23	3,08	1,63	1,37	1,38	1,92	0,81	0,38	0,32	0,43
TOT S (%)	0,01	0,14	0,04	0,11	0,03	0,03	0,03	0,06	0,01	0,01	0,01	0,01
Mo	1,1	0,9	0,8	0,8	0,6	0,7	0,6	0,8	0,9	0,3	0,2	0,8
Cu	75,7	63,1	59,4	46,9	42,5	72,4	35,7	47,2	67,5	51,4	51,4	81,3
Pb	23,4	15,9	12,2	12,6	11,6	24,6	13,8	13,4	18,1	8,6	4,5	7,6
Zn	87	81	75	64	67	123	69	73	93	52	41	49
Ni	11,5	10,3	9,3	8,5	12,1	10,8	9,3	13,1	14,5	7,6	7	7,3
As	14,8	9	7,6	10,2	8,8	11,4	10,6	8,1	22,6	8,4	4,6	8,3
Cd	0,4	0,3	0,2	0,2	0,1	0,4	0,2	0,3	0,2	0,1	0,05	0,1
Sb	0,4	0,3	0,3	0,3	0,2	0,4	0,3	0,2	0,5	0,2	0,05	0,2
Bi	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	0,2	0,1	0,05	0,1
Ag	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Au (ppb)	0,25	1	0,25	1,2	0,7	2,1	0,25	0,8	0,25	1	0,25	0,25
Hg	0,02	0,04	0,02	0,03	0,005	0,02	0,005	0,01	0,02	0,005	0,005	0,01
Tl	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Se	0,25	0,8	0,5	0,9	0,25	0,25	0,25	0,8	0,6	0,25	0,25	0,25

Anexo A7: Resultados de análisis químico - Muestras 70 a 80B.

Muestra	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92
UTM-E	320522	316886	306065	308890	308890	301710	302116	307377	309460	310630	311580	309154
UTM-N	6556267	6557917	6564563	6562182	6562182	6570548	6573570	6580739	6583415	6587426	6590733	6583908
Elementos Mayores %												
SiO ₂	53,02	54,09	49,99	55,21	52,82	55	39,99	50,3	53,26	53,15	52,55	51,23
Al ₂ O ₃	16,61	16,23	15,66	16,35	15,1	15,36	12,24	15,6	16,3	16,78	14,61	15,17
Fe ₂ O ₃	11,7	11,41	14,71	8,88	15,59	12,3	30,83	13,24	10,93	10,03	15,07	14,51
MgO	2,64	2,47	2,96	2,36	2,24	2,37	1,95	2,27	2,28	2,44	1,99	2,1
CaO	4,88	4,85	4,47	5,27	4,81	4,32	4,19	5,35	4,91	4,37	4,8	4,81
Na ₂ O	2,97	2,87	3,01	3,12	3,07	3,21	2,03	2,5	2,69	2,75	2,78	2,6
K ₂ O	1,55	1,32	1,92	1,5	1,56	2,06	1,49	1,78	1,5	1,82	1,5	1,39
TiO ₂	1,01	1,05	1,12	0,83	1,24	0,95	1,73	1,1	1,19	1,04	1,42	1,38
P ₂ O ₅	0,18	0,25	0,16	0,2	0,18	0,22	0,2	0,2	0,19	0,2	0,19	0,18
MnO	0,19	0,19	0,29	0,22	0,18	0,2	0,35	0,23	0,18	0,19	0,17	0,18
Cr ₂ O ₃	0,005	0,001	0,005	0,002	0,006	0,007	0,016	0,007	0,004	0,005	0,007	0,006
Elementos Traza (ppm)												
Sc	22	23	24	20	22	22	22	24	23	23	23	25
Ba	363	405	695	423	340	578	416	521	384	485	381	400
Be	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	2	1	0,5
Co	22	20,6	24,6	18,2	19,1	21,2	29,8	22,2	19,4	21,6	18,6	22
Cs	5,6	6	4,8	5,3	4,7	1,7	1,8	2,9	8,2	4,9	3	3,6
Ga	18,3	17,4	17	16,6	16,8	16,6	18,5	17,2	16,5	17,9	16,2	17,2
Hf	11,9	3,6	3,8	3,3	13,6	11,1	19,8	8	3,9	4,6	7,4	8,5
Nb	5,2	3,8	2,9	3,4	6,3	6	7,4	5,6	5,4	5,5	6,8	7
Rb	57,8	39	52,9	41	49,5	51,1	40,8	49,9	44,9	54,9	40,4	40,6
Sn	1	1	2	1	2	1	2	6	3	2	2	3
Sr	346,7	485,7	540,7	501	344,4	371,3	299,5	415,1	396,5	387,8	400,3	413,4
Ta	0,4	0,4	0,3	0,3	0,5	0,5	0,7	0,5	0,4	0,4	0,5	0,5
Th	8,9	3,3	3,4	3,6	8,7	11	10,9	7,8	4,1	6	6,8	4,2
U	2,6	1	1,1	1,2	2,4	2,8	3	2,1	1,3	1,7	2,3	2
V	263	232	392	197	374	316	860	366	259	239	418	401
W	1,5	0,6	0,7	0,6	1,3	2,1	4,5	1,6	0,6	1,4	1	1,2
Zr	400	120,9	137,3	120,1	469,3	380	746,9	284,5	136,6	184,5	258,1	314,2
Y	26,3	25,8	19,3	21,4	27,4	30	26,2	24,6	23,8	25	24,6	27,8
La	14,1	18	15,4	15,1	17,9	24,8	22,7	19,7	15,5	18,2	18,5	21
Ce	35,1	43,2	36,1	35,9	42,7	56,7	51,9	46,8	37,1	44	42,9	48
Pr	4,73	5,61	4,57	4,64	5,38	7,64	6,6	5,89	4,83	5,61	5,61	6,43
Nd	20,9	25,2	20,1	19,5	23,1	32,5	27,5	26,5	20,6	24	23,5	28,3
Sm	4,61	5,56	4,12	4,39	5,02	6,74	5,54	5,4	4,49	5,14	5,17	6,07
Eu	1,13	1,55	1,33	1,27	1,13	1,51	1,29	1,38	1,33	1,36	1,31	1,5
Gd	4,42	5,02	3,77	4,11	4,77	5,87	5,03	4,82	4,47	4,72	4,65	5,28
Tb	0,76	0,78	0,61	0,67	0,8	0,92	0,78	0,75	0,72	0,76	0,77	0,84
Dy	4,54	4,55	3,53	3,72	4,68	5,18	4,45	4,31	4,28	4,38	4,38	4,87
Ho	0,9	0,84	0,68	0,74	0,91	1,02	0,88	0,82	0,81	0,84	0,88	0,94
Er	2,53	2,65	1,95	2,18	2,8	3,14	2,61	2,53	2,46	2,48	2,56	2,85
Tm	0,44	0,41	0,31	0,36	0,46	0,51	0,45	0,41	0,38	0,4	0,4	0,42
Yb	2,87	2,66	2,04	2,35	3,05	3,15	3	2,62	2,58	2,65	2,64	2,9
Lu	0,48	0,41	0,32	0,37	0,48	0,5	0,49	0,4	0,39	0,4	0,41	0,45
TOT C (%)	0,5	0,26	0,48	0,6	0,27	0,42	0,74	1,21	0,49	0,86	0,77	0,98
TOT S (%)	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,03	0,06
Mo	0,8	0,7	0,5	0,4	0,7	0,7	1,3	0,7	0,5	0,6	0,7	0,7
Cu	95,2	80,4	91,9	92,2	101,5	115,2	117,7	154,1	164	205,3	136,3	125,1
Pb	10	25,1	16,6	19,9	11,1	4,1	11,4	19,5	23,1	18,7	16,6	17
Zn	64	95	89	97	55	39	69	104	111	101	81	95
Ni	9,1	4,4	7,4	6,3	8	6,8	13,5	10,8	8,9	8,9	8,3	7,7
As	10,7	21,1	18,4	15,2	9,2	5,1	7,8	9,5	9,2	7,4	6,5	6,7
Cd	0,2	0,2	0,3	0,3	0,2	0,05	0,1	0,3	0,4	0,3	0,2	0,2
Sb	0,2	0,2	0,7	0,4	0,3	0,3	0,3	0,2	0,3	0,2	0,3	0,2
Bi	0,1	0,1	0,05	0,05	0,1	0,05	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2
Ag	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,3	0,2	0,2	0,2
Au (ppb)	0,6	0,25	8,1	0,25	0,25	4,8	4,5	2,1	0,25	2,1	5,3	1,1
Hg	0,05	0,03	0,06	0,03	0,03	0,06	0,09	0,04	0,04	0,05	0,04	0,04
TI	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Se	0,6	1,1	0,25	0,6	0,7	0,6	0,25	0,9	0,25	0,25	0,8	0,8

Anexo A8: Resultados de análisis químico - Muestras 81 a 92.

Muestra	93A	93B	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103
UTM-E	309154	312246	303801	300104	293652	293652	292075	294275	287956	285986	285986	292230
UTM-N	6583908	6594241	6603350	6606746	6612674	6612674	6613824	6613539	6610450	6610298	6610298	6619395
Elementos Mayores %												
SiO ₂	54,55	55,38	57,59	55,06	54,58	56,84	47,77	34,79	41,75	53,07	56,23	46,05
Al ₂ O ₃	15,92	15,52	15,31	17,26	14,93	16,05	11,73	10,28	11,41	14,32	15,54	12,32
Fe ₂ O ₃	10,56	10,24	10,04	8,33	8,1	9,27	15,57	38,36	21,49	14,03	11,2	14,83
MgO	2,24	2,17	1,77	1,89	1,72	2,07	1,35	1,84	1,74	1,86	2,03	1,97
CaO	4,58	5,48	4,4	4,57	4,22	4,72	8,91	4,4	9,64	5,72	4,33	7,21
Na ₂ O	3,09	3,02	3,7	4,71	3,59	3,47	2,66	2,23	2,47	3,29	3,45	3,51
K ₂ O	1,66	1,75	1,98	1,23	2,09	1,92	1,56	0,92	1,29	1,72	1,84	1,49
TiO ₂	1,01	1,03	1,17	0,85	0,86	1,05	1,97	4,42	2,73	1,65	1,25	1,46
P ₂ O ₅	0,18	0,19	0,21	0,29	0,22	0,21	0,19	0,24	0,19	0,19	0,2	0,38
MnO	0,16	0,16	0,21	0,15	0,13	0,15	0,19	0,38	0,28	0,21	0,16	0,48
Cr ₂ O ₃	0,006	0,005	0,005	0,003	0,004	0,005	0,008	0,023	0,014	0,007	0,007	0,007
Elementos Traza (ppm)												
Sc	21	22	18	21	17	19	18	28	22	21	20	20
Ba	433	455	463	356	431	405	395	279	307	399	417	480
Be	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1	1	1	0,5	1	2	1
Co	18,8	16,6	14,8	18,9	13,9	16	15,5	31,9	19,1	16,3	16,5	27,5
Cs	3,9	3	3,4	3	2,9	3,8	2,3	2	2,1	3	4,2	1,8
Ga	16,1	16,2	16	17,1	14,7	16,4	14,3	18,8	16,8	17	16,1	15,6
Hf	6,4	5	11,3	8,7	6,2	8,2	15,3	31,1	18,1	12,2	8,2	10,7
Nb	4,7	6	9,5	7	5,1	6,8	13,4	22,6	15,6	9,6	7,4	8,2
Rb	48,4	46,8	63,7	36,5	61,8	59,3	50,5	27,2	40,2	52,9	60,2	48
Sn	1	1	2	3	2	2	9	6	4	3	2	7
Sr	424	420,8	417,9	493,1	321,8	374,9	360,1	331,7	364,2	398,8	377,3	332,9
Ta	0,4	0,5	0,7	0,5	0,4	0,5	1	1,6	1	0,8	0,6	0,6
Th	6,2	4,5	9,8	13,1	7,9	7,1	7,6	11,6	9,3	6,8	11,4	11,4
U	1,9	1,7	2,6	3,5	2	2	3,1	4,8	3,1	2,3	2,6	3,2
V	271	259	265	196	211	238	437	1386	671	415	312	481
W	1	1,1	1,3	0,9	1	1,3	2,5	3,1	2,2	1,8	1,2	3,2
Zr	234,8	177,6	404,9	299,4	214,3	284,9	565,9	1120,6	679,8	456,7	316,3	380,5
Y	22,8	24,7	25,4	28,3	20,7	24,3	25,2	32,4	27,5	26,4	24,7	26,8
La	16,5	18,4	24,3	29,7	18,3	20,8	26,1	29,8	30	25,5	19,3	24,3
Ce	39,6	43,2	53,8	70,2	39,9	47,1	53,3	64,1	63,7	54,4	42,4	56
Pr	5,19	5,68	6,81	8,84	5,16	5,78	7,03	8,07	7,79	6,8	5,56	7,28
Nd	21,7	24,3	26,7	34,4	21,5	24	28,4	33,1	31,4	28,1	22,9	31,7
Sm	4,7	5,21	5,41	7,55	4,28	5	5,71	6,64	6,1	5,7	4,86	6,21
Eu	1,24	1,34	1,21	1,64	1,11	1,21	1,27	1,41	1,3	1,3	1,22	1,3
Gd	4,28	4,62	4,86	6,34	3,91	4,45	4,6	5,58	4,99	4,63	4,38	5,03
Tb	0,71	0,74	0,78	0,95	0,64	0,74	0,73	0,89	0,82	0,77	0,73	0,79
Dy	3,94	4,1	4,34	5,29	3,59	4,08	4,13	5,25	4,57	4,37	4,12	4,45
Ho	0,78	0,85	0,8	0,96	0,7	0,8	0,85	1,08	0,94	0,88	0,82	0,88
Er	2,37	2,44	2,53	2,97	2,24	2,5	2,52	3,28	2,88	2,61	2,47	2,41
Tm	0,4	0,38	0,42	0,47	0,36	0,39	0,41	0,53	0,48	0,41	0,39	0,38
Yb	2,53	2,44	2,81	2,95	2,21	2,5	2,64	3,73	3,12	2,75	2,57	2,58
Lu	0,39	0,42	0,44	0,47	0,35	0,4	0,41	0,61	0,48	0,43	0,38	0,38
TOT C (%)	1,14	0,53	0,46	0,78	3,64	0,7	2,05	0,11	1,76	0,52	0,44	3,15
TOT S (%)	0,01	0,02	0,01	0,01	0,05	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,22
Mo	0,6	0,6	0,7	0,6	0,5	0,6	1	1,7	1,1	0,6	0,6	2,4
Cu	108,4	112,4	57,9	171,5	61,2	64,9	179,6	65,9	50,8	45,2	60,4	193,9
Pb	11,1	12,8	8,4	5,9	13	13,4	16,2	15,9	17,2	11,5	13,7	6,9
Zn	64	76	62	48	71	67	55	77	66	60	74	48
Ni	7,4	6,8	7,5	6,5	6,4	8,4	10,3	17,5	12,3	8,5	8,9	8,8
As	11,1	7,1	6,7	7,7	7,1	9,1	9,5	8,7	8,6	8	10,2	10,4
Cd	0,2	0,2	0,1	0,05	0,1	0,2	0,1	0,1	0,2	0,05	0,1	0,05
Sb	0,4	0,3	0,3	0,3	0,4	0,3	0,6	0,6	0,6	0,5	0,5	0,7
Bi	0,3	0,1	0,05	0,05	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,05	0,1	0,1
Ag	0,05	0,1	0,05	0,05	0,05	0,05	0,1	0,05	0,05	0,05	0,05	0,2
Au (ppb)	3,2	0,6	6,4	0,25	1,6	1	2,3	0,25	0,9	0,7	22,3	3,6
Hg	0,1	0,04	0,22	0,02	0,05	0,05	0,07	0,03	0,02	0,03	0,04	0,12
Tl	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Se	0,25	0,25	0,5	0,9	0,8	0,25	0,6	0,25	0,25	0,7	0,6	1,3

Anexo A9: Resultados de análisis químico - Muestras 93A a 103.

Muestra	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115
UTM-E	289955	285926	285926	281720	276577	265480	265480	257800	258918	246400	288530	265300
UTM-N	6616514	6611248	6611248	6609177	6609235	6607549	6607549	6604600	6602926	6597900	6613994	6600313
Elementos Mayores %												
SiO2	42,61	39,63	51,18	49,77	46,94	56,82	54,63	42,41	47,71	43,43	46,05	21,58
Al2O3	11,94	11	17,17	14,11	12,67	13,89	15,66	11,74	12,36	11,46	12,94	6,1
Fe2O3	28,57	27,25	9,92	12,97	17,82	10,63	8,16	8,57	17,6	20,85	20,21	3,61
MgO	1,72	1,31	1,92	1,85	1,69	1,34	2,15	2,74	2,45	2,28	2,38	2,34
CaO	4,09	7,14	3,24	6,8	8,3	5,8	4,47	15,07	7,56	9,01	5,81	29,04
Na2O	3,31	2,9	2,67	3,98	2,85	3,01	2,5	2,55	2,93	2,59	3,01	1,61
K2O	1,39	1,53	1,78	1,8	1,58	1,99	1,8	1,23	1,39	1,23	1,58	0,64
TiO2	1,36	3,22	0,99	1,59	2,32	1,52	0,93	1,12	3,14	3,72	1,02	0,36
P2O5	0,47	0,21	0,18	0,26	0,23	0,16	0,24	0,26	0,37	0,31	0,87	0,14
MnO	0,18	0,38	0,16	0,28	0,24	0,15	0,14	0,38	0,24	0,28	0,22	0,11
Cr2O3	0,008	0,012	0,005	0,007	0,01	0,005	0,005	0,01	0,02	0,022	0,006	0,003
Elementos Traza (ppm)												
Sc	18	21	22	20	21	17	16	19	22	23	16	10
Ba	346	354	418	417	387	442	394	373	314	287	350	259
Be	2	1	1	0,5	1	2	1	1	0,5	1	1	0,5
Co	33,9	23	19,4	29,6	16,9	12,6	14,8	18,6	22,5	23,1	25,6	11,2
Cs	2,2	1,8	4,2	1,8	2,3	2,9	4,8	3,2	1,7	2	2,2	1,1
Ga	15,7	18	18,9	15,8	16,9	16,1	16,9	13,5	16,1	16,9	16,1	6,9
Hf	9,5	24,4	5,8	9,5	19,3	9,6	6,1	8,4	25,2	39,3	6,2	2
Nb	9	20,2	6,8	9	14,3	10	6,4	7,3	21,1	24	6,3	1,9
Rb	46,2	47,7	64,4	55,4	49,8	65,1	65,4	48,7	46,1	40,1	51,2	24,3
Sn	5	8	2	4	4	3	3	2	3	3	4	0,5
Sr	251,2	323,5	266	354,5	405,2	367	285,4	426,9	384,2	369,1	260,5	831,2
Ta	0,6	1,3	0,5	0,7	1,1	0,7	0,5	0,6	1,6	1,8	0,4	0,1
Th	9,5	12,4	7,9	12,9	11,6	8,8	7,6	10,9	11,2	21	11,6	3,4
U	3,9	4,4	2,2	3,3	3,4	2,3	1,8	2,8	4	5,3	2,4	1,7
V	518	898	237	377	533	292	190	267	619	689	434	93
W	2,7	5,2	1,3	2,9	1,8	1,3	1,1	1,2	3,2	5,1	1,7	0,25
Zr	332,7	896,2	220,7	353,1	717,1	383	226,7	319,1	944,1	1475,3	217,7	72,6
Y	29,2	28,5	27,2	25,9	28,9	26,2	23,5	23	31,1	32	27,7	9,4
La	28,3	28,4	18,6	26,8	29,6	29,6	19,6	20,3	28,2	32,4	24,7	6,9
Ce	67,1	62,9	44	61,5	63,5	64,2	44,8	47,3	64,7	72	58,2	16,9
Pr	8,76	7,99	5,63	7,82	7,82	7,8	5,45	6,17	8,42	8,99	7,63	2,18
Nd	37,9	33,6	23,7	33,2	31,2	30,4	23,3	26,3	35,4	37,3	32,4	9,5
Sm	7,34	6,37	5,24	6,38	6,18	5,98	4,73	5,47	7,1	7,19	6,79	2,1
Eu	1,34	1,41	1,25	1,46	1,34	1,35	1,09	1,1	1,39	1,35	1,23	0,46
Gd	6,09	5,51	4,76	5,22	5,06	4,93	4,15	4,5	5,91	5,97	5,61	1,8
Tb	0,94	0,85	0,78	0,82	0,83	0,78	0,68	0,72	0,94	0,94	0,87	0,29
Dy	4,92	5,02	4,76	4,66	4,84	4,45	3,9	3,88	5,31	5,31	4,73	1,58
Ho	0,98	0,97	0,95	0,91	0,98	0,85	0,76	0,79	1,02	1,09	0,95	0,32
Er	2,92	2,81	2,67	2,61	2,93	2,55	2,28	2,25	3,05	3,28	2,57	0,93
Tm	0,43	0,46	0,41	0,41	0,47	0,4	0,35	0,35	0,48	0,54	0,39	0,14
Yb	2,79	3,04	2,82	2,58	3,06	2,58	2,26	2,32	3,36	3,84	2,47	0,92
Lu	0,42	0,48	0,4	0,38	0,48	0,38	0,35	0,34	0,5	0,61	0,37	0,14
TOT C (%)	0,59	1,17	1,42	1,51	1,24	0,73	1,09	3,2	1,04	1,18	0,95	9,67
TOT S (%)	0,06	0,15	0,01	0,08	0,19	0,18	0,05	0,08	0,22	0,1	0,06	0,34
Mo	2,4	2,6	0,6	1,1	0,8	0,4	0,4	0,8	1,7	1,1	0,8	0,3
Cu	834,7	46,3	91,9	65,9	42,9	28,4	54,9	79,5	53	30,4	256,9	62,7
Pb	35,2	10,5	11,1	3,9	7,6	9,1	13,6	6,3	4,2	5,2	9,4	2
Zn	151	56	79	40	48	48	68	36	30	32	71	14
Ni	31,4	11,7	12,5	7,8	8,1	6,5	9,5	10,1	12,9	11,7	26,4	3
As	12,6	6,2	10	5,7	5,9	5,8	9,1	6,5	3,7	4,2	12	4,8
Cd	0,4	0,05	0,1	0,1	0,05	0,05	0,1	0,05	0,05	0,05	0,2	0,05
Sb	1,7	0,6	0,1	0,3	0,4	0,2	0,1	0,1	0,2	0,3	0,3	0,1
Bi	0,4	0,05	0,1	0,05	0,05	0,1	0,1	0,05	0,05	0,05	0,1	0,05
Ag	0,5	0,05	0,05	0,1	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Au (ppb)	7,5	0,25	13,7	1,4	9,3	0,25	2,6	0,8	6,4	0,25	4,3	5,3
Hg	0,81	0,02	0,06	0,03	0,05	0,01	0,04	0,03	0,04	0,07	0,06	0,06
Tl	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Se	0,8	0,6	0,7	1,1	0,7	0,8	0,6	0,5	0,8	0,25	0,25	0,7

Anexo A10: Resultados de análisis químico - Muestras 104 a 115.

Muestra	116	117	118	119	120	121
UTM-E	267087	270389	270389	275209	278688	283699
UTM-N	6597997	6596040	6596040	6593210	6594401	6587294
Elementos Mayores %						
SiO ₂	15,45	37,08	48,9	48,78	27,14	49,85
Al ₂ O ₃	4,06	10,05	14,94	13,26	6,92	16,08
Fe ₂ O ₃	19,64	11,89	8,65	14,64	23,07	9,45
MgO	2,02	2,27	3,42	2,03	1,96	4,05
CaO	28,37	17,46	6,31	8,41	19,23	5,13
Na ₂ O	0,98	2,41	2,93	3,24	1,65	3,32
K ₂ O	0,4	0,98	1,48	1,55	0,59	1,66
TiO ₂	3,05	1,3	0,94	2,03	1,42	0,93
P ₂ O ₅	0,18	0,23	0,26	0,26	0,21	0,23
MnO	0,31	0,17	0,22	0,24	0,18	0,15
Cr ₂ O ₃	0,026	0,01	0,005	0,013	0,015	0,006
Elementos Traza (ppm)						
Sc	12	17	23	19	16	27
Ba	233	312	355	295	230	399
Be	0,5	1	1	1	0,5	1
Co	21,9	23,1	21	19,5	21,8	25,9
Cs	0,8	1,5	3,8	1,8	0,5	1,8
Ga	9,5	12,8	16,1	16	12,4	18
Hf	24,2	13,6	6,5	19	24,6	5,5
Nb	17,9	7,4	5	15	6,4	4,7
Rb	13,4	30	51,3	51,6	15,6	54,7
Sn	3	2	2	4	2	2
Sr	786,7	529,4	294,2	371,3	485,8	326,1
Ta	1,3	0,6	0,4	1,2	0,4	0,3
Th	6,3	8,3	7,3	18,5	12,8	6,3
U	3,5	4	2	3,8	4,5	2,4
V	867	433	239	481	812	241
W	1,9	1,9	1,2	1,9	1,7	4,4
Zr	927,1	501,3	227	726,2	914,7	189
Y	16,6	21,8	22,2	28,9	19,7	25,9
La	11,6	17,1	15,6	22,5	15,2	19,6
Ce	27,3	39,8	37,3	53,5	34,8	46,6
Pr	3,61	5,3	4,87	7,06	4,75	6,18
Nd	15,9	23,3	22,6	29,2	20,9	26,8
Sm	3,26	4,82	4,69	6,17	4,25	5,98
Eu	0,64	1,01	1,1	1,29	0,89	1,36
Gd	2,81	4,08	4,11	5,36	3,72	5,08
Tb	0,45	0,64	0,66	0,86	0,57	0,81
Dy	2,47	3,56	3,82	4,9	3,12	4,48
Ho	0,55	0,7	0,75	0,99	0,63	0,88
Er	1,63	2,11	2,23	2,92	1,98	2,58
Tm	0,27	0,34	0,35	0,47	0,32	0,41
Yb	1,89	2,23	2,34	3,18	2,27	2,59
Lu	0,32	0,35	0,35	0,48	0,37	0,39
TOT C (%)	7,75	4,48	2,41	1,29	5,38	1,77
TOT S (%)	0,39	0,29	0,05	0,05	0,1	0,32
Mo	1,7	2,1	0,8	1,2	1,2	1,1
Cu	28	57,2	152,9	47,7	43,2	226,4
Pb	2,5	3,1	10,3	3,7	1,9	3,2
Zn	19	21	64	22	15	46
Ni	12,5	10,3	12,6	9,6	10,2	11,5
As	5,1	5,2	7,4	2,5	4,3	3,5
Cd	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Sb	0,2	0,3	0,3	0,2	0,3	0,2
Bi	0,05	0,05	0,1	0,05	0,05	0,05
Ag	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Au (ppb)	19,1	3,8	51	0,25	4,3	17,4
Hg	0,03	0,1	0,23	0,06	0,16	0,23
Tl	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Se	0,25	0,8	0,6	0,25	0,7	0,5

Anexo A11: Resultados de análisis químico - Muestras 116 a 121.

Anexo B

Tablas de correlaciones

ID Muestra	UTM-E	UTM-N	Nodo
J1	345574	6638604	8
1	348215	6636204	7
2	350892	6632904	2
3	352099	6629111	2
J3	355614	6628319	2
4	335282	6647740	8
5	329524	6641096	3
7	322680	6637872	3
8	306963	6629353	3
9	298881	6623018	3
10	278507	6607885	6
11	269988	6609388	1
13	262335	6606443	1
14	262335	6606443	8
15	304662	6602984	3
16	298361	6607222	3
17	296443	6608812	8
18	254040	6601547	1
19	254040	6601547	8
21	242953	6597708	8
23	285409	6584276	4
25	288880	6583920	4
27	285151	6582998	3
28	285725	6579708	3
29	324253	6555610	3
30	336257	6549914	8
31	313449	6559666	3
32	304043	6566278	3
33	305290	6576973	3
34	353414	6599382	7
36	359024	6598567	7
37	364087	6598091	7
38	349026	6598562	7
39	377774	6611052	2
40	379304	6614162	4
41	377894	6615700	2
42	375837	6618347	2
43	374214	6618361	2
44	371301	6621076	2
45	368180	6621668	2
46	364681	6622636	2
47	361404	6624304	2
48	357757	6627051	2
49	344209	6642930	8
50	343332	6647320	8
51	340103	6648824	8
53	332633	6644302	3
54	327508	6639574	3
55	318952	6635247	3
56	315086	6634060	3
57	325962	6637473	3
58	310583	6633026	3
60	302625	6627582	3

ID Muestra	UTM-E	UTM-N	Nodo
61	295865	6621372	3
62	293764	6617321	3
63	345369	6598260	7
65	345965	6599572	8
66	338174	6595709	8
67	334388	6596352	8
68	331241	6599040	7
69	329325	6600482	7
71	327797	6600311	8
72	324867	6601022	7
73	320725	6601174	8
74	321680	6598310	8
75	315865	6602298	3
76	316285	6602217	8
77	312745	6602260	8
78	331310	6553901	8
79	327812	6553843	3
80B	320522	6556267	3
82	316886	6557917	3
83	306065	6564563	3
84	308890	6562182	3
86	301710	6570548	8
87	302116	6573570	5
88	307377	6580739	3
89	309460	6583415	3
90	310630	6587426	3
91	311580	6590733	3
92	309154	6583908	3
93B	312246	6594241	3
94	303801	6603350	8
95	300104	6606746	8
96	293652	6612674	3
98	292075	6613824	5
99	294275	6613539	5
100	287956	6610450	5
101	285986	6610298	8
103	292230	6619395	6
104	289955	6616514	4
105	285926	6611248	5
107	281720	6609177	8
108	276577	6609235	5
109	265480	6607549	8
111	257800	6604600	6
112	258918	6602926	5
113	246400	6597900	5
114	288530	6613994	6
115	265300	6600313	1
116	267087	6597997	1
117	270389	6596040	6
119	275209	6593210	5
120	278688	6594401	6
121	283699	6587294	3

Anexo B1: Correlación Nodo - Muestra (sedimentos activos).

Unidad \ Nudo	1	2	3	4	5	6	7	8
Complejo Metamórfico del Choapa								X
Complejo Plutónico Altos de Talinay					X			X
Fm. Confluencia	X		X		X	X		X
Intrusivos Jurásicos	X					X		
Intrusivos Graníticos Kt.Inf			X	X	X			X
Fm. Arqueros			X	X	X	X		
Fm. Qda. Marquesa			X		X			X
Fm. Qda. La Titora			X					X
Fm. Viñita		X	X				X	X
Intrusivos Graníticos Kt.Sup. Tard.			X				X	X
Intrusivos Cenozoicos		X	X				X	X
Fm. Los Elquinos								X
Fm. Algarrobal		X					X	
Fm. Río Tascadero							X	X
Fm. Pucalume							X	X
Fm. Tres Cruces							X	
Intrusivos Paleozoicos (Sup. Elqui)		X		X			X	
Intrusivos Paleozoicos (Sup. Ingaguás)							X	
Fm. Pastos Blancos		X						
Fm. Hurtado		X						
Alteración Hidrotermal		X		X				

Anexo B2: Correlación nodo - unidad geológica. Las unidades geológicas fueron dispuestas en las tablas (comenzando desde arriba) en el mismo orden en que se disponen geográficamente (de oeste a este).

Anexo C

Composición mineralógica detallada de los sedimentos

Río		Limarí										Hurtado								
Mineral	Muestra	22*	21	113	111	110*	109	108	10	101	9	60	56	57	4	48	45	41	40	39
Cuarzo																				
Albita																				
Filipsita																				
Anortita																				
Cristobalita																				
Anglesita																				
Anyuíita																				
Circon																				
Esfalerita																				
Woodwardite																				
Wairauita																				
Awaruítita																				
Arsenolita																				
Cuprita																				
Telurobismutita																				
Rutilo																				
Magnetita																				
Helvita																				
Whitnevitita																				
Hexahidrobórita																				
Berberita																				
Sternbergita																				
Clinocloro																				
Billietita																				
Hawlevita																				
Microclina																				
Flogopita																				
Magnesiohornblenda																				
Anortoclasa																				
Montbravita																				
Montmorillonita-Clorita																				
Fourmarierite																				
Umohoita																				
Hematita																				
Covelina																				
Fluoribeckita																				
Montmorillonita																				
Calcita																				
Saponita																				
Ox. De Hierro (III)																				
Ferrohornblenda																				
Edenita																				
Moganita																				
Clinoferrosilita																				
Gainesita																				
Koninckita																				
Clorita-Vermiculita-Montmorillonita																				
Brushita																				
Clinohipersteno																				
Ferroactinolita																				
Fluor-edenita																				
Illita																				
Clinoestatita																				
Variscita																				
Enstatita																				
Muscovita																				
Actinolita																				
Halita																				
Tridimita																				

Anexo C1: Composición mineralógica detallada de Ríos Limarí y Hurtado. (*) Muestras pre-Industriales.

Río		Estero Ingenio		
Mineral	Muestra	107	104	103
Cuarzo				
Albita				
Filipsita				
Montmorillonita				
Covelina				
Fluoro-Edenita				
Hematita				
Magnesioarfvedsonita				
Fluoranita				
Ferrosilita magnésica				
Cupropavonita				
Anortita				
Anortoclasa				
Montmorillonita-Clorita				
Magnesiohornblenda				
Calcita				
Fosfato de Aluminio				
Rutilo				
Augita				

Anexo C2: Composición mineralógica detallada del Estero Ingenio.

Río		Estero Punitaqui			Queb. Los Mantos				Est. Punitaqui	
Mineral	Muestra	112	117	121	24*	23	26*	25	27	28
Cuarzo										
Albita										
Filipsita										
Anortita										
Biotita										
Fluoro-Edenita										
Montmorillonita-Clorita										
Flogopita										
Ferrihidrita										
Ribekita										
Calcita										
Illita										
Vermiculita										
Fluoranita										
Saponita										
Fluorribeckita										
Donpeacorita										
Montmorillonita										
Anortoclasa										
Actinolita										
Muscovita										
Bieberita										
Montbravita										
Clorita-Vermiculita-Montmorillonita										
Edenita										
Kozulita										
Zeolita										
Magnetita										

Anexo C3: Composición mineralógica detallada del Estero Punitaqui. (*) Mestres pre-Industriales.

Río		Grande				Rapel	Tomes	Los Molles	
Mineral	Muestra	98	94	77	74	72	69	38	37
Cuarzo									
Albita									
Anortita									
Telurobismutita									
Ribekita									
Ox. De Manganeso									
Richetita									
Upalita									
Zeolita									
Biotita									
Microclina									
Montmorillonita-Clorita									
Fluoro-Edenita									
Filipsita									
Actinolita									
Muscovita									
Enstatita									
Clarkeita									
Magnesioarfvedsonita									
Montmorillonita									
Fluorribeckita									
Anortoclasa									
Calcita									
Clorita									
Calomel									
Donpeacorita									
Fluoranita									
Metaheulandita									

Anexo C4: Composición mineralógica detallada Ríos Grande, Rapel, Tomes y Los Molles.

Río		Guatulame			Cogotí		
Mineral	Muestra	93B	89	86	83	80B	30
Cuarzo							
Albita							
Filipsita							
Saponita							
Muscovita							
Edenita							
Ferroactinolita							
Augita							
Anortita							
Flogopita							
Montmorillonita-Clorita							
Vermiculita							
Magnesita							
Fluorribeckita							
Tremolita							
Palygorskita							
Titanita							
Montmorillonita							
Illita							
Hematita							
Crisocola							
Bannermanita							
Polihalita							
Labradorita							
Clinohipersteno							
Fluoro-edenita							
Fluoranita							
Anortoclasa							

Anexo C5: Composición mineralógica detallada Ríos Guatulame y Cogotí.

Anexo D

Lista completa de minerales detectados mediante difracción de Rayos-X

Mineral	Fórmula	Grupo	Subgrupo	Tipo
Actinolita	$\text{Ca}_7(\text{MgFe})_3\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$	Silicatos	Inosilicatos	Anfibolas
Albita	$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$	Silicatos	Tectosilicatos	Plagioclasas
Anglesita	PbSO_4	Sulfatos		
Anortita	$\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$	Silicatos	Tectosilicatos	Plagioclasas
Anortoclasa	$((\text{Na},\text{K})\text{AlSi}_3\text{O}_8)$	Silicatos	Tectosilicatos	FeldespatosK
Anyuilita	$\text{Au}(\text{Pb},\text{Sb})_2$	Nativos - Aleaciones		
Arsenolita	As_2O_3	Óxidos		
Augita	$(\text{Ca},\text{Na})(\text{Mg},\text{Fe}^{2+},\text{Al},\text{Fe}^{3+},\text{Ti})[(\text{Si},\text{Al})_2\text{O}_6]$	Silicatos	Inosilicatos	Piroxenos
Awaruita	$\text{Ni}_2\text{Fe to Ni}_3\text{Fe}$	Nativos - Aleaciones		
Bannermanita	$(\text{Na},\text{K})_{0.7}\text{V}^{4+}_{0.7}\text{V}^{5+}_{5.3}\text{O}_{15}$	Hidroxidos		
Berberita	$\text{Be}_2(\text{BO}_3)(\text{OH},\text{F})\cdot(\text{H}_2\text{O})$	Boratos		
Bieberita	$\text{CoSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$	Sulfatos		
Billietita	$\text{Ba}(\text{UO}_2)_6\text{O}_4(\text{OH})_6\cdot 8(\text{H}_2\text{O})$	Oxi-Hidróxidos		
Biotita	$[\text{K}(\text{Mg},\text{Fe})_3(\text{Al},\text{Fe})\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH},\text{F})_2]$	Silicatos	Filosilicatos	Micas
Brushita	$\text{Ca}(\text{HPO}_4) \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Fosfatos		
Calcita	CaCO_3	Carbonatos		
Calomel	$(\text{Hg}^{+2})\text{Cl}_2$	Halogenuro		
Circon	ZrSiO_4	Silicatos	Nesosilicatos	
Clarkeita	$(\text{Na},\text{Ca},\text{Pb})_2(\text{UO}_2)_2(\text{O},\text{OH})_3$	Óxidos		
Clinocloro	$(\text{Mg}_5\text{Al})(\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_8)$	Silicatos	Filosilicatos	Cloritas
Clinoenstatita	$\text{Mg}_2\text{Si}_2\text{O}_6$	Silicatos	Inosilicatos	Piroxenos
Clinoferrosilita	$(\text{Fe}^{2+},\text{Mg})_2\text{Si}_2\text{O}_6$	Silicatos	Inosilicatos	Piroxenos
Clinohipersteno (Pigeonita)	$(\text{Mg},\text{Fe}^{2+},\text{Ca})(\text{Mg},\text{Fe}^{2+})\text{Si}_2\text{O}_3$	Silicatos	Inosilicatos	Piroxenos
Clorita	-	Silicatos	Filosilicatos	Micas
Covelina	CuS	Sulfuros		
Crisocola	$(\text{Cu},\text{Al})_4\text{H}_4(\text{OH})_8\text{Si}_4\text{O}_{10}\cdot n\text{H}_2\text{O}$	Silicatos	Filosilicatos	
Cristobalita	SiO_2	Silicatos	Tectosilicatos	Cuarzo de alta temperatura
Cuarzo	SiO_2	Silicatos	Tectosilicatos	Cuarzo
Cuprita	Cu_2O	Óxidos		
Cupropavonita	$\text{AgCu}_2\text{PbBi}_5\text{S}_{10}$	Sulfuros		
Donpeacorita	$\text{MgMnSi}_2\text{O}_6$	Silicatos	Inosilicatos	Piroxenos
Edenita	$\text{Na}[\text{Ca}_2][\text{Mg}_5(\text{OH})_2 \text{AlSi}_7\text{O}_{22}]$	Silicatos	Inosilicatos	Anfibolas
Enstatita	$\text{Mg}_2\text{Si}_2\text{O}_6$	Silicatos	Inosilicatos	Piroxenos
Esfalerita	ZnS	Sulfuros		
Ferrihidrita	$\text{Fe}^{3+}_2\text{O}_3\cdot 0.5(\text{H}_2\text{O})$	Oxi-Hidróxidos		
Ferroactinolita	$\text{Ca}_7(\text{Fe}^{2+},\text{Mg})_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$	Silicatos	Inosilicatos	Anfibolas
Ferrohornblenda	$\text{Ca}_7(\text{Fe}^{2+},\text{Mg})_4\text{Al}(\text{Si}_7\text{Al})\text{O}_{22}(\text{OH},\text{F})_2$	Silicatos	Inosilicatos	Anfibolas
Ferrosilita	FeSiO_3	Silicatos	Inosilicatos	Piroxenos
Filipsita	$\text{Ca} - \text{K} - \text{Na} (?)$	Silicatos	Tectosilicatos	Zeolitas
Flogopita	$\text{K}(\text{Mg},\text{Fe},\text{Mn})_3\text{Si}_3\text{AlO}_{10}(\text{F},\text{OH})_2$	Silicatos	Filosilicatos	Micas
Fluoranita	$\text{KFe}^{2+}_3(\text{F},\text{OH})_2 \text{AlSi}_3\text{O}_{10}]$	Silicatos	Filosilicatos	Micas
Fluoro-edenita	$\text{NaCa}_2\text{Mg}_5\text{Si}_7\text{AlO}_{22}(\text{F},\text{OH})_2$	Silicatos	Inosilicatos	Anfibolas
Fluor-Ribeckita		Silicatos	Inosilicatos	Anfibolas

Anexo D1: Lista de minerales detectados por difracción de Rayos-X.

Mineral	Fórmula	Grupo	Subgrupo	Tipo
Fosfato de Aluminio	Al(PO ₄)	Fosfatos		
Fourmarierita	PbU ₄ O ₁₃ ·4H ₂ O	Oxi-Hidróxidos		
Gainesita	Na ₂ (Be,Li)(Zr,Zn) ₂ (PO ₄) ₄ ·1.5H ₂ O	Fosfatos		
Halita	NaCl	Haluros		
Hawleyita	CdS	Sulfuros		
Helvita	Mn ₄ Be ₃ (SiO ₄) ₃ S	Silicatos	Tectosilicatos	Feldespatoides
Hematita	Fe ₂ O ₃	Óxidos		
Hexahidrobórita	Ca[B(OH) ₄] ₂ ·6H ₂ O	Boratos		
Illita	(K,H ₃ O)(Al,Mg,Fe) ₂ (Si,Al) ₄ O ₁₀ [(OH) ₂ ,(H ₂ O)]	Silicatos	Filosilicatos	Arcillas
Koninckita	Fe ³⁺ (PO ₄) ₃ ·3(H ₂ O)	Fosfatos		
Kozulita	NaNa ₂ Mn ²⁺ ₄ (Fe ³⁺ ,Al)Si ₆ O ₂₂ (OH) ₂	Silicatos	Inosilicatos	Anfibolas
Labradorita	(Ca,Na)Al(Al,Si)Si ₂ O ₈	Silicatos	Tectosilicatos	Feldespatos
Magnesio-arfvedsonita	NaNa ₂ (Mg ₄ Fe ⁺⁺)Si ₈ O ₂₂ (OH) ₂	Silicatos	Inosilicatos	Anfibolas
Magnesiohornblenda	Ca ₂ [Mg ₄ (Al,Fe ⁺⁺)]Si ₇ AlO ₂₂ (OH) ₂	Silicatos	Inosilicatos	Anfibolas
Magnesita	MgCO ₃	Carbonatos		
Magnetita	Fe ₃ O ₄	Óxidos		
Metaheulandita	?	Silicatos	Tectosilicatos	Zeolitas
Microclina	KAlSi ₃ O ₈	Silicatos	Tectosilicatos	FeldespatoK
Moganita	SiO ₂	Silicatos	Tectosilicatos	polimorfo del cuarzo
Montbrayita	(Au,Sb) ₂ Te ₃	Teluros		
Montmorillonita	(Na,Ca) _{n-33} (Al,Mg) ₂ (Si ₄ O ₁₀)(OH) ₂ ·nH ₂ O	Silicatos	Filosilicatos	Arcillas
Montmorillonita-Clorita		Silicatos	Filosilicatos	Arcillas
Muscovita	KAl ₂ (Si ₃ Al)O ₁₀ (OH,F) ₂	Silicatos	Filosilicatos	Micas
Ox. De Hierro (III)	Fe ₂ O ₃	Óxidos		
Ox. De Manganeseo	MnO ₂	Óxidos		
Palygorskita	(Mg,Al) ₅ (Si,Al) ₈ O ₂₀ (OH) ₂ ·8H ₂ O	Silicatos	Filosilicatos	Arcillas
Polihalita	K ₂ Ca ₂ Mg(SO ₄) ₄ ·2(H ₂ O)	Sulfatos		
Ribekita	Na ₂ Fe ²⁺ ₂ Fe ³⁺ ₂ Si ₆ O ₂₂ (OH) ₂	Silicatos	Inosilicatos	Anfibolas
Richetita	PbU ₄ O ₁₃ ·4(H ₂ O)	Óxidos		
Rutilo	TiO ₂	Óxidos		
Saponita	(½Ca,Na) _{n-33} (Mg,Fe ⁺²) ₃ (Si,Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₂ ·4H ₂ O	Silicatos	Filosilicatos	Micas
Sternbergita	AgFe ₂ S ₃	Sulfuros		
Telurobismutita	Bi ₂ Te ₃	Teluros		
Titanita (Esfena)	CaTiSiO ₅	Silicatos	Nesosilicatos	
Tremolita	Ca ₂ Mg ₅ Si ₈ O ₂₂ (OH) ₂	Silicatos	Inosilicatos	Anfibolas
Tridimita	SiO ₂	Silicatos	Tectosilicatos	polimorfo del cuarzo
Umohoita	(UO ₂)(MoO ₄)·(H ₂ O)	Molibdatos		
Upalita	Al(UO ₂) ₃ (PO ₄) ₂ O(OH)·7H ₂ O	Fosfatos		
Variscita	AlPO ₄ ·2(H ₂ O)	Fosfatos		
Vermiculita	(MgFe,Al) ₃ (Al,Si) ₄ O ₁₀ (OH) ₂ ·4H ₂ O	Silicatos	Filosilicatos	Micas
Wairauita	CoFe	Nativos - Aleaciones		
Whitneyite (Algodonita)	Cu ₆ As	Arsenuros		
Woodwardita	Cu ₄ Al ₂ (SO ₄)(OH) ₁₂ ·2-4(H ₂ O)	Sulfatos		
Zeolita	-	Silicatos	Tectosilicatos	

Anexo D2: Continuación lista de minerales detectados por difracción de Rayos-X.

Anexo E

Listado de yacimientos metálicos y no-metálicos

No.	Nombre	UTM N	UTM E	Mena	No.	Nombre	UTM N	UTM E	Mena
37	Macanuda Porvenir o Loma Blanca María Manto Gray	6.651.569	310.313	Mn	72	Central Chacarita Pabellón Despreciada Atuiema	6.622.190	282.224	Cu
38	Loma Negra Toda La Vida Distrito Corral Quemado	6.651.725	313.555	Mn	74	Socavón de La Placa Tórtolas Altas	6.614.930	278.822	Cu
41	Los Leones (León) El Zapallo La Hermida Los Ranchos El Porvenir	6.648.939	292.029	Cu, Au, Ag	75	Campanil Ferrocarriil	6.615.433	275.398	Cu, Au, Ag
42	Vencedora	6.647.465	294.783	Cu	76	El Dorado	6.616.831	286.525	Fe
43	Dichosa Carmelita El Espino			Hg, Cu, Au	77	Choapina Custodia Inagotable Cocina San Manuel	6.619.837	289.841	Cu
44	Chamuscada Chaña Toyo Tropezón	6.643.738	311.480	Mn	79	Mantos Chicos	6.611.439	285.927	Hg, Au
45	Civil Alto Civil Bajo Esmeralda Dora San Francisco San Juan Carolina Recreo Serena	6.642.797	308.185	Mn, Cu	80	Blanca Los Mantos Agua Overa	6.618.467	298.246	Cu
46	Sta. Teresa	6.646.159	335.518	Cu	81	LaCoipa Retamillos Ubilla Los Bronces Sta. Carolina	6.617.463	301.629	Cu
47	Los Molles	6.643.565	335.868	Cu	82	Pichilingo	6.622.321	321.549	Ag
48	Mantos Grandes	6.643.807	350.224	Cu, Ag, Au	83	Facundo Carmen Cornelio Quebrada Monta Patria Crucero	6.615.770	318.211	Cu
51	Hualtata San Antonio Los Amigos	6.638.361	284.758	Cu	84	Pompullo Sta. Inés Zorrilla Romeril	6.614.203	326.937	Pb, Cu
52	Azul-Ruleta Tesoro Los Panules	6.637.972	290.327	Cu	85	Si Fuera Gallo	6.622.630	337.291	Cu, Ag
53	La Serena El Cobre Codiciada Andacollo Altamira San Francisco	6.639.859	293.656	Cu	86	José Dolores Talca	6.622.422	347.460	Cu, Ag
54	San Lorenzo	6.634.471	293.375	Cu, Au	88	Carmen	6.606.903	314.250	Cu, Ag, Au
55	Pichanilla, Estrella de Oro	6.636.174	298.565	Au,Cu	89	Corvina Regalo Atutemita Lechuzza Socavón San Pedro	6.607.488	301.236	Cu
57	Farellón Florida	6.630.256	309.821	Cu	90	Risueña Higuera	6.602.365	304.283	Cu
58	Manto Los Molles	6.638.838	339.821	Cu, Ag, Au	91	Virgen de Lourdes Soledad Peña Blanca Millonaria Recuperado	6.606.789	294.692	Cu
59	Disputada	6.634.824	337.621	Cu, Ag	92	Ruiseñor Culebra Sta. Inés	6.602.267	294.564	Cu
60	Sácate El Poncho	6.632.473	340.304	Cu	93	Cerro Chico Despreciada S Las Tinajas	6.604.749	288.136	Cu
61	Chamaquito	6.635.216	346.181	Au, Cu, Ag	94	Icaro Las Placetas	6.603.348	290.064	Cu, Au
62	Esperanza	6.636.717	350.106	Cu, Au, Ag	95	Dos Guías	6.600.147	291.725	Au
63	Sin información	6.629.983	342.668	Fe, Cu	96	Salvación San Jorge (Las Chucas)	6.596.108	294.628	Cu, Au
64	Frente Popular	6.628.403	338.205	Pb, Zn, Au	97	Independencia Choapina (Dos Hermanos)	6.600.107	288.730	Cu, Au
65	Panulcillo María Eugenia	6.626.462	285.991	Cu					
66	Abandonada (Farellón) Sta. Rosa Naranjo	6.632.332	282.423	Cu					
69	Sta. Rita Taylor Condesa Pastos Blancos Incienso Nisñiles	6.626.338	290.873	Cu, Ag, Au					
71	El Espino	6.622.394	277.740	Cu, Ag					

Anexo E1: Lista de yacimientos metálicos al norte de UTM N 6.570.000. Yacimientos del 37 al 97.

No.	Nombre	UTM N	UTM E	Mena	No.	Nombre	UTM N	UTM E	Mena
98	Infiernillo Elvira Cinabrio Carmen Sacramento	6.596.628	283.283	Cu, Au	117	Lucrecia Esperanza Planeta Flor del Bosque Victoria Sombria	6.586.407	321.934	Au, Cu, Ag
99	Los Angeles	6.599.108	281.349	Cu	118	Carmen Socavón Pudiera Ballena El Rosario	6.586.847	325.475	Au, Cu
100	Infiernillo	6.602.969	282.417	Fe	119	Despreciada (La)	6.591.416	331.127	Au
101	Alamito	6.602.414	257.974	Au	120	El Maitén Sasso	6.590.641	349.593	Au
102	Las Huatatas	6.604.538	251.830	Au	126	Estrella del Oriente Olivia Oriente Antonieta Osiris La Nueva Orion Sta. Irene	6.582.665	283.716	Au, Cu
103	Leonor Clara Juanita San Luis Margarita	6.592.011	239.031	Au	127	Frente Popular La Fortuna Sta Amelia	6.579.810	279.410	Cu, Au
104	Flor de Espino San Andrés Visla Hermosa Dichosa Dos Hermanos Akaurano Natacha Espino Viejo Lacy El Altar Sta. Rosa Marichu Carmelita	6.593.350	292.852	Au, Hg	128	24 de Marzo	6.578.814	282.969	Au
105	Escondida La Hoyada La Majada Purísima Grupo Felicidad	6.592.591	296.987	Cu, Au, Hg	129	Pericote Farellón Montgomery El Azogue Culebra Marina Buena Esperanza Champurria Inagotable Estrella del Sur Capitana	6.583.884	287.795	Hg, Au, Cu
106	Algarrobo	6.593.810	310.557	Hg, Cu	130	El Salto Dos Agu Flor de Azuilillo Fortuna Jazmín Rusa Fragosa 20 de Septiembre Tita o Tito Progreso	6.581.616	290.315	Au
107	Abandonada	6.595.209	338.974	Ag	131	Vaca Lechera Canovio Despreciada Inagotable Chela Bolivia California Sin Nombre Milagrosa Membrillo	6.580.076	295.678	Au, Cu
108	El Alba San José	6.584.136	266.380	Au	132	Churruca El Cobre San Pedro Esperanza	6.580.736	299.102	Cu
109	Sabroncello Las Tococas	6.583.821	279.817	Au	133	Gulas Toro La Laja	6.584.387	301.050	Cu
110	Desconocida Cuprita	6.586.657	282.188	Au	134	Preferida	6.579.505	310.344	Cu, Ag, Pb
111	Carmen Flor del Molle Tamayita San Carlos La Poderosa Cruz de Oro Cenizas El Membrillo	6.587.756	286.709	Cu, Au, Hg	135	Castellana Lourdes	6.582.676	315.324	Cu
112	El Durazno Animas Fortuna El Salto Los Chinchos Cerro Blanco Los Azogues	6.587.557	290.819	Au, Cu, Hg	137	Etrella San Lorenzo Malloquina Dama	6.579.766	315.678	Cu
113	Pichuleo Huallata Trivato Cuatro Amigos	6.588.138	300.865	Au, Cu					
114	Sla. Laura Inca de Oro Esperanza	6.590.056	307.630	Cu, Au					
115	Ptomita Esperanza Cabirla (Blanca)	6.590.177	313.449	Pb, Cu, Au, Ag					
116	El Piedrudo	6.586.405	313.251	Cu					

Anexo E2: Lista de yacimientos metálicos al norte de UTM N 6.570.000. Yacimientos del 98 al 137.

No.	Nombre	UTM N	UTM E	Mena
138	Abundancia La Parva	6.576.219	314.484	Cu, Ag, Pb
139	Escondida	6.577.121	324.484	Cu
140	Piorno	6.574.292	321.976	Cu, Ag, Pb
141	Higuera Mugre Espino Agradecida	6.571.882	320.278	Cu, Pb
142	Alfa	6.574.596	331.620	Cu, Ag, Pb
143	Verónica	6.578.807	334.195	Cu
144	Cisterna	6.572.707	333.914	Cu
145	Mina Abandonada de 14 de Julio Abandonada II	6.572.529	336.956	Cu, Au, Ag
146	Los Cóndores	6.578.870	340.829	Au
147	Mantos Divisaderos	6.573.691	349.508	Cu
148	Los Pingos	6.578.687	351.459	Cu
149	Peñuelas	6.578.033	356.663	Au
150	La Blanca San Diego	6.572.194	279.533	Cu, Au
152	Quile Sta. Amelia Quebrada Los Pozos	6.575.721	278.646	Cu
153	Lucero	6.574.593	292.489	Cu, Au
154	Crucero Cerveza Cerveza	6.572.883	298.757	Cu
155	San Fernando Quiltro	6.571.027	292.575	Cu,Au, Fe
156	San Francisco Pretecatermo Pelusa Mercedes Prat	6.569.557	297.326	Cu, Au
157	El Durazno La Cobriza Mariposa Rosa (La Estoica) Vaca Muerta	6.572.983	298.776	Cu, Ag
158	Las Piritas Rosario Las Palmas Araminta Marconi Delirio Socavón Delirio Guatulame Sin Nombre	6.583.637	325.033	Au, Cu, Ag
159	Rosario Marcela	6.571.573	304.798	Au, Cu, Ag, Pb
160	Blanca Famosa Farellón de Sasso	6.568.851	311.900	Cu, Ag
161	Rulo Litro	6.568.996	320.293	Au, Cu, Pb
162	Carmen El Ediante	6.569.932	327.514	Cu
165	Rincón de La Ortiga	6.610.902	322.806	Pb
166	Mantos Chicos Mantos Grandes	6.584.524	351.641	Cu
167	Pintosa	6.569.771	383.680	Cu

Anexo E3: Lista de yacimientos metálicos al norte de UTM N 6.570.000. Yacimientos del 138 al 167.

No.	Nombre	UTM N	UTM E	Mena	No.	Nombre	UTM N	UTM E	Mena
9	Despreciada	6.565.530	293.762	Cu	49	Quiscal	6.540.802	302.556	Cu
10	Pura Pinta	6.562.536	289.418	Cu, Fe		Ascendrada			
	La Justicia				50	La Florida	6.541.027	308.546	Cu
	Veta Don Telmo					Flor del Valle			
	Marqueza					Algarrobo			
11	Las Rosas	6.561.111	293.679	Cu	51	El Bronce	6.543.752	320.077	Cu
12	San Jorge	6.555.356	291.719	Au, Cu		El Peñón (Ramadillas)			
13	La Colorada	6.561.408	300.870	Fe	52	Rincón Seco	6.542.349	326.990	Cu
14	Verde	6.561.089	305.407	Cu, Ag	53	Cordón de La Liga	6.539.697	318.639	Cu
	Placeres de Chingay					Merceditas			
	Potrerillos				54	La Chilena	6.538.590	313.767	Cu
15	Cachiyuyo Grande	6.558.046	307.800	Cu		La Verde			
	Carmela					Sta. Inés			
16	Dos Amigos	6.557.566	304.224	Cu		Remolinos			
	Las Granallas					Paciencia			
17	Porvenir	6.555.275	300.127	Au, Cu	55	Chuchoca	6.538.617	305.043	Au, Cu
18	La Coipa	6.555.648	311.085	Fe, Cu		Quintal			
	Los Chineóles					Sauce (Pama)			
19	Escondida	6.558.049	316.977	Cu		Carachenta			
	Rosario					El Espino			
	Narbona				56	Bellavista	6.536.112	308.370	Cu
	San Manuel					Porvenir			
	Los Ranchitas (Amarilla)					Blanca			
	Dura					El Cobre			
20	Los Sapos	6.551.661	314.585	Cu	67	Sobrina	6.531.022	304.471	Cu, Au
	Sapiola					Tesoro			
	Violeta					Encantadora			
	Mariaa Paulina					Porvenir			
21	La Neqra	6.561.842	323.376	Cu, Ag, Pb, Zn		Socavón			
22	Violeta	6.560.918	335.807	Cu, Pb	69	Tolar (Republicana)	6.527.095	305.262	Au, Cu, Ag
23	Africana	6.554.910	342.734	Cu, Pb, Zn		Resguardo			
	Dos Amigos					Buena Esperanza			
	Rosicler					Tongo			
	Las Galenas					Despreciada			
24	Romerila	6.549.234	325.867	Cu, Mo		Las Tres Vetas			
	La loca					Crucero			
25	Despreciada	6.547.431	318.648	Cu, Au		Barrancón			
	Altamira					La Glorita (GLoria)			
	San Tadeo					Amapola			
	Desengaño					Gallega			
26	Los Bolones	6.547.097	310.962	Cu	70	Calandria	6.529.836	311.434	Hg
27	La Qurla	6.549.189	306.146	Cu	71	Los Azogues	6.533.105	318.281	Cu, Hg
	Chuguí Chico					Socorro			
28	Victoria	6.545.904	300.146	Cu, Mn	74	LaPlatita	6.524.129	324.250	Hg
	Marta				87	Colo-Colo	6.566.959	302.135	Cu
29	Casualidad	6.550.648	299.450	Cu, Au		Rapa-Nuj			
	Arenillas				88	La Plata (La Platita)	6.552.639	303.967	Cu, Ag
31	Saturno, Marte	6.544.968	292.757	Au, Cu		El Negro			
	Suez					Parraína			
32	Dos Amigos	6.546.895	287.138	Cu		Huallongo			
	Polvareda				89	Nueva Farellón	6.567.286	314.643	Cu, Ag
36	Sacramento	6.554.796	283.662	Cu		Verde			
38	Teresita	6.554.107	295.405	Cu, Au, Ag		Flor del Bosque			
	Corrida Larga				90	El Cobre	6.567.288	318.804	Cu, Ag, Au, Pb
	Sta. Fe					Republicana			
	Lana y Corina					Esperanza			
	Sta. Elena					Luz del Pilar (Manto)			
	Lumberita								
	Villa Casque								

Anexo E4: Lista de yacimientos metálicos al sur de UTM N 6.570.000. Yacimientos del 9 al 90.

No.	NOMBRE	RECURSO	UTM E	UTM N
R04-60	BLANQUÍTA	BARITINA	309.328	6.642.562
R04-61	VICTORIA UNO	BARITINA	306.163	6.640.196
R04-67	BLANCA NIEVES	CARBONATO DE CALCIO BLANCO	344.887	6.633.739
R04-68	LOS MOLLES	AZUFRE	369.066	6.606.492
R04-69	QUEBRADA PIDEN	CALIZA	287.312	6.589.964
R04-71	CERRO DE PUNITAQUI	CIMITA-PIROFILITA	286.184	6.586.097
R04-72	LAS PRINCESAS	CAOLÍN	313.557	6.584.252
R04-74	S/N	CAOLÍN	309.002	6.581.520
R04-77	ROSA	BARITINA	302.516	6.569.897
R04-78	B-08	FELDESPATO	302.538	6.567.825
R04-79	VANGUARDIA	CAOLÍN	298.500	6.562.000
R04-80	NORTE VERDE	CIMITA-PIROFILITA	284.850	6.559.950
R04-83	PIEDRA BLANCA	CUARZO	289.462	6.557.067
R04-84	QUILITAPIA	CUARZO	294.010	6.556.242
R04-85	S/N	CUARZO	288.266	6.555.330
R04-86	S/N	CUARZO	287.630	6.554.075
R04-87	S/N	CUARZO	287.897	6.553.671
R04-88	S/N	FELDESPATO	287.897	6.553.671
R04-89	LA CHATA	CUARZO	286.357	6.553.609
R04-90	MERCEDITAS	CUARZO	287.560	6.553.283
R04-91	MERCEDITAS	FELDESPATO	287.560	6.553.283
R04-92	FARELLONES	ALUNITA	310.500	6.553.045
R04-93	MERCEDITAS 1	CUARZO	286.786	6.552.976
R04-94	MERCEDITAS 1	FELDESPATO	286.786	6.552.976
R04-95	MERCEDITAS 2	CUARZO	286.718	6.552.850
R04-96	MERCEDITAS 2	FELDESPATO	286.718	6.552.850
R04-97	S/N	FELDESPATO	286.696	6.552.815
R04-98	CANTERA COMBA	COMBARBALITA	311.888	6.551.916
R04-99	RIO PAMA	CIMITA-PIROFILITA	304.574	6.551.914
R04-100	MERCEDITAS 3	FELDESPATO	286.550	6.551.800
R04-101	CERRO COLORADO	CAOLÍN	314.880	6.551.013
R04-102	CERRO COLORADO	COMBARBALITA	313.834	6.550.867
R04-103	CASABLANCA	COMBARBALITA	306.050	6.548.500
R04-104	ANTENA	COMBARBALITA	311.800	6.548.500
R04-105	LOS SANJONES (Los Bolones 1)	COMBARBALITA	308.830	6.547.948
R04-106	LOS PERALES (Los Bolones 4)	COMBARBALITA	310.825	6.547.850
R04-107	LOS BOLONES 3	COMBARBALITA	309.600	6.547.500
R04-108	COMBARBALA	ALUNITA	309.919	6.546.988
R04-109	LOS BOLONES 2	COMBARBALITA	310.000	6.546.500

Anexo E5: Lista de yacimientos no-metálicos.