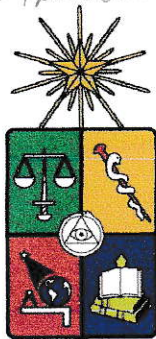


UCH-FC  
Q. Ambiental  
A 663  
C-1

METALES PESADOS - RIO ELQUI  
- - CACHAPOAL  
- DETERMINACION  
CONTAMINACION DE LA AGUA - CHILE - RIO CACHAPOAL



## DETERMINACIÓN DE METALES PESADOS EN LOS SEDIMENTOS DE LOS RÍOS ELQUI Y CACHAPOAL

Seminario de Título

entregado a la

Facultad de Ciencias de la Universidad de Chile

en cumplimiento parcial de los requisitos

para optar al título de

**QUIMICO AMBIENTAL**



**MARÍA CONSUELO ARAYA CURUTCHET**

Director de Seminario de Título: Dr. Manuel Andrés Leiva Guzmán

Profesor Patrocinante: Dr. Jaime Pizarro

Noviembre, 2006

FACULTAD DE CIENCIAS  
UNIVERSIDAD DE CHILE

Informe de Aprobación

Seminario de Título

Se informa a la Escuela de Pregrado de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Chile que el Seminario de Título presentado por la alumna

María Consuelo Araya Curutchet

Ha sido aprobado por la Comisión de Evaluación del Seminario de Título como requisito para optar al título de Química Ambiental.

COMISIÓN

Director de Seminario: Dr. Manuel Leiva Guzmán

Profesor Ptrocicante: Dr. Jaime Pizarro

Dra. María Angélica Rubio

Dr. Juan Förster.



The image shows three handwritten signatures in blue ink. To the right of the signatures is a circular stamp with the text "FACULTAD DE CIENCIAS", "BIBLIOTECA CENTRAL", and "U. DE CHILE" around the perimeter.



**Nombre:** María Consuelo Araya Curutchet.

**Rut:** 15.376.302-K

**Nacionalidad:** Chilena

**Estado civil:** Casada

PARTICIPACION EN ACTIVIDADES ACADEMICAS:

Actividad	Institución	Años
Ayudante de Investigación	U. de Chile, Fac. de Ciencias	2003-2005
Ayudante de Lab. Química Analítica	U. De Chile, Fac. de Ciencias	2005
Ayudante de elaboración de curso	U. De Chile, Fac. de Ciencias	2006
Contaminación de aguas (laboratorio)		

PARTICIPACIÓN EN CONGRESOS NACIONALES:

1. II Simposio Binacional de Polimeros Argentio-Chileno Archipol II 2003  
“Poli-(4-vinilpiridina) N-Alquil Cuaternizada. Estudios Volumétricos”  
Hernan E. Ríos, María Consuelo Araya, Martín Contreras y Marcela Urzúa.
2. “Surfactants in Solution Simposium. Fortaleza Brasil 2004”  
Surface Properties of Poly(Maleic Acid-Alt-Styrene) Mono Sodium salts  
containing Bulky Side groups.  
Marcela Urzúa, Ana María Alvarado, Consuelo Araya, and H.E.Rios.
3. II Coloquio de Macromoleculas, Tomé Chile 2004  
Estudios Volumétricos en soluciones de Polielectrólitos Catiónicos  
Consuelo Araya, Ana María Alvarado, Hernán Ríos, Marcela Urzúa, Martín  
Contreras.

## Dedicatoria

*A mis padres Marta y  
Paulo  
Y al sentido de mi  
vida Jesu*







## Agradecimiento

A Dios, a mis padres Marta y Paulo por todo lo que han hecho por mí, ustedes saben mejor que nadie que soy quien soy gracias a ustedes y que ésta etapa de mi vida concluye por su esfuerzo más que el mío. Les agradezco por lo que me han dado y siguen entregando, educación y el ser siempre una mejor persona, valores, su gran apoyo en éste trabajo, dándome palabras de aliento aunque a veces eran exigencias y retos.

A mis hermanos Paulo, Magdalena, Felipe y Cristián, por ayudarme a salir adelante, les agradezco por todo, las risas, los buenos momentos y las peleas, porque aunque sea difícil creerlo gracias a ellas crecemos y nos damos cuenta de nuestros errores. La verdad es que sin su ayuda y apoyo esta etapa no estaría concluyendo.

A Víctor por ayudarme a estudiar los ramos más difíciles de la carrera y siempre estuviste dispuesto a escucharme y ayudarme cuando lo necesite.

A Anita que has sido mi amiga incondicional durante toda esta etapa de mi vida, te agradezco por ser como eres y darme la oportunidad de conocerte, te agradezco simplemente por brindarme la más sincera amistad que he recibido en mi vida.

A mis grandes amigas Paula, Anita, Tahi, Gisela, Claudia, Diego, Marcelo, Carola, Javier, Carla y Víctor por acompañarme durante estos años, por la paciencia y los buenos momentos que vivimos, por las buenas conversaciones, las tallas. Ustedes de alguna u otra manera ayudaron a que éste trabajo cobrara vida.

A Rocío Castro, Ingrid, Ariela por recibirme con cariño acá en CENMA, por brindarme apoyo, computador, ayuda, paciencia, escuchar los mil alegatos diarios por ésta tesis. Por los consejos y los buenos ratos vividos.

A Isel Cortés por acogerme y ayudarme en éste trabajo, por tu amistad y sinceridad que me has entregado durante éste tiempo, por tus consejos y paciencia.

A Marcela Urzúa quien no sólo me entrego sus conocimientos académicos sino que también me entrego su amistad y sus consejos.

Mis más sinceros agradecimientos a Dr. Manuel Leiva y Dr. Jaime Pizarro por su guía y estímulo durante esta etapa de formación científica. Especialmente a Dr. Manuel por su paciencia y amistad.

A los profesores correctores de ésta tesis por su aporte, para llevar a buen término ésta tesis. A la profesora Sylvia Copaja por su paciencia y apoyo.

A todos los que me ayudaron en éste trabajo de una u otra forma y olvide ponerlos, les agradezco, es muy difícil recordarlos a todos y escribir lo que uno siente en una página.

## INDICE

RESUMEN.....	X
SUMMARY.....	X
<b>1.- INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
<b>1.1.- ASPECTOS GENERALES.....</b>	<b>1</b>
1.2.- MARCO TEÓRICO.....	8
1.2.1. SEDIMENTOS.....	8
1.2.2. METALES PESADOS.....	10
<b>2. OBJETIVOS.....</b>	<b>16</b>
OBJETIVO GENERAL.....	16
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	16
<b>3. MATERIALES Y MÉTODOS.....</b>	<b>17</b>
3.1. MUESTREO.....	17
3.2. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	18
3.2.1 MINERALOGÍA DE LA IV REGIÓN.....	18
3.2.2 .DESCRIPCIÓN DEL RÍO ELQUI.....	18
3.2.3. MUESTREO DEL RÍO ELQUI.....	20
3.2.4. DESCRIPCIÓN DE PUNTOS DE MUESTREO PARA RÍO ELQUI.....	21
3.2.5. MINERALOGÍA DE LA VI REGIÓN.....	24
3.2.6. DESCRIPCIÓN DEL RÍO CACHAPOAL.....	24
3.2.7. MUESTREO DEL RÍO CACHAPOAL.....	26
3.2.8. DESCRIPCIÓN DE PUNTOS DE MUESTREO RÍO CACHAPOAL.....	27
<b>3.3.- ANÁLISIS DE SEDIMENTOS.....</b>	<b>30</b>
3.3.1. DETERMINACIÓN DE TEXTURA DE SEDIMENTOS POR MÉTODO DE BOUYOUCOS.....	30
3.3.2. DETERMINACIÓN DE MATERIA ORGÁNICA.....	32
3.3.3. DETERMINACIÓN DE CO <sup>-2</sup> <sub>3</sub> POR TITULACIÓN.....	34
3.3.4. EXTRACCIÓN SELECTIVA.....	34
<b>4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>39</b>
4.1. TEXTURA DE LOS SEDIMENTOS (GRANULOMETRÍA).....	39
4.2. CONTENIDO DE MATERIA ORGÁNICA.....	41
4.3. DETERMINACIÓN DE CARBONATO.....	44
4.4. DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS DE LAS AGUAS SUPERFICIALES.....	47
4.5. METALES PESADOS, EXTRACCIÓN SECUENCIAL.....	48
ANEXOS.....	75
ANEXO 1.....	75
ANEXO 2.....	78
ANEXO 3.....	81
ANEXO 4.....	82



## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura N°1:</b> Posibles reacciones química de metales trazas con varios componentes acuáticos.....	5
<b>Figura N°2:</b> Mecanismos de asociación de metales trazas en varias fase de sedimentos en Posibles ambientes oxidantes.....	7
<b>Figura N°3:</b> Mapa de estaciones de muestreo Río Elqui, la flechas rojas indican los puntos que se analizaron en éste trabajo.....	20
<b>Figura N°4:</b> Punto 1 de muestreo del Río Elqui, Río Claro.....	22
<b>Figura N°5:</b> Punto 2 del muestreo del Río Elqui, Río Turbio.....	22
<b>Figura N°6:</b> Punto 3 del muestreo del Río Elqui, Antes del embalse.....	23
<b>Figura N°7:</b> Punto 4 del muestreo del Río Elqui, Puente Altovasol.....	23
<b>Figura N°8:</b> Mapa de estaciones de muestreo Río Cachapoal, donde las flechas rojas indican los lugares de muestreo analizados en éste trabajo.....	25
<b>Figura N°9:</b> Punto 1 de muestro del Río Cachapoal, Río Pangal Bocotoma.....	28
<b>Figura N°10:</b> Punto 2 de muestreo del Río Cachapoal, después de la confluencia Río Claro.....	28
<b>Figura N°11:</b> Punto 3 de muestreo del Río Cachapoal, Puente Cónico.....	29
<b>Figura N°12:</b> Punto 4 de muestreo del Río Cachapoal, Puente Peumo.....	29
<b>Figura N°12:</b> Triángulo de Feret (Gráfica descrita en la Leyenda del Mapa Mundial de Sedimentos FAO/ UNESCO/ISRIC, 1988).....	32
<b>Figura N°13:</b> Esquema de procedimiento experimental de extracción de metales.....	38
<b>Figura N°14:</b> Distribución de materia orgánica en las estaciones de muestreo para ambos ríos.....	42
<b>Figura N°15:</b> Distribución de carbonato en las estaciones de muestreo para ambos ríos.....	46





## INDICE DE TABLAS

<b>Tabla N°1:</b> Estaciones de muestreo georeferenciadas con GPS y las influencias antrópicas en cada una de las estaciones del río Elqui.....	21
<b>Tabla N°2:</b> Estaciones de muestreo georeferenciadas con GPS y las influencias antrópicas en cada una de las estaciones del río Cachapoal.....	27
<b>Tabla N°3:</b> Resumen de las potencias aplicadas para la digestión en horno de microondas.....	36
<b>Tabla N°4:</b> Textura de sedimentos de los Ríos Cachapoal y Elqui.....	40
<b>Tabla N°5:</b> Porcentajes de materia orgánica (%MO) y de carbono (%C) en Río Cachapoal y Elqui.....	41
<b>Tabla N°6:</b> Contenido de carbonato en ambos Ríos (mg/Kg de masa seca) .....	45
<b>Tabla N°7:</b> Variables fisicoquímicas en las aguas el Río Cachapoal .....	47
<b>Tabla N°8:</b> Variables fisicoquímicas en las aguas el Río Elqui.....	47
<b>Tabla N°9:</b> Concentración de metales en para cada fracción en los distintos puntos de muestreo en $\mu\text{g/g}$ masa seca en Río Cachapoal.....	49
<b>Tabla N°10:</b> Concentración de metales en la fracciones analizadas en los distintos puntos de muestreo para Río Elqui ( $\mu\text{g/g}$ masa seca) .....	50
<b>Tabla N°11:</b> Porcentaje de metales en las fracciones analizadas en los distintos puntos de muestreo para Río Cachapoal.....	51
<b>Tabla N°12:</b> Porcentajes de metales en las fracciones analizadas en los distintos puntos de muestreo para el Río Elqui.....	52
<b>Tabla N° 13:</b> Factores incidentes en la calidad de los sedimentos del Río Elqui ...	54 y 55
<b>Tabla N°14:</b> Factores incidentes en la calidad de los sedimentos en la cuenca del Río Cachapoal.....	56 y 57
<b>Tabla N°15:</b> Desviaciones estándares (DS) y coeficientes de variación (%CV) para Fe y Mn en cada fracción.....	78
<b>Tabla N° 16:</b> Desviaciones estándares (DS) y coeficientes de variación (%CV) para Al y Cu en cada fracción.....	78
<b>Tabla N° 17:</b> Desviaciones estándares (DS) y coeficientes de variación (%CV) para Zn y Cr en cada fracción. ....	79
<b>Tabla N°18:</b> Desviaciones estándares (DS) y coeficientes de variación (%CV) para V y As en cada fracción.....	79
<b>Tabla 19:</b> Desviaciones estándares (DS) y coeficientes de variación (%CV) para Pb y Cd en cada fracción.....	79
<b>Tabla N°20:</b> Recuperabilidad del Material de Referencia (CMR).....	80
<b>Tabla N°21:</b> Metales disueltos en aguas superficiales en Río Cachapoal ( $\mu\text{g/g}$ ).....	81
<b>Tabla N°22:</b> Metales disueltos en aguas superficiales en Río Elqui ( $\mu\text{g/g}$ ).....	81
<b>Tabla N°23:</b> Minerales presentes en cada río.....	82
<b>Tabla N°24:</b> Proporciones de metales pesados en algunos pesticidas recomendados en agricultura.....	83
<b>Tabla N°25:</b> Concentración de algunos metales en aguas residuales de industrias no metálicas .....	83
<b>Tabla N°26:</b> Concentración de metales pesados en desechos de animales en $\mu\text{g/g}$ .....	84
<b>Tabla N°27:</b> Concentración de arsénico en matrices ambientales .....	84



**Tabla N°28:** Concentración de metales pesados en rocas graníticas ug/g ..... 84





## RESUMEN

Las cuencas del Elqui y Cachapoal reciben gran cantidad de vertidos contaminantes de forma directa e indirecta de los ríos Elqui y Cachapoal y de sus afluentes. Estos vertidos son desechos urbanos, agrícolas, ganaderos y los procedentes de las industrias que en gran número están instaladas en sus cuencas, como las mineras, agrícola, alimenticias y por otra parte se encuentran los vertidos de los asentamientos urbanos que se ubican en sectores aledaños.

Los vertidos pueden presentar una variada composición química, dentro de la cual destacan los metales pesados. Los metales, que llegan al medio de ríos en estos vertidos, pueden reaccionar con los componentes del medio y quedan en fase acuosa o depositarse en los sedimentos si hay condiciones favorables para ello. Asimismo pueden ingresar en la cadena trófica afectando a los seres vivos. De allí que resulta de interés caracterizar la concentración de metales en las diferentes matrices ambientales. Además las aguas de estas cuencas son utilizadas para el consumo humano y agrícola por lo que es importante vigilar su calidad.

El presente trabajo tiene por objetivo realizar la caracterización del contenido de metales pesados en los sedimentos de los ríos Elqui y Cachapoal con el objeto de entregar información sobre la distribución de metales pesados (As, Cd, Cu, Cr, Ni, Zn, Pb, Fe y Al) en los sedimento de dichos ríos.

El estudio se realizó mediante un análisis de especiación sucesiva a partir del método de extracción secuencial de Tessier. Este método permite caracterizar la concentración de

metales en diferentes fracciones, tales como: la intercambiable, unidos a carbonatos, unidos a óxidos de hierro y manganeso, unidos a materia orgánica y los residuales.

Los contenidos metálicos en los sedimentos se analizaron mediante Espectrometría emisión atómica con plasma de argón con detección óptica (ICP).

Los resultados, en general, indicaron para el Río Cachapoal que los metales As, Fe, Mn, Al, Ni, Pb, Zn, V, Cd, Cr, Cu presentan una mayor proporción de su contenido en la fase residual, exceptuando el Cromo que en algunas estaciones presenta un porcentaje elevado en la fracción ligada a óxidos de Fe-Mn. Por su parte en el caso del Río Elqui el mayor contenido de los metales: As, Fe, Cu, Mn, Ni, Pb, Al, Zn, V, Cr, Cd, se encuentra en la fracción residual, a excepción del cobre.

Estos resultados nos permiten indicar que en general los sedimentos de ambos ríos no se encuentran contaminados, ya que en las fracciones indicadoras de contaminación (intercambiable y unido a carbonato) presentan bajos contenidos de los metales estudiados.

## SUMMARY

The Elqui and Cachapoal basins receive a large amount of polluting sewage directly and indirectly from the rivers Elqui and Cachapoal and their tributaries. This sewage is made of urban, farming, and animal wastes as well as those from the industries that exist in large numbers in their basins, such as mining, agricultural and food, in addition to the sewage from human settlements in the surrounding areas.

The sewage can have a varied chemical composition, with particular mention of heavy metals. These metals, when incorporated into the tributaries, can interact so that they may appear in the aqueous medium or may be deposited in the sediment, and they can also go into the trophic chain, thereby affecting living beings. That, together with the fact that the water from these basins is used for human and farming consumption, is why there is interest in determining metal concentrations in these systems.

The objective of this work is to determine the heavy metal content in the sediments of the rivers Elqui and Cachapoal, as well as to provide information on the distribution of heavy metals (As, Mn, V, Cd, Cu, Cr, Ni, Zn, Pb, Fe and Al) in those sediments.

The study was made by ionic speciation using Tessier's sequential extraction. This method makes it possible to determine metal concentration in different fractions such as exchangeable, carbonates, iron and manganese oxides, organic matter and residuals.

Metal content in water and sediments was analyzed by inductively coupled plasma spectroscopy (ICP).

In general, the results showed that for the Cachapoal river the content of all metals was higher in the residual phase, but at some stations Cr had high percentages in the fraction

bound to Fe-Mn oxides. On the other hand, in the case of the Elqui river the highest content of all the metals except Cu was found in the residual fraction.

These results allow us to state that in general the sediments of both rivers are not polluted.

## 1.- INTRODUCCIÓN

### 1.1.- Aspectos generales.

El recurso agua tiene importancia estratégica para el crecimiento económico de las regiones. En Chile, este recurso se distribuye en forma distinta según la región; generando problemas de escasez en la zona Norte, lo que provoca una demanda social de regulación y calidad. Mientras, en otras regiones más al Sur, donde el abastecimiento es mayor, se producen conflictos más bien por su calidad. Como consecuencia de una alta utilización del recurso se tiene un problema de calidad de las aguas, ya que se encuentran deterioradas, fundamentalmente por el crecimiento demográfico e industrial, el cual se viene presentando desde hace varias décadas.

En Chile, las demandas sobre el recurso agua han ido aumentando a la vez que la calidad del agua ha ido decreciendo. Las principales fuentes de contaminación en nuestras cuencas hidrográficas están dadas por: actividades industriales, mineras, agroquímicas (Estadística del Medio Ambiente, 2002). El aumento de la contaminación de las aguas ha causado un impacto negativo sobre los ecosistemas, afectando los niveles de producción, como por ejemplo las actividades turísticas, o silvoagropecuarias, e incrementando los costos sociales de mantención de higiene y salud de la población.

La contaminación del agua y sedimentos por sustancias químicas como pesticidas, metales, pueden tener graves consecuencias. Esto último debido a que los ríos son muy vulnerables a la contaminación por productos tóxicos que generan la minería, las fundiciones y la industria, tales como metales pesados, ácidos, disolventes y policloruros



de vinilo (PVCs); y sustancias de tipo orgánicas provenientes de pesticidas utilizados en la agricultura.

Los metales son elementos naturales que se pueden encontrar en ambientes donde no hayan existido impactos en las aguas, dependiendo del tipo de sedimento o rocas presentes en toda la cuenca. En pequeñas cantidades muchos metales son nutrientes necesarios para la vida acuática y humana, pero en concentraciones superiores a las necesarias pueden llegar a ser tóxicos, y éstas concentraciones son causadas por excesivas descargas y emisiones de metales de fuentes antropogénicas.

Las actividades antropogénicas generalmente modifican los ciclos geoquímicos de los metales pesados. Su acumulación en la pedósfera y litosfera son motivo de preocupación ya que éstos no se degradan, siendo por esto importante el estudio de metales pesados en las diferentes matrices ambientales. De la concentración total del metal sólo ciertas formas químicas son tóxicas para los organismos, estas incluyen iones libres y metales liposolubles (Morrison y col, 1983; Chen y col 1997). Los metales pesados en aguas y sedimentos tienen una elevada toxicidad, alta persistencia y acumulación por los organismos vivos. El análisis de los sedimentos nos permite una mejor evaluación de la contaminación por metales pesados pues éstos pueden actuar como reservorios de posibles fuentes de contaminación. Lo anterior debido a que los metales pesados no se quedan permanentemente retenidos en los sedimentos y pueden ser liberados a la columna de agua por cambios de las condiciones ambientales tales como pH, potencial redox, oxígeno disuelto o la presencia de quelatos orgánicos (Förstner, 1987; Sigg y col 1987; Carignan y Tessier, 1988; Vainithayanathan y col, 1993; Singh y col 1999). Los sedimentos naturales son mezclas de varias fases, normalmente de residuos de la erosión

de arcillas y otros aluminosilicatos de hierro y oxihidróxidos de aluminio y sulfuros, también por sustancias producidas por la actividad biológica, ya sea orgánica (microorganismos, detritus y sustancias húmicas) o inorgánicas (carbonatos, silica y fosfatos) (Tessier, 1992). En consecuencia el estudio de la fracción biodisponible o móvil de los metales ligados a sedimentos es más ambientalmente significativa que la concentración total del metal en las corriente fluviales.

Una de las más utilizadas metodologías de extracción química secuencial fue desarrollada por Tessier (Tessier y col, 1979). Los métodos de extracción selectiva son los que aportan una información más significativa en la determinación de las principales fase acumulativas de metales pesados en sedimentos. A través de una serie de extracciones sucesivas, se consigue remover los constituyentes más importantes de los sedimentos: carbonatos, óxidos de hierro y manganeso, materia orgánica, y metales asociados a minerales de sedimentos (Legrett, 1993; López-Sánchez, 1993; Usero, 1997).

En la mayoría de los esquemas de extracción se pretende separar los metales en cinco fracciones que son las siguientes:

1. Metales intercambiables. Estos pueden ser fácilmente liberados por los sistemas acuáticos por cambios ambientales.
2. Metales enlazados a carbonatos. Los metales unidos a ésta fase se pueden liberar por descenso del pH, al disolverse los metales en forma de carbonatos.
3. Enlazados a óxidos de hierro y manganeso. Los metales unidos a ésta fracción pasarán al agua en condiciones reductoras. Estos óxidos son sustancias de alto

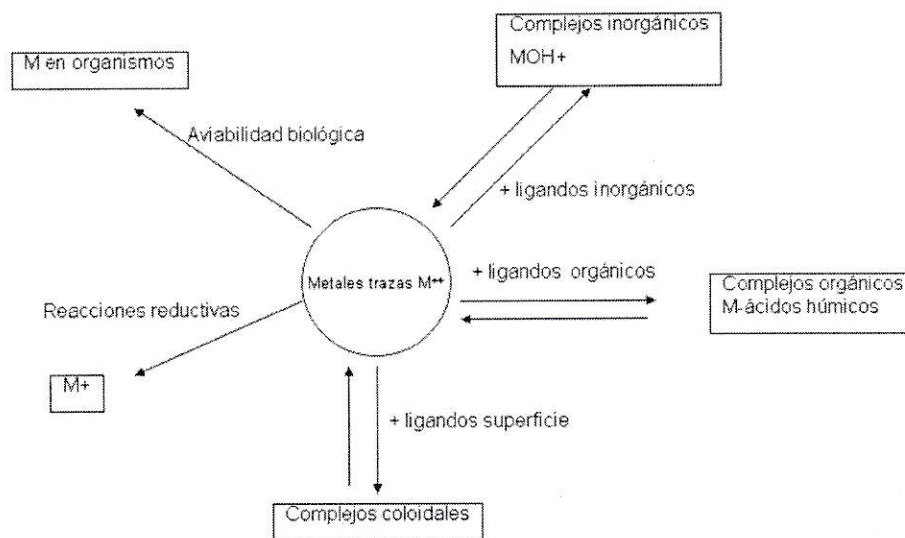
poder de adsorción y son termodinámicamente inestables en condiciones anóxicas (valores bajos de potenciales redox).

4. Enlazados a materia orgánica. Estos metales representan la fracción que se liberarían al pasar a condiciones oxidantes.
5. Metal ligado a la fase residual. Son los metales ligados a los minerales, formando parte de la estructura cristalina. La liberación de los metales en ésta fase, en un período razonable de tiempo es ciertamente improbable.

La especiación depende de la afinidad de las características físicas y químicas de los metales con los componentes del sedimento. Los metales trazas móviles, existen mayoritariamente como enlazados a compuestos orgánicos, intercambiables y solubles en agua. Su migración depende de la forma o compuestos en que se encuentren y de las condiciones del sedimento (pH, materia orgánica, potencial redox, contenidos de sales y carbonatos, y arcillas).

Las aguas contienen disueltos numerosos solutos como gases, iones de metales alcalinos, metales pesados y materia orgánica. Además contienen una gran cantidad de materiales suspendidos como coloides y material particulado. Al igual que en condiciones controladas, los cambios en los parámetros fisicoquímicos como temperatura, pH, potencial redox, etc, producen cambios en la composición de los cuerpos de agua naturales debido a modificaciones en las diferentes solubilidades de los materiales disueltos en ellas. Por ejemplo, un cambio de temperatura podría provocar una modificación de la solubilidad de iones y gases; un cambio en el potencial redox o en el pH, modificación en la solubilidad de metales pesados.

Los procesos fisicoquímicos (cambios de pH, temperatura, potencial redox, oxígeno disuelto), entre los metales disueltos en niveles trazas y cada uno de éstos componentes del agua o del sedimento por los cuales los metales pueden disolverse en el sistema acuático, como se observan en la figura 1, condicionan la distribución de los metales trazas, entre las distintas especies químicas y sus formas lo que finalmente determina su reactividad geoquímica y su actividad biológica.



**Figura N°1: Posibles reacciones química de metales trazas con varios componentes acuáticos.**

Muchas reacciones químicas, asociaciones con coloides y partículas en suspensión o en los sedimentos son la clave de los ciclos de los metales trazas en aguas naturales. De hecho, se ha encontrado que predominantemente los metales trazas son llevados por



partículas en suspensión y sólo una pequeña fracción es transportada en su forma soluble (Horowitz, 1991; Moore and Ramamoorthy, 1984).

Los mecanismos más importantes de asociación de metales trazas en fases específicas de los sedimentos naturales pueden ser consideradas en ambientes oxidantes opuestos a ambientes anóxicos donde la precipitación de sulfuros de metales trazas puede dominar (figura 2) son : (1) coprecipitación con hidruros de hierro y óxidos de manganeso y carbonatos, (2) adsorción e intercambio catiónico en las arcillas, hidruros de hierro y óxidos de manganeso y sustancias húmicas, (3) enlaces organometálicos con sustancias húmicas y (4) incorporación en la estructura cristalina de las arcillas y otros aluminosilicatos (Horowitz, 1991; Tessier, 1992)





**Figura N°2:** Mecanismos de asociación de metales trazas en varias fase de sedimentos en posibles ambientes oxidantes.

## **1.2.- Marco Teórico**

### **1.2.1. Sedimentos**

Los sedimentos son materiales que se acumulan en el fondo de cuencas hidrográficas, los depósitos pueden ser de origen detrítico, químico u orgánico, resultantes de la erosión de rocas, precipitaciones de elementos disueltos en el agua o acumulación de materia orgánica y que son depositados cuando disminuye la energía del fluido que los transporta (agua o viento). La composición del sedimento depende de los materiales que le dieron origen por procesos de meteorización u otros directamente influenciados por el hombre.

Los sedimentos se pueden encontrar en dos formas, sedimentos en suspensión, las cuales están constituidos por partículas más finas mantenidas en suspensión por los remolinos de la corriente y sólo se asientan cuando la velocidad de la corriente disminuye; y sedimentos depositados, que en general están constituidos por partículas de mayor tamaño que se redepositan por la fuerza de gravedad.

El tamaño del material particulado de los sedimentos es un parámetro importante ya que los metales pesados están asociados a las partículas pequeñas de éstos, las arcillas, que poseen carga negativa en la superficie, y debido a su gran área superficial con relación a su volumen son altamente reactivas y pueden intercambiar cationes (Golterman, 1983; Mc Bride, 1994; Doménech, 1997); y a partículas mayores como las arenas que tiene un diámetro que varía entre 2 y 0.05 mm. El área superficial de los sedimentos es dependiente de los parámetros granulométricos y su composición mineral (Juracic y col 1982; Singh y col 1999). La textura se refiere al tamaño de las partículas que tiene un sedimento. Hay 5 texturas básicas:

*a. Textura arcillosa*

Un sedimento con textura arcillosa es aquel en el que predomina la arcilla. La arcilla son partículas minerales que miden menos de 0,002 milímetro. Toda partícula mineral en el sedimento y que mida menos de 0,002 mm, es arcilla.

*b. Textura arenosa*

El sedimento de textura arenosa tiene sobre todo arena. Arena son partículas minerales de entre 0,02 y 0,2 milímetros.

*c. Textura franco*

En un sedimento con textura franca abunda el limo. Es algo intermedio a los dos anteriores. Ni es arcilloso, ni es arenoso. Limo son partículas minerales de entre 0,002 milímetro y 0,02 mm.

*d. Textura franco-arcillosa*

Entre arcilloso y franco. Tiene bastante arcilla pero también lleva mucho limo. De arena, poca.

*e. Textura franco-arenosa*

Entre franco y arenoso.

Según la proporción que haya de un tipo de partículas u otras tendremos las diferentes texturas.

La composición química de los sedimentos varía ampliamente y está relacionado con el tamaño del grano (textura) y de la madurez. La naturaleza química primaria de un sedimento está determinada por la integridad de los procesos de meteorización que han

dado origen al sedimento y por la minuciosidad del proceso de fraccionamiento mecánico (lavado) por efecto del transporte y la deposición. La composición original puede transformarse de varias formas después de la deposición del sedimento por procesos de diagénesis, litificación y metamorfismo.

En general la composición química de un sedimento resulta de un componente orgánico y otro inorgánico. El contenido orgánico consiste principalmente en microorganismos, residuos de animales y vegetales, además de detritus del material descompuesto (Golterman, 1983), mientras el contenido inorgánico, incluye productos generados en la erosión de las rocas, materiales cósmicos, materiales sueltos y consolidados, además de compuestos generados químicamente por precipitación de sales disueltas producto de la evaporación y reacciones químicas, tales como sulfatos, carbonatos y sílice, generados fuera o dentro del cuerpo de agua por compuestos solubles o por las acciones indirectas de los organismos acuáticos (Hakanson, 1983).

### **1.2.2. Metales pesados**

Se consideran metales pesados aquellos metales que tienen una densidad mayor que 5-6 g/cm<sup>3</sup> (Wild, 1993). Los metales pesados contaminantes más comunes son el cadmio, cromo, cobre, hierro, mercurio, manganeso, níquel, plomo, zinc y molibdeno. El As y Se se incluyen, por simplicidad, dentro de los metales pesados aún cuando son metaloides o no metales (Cornell, 1997; Brady y Weill, 2002).

Existen tres orígenes de los metales pesados, litogénicos, pedogénicos y antropogénicos. Los litogénicos son aquellos que provienen directamente de la litosfera (material parental). Los metales antropogénicos son depositados de manera directa e indirecta



como resultado de actividades humanas tales como: (1) deposición atmosférica (2) aplicación de pesticidas y fertilizantes (3) utilización de basurales (4) deposición de dragado de sedimentos (5) irrigación de las aguas de ríos. La especiación y distribución de los metales antropogénicos están relacionadas con las formas químicas y el tiempo de impacto. Estos metales antropogénicos pueden formar diferentes especies en los sedimentos dependiendo de las reacciones superficiales y externas en los sitios con distintas energías. Los metales de origen pedogénico son aquellos que provienen de los orígenes litogénicos y antropogénicos pero su distribución en el horizonte de los sedimentos y las partículas del sedimento son cambiados por la transformación mineral y otros procesos pedogénicos.

Los procesos pedogénicos (hidrolización, oxidación, etc), y los factores antropogénicos pueden controlar el contenido total y movilidad de metales trazas en sedimentos. Los metales pesados pueden ser liberados de los sedimentos a la columna de agua por cambios en las condiciones ambientales, ya descritas anteriormente (Förstner, 1987; Sigg y col 1987; Carignan y Tessier, 1988; Vainithayanathan y col, 1993; Singh y col 1999).

Como los metales pesados no quedan permanentemente retenidos en los sedimentos, sino que por el contrario pueden pasar a la solución y quedar biológicamente disponibles, el estudio de metales pesados en sedimentos nos permite cuantificar y proyectar contaminación que no se detecta en el análisis de las aguas (ya que los metales se pueden encontrar precipitados). Además proporciona información sobre las zonas en las que eventualmente pueden solubilizarse en sistema acuático (Förstner & Salomons,



1980; Baudo y Muntau, 1990; Belckin y Sparck, 1993; Förstner y col, 1993; Chen y col, 1996; Moalla y col, 1996).

La especiación de metales pesados en sedimentos y sedimentos también está relacionado con la reactividad biogeoquímica, que está controlada por el agua local, microflora y las propiedades de los poros del sedimento.

A continuación se describen características generales de algunos de los metales en estudio en éste trabajo:

**Cadmio:**

La movilidad del cadmio en ambientes mineros es escasa y está controlado por CdS, en ambientes no mineralizados. Es relativamente móvil en altos contenidos de aguas dulces comparado con las rocas. Se usa en el electroplateado, por ser resistente a la corrosión. Además se utiliza en soldaduras, en fabricación de baterías alcalinas, en estabilizadores de cloruro polivinilo, en lámparas fluorescentes y en semiconductores, en fertilizantes que contienen fosfatos y superfosfatos se ha reportado contenidos entre 9 y 36 ppm (Adaptado de Ruíz y col 1991; Krauskopft, 1979).

**Cromo:**

El cromo tiene baja movilidad. Sales como dicromatos, cromatos y sulfatos se usan en curtiembres, elaboración de tintas, decoración de porcelanas, otros. El acetato crómico se usa como mordiente, "endurecedor" de emulsiones fotográficas y para mejorar su estabilidad a la luz. Otros compuestos se usan en cromado (Adaptado de Ruíz y col 1991; Krauskopft, 1979).

como resultado de actividades humanas tales como: (1) deposición atmosférica (2) aplicación de pesticidas y fertilizantes (3) utilización de basurales (4) deposición de dragado de sedimentos (5) irrigación de las aguas de ríos. La especiación y distribución de los metales antropogénicos están relacionadas con las formas químicas y el tiempo de impacto. Estos metales antropogénicos pueden formar diferentes especies en los sedimentos dependiendo de las reacciones superficiales y externas en los sitios con distintas energías. Los metales de origen pedogénico son aquellos que provienen de los orígenes litogénicos y antropogénicos pero su distribución en el horizonte de los sedimentos y las partículas del sedimento son cambiados por la transformación mineral y otros procesos pedogénicos.

Los procesos pedogénicos (hidrolización, oxidación, etc), y los factores antropogénicos pueden controlar el contenido total y movilidad de metales trazas en sedimentos. Los metales pesados pueden ser liberados de los sedimentos a la columna de agua por cambios en las condiciones ambientales, ya descritas anteriormente (Förstner, 1987; Sigg y col 1987; Carignan y Tessier, 1988; Vainithayanathan y col, 1993; Singh y col 1999).

Como los metales pesados no quedan permanentemente retenidos en los sedimentos, sino que por el contrario pueden pasar a la solución y quedar biológicamente disponibles, el estudio de metales pesados en sedimentos nos permite cuantificar y proyectar contaminación que no se detecta en el análisis de las aguas (ya que los metales se pueden encontrar precipitados). Además proporciona información sobre las zonas en las que eventualmente pueden solubilizarse en sistema acuático (Förstner & Salomons,

1980; Baudo y Muntau, 1990; Belckin y Sparck, 1993; Förstner y col, 1993; Chen y col, 1996; Moalla y col, 1996).

La especiación de metales pesados en sedimentos y sedimentos también está relacionado con la reactividad biogeoquímica, que está controlada por el agua local, microflora y las propiedades de los poros del sedimento.

A continuación se describen características generales de algunos de los metales en estudio en éste trabajo:

**Cadmio:**

La movilidad del cadmio en ambientes mineros es escasa y está controlado por CdS, en ambientes no mineralizados. Es relativamente móvil en altos contenidos de aguas dulces comparado con las rocas. Se usa en el electroplateado, por ser resistente a la corrosión. Además se utiliza en soldaduras, en fabricación de baterías alcalinas, en estabilizadores de cloruro polivinilo, en lámparas fluorescentes y en semiconductores, en fertilizantes que contienen fosfatos y superfosfatos se ha reportado contenidos entre 9 y 36 ppm (Adaptado de Ruíz y col 1991; Krauskopft, 1979).

**Cromo:**

El cromo tiene baja movilidad. Sales como dicromatos, cromatos y sulfatos se usan en curtiembres, elaboración de tintas, decoración de porcelanas, otros. El acetato crómico se usa como mordiente, "endurecedor" de emulsiones fotográficas y para mejorar su estabilidad a la luz. Otros compuestos se usan en cromado (Adaptado de Ruíz y col 1991; Krauskopft, 1979).

**Hierro:**

El hierro se encuentra soluble cuando está en la forma de  $\text{Fe}^{+2}$ , pero cuando se encuentra como  $\text{Fe}^{+3}$  está precipitado. Este elemento precipita cuando el pH es  $>3$ , dentro de algunas condiciones se presenta con suspensiones coloidales de oxihidróxidos de hierro o en complejos orgánicos, el Fe puede ser muy estable. Sales como sulfato férrico se usan primordialmente en producción de alumbres y como coagulante en purificación de aguas. El cloruro de hierro se usa como agente reductor y en preparaciones farmacéuticas. Otros compuestos se usan en cerámica, semiconductores eléctricos, catalizadores, entre otros. Fuentes antropogénicas producen desechos en minería, fundiciones, combustión de carbón (Adaptado de Ruíz y col 1991; Krauskopft, 1979).

**Cobre:**

La solubilidad del cobre está controlada por absorción en óxidos de Fe y Mn, materia orgánica y precipitación por hidrólisis a  $\text{pH}>5$ . Su movilidad es intermedia, controlada por absorción sobre óxidos de Fe y Mn, materia orgánica y precipitación por hidrólisis a  $\text{pH}>5$ . Es magnífico conductor de la electricidad. Se usa para alambres de circuitos, conductores, terminales, entre otros. Además se utiliza en una variedad de aleaciones: bronces, latones, plata alemana y otros. Varios compuestos de cobre se utilizan como fungicidas, insecticidas, alguicidas, como catalizadores, pigmentos en pinturas para barcos (Adaptado de Ruíz y col 1991; Krauskopft, 1979).

**Manganeso:**

Su movilidad es baja excepto en ambiente reductor-ácido de ciénagas y pantanos donde el Mn puede ser movilizado dependiendo de sus formas. Se usa en la industria de hierro y el acero, en aleaciones como ferromanganeso, manganina. Sus compuestos se utilizan



en manufactura de pilas secas, pinturas, barnices, tintas, colorantes, fuegos artificiales, como fertilizantes, desinfectantes y blanqueadores (Adaptado de Ruíz y col, 1991; Krauskopft, 1979).

### **Níquel:**

Es relativamente inmóvil, limitada su movilidad por co-precipitación con limonita, e hidrólisis donde el  $\text{pH} > 6,5$ . Se usa en aleaciones con varios metales, generalmente resistentes a la corrosión. Se usa en enchapados eléctricos, fabricación de monedas, cintas magnéticas, instrumentos quirúrgicos y dentales, baterías Ni-Cd, en cajas de transmisión, esmaltes de revestimiento y también como catalizador en hidrogenación de grasas y aceites (Adaptado de Ruíz y col, 1991; Krauskopft, 1979).

### **Plomo:**

Su movilidad es relativamente baja, está restringida por tendencia de adsorción en óxidos de Mn y Fe e insolubles en materia orgánica, formación de complejos orgánicos y aniónicos. El reemplazo de alquilos de plomo de gasolina ha disminuido su alto aporte al ambiente por esta vía. Se usa en recubrimientos de depósitos de tubería, cuando se necesita flexibilidad y resistencia a la corrosión. También en soldaduras y como protectores de rayos X, en acumuladores; en pigmentos para pinturas y barnices, en artefactos electrónicos.

### **Zinc**

Su movilidad es alta, está limitada por la tendencia de ser adsorbido por  $\text{MnO}_2$  y por la materia orgánica insoluble. En grandes cantidades puede ser tóxico. Se utiliza frecuentemente a través de sus compuestos cloruro y óxido. El primero como preservativo de madera, en pieles secas, fibras vulcanizadas, manufactura del papel,

desodorantes, desinfectantes y en taxidermia. El óxido se usa como pigmento blanco, en fotocopiado, pinturas, lacas, barnices y como carga en cosméticos y fármacos (Adaptado de Ruíz y col 1991; Krauskopft, 1979).

### **Hipótesis de trabajo**

Los sedimentos de los ríos Elqui y Cachapoal se encuentran influenciadas por la actividad antrópica de la zona y presentan elevadas concentraciones de metales pesados.

## **2. OBJETIVOS**

### **Objetivo General**

Realizar una caracterización del contenido de metales pesados en los sedimentos de los Ríos Elqui y Cachapoal con vistas a aportar información sobre la distribución de metales pesados As, Cd, Cu, Cr, Ni, Zn, Pb, Fe, y Al.

### **Objetivos específicos**

- Determinar propiedades complementarias de los sedimentos como textura, contenido de materia orgánica, y contenido de carbonatos, para así poder interpretar los resultados de extracción de metales.
- Determinar la distribución de Cu, Ni, As, V, Cd, Pb, Fe, Cr, Mn, Zn, y Al en las distintas fracciones de sedimentos obtenidos desde un procedimiento de extracción secuencial de Tessier.
- Establecer una comparación de las concentraciones de los metales Cu, Ni, As, V, Cd, Pb, Fe, Cr, Mn, Zn, y Al analizadas para ambos ríos Cachapoal y Elqui.

### 3. MATERIALES Y MÉTODOS

Para la realización de este trabajo se utilizará sedimentos del río Cachapoal y Elqui previamente colectados, junto con los análisis de parámetros físico-químicos de aguas superficiales medidos in situ.

En cada uno de los puntos de muestreo se midieron las siguientes características físicas y químicas:

- Conductividad eléctrica (HACH Company Meter Model 50150).
- Oxígeno disuelto: (Oxigenómetro YSI Model 95)
- pH: (electrodo combinado, equipo HANNA Instruments ph/EC/TDS Waterproof Family).
- Temperatura: termómetro de vidrio.

#### 3.1.- Muestreo

El muestreo de sedimento, se debe diseñar en base a los objetivos planteados en los programas de muestreo, es decir; diseño orientado hacia los objetivos.

La metodología seguida, fue la siguiente; en el punto donde se tomaban las muestras para calidad de aguas próxima a la rivera contigua se extrajeron muestras de sedimentos por métodos manuales.



### **3.2.- Descripción del área de estudio**

#### **3.2.1 Mineralogía de la IV Región.**

Hay tres tipos de constituyentes minerales en los sedimentos del río Elqui: (1) una fracción de silicatos, con cuarzo, plagioclasa y filosilicatos que incluyen montmorillonita, caolinita y muscovita (2) una fracción oxidada de hierro con presencia de goethita de baja cristalinidad; y (3) sales, con halita, yeso y bloedita  $[\text{Na}_2\text{Mg}(\text{SO}_4)\cdot 4\text{H}_2\text{O}]$ . Los sedimentos están fuertemente enriquecidos en arsénico, cobre y zinc (Oyarzún R., Lillo J., Higuera P., Oyarzún J., Maturana H., 2002)

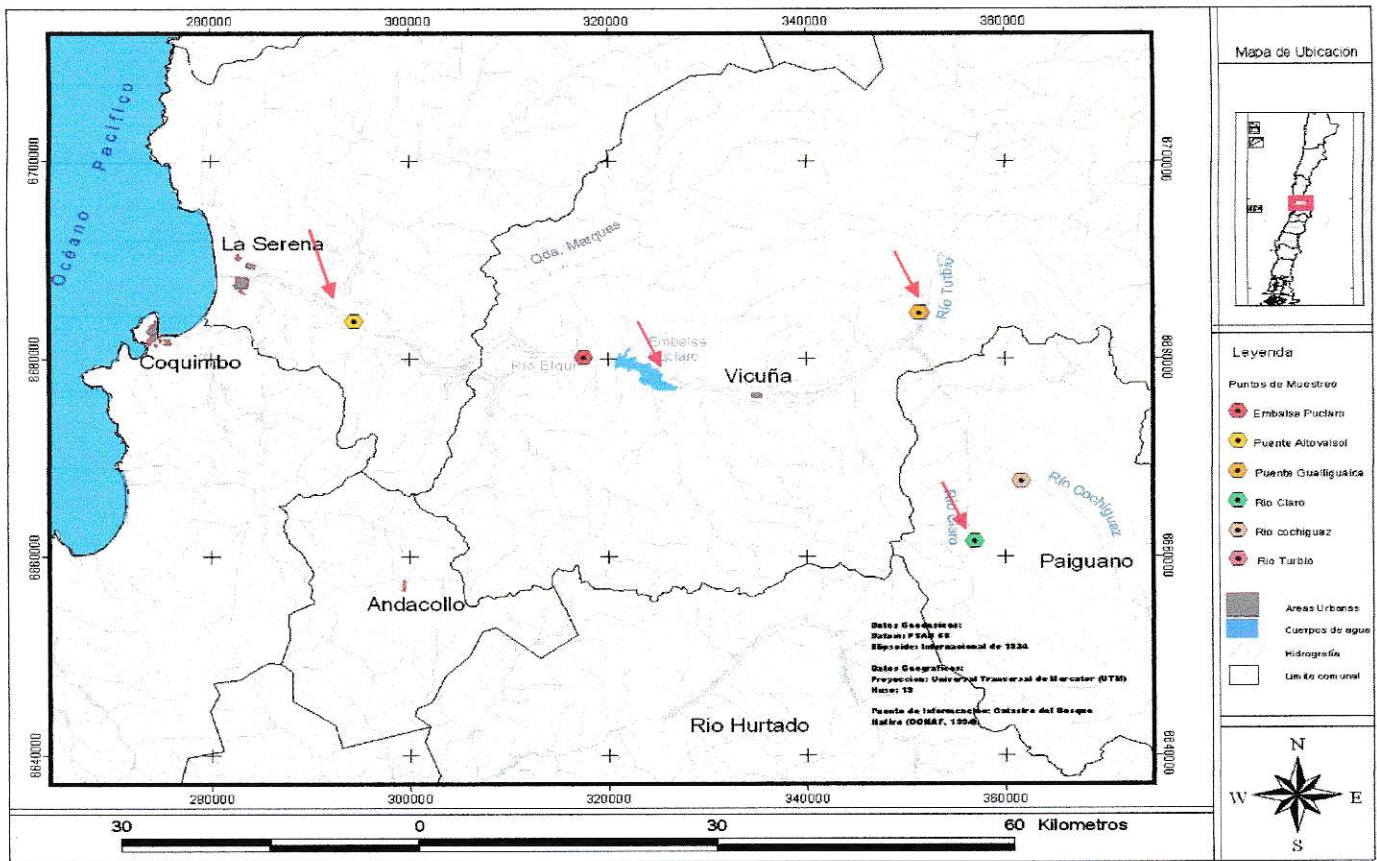
En términos geológicos (Oyarzún, 1998), la cuenca está constituida principalmente por afloramientos de rocas plutónicas y volcánico-sedimentarias de edad mesozoica y cenozoica. Estas rocas son de carácter calcoalcalino intermedio, y su composición es similar a la del promedio de la corteza terrestre. Debido a que albergan numerosos yacimientos sulfurados, asociados a zonas de alteración hidrotermal, los procesos de meteorización y erosión comunican a las aguas y sedimentos altos contenidos de Cu, Zn, Fe, As y  $\text{SO}_4$ , en parte relacionados con la generación natural de drenaje ácido (Jannas y col, 1999; Oyarzún y col, 2003; Oyarzún y col, 2004).

#### **3.2.2.- Descripción del Río Elqui**

La cuenca hidrográfica del río Elqui forma parte de la IV Región de Coquimbo y se ubica aproximadamente entre los paralelos  $29^{\circ}35'$  y  $30^{\circ}20'$  de latitud sur, con una extensión de  $9.826 \text{ km}^2$  de superficie, con una longitud de 75 Km y un caudal medio de  $13 \text{ m}^3/\text{seg}$  (INE,2004). El río Elqui es uno de los ríos más importantes de los valles

transversales que nace en el sector andino y posee un caudal permanente por efecto de las lluvias y deshielos originados en la alta cordillera

El río Elqui nace a 815 m s.n.m, 2 km aguas arriba de Rivadavia, de la unión de los ríos Turbio que viene del oriente y Claro o Derecho que provienen del sur. Desde Rivadavia, a 75 km de La Serena, el río principal se desarrolla casi en dirección E-W y prácticamente no recibe efluentes, salvo varias quebradas de considerable desarrollo, pero normalmente secas y que sólo le aportan agua en caso de lluvia directa en los años muy húmedos. Normalmente, un área cercana a 3.900 km<sup>2</sup>, no participa del comportamiento hidrológico del Elqui. Por la ribera norte las quebradas más importantes son Marquesa y Santa Gracia, que confluyen en su curso medio e inferior, respectivamente. Por el sur, recibe las quebradas San Carlos, Arrayán y Talca, aparte de otras menores. Si bien dichas quebradas no aportan escurrimientos superficiales, entre Algarrobal y La Serena numerosas vertientes descargan sobre la planicie aluvial del río con caudales que van de unos pocos litros por segundo hasta 250 L/s.(Dirección General de aguas, 2004).



**Figura N°3:** Mapa de estaciones de muestreo Río Elqui, las flechas rojas indican los puntos que se analizaron en éste trabajo

### 3.2.3.- Muestreo del Río Elqui.

Se realizó el muestreo en las distintas zonas del Río Elqui el 17 y 18 de marzo del 2005. Los criterios para la elección se hicieron sobre la base de ser ésta una época de considerable riesgo ambiental, de mayor estiaje y por lo tanto, de menor caudal (U Chile- DGA 1996; informe Avance N°1, SAG)

### 3.2.4.- Descripción de puntos de muestreo para el Río Elqui.

**Tabla N°1:** Estaciones de muestreo georeferenciadas con GPS y las influencias antrópicas en cada una de las estaciones del río Elqui.

Estaciones de muestreo	N; E Coordenada (utm)	Altura (m.s.n.m.)	Impacto Ambiental
Punto 1 Río Claro	6659170; 356977	1409	Gran presión por pesca. Riberas alteradas sin vegetación ni presencia de organismos. Área de pristinidad, planificación Tranque Piuquenes.
Punto 2 Río Turbio	6686470; 351534	926	Agua de color turquesa por actividad minera. Aguas arriba minería de oro El Indio; El Tambo. Por sobre esta zona se ubica "Huanta" que presenta un alto grado de pristinidad.
Punto 3 Antes del Embalse de Puclaro	6686439; 351714	531	Zona agrícola- industrial pisquera. Río bordeado de parronales. Descarga de aguas servidas en Puente "Gualliguaica"
Punto 4 Puente Altovasol	6685404; 294464	116	Zona de minera San Jerónimo, Quebrada la Marquesa. Agricultura, descarga aguas servidas. Extracción de áridos, fábrica de asfalto.





**Figura N°4:** Punto 1 de muestreo del Río Elqui, Río Claro.

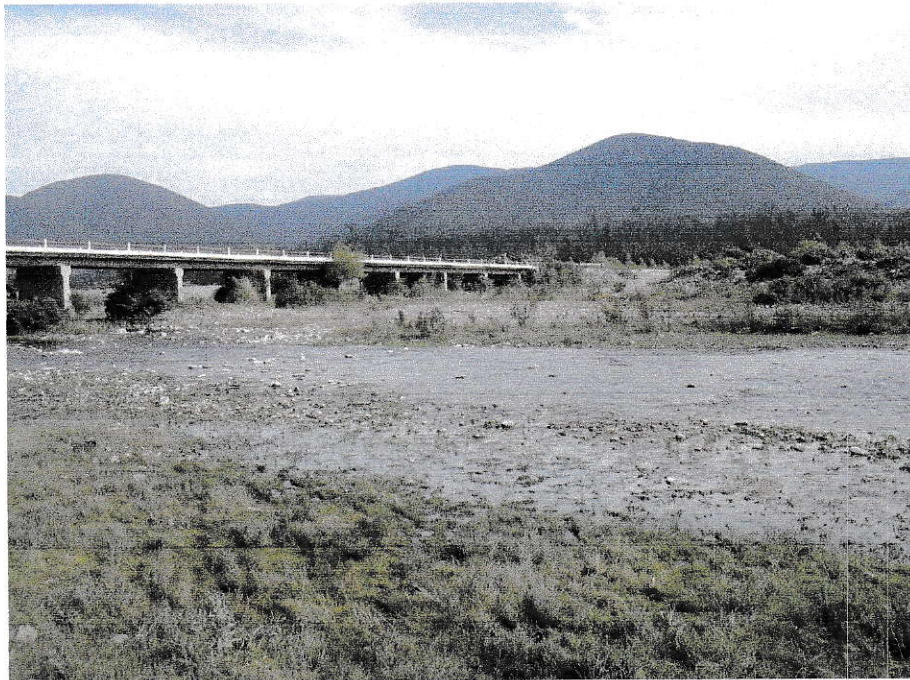


**Figura N°5:** Punto 2 del muestreo del Río Elqui, Río Turbio.





**Figura N°6:** Punto 3 del muestreo del Río Elqui, Antes del embalse de Puclaro.



**Figura N°7:** Punto 4 del muestreo del Río Elqui, Puente Altovasol.

### **3.2.5.- Mineralogía de la VI Región.**

La información mineralógica de los sedimentos y del material parental de la sexta región es escasa, sólo se tiene alguna información relacionada con los minerales que forman parte de la corteza terrestre, que incluye a los sedimentos y la cordillera de los Andes. La región posee una importante variedad de minerales metálicos que corresponden a asociaciones mineralógicas de cobre, molibdeno, oro, plata, plomo, cinc, cobalto y níquel. También se tienen recursos no metálicos como arcillas, caliza, caolín, cuarzo, diatomita, feldespato, mica, pirofilita, pumicita y sal común. (Cisternas, 2005).

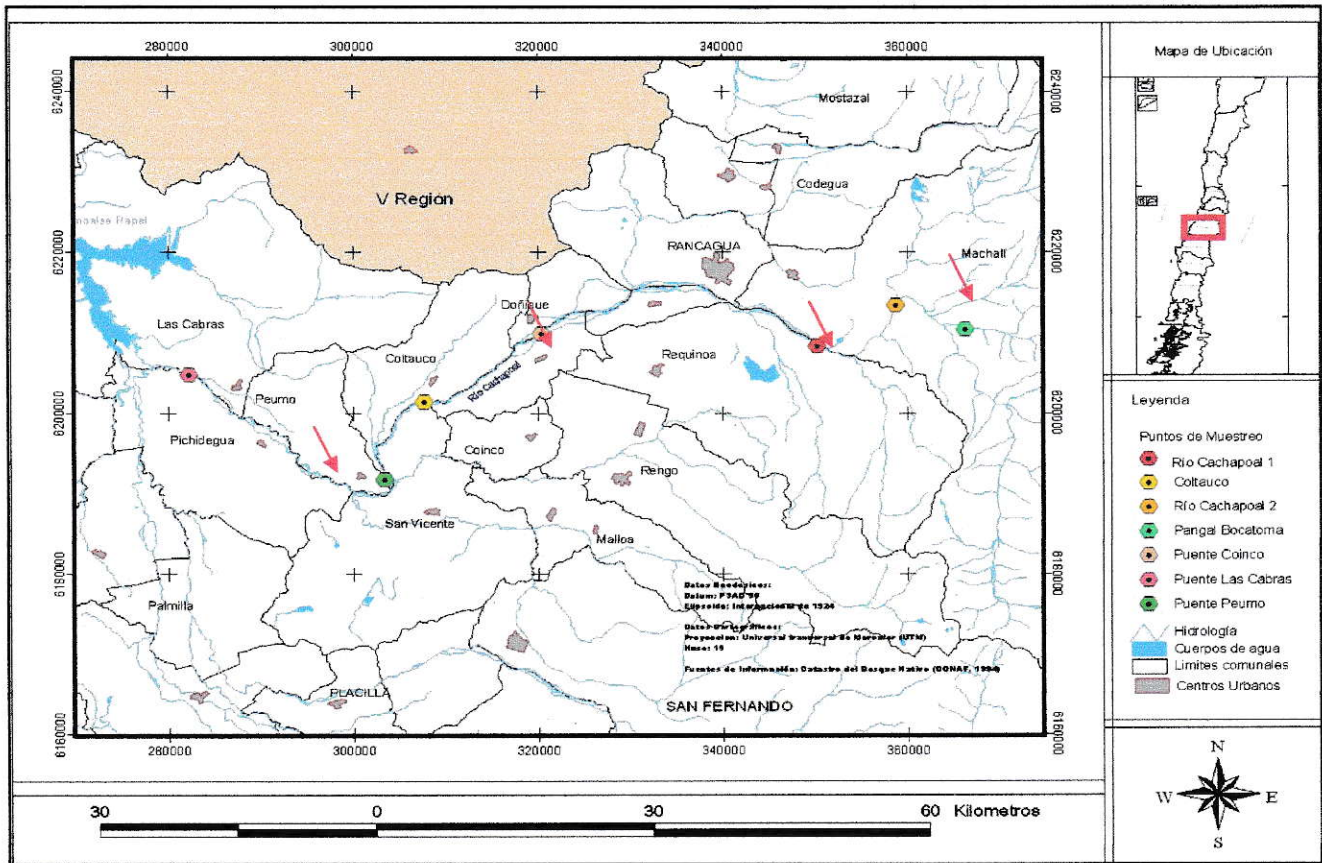
### **3.2.6.- Descripción del Río Cachapoal.**

La hoya del río Cachapoal compromete una superficie de 6370 Km<sup>2</sup>, el río nace del cerro los Piuquenes a 4460 m de altura en un conjunto de ventisqueros, cuyos deshielos lo alimentan. El brazo que lleva el nombre de Cachapoal es el de mayor caudal; recibe por el sur las aguas de los ríos de Las Leñas y Cortaderal. Aguas abajo recibe el aporte de los Cipreses, orientado también con dirección SN, el cual toma su origen en el Cerro del Plomo (4820 m de altura), los ríos Pangal y Coya le aportan las aguas de la parte septentrional de la hoya cordillerana y más abajo el río Claro. Cercano a esta última confluencia está la Central Hidroeléctrica Sauzal de 76000 KW de potencia, una de las primeras en Chile. Luego viene una depresión intermedia hacia el Norte encontrándose la ciudad de Rancagua.

De Rancagua a Peumo el Cachapoal se vuelve SW siguiendo la cordillera de la costa en la parte oriental. En la última parte se junta con el río Claro (de Rengo) que se origina en



la lagunas Los Cristales usada para formar un embalse. De Peumo al embalse el río recorre 34Km con aporte de esteros que drenan el valle central como Antivero y Zamorano como también del río Tinguiririca.



**Figura N°8:** Mapa de estaciones de muestreo Río Cachapoal, donde las flechas rojas indican los lugares de muestreo analizados en éste trabajo



### **3.2.7.- Muestreo del Río Cachapoal.**

Se realizó el muestreo en las distintas zonas del Río Cachapoal el 15 y 16 de marzo del 2005. Los criterios para la elección se hicieron sobre la base de ser ésta una época de considerable riesgo ambiental, de mayor, estiaje y por lo tanto de menor caudal (Geotécnica, 2001; muestreos periódicos Junta de Vigilancia del Río Cachapoal y Asociación de Canalistas del Cachapoal; U Chile- DGA 1996).

### 3.2.8.- Descripción de puntos de muestreo

**Tabla N°2.** Estaciones de muestreo georeferenciadas con GPS y las influencias antrópicas en cada una de las estaciones del río Cachapoal

Zona del río	N; E Coordenada (utm)	Altura (m.s.n.m.)	Factor antrópico
Zona 1 Pangal	6210399; 366323	905	Central Pangal Vegetación nativa, zona de aguas más limpias, menor intervención, alta turbiedad. Presencia de minibasurales
Zona 3 Después confluencia río Claro Cauquenes	6208329; 350227	637	Zona de extracción de áridos. Presencia minibasurales, alta turbiedad.
Zona 4  Puente Cónico	6209770; 320367	347	Zona de altas intervención aguas abajo del estero La cadena. Descarga aguas servidas significativa, se siente mal olor, agua grasosa. Presencia minibasurales por restos de faenadoras de pollo, frutas.
Zona 6  Puente Peumo	6191672; 303372	234	Zona de confluencia de esteros. Presencia de minibasurales.



**Figura N°9:** Punto 1 de muestreo del Río Cachapoal, Río Pangal Bocatoma

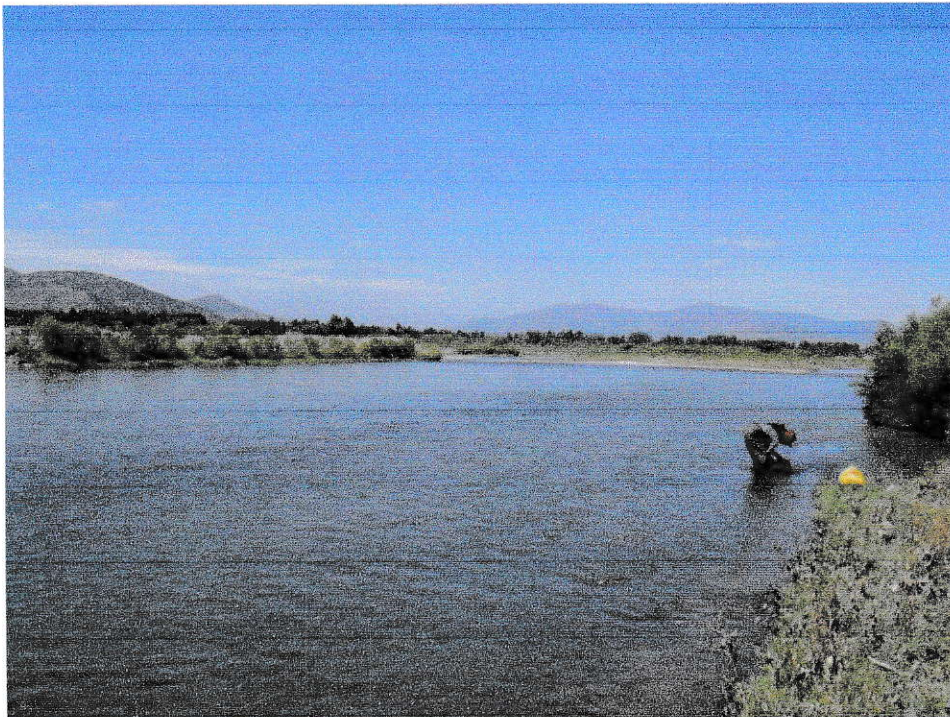


**Figura N°10:** Punto 2 de muestreo del Río Cachapoal, después de la confluencia Río Claro





**Figura N°11:** Punto 3 de muestreo del Río Cachapoal, Puente Cónico.



**Figura N°12:** Punto 4 de muestreo del Río Cachapoal, Puente Peumo.



### **3.3.- Análisis de sedimentos**

#### **3.3.1. Determinación de textura de sedimentos por método de Bouyoucos**

Los métodos analíticos para la determinación de textura, se basan en la ley de Stokes donde se calcula la velocidad de caída de las partículas en función de su densidad, de su tamaño, de su viscosidad y densidad del líquido (Brisio, 2005) En el método de Bouyoucos, se basa en la determinación de la densidad de la suspensión del sedimento, la cual se expresa en función de la velocidad de la sedimentación de cada una de las partículas.

##### *Procedimiento*

Para la determinación de la textura de los sedimentos se pesan 50 g de sedimento y se depositan en un vaso precipitado de 1000 mL. Luego se agregan 500 mL de agua y 20 mL de Hexametáfosfato de sodio al 10% (MERCK), se agita con un agitador automático durante 15 minutos (IKA Labortechnik HS 501), al cumplirse el tiempo, se trasvasija el contenido del vaso a una probeta de 1000 mL y se afora a 1 litro. Se agita vigorosamente con el agitador manual por 1 minuto. Luego se deja reposar por 4 minutos (exactos), se mide la temperatura ( $T_1$ ) y se lee la lectura del hidrómetro ( $L_1$ ). Se deja reposar por dos horas, al cumplirse el tiempo, se vuelve a medir la temperatura ( $T_2$ ) y se lee la lectura del hidrómetro ( $L_2$ ).

La textura del sedimento se calcula a partir de los porcentajes de limo, arcilla y arena, para esto se uso el método de Bouyoucos, en el cual a las lecturas del hidrómetro se les aplica una corrección de temperatura de 0.2 por cada 1° F por sobre o debajo de 67° F, de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$L_{1 \text{ corregida}} = L_1 \pm (|T_1 - 67| \times 0,2) \quad (1)$$

$$L_{2 \text{ corregida}} = L_2 \pm (|T_2 - 67| \times 0,2) \quad (2)$$

Los valores se suman cuando la temperatura observada es mayor que 19,4° C y se restan cuando la temperatura observada es menor a 19,4°C.

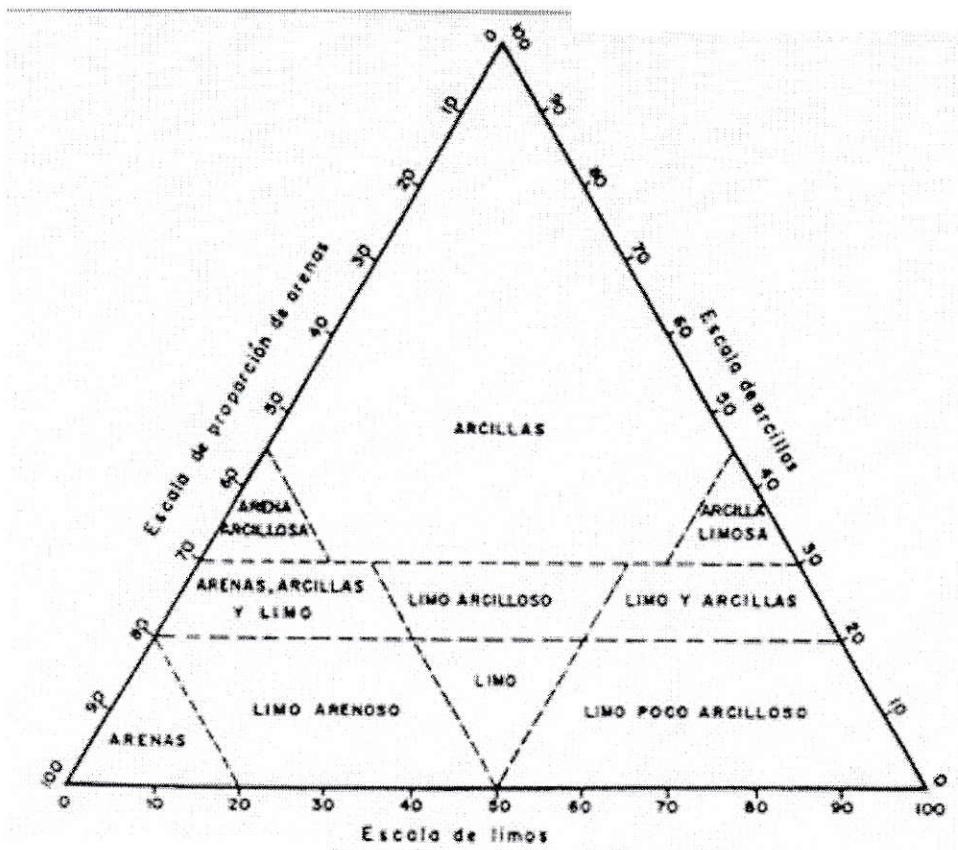
Los porcentajes de arena, limo y arcilla, se calculan de acuerdo a las siguientes fórmulas:

$$\% \text{ de Arena} = 100 - (L_{1 \text{ corregida}} \times 2) \quad (3)$$

$$\% \text{ de Arcilla} = L_{2 \text{ corregida}} \times 2 \quad (4)$$

$$\% \text{ de Limo} = 100 - (\% \text{ de Arena} + \% \text{ de Arcilla}) \quad (5)$$

Luego la textura se obtiene a partir de los porcentajes obtenidos anteriormente y utilizando el siguiente triángulo, triángulo de Feret (figura 12):



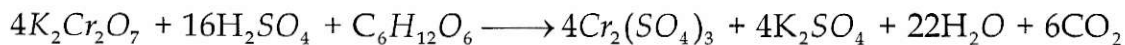
**Figura N°12:** Triángulo de Feret (Gráfica descrita en la Leyenda del Mapa Mundial de Sedimentos FAO/ UNESCO/ISRIC, 1988)

### 3.3.2. Determinación de materia orgánica

El método mayormente utilizado es el de Walkey-Black, por combustión húmeda, descrito por Allison (1965).

La reacción consiste básicamente en una oxidación del carbono orgánico, que pasa a formar dióxido de carbono. El agitado de la muestra posibilita el contacto del oxígeno con la materia orgánica a oxidar; y el calor de disolución del ácido sulfúrico suministra la energía necesaria para que dicho proceso se realice. Este método ofrece la ventaja que prácticamente no ataca al carbono elemental que pueda hallarse presente y oxida la materia orgánica en un 70-77% aproximadamente (Brisio, 2005). En la ecuación (i) se

puede determinar la cantidad de dicromato en exceso que no interviene en la reacción, mediante titulación.



(i)

Se agrega una solución de sulfato ferroso ( $FeSO_4$  o Sal de Mohr), de concentración conocida, y la difenilamina como sustancia indicadora del punto de equivalencia o punto final, esto de acuerdo a la reacción de óxido reducción (ecuación ii) (Kolthoff et.al., 1969).



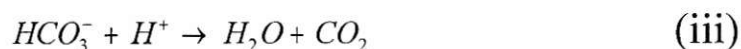
#### *Procedimiento*

Se pesa 1 gramo de muestra (balanza PB 1502) y se le agregan 10 mL de  $K_2Cr_2O_7$  1 N (MERCK) y 20 mL de ácido sulfúrico concentrado ( $H_2SO_4$ ) (Fischer-Chemicals). Se agita por 30 segundos y se deja reposar bajo campana por 30 minutos, luego se agregan 200 mL de agua desionizada y 10 mL de ácido fosfórico 85% ( $H_3PO_4$ ) (Fischer-Chemicals), se agita y se deja enfriar a temperatura ambiente. Luego se titula con sulfato ferroso amoniacal 0.5N (MERCK), incluyendo un blanco. Los cálculos se muestran en el anexo 1.



### 3.3.3. Determinación de $\text{CO}_3^{2-}$ por titulación

La determinación de carbonato mediante volumetría, que se basa en la siguiente reacción:



*Procedimiento:*

Se pesan 5 gramos de sedimento (balanza PB 1502), se les agregan 100 ml de HCl 1.0 M (Fischer-Chemicals). Las muestras se agitan durante dos horas (IKA Labortechnik HS 501), una vez transcurrido el tiempo se filtran por gravedad con papel filtro (MFS-Advante 11 $\mu\text{m}$ ). Luego se toma una alícuota de 10 mL del sobrenadante en un matraz erlenmeyer y se le agregan 25 mL de agua desionizada. Se agregan gotas de fenolftaleína (MERCK) y se titula con NaOH 0.5 M (MERCK). Se incluye un blanco. Los cálculos se muestran en el anexo 1.

### 3.3.4. Extracción selectiva

Para la determinación de metales pesados se utiliza el método de extracción secuencial descrito por Tessier (Tessier y col 1979).

Para realizar esta experiencia el sedimento se trata con distintos reactivos en cada una de las fracciones y de esta forma se obtienen los metales ligados en cada una de las fracciones y las distintas formas en que se encuentra el metal en el sedimento.

*Procedimiento:*

Para 1 gramo de sedimento:

*Etapa 1:* Metales intercambiables: Se agita el sedimento a temperatura ambiente por una hora con 8 mL de una solución de cloruro de magnesio 1M (MERCK) a pH 7, por una hora y se centrifuga (Rolco CM 24) por media hora. El sobrenadante se extrae con una pipeta Pasteur y se deposita en un vaso de plástico y se guarda en un cámara fría hasta su posterior análisis por ICP (PerkinElmer Optima 3300XL). El residuo se guarda para la siguiente extracción.

*Etapa 2:* Metales enlazado a carbonatos: el residuo de la etapa 1 se le agrega 8 mL de acetato de sodio 1 M (MERCK) ajustado a pH 5 con ácido acético (Fischer-Chemicals), se agita por 5 horas y luego se centrifuga (Rolco CM 24) por media hora. El sobrenadante se extrae con una pipeta Pasteur y se deposita en un vaso de plástico y se guarda en un cámara fría hasta su posterior análisis por ICP. El residuo se guarda para la siguiente extracción.

*Etapa 3:* Metales enlazados a óxidos de hierro y manganeso: El residuo de la etapa 2 se hace reaccionar con 20 mL de 0.04 M cloruro de hidroxilamina (MERCK) en 25% v/v de ácido acético (Fischer-Chemicals), a  $96 \pm 3$  °C con agitación ocasional durante 6 horas. El sobrenadante se extrae con una pipeta Pasteur y se deposita en un vaso de plástico y se guarda en una cámara fría hasta su posterior análisis por ICP. El residuo se guarda para la siguiente extracción.

*Etapa 4:* Metales enlazados a materia orgánica: al residuo de la etapa 3 se le agrega 3 mL de una solución 0.02 M de ácido nítrico (Fischer-Chemicals) y 5 mL al 30%

H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (MERCK) ajustada a pH 2 con ácido nítrico (Fischer-Chemicals), se calienta la mezcla a 85 ± 2 °C por dos horas con agitación ocasional. Luego se vuelve a agregar 3 mL de agua oxigenada al 30% a pH 2 ajustado con ácido nítrico, se vuelve a calentar a 85 ± 2 °C con agitación ocasional, una vez que se enfría se le agrega 5 mL de acetato de amonio 3.2M (MERCK) en ácido nítrico al 20% v/v diluyéndose a 20 mL y se agita constantemente por 30 minutos, y se centrifuga por 30 minutos. El sobrenadante se extrae con una pipeta Pasteur y se deposita en un vaso de plástico y se guarda en un cámara fría hasta su posterior análisis por ICP. El residuo se guarda para la siguiente extracción.

*Etapa 5: Metales Residuales:* el residuo de la etapa 4 se digiere con una mezcla de HF-HClO<sub>4</sub> de 5:1 (Fischer-Chemicals). La digestión se realiza en horno microondas con vaso cerrado en cuatro pasos a distintas potencias. La tabla 3 resume los tiempos y las potencias a las cuales se realizan la digestión para cada una de las muestras.

Todo esto se resume en la figura 13.

**Tabla N°3:** Resumen de las potencias aplicadas para la digestión en horno de microondas(ATC-300).

Pasos	Tiempo (minutos)	Potencia (W)
1	6	250
2	6	400
3	6	650
4	6	250

Las extracciones se realizaron por cuatuplicado, una muestra y tres contra-muestras. Además en cada una de las etapas se realizaron cuatro blancos.

**Metales totales:**

Se pesan 0.25 g de sedimentos, se le realiza una digestión, de la misma forma en que se realiza la digestión para la quinta etapa de la extracción secuencial (tabla 3), se filtra la muestra y se guarda para su posterior análisis en el ICP.



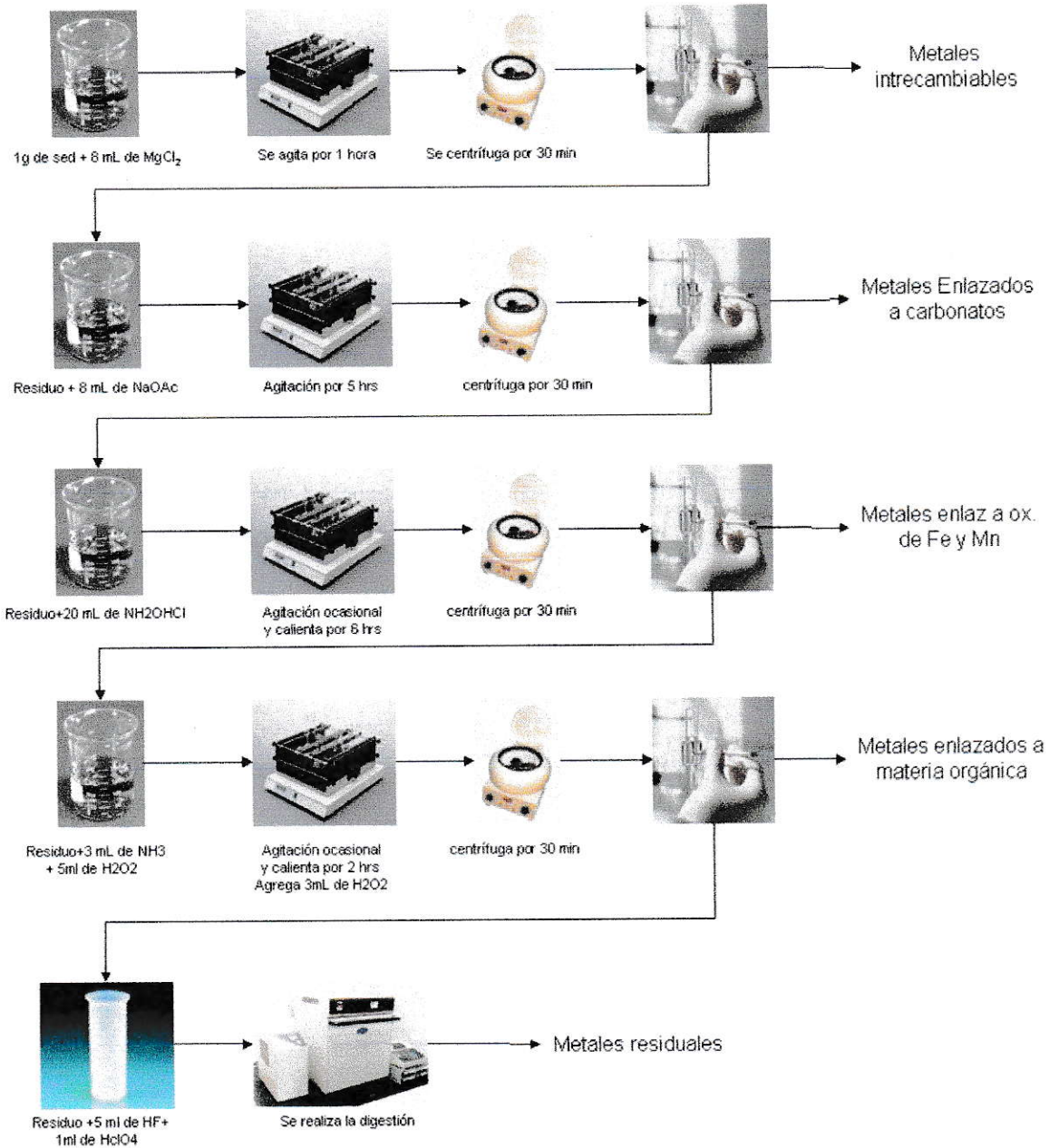


Figura N°13: Esquema de procedimiento experimental de extracción de metales.

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos se discutirán en base a la textura del sedimento, contenido de materia orgánica, contenido de carbonatos, variables fisicoquímicas de las aguas superficiales, y extracción sucesiva, en la cual los metales se discutirán individualmente.

### 4.1. Textura de los sedimentos (granulometría)

La textura de un sedimento se expresa como la distribución del tamaño de las partículas sólidas que comprenden el sedimento. En otras palabras por la composición granulométricas del sedimento, previa dispersión de sus agregados.

Es importante conocer el tamaño de las partículas, ya que los metales pesados se encuentran fundamentalmente asociados a las partículas más pequeñas ( $< 63 \mu\text{m}$ ), porque las partículas de menor tamaño tienen una carga superficial elevada respecto a su volumen y en consecuencia pueden retener altas concentraciones de metales. El área superficial de los sedimentos depende de la granulometría y de la composición mineral.

Los resultados obtenidos de la textura de los sedimentos de los ríos Cachapoal y Elqui se muestran en la tabla N°4.

Los sedimentos del Río Cachapoal tienen una textura arenosa (tabla 4) para cada uno de los puntos de muestreo.

Del análisis granulométrico se concluye que, para el Río Cachapoal la textura de los sedimentos en todos los puntos de muestreo analizados son de textura gruesa y del tipo

arena. Los porcentajes de arena son muy parecidos entre ellos y ninguno es inferior al 98%.

Para el Río Elqui hay una mayor variabilidad en los porcentajes de las texturas de los sedimentos en los puntos de muestreo (tabla 4). Para todos los puntos de muestreo se obtuvo una textura gruesa, correspondiente al tipo arena, a excepción del punto Antes de Puclaro que tiene una textura más fina, correspondiente al tipo Limo-arenoso.

Comparando ambos ríos se observa que en su mayoría los dos tienen una textura gruesa del tipo arena, a excepción del punto en el Río Elqui que corresponde al tipo limo-arenoso. El río Cachapoal representa una textura más gruesa. Con este antecedente se esperaría que para ambos ríos, el contenido de metales pesados sea bajo, ya que los metales se asocian a las partículas de menor tamaño (arcillas).

**Tabla N °4:** Textura de sedimentos de los Ríos Cachapoal y Elqui.

Puntos de muestreo	% Arena		% Limo		% Arcilla		Textura	
	Cachapoal	Elqui	Cachapoal	Elqui	Cachapoal	Elqui	Cachapoal	Elqui
P 1	98,2	87,2	0,9	7,2	0,9	5,6	Arena	Arena
P 2	99,5	93,2	0,5	1,9	0,0	4,9	Arena	Arena
P 3	99,4	65,2	0,6	24,0	0,0	10,8	Arena	Limo Arenoso
P 4	99,8	67,2	0,2	17,2	0,0	15,6	Arena	Arena

\*Para Río Cachapoal el P1 corresponde a Río Pangal; P2 a Cauquenes; P3 a Puente Cónico; P4 a Puente Peumo.

\*Para Río Elqui el P1 corresponde a Río Claro; P2 a Río Turbio; P3 a Antes de Puclaro; P4 Puente Altovasol.

## 4.2. Contenido de materia orgánica

La importancia de medir el contenido de materia orgánica radica en establecer la capacidad de liberación de metales pesados de las partículas en suspensión mediante reacciones de intercambio catiónico.

La presencia de materia orgánica favorece los fenómenos de adsorción de metales y formación de complejos solubles o insolubles (Craig, 1986; Calmano y col 1993; Förstner, 1993; Usero y col 1994; Grousset y col 1999).

Los resultados obtenidos de materia orgánica para ambos ríos se resumen en la tabla N°5.

**Tabla N° 5:** Porcentajes de materia orgánica (%MO) y de carbono (%C) en

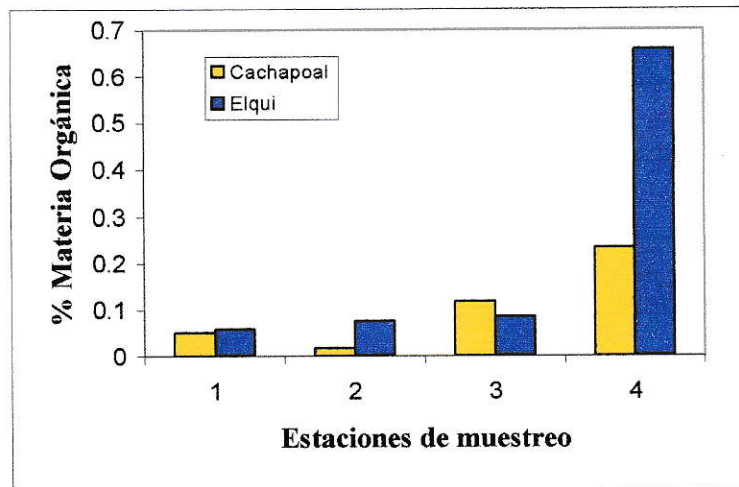
Río Cachapoal y Elqui

Puntos de muestreo	% C		%MO	
	Río Cachapoal	Río Elqui	Río Cachapoal	Río Elqui
P 1	0,029	0,034	0,050	0,059
P 2	0,010	0,044	0,017	0,076
P 3	0,069	0,049	0,118	0,085
P 4	0,136	0,388	0,234	0,659

\*Para Río Cachapoal el P1 corresponde a Río Pangal; P2 a Cauquenes; P3 a Puente Cónico; P4 a Puente Peumo.

\*Para Río Elqui el P1 corresponde a Río Claro; P2 a Río Turbio; P3 a Antes de Puclaro; P4 Puente Altovasol.





**Figura N°14:** Distribución de materia orgánica en las estaciones de muestreo para ambos ríos. Para Río Cachapoal 1 es Río Pangal; 2 Cauquenes; 3 Puente Cónico; 4 Puente Peumo. Para Río Elqui 1 corresponde a Río Claro; 2 Río Turbio; 3 Antesde Puclaro; 4 Puente Altovasol.

Para el Río Cachapoal, las concentraciones de materia orgánica se muestran en la tabla 5, junto con su gráfica (figura14). En éste río los valores de materia orgánico son bajos, siendo los más altos en Puente Cónico y Peumo (0,118 y 0,234), correspondientes a los dos últimos puntos. En Puente Cónico se podría deber a las descargas de aguas servidas que se vierten al Río, además existen restos de basuras debidos a actividad agrícola y faenadoras de pollo (Agrosuper Lo Miranda) la cual posee residuos líquidos que contienen aceites y grasas que podrían estar vertiéndose al río. Mientras que para el Puente Peumo se podrá deber a la gran cantidad de macrófitas existentes (plantas acuáticas grandes como contraposición al fitoplancton y otras algas pequeñas), además del hecho que en este punto desemboca el Estero San Vicente (comuna San Vicente) en

donde se encuentra una faenadora de aves que descarga sus residuos con aceites y grasas, lo cual aumenta el contenido de materia orgánica. Se observa además, que a medida que se avanza por las estaciones de muestreo hay un aumento del contenido de materia orgánica, a excepción de Cauquenes, en la que se encuentra una disminución del contenido de materia orgánica, debido a que en éste punto de muestreo se tomó después de la confluencia del río Cauquenes, con lo cual podría haber ocurrido una dilución del contenido de materia orgánica.

En puente Cónico se observó una gran contaminación de materia orgánica. Este sitio está después del estero la Cadena, lugar de vertimiento de una serie de residuos orgánicos de actividades industriales. En terreno se observó abundancia de materia orgánica flotante en la parte del Estero la Cadena que va río abajo (descripción entregada por Laboratorio de Química y Referencia Medio Ambiental, CENMA).

Al tener pendiente el Río Cachapoal, los puntos de muestreo que están a mayor altura contienen un menor contenido de materia orgánica, ya que al tener una mayor pendiente hay un mayor arrastre del material y una menor depositación, impidiendo la depositación del carbono orgánico en los sedimentos. Además de las razones antrópicas anteriormente mencionadas.

Para el Río Elqui, las concentraciones de materia orgánica se muestran en la tabla 5 y figura 14. En la mayoría de los valores éstos son similares a excepción de Puente Altovasol donde se observa la mayor concentración. En esta zona hay existencia de actividades agrícolas y descargas de aguas servidas no tratadas, además hay presencia de aceites y grasas lo cual aumenta el contenido orgánico.

El río Elqui al igual que el Río Cachapoal presenta una pendiente, y por ésta razón es que los puntos aguas arriba tienen un menor contenido de materia orgánica.

De la Figura 14 se observa, que ambos ríos tienen un porcentaje bajo de materia orgánica, siendo superior para el Río Elqui. En ambos ríos se observa la misma tendencia de incremento del contenido de materia orgánica río abajo. En ambos ríos además se observa que el último punto de muestreo es el que contiene un mayor contenido de carbono orgánico. Aunque para el río Elqui se observa que las concentraciones de materia orgánica tienen menor variación que para el Río Cachapoal.

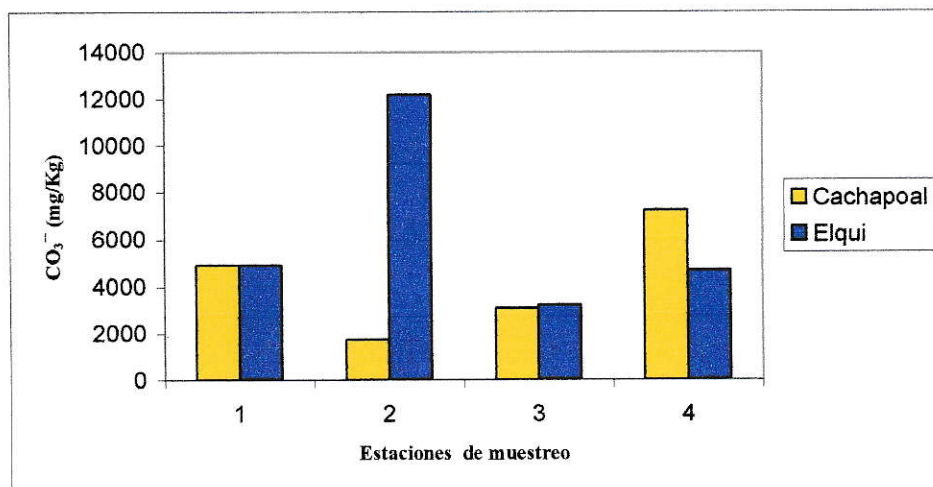
#### **4.3. Determinación de carbonato**

La presencia de carbonatos en los sedimentos trae como consecuencia altos valores de pH, con lo cual los metales pesados tienden a precipitar.

Los resultados obtenidos de carbonato para ambos ríos se muestran en la tabla N°6.

**Tabla N°6:** Contenido de carbonato en ambos Ríos  
(mg/Kg de masa seca)

Río Cachapoal	Puntos de muestreo	Carbonato
	Río Pangal (P1)	4449
	Río Cachapoal (P2)	1762
	Puente Cónico (P3)	3082
	Puente Peumo (P4)	7245
Río Elqui	Río Claro (P1)	4918
	Río Turbio (P2)	12180
	Antes Puclaro (P3)	3220
	Puente Altovasol (P4)	4667



**Figura N°15:** Distribución de carbonato en las estaciones de muestreo para ambos ríos.  
Para Río Cachapoal 1 es Río Pangal; 2 Cauquenes; 3 Puente Cónico; 4 Puente Peumo.  
Para Río Elqui 1 corresponde a Río Claro; 2 Río Turbio; 3 Antesde Puclaro; 4 Puente Altovasol.



Para el Río Cachapoal, los resultados obtenidos de carbonatos se muestran en la tabla 6 y en la figura 15. Se encuentra que las concentraciones de carbonatos más elevadas corresponden a Río Pangal y Puente Peumo (4449 y 7245 mg/Kg respectivamente). Como en el punto 1 hay un gran contenido de carbonatos se espera que en todos los puntos de muestreo exista un alto contenido, ya que este punto es el considerado el menos intervenido de todos y por esto es de referencia.

El punto 2 tiene el menor contenido de carbonatos, lo cual se puede deber a que en este punto hay confluencia de ríos, hay un efecto de dilución.

Para el Río Elqui, en la figura 15 y tabla 5 se presentan los contenidos de carbonato. Se observa que en Río Turbio se presenta el mayor contenido de carbonato, lo cual se puede deber a que en este punto hay actividad minera, ya que en algunos de sus procesos utilizan cal para precipitar el arsénico.

Los valores de carbonatos obtenidos son muy parecidos entre sí, a excepción del punto 2, lo cual demuestra que la actividad minera aumenta el contenido de carbonato.

Al igual que en el Río Cachapoal, hay altos valores de carbonato, lo cual se debe a que los sedimentos de estos ríos son arenosos, y el carbonato es uno de los constituyentes principales de la arena, ya que esta contiene caliza (Solís Gabriela, 2006).

#### 4.4. Determinación de parámetros fisicoquímicos de las aguas superficiales.

Estos parámetros fueron entregados por el Laboratorio de Química y Referencia Medio Ambiental (CENMA) y se muestran en la tabla 7 y 8:

**Tabla N°7:** Variables fisicoquímicas en las aguas el Río Cachapoal

Parámetro	Pangal	Río Cachapoal	Puente Cónico	Puente Peumo
CE (dS/m)	4,19	5,15	5,35	5,47
Ox. Disuelto (mg/L)	9,01	8,17	8,57	10,10
Temperatura (°C)	11,40	21,00	16,0	20,00
pH	7,99	8,00	7,80	8,48

**Tabla N°8:** Variables fisicoquímicas en las aguas el Río Elqui

Parámetro	Río Claro	Río Turbio	Antes de Puclaro	Pte. Altovasol
CE (dS/m)	7,92	7,62	6,65	7,09
Ox. Disuelto (mg/L)	9,26	7,42	8,62	10,50
Temperatura (°C)	13,70	17,50	20,60	21,90
pH	7,60	8,09	8,27	8,23

De aquí se desprende que para ambos ríos, los valores encontrados de pH son muy similares entre sí, todos los pH corresponden a pH básicos.

Como los valores de pH encontrados corresponden a básicos, se puede decir que los metales se deberían encontrar hidroxilados o precipitados.

#### **4.5. Metales pesados, extracción secuencial.**

La fracción del metal ligada a óxidos de Fe – Mn y a la materia orgánica pueden proporcionar información acerca del sumidero para metales pesados en sedimentos. La liberación de metales para estas dos últimas fracciones puede ser afectada, muy probablemente, por el potencial redox y pH (Gambrell y col 1976; Baruah y col 1996).

Los metales en la fracción residual no se liberan fácilmente bajo condiciones normales.

En las tablas 9 y 10 se resumen las concentraciones obtenidas de los metales pesados en la extracción secuencial para el Río Cachapoal y Elqui respectivamente. En las tablas 11 y 12 se presentan los porcentajes de cada metal obtenidos de la extracción secuencial para Río Cachapoal y Elqui respectivamente.

Relativo a las propiedades analíticas del método utilizado, en el anexo 2 se presentan los resultados para la estimación de la precisión (expresada como replicabilidad) tomando como ejemplo los valores para el punto Río Pangal, en términos de desviación estándar y coeficiente de variación CV(%). Se encontró que los CV variaron entre 0,04 y 50%, lo que indica que el procedimiento es adecuado para la mayoría de los metales estudiados. En el anexo 2 se presenta además el porcentaje de recuperación obtenido al analizar un material de referencia certificado (NCSDC 78301 River Sediment) siguiendo el procedimiento empleado. Se encontraron valores adecuados de recuperación para la mayoría de los metales.

**Tabla N°9:** Concentración de metales en para cada fracción en los distintos puntos de muestreo en µg/g masa seca en Río Cachapoal.

Puntos	Fracción	As	Fe	Cu	Mn	Ni	Al	Pb	Zn	V	Cd	Cr
Río Pangal	Intercambiables	<0,453	0,4	<0,275	8	<0,382	0,1	<0,265	<0,130	<0,031	<0,064	<0,453
	Carbonatos	6	11333	17	223	<0,391	5470	8	6	<0,038	5	10
	Ox. Fe y Mn	<0,488	104000	355	2725	<0,375	20100	<0,284	598	2058	26	152
	Materia Orgánica	<0,511	107	14	12	<0,422	620	<0,175	8	<0,042	<0,085	<0,554
	Residual	1175	908800	4070	21222	<0,251	839680	2189	3917	8704	835	2138
Cauquenes	Intercambiables	<0,453	0,4	<0,275	8	<0,382	1	<0,265	<0,130	<0,031	<0,064	<0,453
	Carbonatos	11	6383	1551	1013	<0,391	2548	16	144	<0,038	113	6
	Ox. Fe y Mn	<0,488	216500	160	1138	<0,375	10150	<0,284	1730	77	30	305
	Materia Orgánica	0,8	67	298	7	<0,422	414	<0,175	8	0,2	<0,085	<0,554
	Residual	<0,311	1280000	13005	24717	4420	859746	4890	5325	8183	1236	4514
Pte. Conico	Intercambiables	0,3	0,4	0,2	17	0,2	233	<0,265	<0,130	<0,031	<0,064	<0,453
	Carbonatos	14	7525	25	1090	<0,391	860	24	<0,141	<0,038	6	9
	Ox. Fe y Mn	<0,488	35250	200	565	<0,375	8150	<0,284	290	47	12	51
	Materia Orgánica	2	101	286	10	<0,422	930	0,5	5	<0,042	<0,085	<0,554
	Residual	<0,311	524800	5427	15753	3541	798563	3405	1788	5427	655	1213
Pte. Peumo	Intercambiables	<0,453	0,2	2	8	<0,382	1	<0,265	<0,130	<0,031	<0,064	<0,453
	Carbonatos	7	12333	2485	1058	<0,391	3425	14	1175	<0,038	5	12
	Ox. Fe y Mn	<0,488	94	<0,311	<0,032	<0,375	<2,07	<0,284	<0,165	<0,042	114	81500
	Materia Orgánica	10	6	89	31	<0,422	1186	0,1	15	0,1	<0,085	<0,554
	Residual	5363	694613	9856	25345	3874	800257	3904	2893	4966	895	1659



**Tabla N°10:** Concentración de metales en las fracciones analizadas en los distintos puntos de muestreo para Río Elqui (ug/g masa seca)

<b>Puntos</b>	<b>Fracción</b>	<b>As</b>	<b>Fe</b>	<b>Cu</b>	<b>Mn</b>	<b>Ni</b>	<b>Al</b>	<b>Pb</b>	<b>Zn</b>	<b>V</b>	<b>Cd</b>	<b>Cr</b>
<b>Río Claro</b>	Intercambiables	7	5775	19	192	0,4	1565	0,7	<0,130	<0,031	2	2
	Carbonatos	<0,108	21840	482	8080	<0,391	4928	21	<0,141	18	62	164
	Ox. Fe y Mn	<0,448	10400	36	272	<0,375	2020	<0,281	60	21	3	15
	Materia Orgánica	<0,551	376	12	9	<0,422	786	12	3	<0,042	<0,085	<0,554
	Residual	1069	456533	119	14349	4762	489774	3106	1165	3132	588	1284
<b>Río Turbio</b>	Intercambiables	26	6621	1258	2156	25	5874	7	<0,130	<0,031	7	4
	Carbonatos	64	23520	39640	6970	77	2824	283	299	<0,038	234	126
	Ox. Fe y Mn	<0,448	21660	16	114	<0,375	1016	<0,281	173	8	5	31
	Materia Orgánica	0,3	312	538	16	<0,422	1148	1	13	<0,042	<0,085	<0,554
	Residual	2291	634880	8012	18150	4070	500876	6426	2263	4096	804	2918
<b>Antes Puclaro</b>	Intercambiables	<0,453	7648	3893	<0,01	4	4646	8	<0,130	<0,031	4	9
	Carbonatos	74	2580	112	1716	10	1560	7	22	<0,038	12	13
	Ox. Fe y Mn	<0,448	7060	40	113	<0,375	1630	<0,281	58	9	2	10
	Materia Orgánica	3	63	73	7	<0,422	758	<0,175	6	3	<0,085	<0,554
	Residual	2347	794453	3294	15283	5197	514879	2095	1230	4582	927	2275
<b>Pte. Altovasil</b>	Intercambiables	20	106	404	12776	20	377	8	<0,130	<0,031	1	<0,453
	Carbonatos	<0,108	7296	262	160	31	1256	<0,347	38	<0,038	10	34
	Ox. Fe y Mn	0,448	8200	104	146	<0,375	1040	<0,281	67	11	2	12
	Materia Orgánica	0,2	216	107	15	<0,422	974	2	8	9	<0,085	<0,554
	Residual	1680	558080	441173	14523	3976	49588	5722	1725	6502	762	1115

**Tabla N°11:** Porcentajes de metales en las fracciones analizadas en los distintos puntos de muestreo para el Río Cachapoal

Puntos	Fracción	As	Fe	Cu	Mn	Ni	Al	Pb	Zn	V	Cd	Cr
<b>Río Pangal</b>	Intercambiables	<L.D	<L.D	<L.D	0,034	<L.D	<L.D	<L.D	<L.D	<L.D	<L.D	<L.D
	Carbonatos	0,49	1,11	0,37	0,92	<L.D	0,63	0,38	0,14	<L.D	0,55	0,44
	Ox. Fe y Mn	<L.D	10,15	7,97	11,3	<L.D	2,32	<L.D	13,2	19,11	3,04	6,62
	Materia Orgánica	<L.D	0,01	0,32	0,05	<L.D	0,07	<L.D	0,17	<L.D	<L.D	<L.D
	Residual	99,5	88,73	91,34	87,7	<L.D	96,97	99,6	86,5	80,9	96,4	92,9
<b>Cauquenes</b>	Intercambiables	<L.D	<L.D	<L.D	0,03	<L.D	<L.D	<L.D	<L.D	<L.D	<L.D	<L.D
	Carbonatos	93,4	0,42	10,33	3,77	<L.D	0,29	0,33	1,99	<L.D	8,2	0,13
	Ox. Fe y Mn	<L.D	14,41	1,06	4,23	<L.D	1,16	<L.D	24,00	0,93	2,16	6,32
	Materia Orgánica	6,62	0,004	1,98	0,024	<L.D	0,05	<L.D	0,11	0,003	<L.D	<L.D
	Residual	<L.D	85,17	86,62	91,9	100	98,5	99,67	73,9	99,1	89,7	93,5
<b>Pte. Conico</b>	Intercambiables	1,7	<L.D	0,004	0,1	<L.D	0,03	<L.D	<L.D	<L.D	<L.D	<L.D
	Carbonatos	88,38	1,33	0,42	6,25	<L.D	0,11	0,69	<L.D	<L.D	0,82	0,67
	Ox. Fe y Mn	<L.D	6,21	3,36	3,24	<L.D	1,00	<L.D	13,9	0,85	1,71	4,03
	Materia Orgánica	9,89	0,02	4,82	0,056	<L.D	0,11	0,013	0,23	<L.D	<L.D	<L.D
	Residual	<L.D	92,45	91,4	90,4	100	98,7	99,3	85,8	99,15	97,47	95,3
<b>Pte. Peumo</b>	Intercambiables	<L.D	N.D	0,013	0,03	<L.D	<L.D	<L.D	<L.D	<L.D	<L.D	<L.D
	Carbonatos	0,12	1,74	19,9	3,99	<L.D	0,43	0,36	28,8	<L.D	0,45	0,014
	Ox. Fe y Mn	<L.D	0,013	<L.D	<L.D	<L.D	<L.D	<L.D	<L.D	<L.D	11,27	97,99
	Materia Orgánica	0,18	0	0,71	0,12	<L.D	0,15	0,002	0,37	0,016	<L.D	<L.D
	Residual	99,7	98,24	79,3	95,9	100	99,4	99,6	70,8	99,9	88,3	1,99

\*<L.D menor al limite de detección

**Tabla N°12:** Porcentajes de metales en las fracciones analizadas en los distintos puntos de muestreo para el Río Elqui

Puntos	Fracción	As	Fe	Cu	Mn	Ni	Al	Pb	Zn	V	Cd	Cr
Río Claro	Intercambiables	0,65	1,17	2,89	0,84	0,01	0,3	0,02	<L.D	<L.D	0,27	0,10
	Carbonatos	<L.D	4,41	72,18	35,28	<L.D	0,99	0,67	<L.D	0,55	9,53	11,20
	Ox. Fe y Mn	<L.D	2,1	5,33	1,19	<L.D	0,4	<L.D	4,87	0,65	0,40	1,04
	Materia Orgánica	<L.D	0,08	1,84	0,04	<L.D	0,16	0,39	0,23	<L.D	<L.D	<L.D
	Residual	99,30	92,24	17,76	62,66	99,99	98,14	98,2	94,9	98,8	89,79	87,66
Río Turbio	Intercambiables	1,10	0,96	2,54	7,87	0,60	1,2	0,11	<L.D	<L.D	0,70	0,12
	Carbonatos	2,70	0,32	80,14	25,43	1,85	0,55	4,21	10,87	<L.D	22,28	4,11
	Ox. Fe y Mn	<L.D	0,87	0,03	0,42	<L.D	0,2	<L.D	6,3	0,19	0,47	0,99
	Materia Orgánica	0,01	0,01	1,09	0,06	<L.D	0,22	0,01	0,48	<L.D	<L.D	<L.D
	Residual	97,00	97,86	16,20	66,23	97,55	97,88	95,67	83,25	99,81	76,550	94,78
Antes Puclaro	Intercambiables	<L.D	0,94	52,17	<L.D	0,08	0,89	0,37	<L.D	<L.D	0,4	0,39
	Carbonatos	3,10	3,42	1,52	10,02	0,18	0,3	0,34	1,67	<L.D	1,30	0,55
	Ox. Fe y Mn	<L.D	3,15	0,54	0,66	<L.D	0,31	<L.D	4,41	0,2	0,24	0,44
	Materia Orgánica	0,10	0,05	0,99	0,04	<L.D	0,14	<L.D	0,43	0,05	N.D	<L.D
	Residual	96,80	92,41	44,7	89,28	99,74	98,36	99,29	93,49	99,74	98,05	98,62
Pte. Altovasol	Intercambiables	1,20	0,02	0,09	46,26	0,49	0,71	0,14	<L.D	<L.D	0,18	<L.D
	Carbonatos	<L.D	1,27	0,06	0,58	0,77	2,36	<L.D	2,08	<L.D	1,24	2,89
	Ox. Fe y Mn	<L.D	1,43	0,02	0,53	<L.D	1,95	<L.D	3,62	0,17	0,28	1,05
	Materia Orgánica	0,011	0,04	0,02	0,05	<L.D	1,83	0,02	0,46	0,15	<L.D	<L.D
	Residual	98,80	97,24	99,80	52,58	98,73	93,15	99,84	93,84	99,69	98,30	96,06

\*<L.D: menor al límite de detección



**Tabla N°13:** (Continuación) Factores Incidentes en la Calidad de los sedimentos en la Cuenca del Río Elqui.

Estaciones de Muestreo	Factores Incidentes		Metales que pueden verse influenciados por los factores incidentes		Caracterización del factor
	NATURALES	ANTROPOGÉNICO	Metales	Fracciones predominantes	
Antes del Embalse Puclaro	Rocas volcano-sedimentaria continentales y marinas	Descargas difusas de plaguicidas. Aporte de los tributarios Contaminación difusa de las aguas servidas.	As, Fe, Cu, Mn, Ni, Al Pb, Zn, V, Cd Cr	Residual Residual Res-Intercam Res -Carbona Residual Residual Residual Residual Residual Residual	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Formaciones rocosas de los períodos terciarios y creácico constituido por rocas volcánicas.</li> <li>• Geomorfología: Valle transversal con laderas constituidas por materiales coluviales y aluviales.</li> <li>• Agricultura: Cultivos de viñas y parronales en forma intensa y tecnificada</li> <li>• Cubierta vegetal: Sólo en planicies fluviales.</li> </ul>
Puente Altovasol	Lixiviación superficial y subterránea de filones mineralizados de la franja metalogénica. Rocas asociadas a mineralización de Cu y Au.	Actividad minera de manganeso y cobre Descargas difusas de plaguicidas Contaminación difusa de Aguas Servidas Descargas difusas desde tortas de estériles mineros	As, Fe, Cu, Mn, Ni, Pb, Zn, V, Cd Cr	Residual Residual Residual Res-Intercam Residual Residual Residual Residual Residual Residual	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Litología: Franja metalogénica</li> <li>• Geología: Formaciones rocosas de los períodos terciarios y cretácico constituido por rocas volcánicas.</li> <li>• Geomorfología: Valle transversal con laderas constituidos por materiales coluviales y aluviales</li> <li>• Descargas: Aguas arribas descarga de la ciudad de Vicuña (ESSCO), Empresa Capel Vicuña. <ul style="list-style-type: none"> <li>• Agricultura: Agricultura de Viñas y Patronales en forma intensa y tecnificada.</li> <li>• Cubierta vegetal: Sólo en planicies fluviales</li> <li>• Minería: C.M. Manganeso Atacama: Minas: Los Loros, Copihue y Puntilla. Planta de beneficio de mineral y mina (Mn): La Puntilla. C.M. San Jerónimo.</li> </ul> </li> </ul>



**Tabla N°14:** Factores incidentes en la Calidad de los sedimentos en la Cuenca del Río Cachapoal

Estaciones de Muestreo	Factores Incidentes		Metales que pueden verse influenciados por los factores incidentes		Caracterización del factor
	NATURALES	ANTROPOGÉNICO	Metales	Fracciones predominantes	
Río Pangal	Lixiviación superficial y subterránea de filones mineralizados de la franja metalógena. Escorrentías de arcilla (aluminio silicatos) con pH básico generan complejos de aluminio en solución.	Existencia de minibasurales.	As, Fe, Cu, Mn, Ni, Al Pb, Zn, V, Cd Cr	Residual Residual Residual Residual Residual Residual Res Ox Fe-Mn Res Ox Fe-Mn Residual Residual	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Geología: Formaciones geológicas sedimentarias volcánicas y volcánicas puras.</li> <li>• Industria: Central Pangal de CODELCO.</li> <li>• Geomorfología: Valle transversal con laderas constituidas por materiales coluviales y aluviales</li> <li>• Cubierta vegetal: Escasa de precordillera.</li> </ul>
Cauquenes	Lixiviación superficial y subterránea de filones mineralizados de la franja metalógena. Escorrentía de aluminio silicatos	Contaminación difusa por actividad industrial	As, Fe, Cu, Mn, Ni, Al Pb, Zn, V, Cd Cr	Carbonatos Res Ox Fe-Mn Res y Carbonatos Residual Residual Residual Residual Res Ox Fe-Mn Residual Residual Residual	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Geología: Formaciones geológicas sedimentarias y volcánicas puras.</li> <li>• Hidrología: Aporte del Estero Coya.</li> <li>• Industria: Criaderos de aves y porcinos</li> <li>• Cubierta vegetal: escasa de precordillera.</li> <li>• Minería: Actividad minera El Teniente.</li> </ul>

**Tabla N°14:** (Continuación) Factores Incidentes en la Calidad de los sedimentos en la Cuenca del Río Cachapoal.

Estaciones de Muestreo	Factores Incidentes		Metales que pueden verse influenciados por los factores incidentes		Caracterización del factor
	NATURALES	ANTROPOGÉNICO	Metales	Fracciones predominantes	
Puente Coinco	Escorrentías de arcillas (aluminio silicatos) con pH básico generan complejos de aluminio en solución.	Contaminación difusa por aguas servidas Descarga de RILEs Aplicación de fertilizantes y plaguicidas.	As, Fe, Cu, Mn, Ni, Al Pb, Zn, V, Cd Cr	Carbonatos Residual Residual Residual Residual Residual Res Ox Fe-Mn Residual Residual Residual	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Centros poblados: Olivar Alto (Pta. De tratamiento 60% cobertura)</li> <li>• Industrias: Agrosuper Lo Miranda, Descarga de Faenadoras Super, Viña santa Mónica.</li> <li>• Agricultura: intensiva y tecnificada</li> <li>• Vertederos: Relleno sanitario Colihues La Yesca.</li> <li>• Descargas: Emisario de ESSEL</li> <li>• Minería: Relaves mineros Colihues.</li> </ul>
Puente Peumo	Escorrentía de arcillas con pH básicos que generan complejos de aluminio en solución	Contaminación difusa por aguas servidas Descarga de RILEs Aplicación de fertilizantes y plaguicidas	As, Fe, Cu, Mn, Ni, Al Pb, Zn, V, Cd Cr	Residual Residual Res y Carbonatos Residual Residual Residual Residual Res y Carbonatos Residual Res Ox Fe-Mn Ox Fe-Mn	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Centros poblados: Ciudad de Sn Vicente de Tagua-Tagua (con pta. de tratamiento 80% cobertura), Poblado de Pelequén, sin pta de tratamiento, poblado de Malloa (con pta. De tratamiento 60% de cobertura)</li> <li>• Descargas: Emisario Estero Malambo (ESSEL).</li> <li>• Hidrogeología: Río de origen pluvial con recarga de acuífero en período estival.</li> <li>• Industrias: Faenadota Sn Vicente, Viña Morandé.</li> <li>• Agricultura: Intensiva y tecnificada</li> </ul>

De las Tablas 13 y 14 se deduce que los metales en general se encuentran en la fracción residual a excepción en algunos puntos para As, Cd, Cr, Zn, Cu y Fe.

Se realizará un breve análisis de los metales encontrados sobre un 10% en otras fracciones que no sean la residual para cada río.

### **Río Cachapoal**

El As se encontró en mayor proporción en la fracción de carbonatos en Cauquenes y Puente Cónico, esto se puede justificar ya que aquí hay contaminación de origen antropogénico, hay industrias de pollos y frutas y en de la dieta de animales de corral se les dan altas dosis de microelementos (Tabla 26, Anexo 4).

El hierro se encontró en además de la fracción residual en la fracción de Oxido de Fe-Mn en Cauquenes. Esto puede estar influenciado por la actividad minera de esta zona, concordando en que en este punto se encontró la mayor concentración de hierro en agua (Tabla 21, Anexo 3).

El cobre se encontró en la fracción de carbonatos en Cauquenes, esto puede ser por la influencia del yacimiento cuprífero El Teniente. En Puente Peumo se puede deber a que en este punto hay descargas de RILEs, además de actividad agrícola (aplicación de fertilizantes y plaguicidas, Tabla 24 Anexo 4). En Puente Cónico la presencia de cobre se puede deber a la existencia de las faenadoras de cerdos y pollos, (Tabla 26, Anexo 4).

El zinc además de la fracción residual se encontró en la fracción de óxidos de Fe-Mn en todos los puntos de muestreo a excepción de Puente Peumo, que se encontró en la fracción de carbonatos. El zinc a pH mayores a 8,5 permanece en solución, a pH



mayores de 7 el zinc se hidroliza formando compuestos coloidales como  $Zn(OH)_2$  de gran estabilidad a pH mayores que 8 (Moore y Ramammorthy, 1984), siendo éste pH muy similar al obtenido en este río. En Puente Cónico se encontraron las concentraciones más bajas de este elemento en los sedimentos, sin embargo se encuentran las concentraciones más altas de zinc en las aguas (Tabla 21 , Anexo 3), por lo que el zinc en este punto se encuentra soluble. La existencia de zinc se puede deber a que hay faenadoras de cerdos y pollos, lo cual puede estar contribuyendo al aumento de éste elemento (Tabla 26, Anexo 4).

El cadmio además de la fracción residual se encuentra asociado a la fracción de óxidos de Fe-Mn. La adsorción de cadmio en oxihidróxidos de Fe se puede expresar por:



Donde x es el promedio aparente del número de protones liberados por cada ión de  $Cd^{+2}$  adsorbido en la superficie. En sedimentos con valores de pH mayores que 8 el cadmio fundamentalmente se encuentra asociado a óxidos de Fe-Mn, ya que éstos pH favorecen la precipitación de la mayoría de los metales por la formación de compuestos insolubles mayoritariamente hidróxidos (Arribas et al., 1995).

Después de la fase de óxidos de Fe y Mn, el cadmio se encuentra asociado a la fracción de carbonato lo cual se explica porque el cadmio y el calcio tienen radio iónico similar y el  $Cd^{+2}$  puede sustituir al  $Ca^{+2}$  (Span y Gaillard, 1986; Prusty y col, 1994). El mayor contenido de cadmio en esta fracción corresponde a Cauquenes, lo que se puede deber a la actividad minera en El Teniente.



El cromo se encontró además de la fracción residual en la fracción de óxido de Fe-Mn en la estación de Puente Peumo donde el mayor contenido de cromo está ligado a la fracción de óxidos de Fe-Mn. El pH y los mecanismos de floculación y precipitación son los principales factores que propician los factores de deposición del cromo puesto que se aprecia que este elemento permanece en solución a pH menores a 8, produciéndose la precipitación a valores mayores (Adriano, 1986) (Pte Peumo pH 8.48), por ésta razón se encuentran altos contenidos de cromo en éste punto, ya que en el agua (Tabla 21, Anexo 3) no se detectó cromo, lo que indica que el cromo precipitó pero no recientemente, sino que podría haber transcurrido algunos años. El cromo se encuentra ligado a los óxidos de hierro y manganeso, ya que en estos ambientes el cromo se encuentra adsorbido en sus dos formas, sobre la superficie de estos óxidos de Fe-Mn mediante una fase inicial (reacción física), seguida de una fracción química de penetración del retículo cristalino de los óxidos de estos dos elementos (Sadid, 1992).

### **Río Elqui**

El cobre se encontró con su mayor concentración en Puente Altovasol, en este punto se encuentra el menor valor de Cu en aguas, con lo que podría decir que el cobre está precipitado y por lo tanto aumenta la concentración de cobre en los sedimentos de esta zona, además de la existencia de la minera San Jerónimo, agricultura con uso de fertilizantes y plaguicidas con contenidos de este metal, y descargas de aguas servidas, que en su conjunto contribuyen a un aumento de las concentraciones de cobre. El segundo punto con mayor concentración de cobre es en Río Turbio, en este punto es esperable que haya un aumento en la concentración de Cu por la influencia minera.

La fracción intercambiable y carbonatos son las que mayor porcentaje de cobre tienen (Tabla N°12), a excepción de Puente Altovasol que el mayor contenido de cobre se encuentra en la fracción residual. Al encontrar que los mayores porcentajes de cobre están en las primeras fracciones, hace pensar que el mayor origen de este metal es antropogénico, debido a las distintas actividades de la zona, ya sea minera para Río Turbio, industria pisquera y agrícola (Tabla 25, Anexo 4) para Puente Cónico. Además hay que tener en cuenta que la textura de los sedimentos es arenosa y por lo que se espera un alto contenido de carbonatos, por lo que es más probable que los metales se distribuyan más en esta fracción.

En Río Turbio se encontró que el mayor contenido de cobre se encuentra en la fracción de carbonato debido a que en este punto se encuentran las mayores concentraciones de carbonato (figura 15).

En Río Turbio también hay actividad minera (El Indio, Tambo), la cual contribuye al aumento de manganeso especialmente en las fracciones biodisponibles, además en este punto se encontraron las concentraciones de este metal más altas en las aguas (Tabla 22, Anexo 3) quedando de ésta manera la evidencia de que el origen de este metal en este punto no es sólo litogénico, sino que también es antropogénico.

En Río Claro el Mn encontrado que corresponde a la fracción carbonato, se debe a que los sedimentos de ambos ríos son arenosos los cuales tienen un alto contenido de carbonato.

Existen porcentajes no despreciables de manganeso en la fracción intercambiables especialmente en Puente Altovasol. Esto se puede deber a que hay presencia de actividad minera (San Jerónimo), y además hay actividades agrícolas, por lo que se

usan pesticidas y fungicidas que contienen manganeso como por ejemplo Mancozeb que contiene un 16% de manganeso en su fórmula química (Adriano, 1986) (Tabla 24, Anexo 4). En las aguas de este punto no se encontró manganeso (Tabla 22, anexo 3), por lo cual el manganeso en este punto precipitó, por esta razón en conjunto con las demás se explican los altos valores de manganeso en la fracción intercambiable.

El cadmio se encontró en la fracción de carbonato, esto se puede deber fundamentalmente a dos razones: (1) la textura de los sedimentos es arena y por lo tanto hay un alto contenido de carbonatos (2) el cadmio se puede intercambiar fácilmente con el calcio, ya que presentan radios iónicos similares. En Río Turbio el cadmio se puede deber además a la actividad minera de esta zona.

El contenido de manganeso y hierro es principalmente de origen natural, por la geología de ambos ríos.

## 5. CONCLUSIONES

1.- Los sedimentos de toda la cuenca del Cachapoal y Elqui son de textura arenosa. A excepción de un punto antes del embalse de Puclaro (Río Elqui) cuya textura es limo-arenosa.

2.- La concentración de materia orgánica aumenta desde la primera estación de muestreo (Pangal, Río Claro) hasta la última estación (Puente Peumo y Puente Altovasol) para Río Cachapoal y Elqui respectivamente.

3.- Las concentraciones de carbonatos para el río Cachapoal van en aumento desde la primera estación de muestreo (Pangal) hasta la última (Pte. Peumo), a excepción de Cauquenes donde hay una disminución de la concentración de carbonatos por dilución, ya que en ésta zona hay convergencia de ríos.

Para el Río Elqui el mayor valor de carbonato se encontró en la estación de Río Turbio y luego presentó una disminución.

4.- Para ambos ríos se presentan un pH básico, en los cuales va aumentando a medida que se avanza por el Río. El río Elqui en general presenta valores de pH más altos que el Río Cachapoal. Con respecto a la conductividad eléctrica se observan valores muy similares entre una estación y otra en ambos ríos; el Río Elqui presenta valores de conductividad más altos que el Río Cachapoal.

5.- A partir de los resultados de especiación obtenidos se realizan las siguientes interpretaciones para cada uno de los puntos estudiados:



### Río Cachapoal

Los metales As, Fe, Mn, Al, Ni, Pb, Zn, V, Cd, Cr, Cu presentan la mayor proporción de su contenido en la fracción residual, exceptuando el cromo en la última estación de muestreo (Pte. Peumo) que muestra un porcentaje elevado en la fracción ligada a óxidos de Fe-Mn.

### Río Elqui

La fracción de metal más importante en que se hallan los elementos As, Fe, Cu, Mn, Ni, Al, Pb, Zn, V, Cr, Cd es la fracción residual, a excepción del cobre y manganeso. El cobre tiene una mayor proporción en Río Claro y Río Turbio en la fracción de carbonato y en antes del Embalse de Puclaro en la fracción intercambiable. El manganeso tiene importantes proporciones en la fracción de carbonatos y fracción intercambiables.

6.- En general el origen de todos los metales es litogénico ya que todos los metales se encuentran en la mineralogía de ambos ríos, por lo tanto no se encuentra mayor contaminación a excepción de algunos metales como Cu, As, Zn, Fe, Cd y Cr en algunos puntos de muestreo para cada río.

7.- En general la materia orgánica juega un papel importante en la distribución y dispersión de los metales pesados en el medio ambiente. Sin embargo en el caso de las cuencas del Cachapoal y Elqui los metales no presentan mayor afinidad por ésta fracción con excepción del cobre en el Cachapoal. Esta tendencia de baja acumulación se puede deber a que la formación de complejos-orgánicos sea muy lenta y a que no hay un contenido muy alto de materia orgánica. Pero si presentaron una gran afinidad por la fracción residual y por la formación de carbonato. En la fracción de carbonato la

mayor afinidad se puede deber principalmente a que la textura de los sedimentos es arenosa y la arena tiene un alto contenido de carbonatos. La afinidad por la fracción residual se debe que ésta fracción está compuesta principalmente por arcilla y como se ha mencionado anteriormente los metales se ligan con mayor facilidad a ésta por su mayor carga superficial y tamaño.

8.- Se ha realizado una comparación de la secuencia que siguen los metales en cada una de las fracciones estudiadas teniendo en cuenta la concentración media de toda la cuenca del Cachapoal y Elqui:

Río Cachapoal

Intercambiable: Mn>Fe>Al>Cu>As

Carbonato: Fe>Al>Mn>Zn>Cd>Pb>Cr>As

Óxido de Fe-Mn: Fe>Al>Mn>Cu>Cr>Zn>V>Cd

Materia orgánica: Al>Cu>Fe>Mn>Zn>As>V>Pb

Residual: Fe>Mn>Ni>Pb>Cu>V>Cr>As>Zn>Cd

Río Elqui

Intercambiable: Fe>Al>Mn>Cu>As>Ni>Pb>Cd>Cr

Carbonato: Fe>Cu>Mn>Al>Pb>Cr>Cd>As>Zn

Óxidos de Fe y Mn: Fe>Al>Mn>Zn>Ni>Cu>Cr>V>Cd

Materia orgánica: Al>Fe>Cu>Mn>Zn>V>As

Residual: Al>Fe>Mn>Cu>Ni>As>Pb>Zn>V>As

9.- De acuerdo a las secuencias expuestas en cada una de las fracciones, se puede observar que el manganeso, aluminio, el hierro son los más móviles y disponibles, junto con el Cu en los sedimentos de ambas cuencas.

10.- En la cuenca del Elqui el punto que presenta mayor concentración es en Río Turbio debido fundamentalmente a la actividad minera presente (El Indio y El Tambo).

En la cuenca del Cachapoal en Puente Cónico por la actividad agrícola e industrial.

11.- Del estudio de especiación para ambos ríos, en general, se encontraron bajos porcentajes de metales en la fracción intercambiable, debido a que la textura de los sedimentos es predominantemente arena y tienen un bajo contenido de materia orgánica.

12.- Los resultados encontrados concuerdan con los valores informados para las concentraciones metálicas y de otros parámetros estudiados en los Ríos Elqui y Cachapoal.

## 6.- Bibliografía

- ADRIANO, D.C. 1986. Trace elements in terrestrial environment. Springer Verlag. Pp 533.
- ALLISON, L. 1965a. Organic soil carbon by reduction of chromic acid. Soil Science. 40:311-320.
- ARCADIS Geotécnica, 2001. Diagnostico y Plan de Gestión de la calidad del agua del río Cachapoal. Infomr final. Pp 1-28.
- ALBER, L (1990) Curso básico de toxicología ambiental. Editorial NORIEGA LIMUSA México, pp 311.
- ARCADIS Geotécnica, 2000. Diagnóstico y Plan de Gestión de la Calidad del Agua del Río Cachapoal. Infome avance. Pp 6-20.
- ARRIBAS, A.,Cunni GG Ham, C.G., TOS DAL, R.M. (1995) Geology, geocrhnology fluid indusions and isotupe geochemistry of the Rodelquilar Gold alumide deposit, Spain. Economic Gea Lagy and The bulletin of the society 90(4), 795-822.
- BAUDO, R., MUTAN, H (1990) Chapter 1: Lesser known in place pollutants and diffise source problems. In: Baudo, R, Giesy, J.P., and Muntan, H. (Eds), Sediments: Chemistry and toxicity of inPLACE pollutants. Ann. Arbor: Lewis publisher, PP 1-14.
- BARUAH N.K. y col. 1996. Metal speciation in Jhanji Rivers Sediments. The Science of total Enviroment. Rev. 193: 1-12.



BELCICIA, H.E., SPARCK, H.M. (1993) Mercury, Arsenic, Antimony, and selenium contents of sediment from the K us Kokwin River, USA. *Environmental Geology* 22, 106-110.

BRISSIO, P. A. (2005); Evaluación preliminar del estado de contaminación en sedimentos de la provincia del Neuquén donde se efectúan actividades de explotación hidrocarburífera. <<http://www.tesis.bioetica.org/pab5.htm>> Fecha de Consulta: 29/08/2006

CALMANO W. y col. 1993. Binding and mobilization of heavy metals in contaminated sediment affected by pH and redox potencial. *Water Science Technology*. Rev. 28: 223-235.

CARIGNAN, R., TESSIER, A, (1998) The co-diagenesis of sulphur and iron in acid lake sediments of sputhwestern Quebec. *Geochimica at Cosmochimica Acte* 1179-1188.

CISTERNAS L. Caracterización fisicoquímica y determinación de metales pesados en los sedimentos del Río Cachapoal (Química Ambiental). Santiago, Chile. Universidad de Chile, facultad de Ciencias, 2005.

CRAIG P.J. 1986. *Organometalic compounds in the enviroment*. Longman Harlow pp 76.

CHEN, W., TAN, S.K., TAY ,J.H. (1996) distribution, fractional composition and release of sediment-baund heavy metals in tropical reservoirs. *Water, air, and soil pollution* 92, 273-287.

Dirección general de aguas (1994-1997). *Contaminación de aguas naturales*.

- DOMÉNECH, X. 1997. El impacto de los contaminantes. En Miraguano (Eds.). Química del sedimento Pp 190.
- FORSTNER, U. & SALOMONS W. (1998). Trace metals analysis on polluted sediments. I. Assessment of sources and intensities. Environment Technology Letters 1, 494-505.
- FORSTNER U. y col. 1993. Sediment quality objectives and criteria development in Germany. Water Science Technology. Rev: 28: 307-316.
- GAMBRIEL R.P. y col. 1976. Physicochemical parameters that regulate mobilization and immobilization of toxic heavy metals. In: P.A. Krenkel, J. Harrison and J.C. BURDICK (eds), Dredging and its Environmental Effects. Pp. 418-434.
- Geotécnica, 2001
- GIBBS, R.J. (1997) Transport phases of transition metals in the Amazon and Yukon Rivers. Bulletin Geological Society of America 88, 829-843.
- GOLTERMAN, H., SLY, P. & THOMAS, R. (1983). Study of the relationship between water quality and sediment transport. UNESCO, Francia, pp 1-123.
- GROUSSET, F.E., SOUNNEAM; S.M., LAVEUY, G., LATAUCH, C. (1999). A 70 year record of contamination from industrial activity along the Gironde river and its tributaries (France). Estuarine, Coastal and Shelf Science 48, 401-414.
- HAKANSON, L & JANSSON, M. 1983. Principles of Lake Sedimentology. Springer-Verlag, Germany, 314 pp.
- HERMÓGENES ROSA R, 2001. Estudio de la contaminación por metales pesados en la cuenca del Llobregat, pp 3-45.

HERRRERA L., J. HERNÁNDEZ "Anteproyecto de planta industrial de eliminación de sulfatos y metales pesados desde aguas de relave", informe final, CODELCO Chile, Div. El Teniente, 1992.

HOROWITZ, A.J., RIVIELLE, F.A., LOMOTHE, P., MILLER. L., EDWARDE, T.K., ROCHE, Z.L., RICKET, D.A. (1990) variations in suspended sediment and associated trace elements concentrations in selected Riverrine cross sections. *Enviroment Science Technology* 21, 1313-1320.

JIRI SKVARLA, "A study on the trace metal speciation in the Ruzin reservoir sediment", *Acta Montanistica Slovaca.*, Rocnik 3 (1998), 2, 177-182.

JURECG, M.,BAUMAN, I., PDAVDIC, V. (1982) Are sediments the ultimate depository of Hydrocarbon pollution. *Ves 5 Etud Pollet Mar Mediterrance CIESM, Cannes* 83-87.

LEGRET, M. 1993.speciation of heavy metals in sewage sludge and sludged-amended soil. En: *Proceedings of the workshop of the sequential extraction of trace metals in soils and sediemnts. Int. J. Environ. Anal Chem.* 51, 161- 165.

LOPEZ – SANCHEZ, J.F. (1193). Comparison of two sequential extraction procedures of trace metals partitioning in sediments. En: *Proceedings of the workshop of the sequential extraction of trace metals in soils and sediemnts. Int. J. Environ. Anal Chem.* 51, 113-121.

MC.BRIDE M. 1994. *Enviromental Chemistry of soils.* Oxford University Press. New York, USA, 406 pp.

M.L. JACKSON, "Soil Chemical Analysis", Prentice-Hall, Englewwod Cliffs, N.J., 1958.

- MOALLA, S.M., AWADALLAH, R.M., RESHED, M.N., SALTON, M.E., (1998). Distribution and chemical fractionation of some heavy metals in bottom sediments of lake Nasser. *Hydrobiologia* 364, 31-40.
- MOORE, J. W., RAMA MOORTHY, S. (1984). Heavy metals in materials waters: Applied monitoring and impact assesment. Springer-Verlag, N. York Berlin Hesdel bevg pp. 265.
- LEONNI Y SERTORI, F. (1997) Heavy Metals and arsenic distribution in sediments of the Elba-Argentario lasin, southern Tuscanj, Italy. *Enviromental Geology* 32(2), 83-92.
- OYARZÚN R., LILLO J., HIGUERAS P., OYARZÚN J., MATURANA H. (2002) Caso de Estudio: Sedimentos ricos en arsénico en la cuenca hidrográfica del Río Elqui (norte de Chile): ¿Contaminación industrial o natural?.
- PROYECTO SAG: “Desarrollo de un modelo para el uso de bioindicadores y bioensayos como medida de la condición biológica de un cuerpo de agua”.
- PROSTY, B.G., SAHV, K.C., GODGUL, G. (1994) Metal contamination due to mining and millig activities at the Zawar zinc mine, Rajasthen, India. I. Contamination of stream sediments. *Chemical Geology* 112, 275-291.
- SALOMONS W., FORSTNER U. (1984). Metals in the hydrocycle. Springer – Verlag, New York Berlin pp 349.
- SCHOLLENBERGER, C. 1945. Determination of soil organic matter. *Soil Science*. 59:53-56.
- SIGG, L., STURM, M., KISTER, D. (1987) vertical transport of heavy metals by setting porticles in lake Zurich. *Limno Oceanog* 32, 112-130.



SINGH, A.K., HASNAIN, S.D., BAAERJEE, D.K. (1999) Grain size and geochemical partitioning of heavy metals in sediments of the Domador Rier a tribulary of the cower Ganga, India. Enviromental Geology 39(1), 96-98.

Solís P. Gabriela, Apuntes para el curso de Fundamentos de Geología. <<http://geologia.igeolcu.unam.mx/academia/Temas/Sedimentos.html>>, [consulta: 1/8/2006]

SPAN, D., GAILLERD, J.F. (1986) an investigation of a procedire for determining carbonate-bound trace metals. Chemical Geology 56, 135-141.

STUNM, W., MORGAN, S.J. (1982) Aquatic Chemistry. Ed. John Wiley Interscience, New York, pp 780.

TESSIER, A. CAMPBELL, P.G.C., BISSON, M., (1979) sequential extraction procedue for the speciation of particulate trace metals. Analytical Chmestry 51, 844-851.

CATEDRA de Edafología- UNCo; 2003.- Estructura, Propiedades, y Comportamiento del Cuerpo Sedimento. Capítulo XII. Cátedra de Edafología. Facultad de Ciencias Agrarias. UNCo.

VAITHIYA Nathan, p. Ramana than A.L., Subraminian, V. (1993) transport and distribution of heavy metals in Cauvery river. Water, air, and pollution 71, 13-28.

U Chile – DGA, 1996

USERO J. y col. 1997. Contaminación por metales en sedimentos acuáticos. Tecnología del agua. Rev. 166: 44-50.

WITTMAN, G. (1981) Toxic Metals. En; Metal Pollution in the Aquatic Environment, Cheptb. Forstner, U., and wittman, G. (Eds). Springer-Verbyas Berlin pp4-70.

R. OYARZUN, J. LILLO, P. HIGUERAS, J. OYARZÚN, H. MATURANA.

“Sedimentos ricos en arsénico en la cuenca hidrogáfica del río Elqui (norte de Chile): ¿Contaminación industrial o natural?”.

Páginas Web:

[http://www.redpav-fpolar.info.ve/venesuel/v06\\_1-2/v612a020.html](http://www.redpav-fpolar.info.ve/venesuel/v06_1-2/v612a020.html)

[http://www.eco-index.org/search/pdfs/513report\\_12.pdf](http://www.eco-index.org/search/pdfs/513report_12.pdf)

<http://www.tesis.bioetica.org/pab7.htm>

## **7. ANEXOS**

## 7. ANEXOS

### Anexo 1:

- i) Determinación de materia orgánica

El porcentaje de materia orgánica se determinó de acuerdo a la siguiente relación:

$$\% \text{ Carbono} = \frac{(V_1 - V_2) * N * 0.003 * 1.3 * 100}{S}$$

$$\% \text{ MO} = \% \text{ Carbono} * 1.72$$

Donde:

$V_1$  = mL de sulfato ferroso amoniacal gastados en el blanco

$V_2$  = volumen (mL) de sulfato ferroso gastados en la muestra

N = normalidad de la solución de sulfato ferroso

1.3 = factor resultante del supuesto de que la materia orgánica valorada por este método, o fácilmente oxidable, es aproximadamente el 77% de la materia orgánica total (1/0.77)

0.003 = peso equivalente del carbono (12/4)

1.72 = factor empírico de conversión del % de carbono a % de materia orgánica (100/58).



iii) Determinación del contenido de carbonato:

El porcentaje de carbonato equivalente se obtiene de la siguiente relación:

$$\text{CaCO}_3 \text{ equivalente (\%)} = \frac{M * (a-b) * 50 * fh}{S}$$

Donde:

M = molaridad de la solución de NaOH

a = volumen (mL) de NaOH gastados en el blanco

b = volumen (mL) de NaOH gastados en la muestra

50 =  $50 * 10 * 100 / 1000$  = peso equivalente del carbonato

fh = factor de humedad

Para calcular el factor de humedad del sedimento se coloca una muestra representativa en un recipiente previamente tarado, siendo deseable al menos el peso de la muestra sea de unos 25 g. Se procede a pesarla y a un posterior secado sin tapar en una estufa a 105°C, hasta que se mantenga un peso constante. Se deja enfriar el recipiente tapado en un desecador y a continuación se pesa de nuevo.

El cálculo de l factor de humedad se efectúa a partir de al relación:

$$Fh = (P - P') * 100 / P'$$

Siendo: P = peso en gramos de la muestra de sedimento.

P' = peso en gramos de la muestra de sedimento seco.

iv) Metales pesados: conversión de  $\mu\text{g/g}$  a porcentaje:

El ejemplo se tomará en Río Pangal, Río Cachapoal para el Fe (tabla 9):

Concentración de Fe para Río Pangal en $\mu\text{g/g}$					
	Intercambiable	Carbonato	Ox de Fe y Mn	Materia orgánica	Residual
Río Pangal	0,448	11333	104000	107	908800

$$\Sigma_{\text{fracciones}} = 0.448 + 11333 + 104000 + 107 + 908800 = 1024240 \mu\text{g/g}$$

Fracción intrecambiable:

$$1024240 \rightarrow 100\%$$

$$0,448 \rightarrow X \Rightarrow X = 0,448 * 100 / 1024239,55 = 4,4 * 10^{-5} \% \text{ (valor no puesto)}$$

en la tabla 8 por ser tan bajo)

Fracción ligada a carbonato:

$$1024239,55 \rightarrow 100\%$$

$$11332,5 \rightarrow X \Rightarrow X = 11332,5 * 100 / 1024239,55 = 1,11 \% \text{ de hierro}$$

**Anexo 2:**

La repetibilidad se estimó usando las contramuestras. Las siguientes tablas muestran los valores obtenidos de la desviación estándares de todos los metales obtenidos en un punto de muestreo, correspondiente al punto 1 del Río Cachapoal (Río Pangal).

En la Tabla 25 se muestran los valores obtenidos de la suma de las cinco fracciones de un Material de Referencia Certificado para los metales analizados en éste trabajo.

**Tabla N°15:** Desviaciones estándares (DS) y coeficientes de variación (%CV) para Fe y Mn en cada fracción.

Fracción	Fe (ug/g)						Mn (ug/g)					
	S1	S2	S3	S4	DS	%CV	S1	S2	S3	S4	DS	%CV
Intercambiable	0,35	0,45	0,4	0,4	0,041	10,3	8,40	7,80	8,20	7,60	4,34	54,24
Carbonatos	11333	11338	11327	11333	4,5	0,04	220	223	223	223	1,5	0,67
Enlazados a Ox de Fe y Mn	103900	104200	104000	104210	152,8	0,15	2725	2700	2725	2620	49,7	1,85
Materia Orgánica	107	100	118	103	7,874	7,36	12,5	12,0	12,0	12,0	0,25	2,07
Residual	910000	906250	910640		2372	0,26	21156	21358	21200		1062	0,41

**Tabla N°16:** Desviaciones estándares (DS) y coeficientes de variación (%CV) para Al y Cu en cada fracción.

Fracción	Al (ug/g)						Cu (ug/g)					
	S1	S2	S3	S4	DS	%CV	S1	S2	S3	S4	DS	%CV
Intercambiable	0,05	0,1	0,15	0,1	0,04	41,0						
Carbonatos	5500	5470	5470	5470	15	0,08	15	17	19	17	1,6	9,6
Enlazados a Ox de Fe y Mn	2755	2730	2710	2706	22,4	0,82	358	355	355	355	1,5	0,1
Materia Orgánica	10	10	12	14	1,91	16,65	14	14	14	14	0,0	0,0
Residual	840650	839680	839540		605	0,28	4000	4070	4070		40,4	0,8

**Tabla N°17:** Desviaciones estándares (DS) y coeficientes de variación (%CV) para Zn y Cr en cada fracción.

Fracción	Cr (ug/g)						Zn (ug/g)					
	S1	S2	S3	S4	DS	%CV	S1	S2	S3	S4	DS	%CV
Intercambiable												
Carbonatos	10	8	15	10	3,0	27,91	4	8	6	6	1,6	26,7
Enlazdaos a Ox de Fe y Mn	152	250	152	152	49,0	12,69	600	590	590	610	9,6	1,6
Materia Orgánica							8,0	6,0	8,0	10,0	1,6	20,0
Residual	2120	2295	2000		148	6,92	4000	3917	3917		47,9	1,2

**Tabla N°18:** Desviaciones estándares (DS) y coeficientes de variación (%CV) para V y As en cada fracción.

Fracción	V (ug/g)						As (ug/g)					
	S1	S2	S3	S4	DS	%CV	S1	S2	S3	S4	DS	%CV
Intercambiable												
Carbonatos							8	10	4	4	3,0	42,9
Enlazdaos a Ox de Fe y Mn	2058	2100	2050	2058	22,6	1,09						
Materia Orgánica												
Residual	8700	8710	8703		5	0,06	1190	1175	1175		8,7	0,7

**Tabla N°19:** Desviaciones estándares (DS) y coeficientes de variación (%CV) para Pb y Cd en cada fracción.

Fracción	Pb (ug/g)						Cd (ug/g)					
	S1	S2	S3	S4	DS	%CV	S1	S2	S3	S4	DS	%CV
Intercambiable												
Carbonatos	10	6	7,2	8,5	1,7	21,25	10	5	5	5	2,5	50,0
Enlazdaos a Ox de Fe y Mn							20	33	26	26	5,3	20,2
Materia Orgánica												
Residual	2190	2180	2198		9	0,41	830	840	840		5,8	0,7



**Tabla N°20: Recuperabilidad del Material de Referencia (CMR)**

<b>Metales</b>	<b>Muestra de CMR (ug/g)</b>	<b>Encontrado (ug/g)</b>	<b>% de Recuperación</b>
As	56 ±10	37,40	67
Cd	2,45 ±0,3	1,11	45
Cr	90 ±8	89,75	100
Cu	53 ±6	95,30	86
Zn	(251)	225,70	90
Mn	975 ±34	799,70	82
Pb	79±12	58,40	74
Fe	3,94± 0,13	3,02	76
Ni	(32)	27,04	85
V	96	55,70	58

() significa que sólo de referencia.

### ANEXO 3:

Metales disueltos en aguas superficiales del Río Cachapoal (tabla 20) y Elqui (tabla 21) en mg/L medidos por el laboratorio de química y referencia del medio ambiente (CENMA):

**Tabla N°21:** Metales disueltos en aguas superficiales en Río Cachapoal (ug/g)

Elemento	Pangal	Cauquenes	Pte Cónico	Pte. Peumo
As	20	13,9	19,9	<LD
Al	32,3	<LD	<LD	10,3
Cd	<LD	<LD	<LD	<LD
Cr	<LD	<LD	<LD	<LD
Cu	7,69	37,4	22,9	11,8
Fe	49,3	66,5	50,5	51,5
Mn	<LD	118	34	19,2
Ni	<LD	<LD	<LD	<LD
Pb	<LD	<LD	<LD	<LD
Zn	36,8	37,1	108	38

**Tabla N°22:** Metales disueltos en aguas superficiales en Río Elqui (ug/g)

Elemento	Río Claro	Río Turbio	A. E. Puclaro	Pte. Altovasol
As	12,7	24,7	21,5	<LD
Al	<LD	54,4	20,2	<LD
Cd	<LD	<LD	<LD	<LD
Cr	<LD	<LD	<LD	<LD
Cu	<LD	47,7	38	7,5
Fe	<LD	<LD	<LD	<LD
Mn	<LD	503,5	120	3,3
Ni	17,3	23,9	22,2	<LD
Pb	<LD	<LD	<LD	<LD
Zn	25,3	74,9	80,2	48,3

#### Anexo 4:

En las tablas siguientes se mostraran concentraciones de metales pesados en distintas matrices.

**Tabla N° 23:** Minerales presentes en cada río

Minerales	Fórmula química	Río Elqui	Río Cachapoal
Rocas ígneas			X
Rocas graníticas		X	X
Rocas plutónicas		X	
Plagioclasa	(Na, Ca)Al(Al, Si)Si <sub>2</sub> O <sub>8</sub> ó Na, AlSiO <sub>3</sub> ; CaAl <sub>2</sub> OSi <sub>2</sub> O <sub>8</sub>	X	
Filosilicatos		X	
Montmorillonita	(Na,Ca) <sub>0,3</sub> (Al,Mg) <sub>2</sub> Si <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>4</sub>	X	
Caolinita	Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub>	X	
Moscovita	KAl <sub>2</sub> Si <sub>3</sub> AlO <sub>10</sub> (OH,F) <sub>2</sub>	X	
Goethita	A-Fe <sup>+3</sup> (OH)	X	
Halita	NaCl	X	
Yeso	CaSO <sub>4</sub> *2H <sub>2</sub> O	X	
Blondita	Na <sub>2</sub> Mg(SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> *4H <sub>2</sub> O	X	
Arcillas		X	X
Caliza	CaCO <sub>3</sub> el Mn y Fe pueden sustituir al Ca		X
Cuarzo	SiO <sub>2</sub>		X
Diatomita	Si, Ca(Cu, Fe) <sub>12</sub> As <sub>4</sub> Si <sub>13</sub>		X
Feldespatos	XZ <sub>4</sub> O <sub>8</sub> ; X=Ba, Ca, K, Na, NH <sub>3</sub> , Sr.; Z= Al, B, Si	X	X
Mica	XY <sub>2-3</sub> Z <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (OH,F) ó XY <sub>3</sub> Si <sub>4</sub> O <sub>10</sub> X= Ba, Ca, Cs(H <sub>3</sub> O)K, Na, NH <sub>3</sub> ; Y= Al, Cr <sup>+3</sup> , Fe <sup>+2</sup> , Fe <sup>+3</sup> , Mg <sup>+3</sup> , Mn <sup>+2</sup> , V <sup>+3</sup> , Zn; Z= Al, Be, Si, Fe <sup>+3</sup>		X
Enarcita	Cu <sub>3</sub> AsA <sub>4</sub> A= sulfuro o telurio	X	X
Pirofilita	Al <sub>2</sub> Si <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub>		X
Pumicita	Si como diatomita		X

X: indica que hay existencia del mineral

**Tabla N° 24:** Proporciones de metales pesados en algunos pesticidas recomendados en la agricultura

Sustancia	Composición metálica
<b>INSECTICIDA</b>	
Acetato-arsenito de cobre	2,3%As; 39% de Cu
Arsenato de plomo	4,2-9,1%As; 11-26% Pb
Arsenato de Calcio	0,8-26% As
Sulfato de zinc	20-30% Zn
Cloruro de mercurio	6% Hg
<b>FUNGICIDAS</b>	
Sulfato de cobre-sales de calcio	4-6% Cu
Sales de cobre	2-56% Cu
Metil y fenil de sales de mercurio	0,6-6% Hg
Acetato fenil mercurio	6% Hg
Mancozeb	16% Mn; 2% Zn
Zineb y Ziram	1-18% Zn

Modificado de Adriano, 1986

**Tabla N° 25:** Concentración de algunos metales en aguas residuales de industrias no metálicas

Industriales	Concentraciones medias				
	Cd	Cu	Cr	Ni	Zn
Alimentos diversos	6	350	150	110	1100
Bebidas no alcohólicas	3	2040	180	220	2990
Cervezas	5	410	60	40	470
Helados	81	2700	50	110	780
Lavanderías	134	1700	1220	100	1750
Licuación de grasas	6	220	210	280	3890
Limpieza de automóviles	18	180	140	190	920
Procesado de carnes	11	150	150	70	460
Procesado de pescados	14	240	230	140	1590
Ropas y curtidos de pieles	115	7040	20140	740	1730
Sustancias químicas diversas	27	160	280	100	800
Tahomas	2	150	330	430	280
Tintes y textiles	30	37	820	250	500

Modificado de Klein y col, 1974



**Tabla N°26:** Concentración de metales pesados en desechos de animales en  $\mu\text{g/g}$

Origen de los desechos	Sb	As	Cd	Cu	Cr	Hg	Pb	Zn
Vacuno	0,08	0,88-2,2	0,24-0,28	21-24	20-30	0,03-0,05	21.-3,3	86-115
Aves de corral	0,08-1,0	0,57-0,66	0,42-0,58	4,4-31	0,5-10	0,04-0,06	2,1-90	36-158

\* Fuente: Adriano, 1986.

**Tabla N°27:** Concentración de arsénico en matrices ambientales

Material	Concentración media	Rango
Calizas	2,6	0,1-20,1
Arcillas	13	

**Tabla N° 28:** Concentración de metales pesados en rocas graníticas  
 $\mu\text{g/g}$

Elementos	Rocas graníticas
Antimonio	0,2
Arsénico	1,9
Cadmio	0,13
Cobre	30
Cromo	22
Níquel	0,08
Mercurio	15
Plomo	15
Zinc	60

Fuente. Turekian y Wedepohl, 1961