

UCH-FC  
Q. Ambiental  
R 618  
C.1



FACULTAD DE CIENCIAS  
UNIVERSIDAD DE CHILE

**“EVALUACIÓN AMBIENTAL DE LOS SEDIMENTOS DE LOS  
ESTEROS ALHUÉ Y CARÉN COMO PARTE DE APOYO AL  
PROCESO DE REVISIÓN DE NORMAS DE EMISIÓN”**

Seminario de título entregado a la universidad de Chile en cumplimiento parcial de los requisitos para optar al título de:

**Químico Ambiental**

**Guillermo Andrés Rivas Valladares**

Directora de seminario de título y profesora patrocinante: Dra. Isel Cortés  
Nodarse



## 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 el candidato:

**GUILLERMO ANDRÉS RIVAS VALLADARES**

“EVALUACIÓN AMBIENTAL DE LOS SEDIMENTOS DE LOS ESTEROS ALHUÉ Y CARÉN COMO PARTE DE APOYO AL PROCESO DE REVISIÓN DE NORMAS DE EMISIÓN”

Ha sido aprobado por la comisión de evaluación, en cumplimiento parcial de los requisitos para optar al título de Químico Ambiental.

### COMISIÓN DE EVALUACIÓN

*Dra. Isel Cortés Nodarse*  
**Director de seminario de título**

*Dra. Isel Cortés Nodarse*  
**Profesor patrocinante**

*Prof. María Inés Toral*  
**Corrector**

*Prof. Irma Vila P.*  
**Corrector**

  
  
*M. Inés Toral*  
*Irma Vila P.*



17 de octubre de 2013

## BIOGRAFÍA



Nace en el año 1985, proveniente de las lejanas tierras de Arica, desarrolla sus estudios escolares hasta el término de los mismos, fecha en la cual decide emigrar a la ciudad de Santiago, impulsado por deseos propios y consejos maternos. Una vez en la ciudad dedica su tiempo a otras actividades y después de otros intentos de ingresar a la universidad, ingresa en el año 2006 a la carrera de química ambiental en la universidad de Chile, durante el año 2008 congela sus estudios, para trabajar y reunir fondos para poder continuar estudiando; el año 2009 reingresa en la universidad y egresa de la misma el año 2012, fecha desde la cual desarrolla su seminario de título, para dar fin a su carrera universitaria en el año 2013.

## AGRADECIMIENTOS

Considero importante recalcar que este espacio, sólo alberga lo que quizás es una gota en el mar, sin embargo, representa una de las cosas más importantes a la hora de dar término a un periodo de la vida, para agradecer a aquellos más cercanos.

Principalmente quiero agradecer a mis padres José y Ruth, mis hermanos Margarita y José y mis sobrinos Daniel, Nicolás y Catalina, en general por su soporte y amor durante este difícil camino; a mis tías Ida y Jeanette por su gran cariño y apoyo; a mis primos más cercanos y a mi familia en general; a mis compañeros, por esas largas jornadas y noches de estudio y diversión, los cuales estoy seguro, serán grandes profesionales el día de mañana; a mis amigos más cercanos, los cuales saben que pueden contar en cualquier momento conmigo; a mis profesores que brindaron el soporte de mi educación; a Javier por ser mi primer amigo en este camino universitario, su hermana Sofía y su madre Carolina, por representar un gran apoyo en este camino, el cual dudo hubiera podido finalizar sin su comprensión y ayuda.

No podría terminar esta página, sin antes mencionar todo el esfuerzo y sacrificio de mi madre, por ser la mujer más tenaz y trabajadora que conozco, por sacar adelante sus ideales y educar a sus hijos con muchos obstáculos, pero nunca dando su brazo a torcer, a pesar de las adversidades; por su esencia que dimana de la fortaleza y su infinita consecuencia impulsada por su gran amor. Sin su apoyo y compañía, nada de esto hubiera siquiera comenzado; en este pedacito de texto te doy las gracias, por enseñarme que la primera educación, fue la que me diste en casa y que forjó mi carácter hasta el día de hoy. Gracias madre mía por todo lo que has hecho por mí. Tu hijo que te ama.



## ÍNDICE



| CONTENIDO   | Pág. |
|---|------|
| I. INTRODUCCIÓN   | 1    |
| 1. Antecedentes   | 1    |
| 1.1. Descripción y utilización del agua   | 1    |
| 1.2. Extracciones de agua en la minería del cobre   | 3    |
| 1.2.1. Consumo de agua en la minería del cobre en Chile   | 3    |
| 1.3. Estero Carén   | 6    |
| 1.4. División El Teniente (CODELCO)   | 8    |
| 1.4.1. Breve descripción de los orígenes, desarrollo y explotación  | 8    |
| 1.4.2. Breve descripción del proceso productivo en la explotación de minerales de cobre y/u otros               | 10   |
| 1.4.3. Descripción del problema   | 14   |
| 1.4.4. Emisión de riles al estero Carén   | 15   |
| 1.4.5. Caracterización de los riles   | 16   |
| 1.4.6. Consecuencias medioambientales   | 20   |
| 1.5. Normas de emisión  | 23   |
| 1.6. Importancia del Decreto Supremo 90/2000  | 24   |
| 1.7. Origen legal del Decreto Supremo 80/2006   | 25   |
| 1.8. Decreto Supremo 80/06  | 26   |
| 1.8.1. Objeto y ámbito de aplicación  | 26   |
| 1.8.2. Límites máximos permitidos para descargas de residuos líquidos   | 27   |
| 1.8.3. Límites máximos permitidos para descargas de residuos líquidos desde tranques de relaves al estero Carén | 27   |
| 1.8.4. Programa y plazos de cumplimiento de la norma  | 28   |
| 1.8.5. Procedimientos de monitoreo y control  | 29   |
| 1.8.5.1. Frecuencia de monitoreo  | 29   |
| 1.8.5.2. Número de muestras   | 29   |
| 1.8.6. Criterios de cumplimiento de la norma  | 30   |
| 1.9. Fundamentos teóricos y alcance de los métodos  | 31   |
| 1.9.1. Fundamentos de la fluorescencia de rayos X   | 31   |
| 1.9.1.1. Objetivo   | 31   |
| 1.9.1.2. Alcance  | 31   |
| 1.9.1.3. Seguridad  | 32   |
| 1.9.1.4. Principio teórico y descripción de la actividad  | 32   |
| 1.9.2. Fundamentos de la determinación de sulfato por calcinación de residuo                                    | 34   |



|  |           |
|--|-----------|
| 1.9.2.1. Objetivo y alcance  | 34        |
| 1.9.2.2. Principios  | 34        |
| 1.9.2.3. Cálculos  | 35        |
| 1.9.2.4. Interferencias  | 35        |
| 1.9.2.4.1. Interferencias positivas  | 35        |
| 1.9.2.4.2. Interferencias negativas  | 36        |
| 1.9.3. Fundamentos de los métodos complementarios  | 37        |
| 1.9.3.1. Potencial redox   | 37        |
| 1.9.3.2. Materia orgánica  | 38        |
| 1.9.3.2.1. Alcance y aplicación  | 39        |
| 1.9.3.2.2. Cálculos  | 40        |
| 1.10. Objetivos del seminario  | 41        |
| 1.10.1. Planteamiento del problema   | 41        |
| 1.11. Objetivo general   | 41        |
| 1.11.1. Objetivos específicos  | 41        |
| <b>II. MATERIALES Y MÉTODOS</b>  | <b>43</b> |
| 3.1. Reactivos y soluciones  | 43        |
| 3.1.1. Soluciones  | 43        |
| 3.1.1.1. Solución indicadora de rojo de metilo   | 44        |
| 3.1.1.2. Ácido clorhídrico 1:1   | 44        |
| 3.1.1.3. Solución de cloruro de bario 10% p/v  | 44        |
| 3.1.1.4. Solución de ácido nítrico – nitrato de plata  | 44        |
| 3.1.1.5. Solución de dicromato de potasio 1N   | 44        |
| 3.1.1.6. Solución de ácido sulfúrico 0,5N  | 44        |
| 3.1.1.7. Solución de sulfato ferroso de aproximadamente 0,5N   | 45        |
| 3.1.1.8. Solución indicadora de difenilamina sulfonato de sodio                                      | 45        |
| 3.1.2. Materiales, equipos y/o aparatos utilizados   | 46        |
| 3.2. Métodos   | 47        |
| 3.2.1. Conservación de muestras, recipientes, manejo y almacenamiento                                | 47        |
| 3.2.2. Interferencias y problemas potenciales  | 49        |
| 3.2.3. Método de muestreo  | 50        |
| 3.2.3.1. Preparación   | 50        |
| 3.2.3.2. Recogida de muestras  | 52        |
| 3.2.3.3. Garantía de calidad / Control de calidad  | 57        |
| 3.2.4. Determinación de la composición elemental de suelos y sedimentos por fluorescencia de rayos X | 58        |
| 3.2.4.1. Preparación de la curva de calibración  | 58        |
| 3.2.4.2. Preparación de material de referencia   | 59        |
| 3.2.4.3. Protocolo de análisis   | 59        |

|             |  |           |
|-------------|--|-----------|
| 3.2.4.4.    | Control y aseguramiento de la calidad  | 62        |
| 3.2.4.4.1.  | Criterios de aceptabilidad   | 62        |
| 3.2.5.      | Determinación de sulfato disuelto por calcinación de residuo según norma Chilena 2313/18 Of 97 | 63        |
| 3.2.5.1.    | Procedimiento  | 63        |
| 3.2.5.1.1.  | Filtración previa  | 63        |
| 3.2.5.1.2.  | Método de eliminación de la sílice y de la materia orgánica                                    | 63        |
| 3.2.5.1.3.  | Precipitación de sulfato de bario  | 65        |
| 3.2.5.1.4.  | Filtración y pesada  | 66        |
| 3.2.6.      | Métodos complementarios  | 67        |
| 3.2.6.1.    | Potencial redox  | 67        |
| 3.2.6.1.1.  | Procedimiento  | 67        |
| 3.2.6.2.    | Materia orgánica   | 68        |
| 3.2.6.2.1.  | Toma de muestra, almacenamiento y preservación   | 68        |
| 3.2.6.2.2.  | Procedimiento  | 68        |
| 3.2.6.2.3.  | Determinación de la materia orgánica   | 69        |
| 3.2.6.2.4.  | Calibración  | 70        |
| <b>III.</b> | <b>RESULTADOS</b>  | <b>72</b> |
| 3.          | Localización de zonas de muestreo y expresión de resultados                                    | 72        |
| 4.1.        | Caracterización de las zonas de estudio  | 74        |
| 4.2.        | Resultados para molibdeno desglosados por zona   | 78        |
| 4.2.1.      | Zona 1   | 78        |
| 4.2.2.      | Zona 2   | 78        |
| 4.2.3.      | Zona 3   | 78        |
| 4.2.4.      | Zona 4   | 79        |
| 4.3.        | Resultados para sulfato desglosados por zona   | 79        |
| 4.3.1.      | Zona 1   | 79        |
| 4.3.2.      | Zona 2   | 80        |
| 4.3.3.      | Zona 3   | 80        |
| 4.3.4.      | Zona 4   | 80        |
| 4.4.        | Resumen de los valores de las concentraciones más significativas en las zonas de muestreo      | 81        |
| <b>IV.</b>  | <b>DISCUSIÓN</b>   | <b>83</b> |
| <b>V.</b>   | <b>CONCLUSIONES</b>  | <b>87</b> |
| <b>VI.</b>  | <b>REFERENCIAS</b>   | <b>91</b> |
| <b>VII.</b> | <b>ANEXOS</b>  | <b>94</b> |

## ÍNDICE DE TABLAS

| <b>Tabla</b>  | <b>Pág.</b> |
|---|-------------|
| <b>Tabla 1.</b> Límites máximos en mg/l del alcance del DS 80/2006.   | 27          |
| <b>Tabla 2.</b> Materiales de vidrio, plástico y otros.   | 46          |
| <b>Tabla 3.</b> Principales equipos y/o aparatos utilizados en terreno y/o laboratorio.   | 47          |
| <b>Tabla 4.</b> Descripción de las zonas de muestreo y condiciones en la toma de muestra.   | 74          |
| <b>Tabla 5.</b> Resumen de resultados de los valores de parámetros fundamentales, en sedimentos como componente fundamental de los ecosistemas lóticos que conforman los esteros Alhué y Carén. | 76          |
| <b>Tabla 6.</b> Parámetros complementarios en muestras de sedimentos en las diferentes estaciones de muestreo.  | 77          |
| <b>Tabla 7.</b> Valores que exceden los valores establecidos por DS 80/2006 asumiendo que la norma aplicara en sedimentos.  | 81          |
| <b>Tabla 8.</b> Concentración de sulfato en las muestras de agua de las distintas zonas de estudio.   | 82          |
| <b>Tabla 9.</b> Códigos y coordenadas de las muestras con fechas de muestreo y recepción en CENMA.  | 95          |
| <b>Tabla 10.</b> Parámetros complementarios de las muestras de aguas según estación.  | 99          |
| <b>Tabla 11.</b> Concentraciones y otros parámetros para sulfato y molibdeno en las muestras analizadas.  | 102         |



## ÍNDICE DE FIGURAS

| <b>Figura</b>   | <b>Pág.</b> |
|---|-------------|
| <b>Figura 1.</b> Procesamiento de minerales sulfurados por flotación.   | 3           |
| <b>Figura 2.</b> Procesamiento hidrometalúrgico de producción de cobre.   | 4           |
| <b>Figura 3.</b> Procedencia y porcentaje de agua utilizado por división El Teniente de CODELCO.  | 5           |
| <b>Figura 4.</b> Embalse Carén, comuna de Alhué.  | 7           |
| <b>Figura 5.</b> Destino de las exportaciones de cobre realizadas por Chile en porcentaje.  | 14          |
| <b>Figura 6.</b> Ciclo del azufre.  | 18          |
| <b>Figura 7.</b> Esquema de la emisión de la radiación de fluorescencia de rayos X.   | 33          |
| <b>Figura 8.</b> Ilustración de la inspección en terreno de los materiales e insumos disponibles.   | 50          |
| <b>Figura 9.</b> Condiciones del muestreo: uso de implementos de seguridad personal (botas, guantes, cuerda de vida), colocar los instrumentos para medición en terreno, pala y frasco listos para tomar la muestra de sedimento. | 53          |
| <b>Figura 10.</b> Toma de muestras introduciendo la pala en sentido aguas arriba de la corriente y colocando la muestra en frasco plástico de boca ancha.   | 54          |
| <b>Figura 11.</b> Condiciones de registro de información en terreno.  | 55          |
| <b>Figura 12.</b> Utilización de una pala para extraer una porción mayor desde la cual se extrae otra muestra para el ensayo.   | 56          |
| <b>Figura 13.</b> Localización de las estaciones de muestreo de los esteros Alhué y Carén.  | 73          |
| <b>Figura 14.</b> Diagrama de potencial en función del pH del molibdeno. $C=10^{-2}$ M.   | 85          |
| <b>Figura 15.</b> Estaciones E1, E2 y E3.   | 106         |
| <b>Figura 16.</b> Estaciones E4, E5 y E6.   | 106         |
| <b>Figura 17.</b> Estaciones E7, E9 y E10.  | 107         |
| <b>Figura 18.</b> Estación E8.  | 107         |
| <b>Figura 19.</b> Estación 11.  | 108         |

## RESUMEN

En función del importante crecimiento que experimenta la minería en Chile, se genera una problemática ambiental debido al aumento en la producción y un deterioro en el medio ambiente por la descarga de riles (principalmente suelos). Las normas que regulan las emisiones, no siempre son respetadas por los establecimientos, lo que plantea el trabajo realizado, en el cual se revisa una norma de carácter “especial” para la División El Teniente de Codelco. Esta norma (DS 80/2006) corresponde a un decreto que sólo regula de manera unilateral a la división antes mencionada, esta norma tiene una gran particularidad, ya que, permite a la empresa, emitir por lo menos el doble de concentración en cuanto a sulfato ( $\text{SO}_4^{-2}$ ) y molibdeno (Mo), con niveles establecidos de 2000 ppm y 1,6 ppm (mg/l) respectivamente. Todas las empresas emisoras que se encuentran regidas en el país, lo hacen mediante el DS 90/2000, en el cual las concentraciones para los analitos anteriormente mencionados, corresponden a 1000 mg/l y 0,7 mg/l respectivamente.

Todos los procedimientos necesarios para realizar los análisis son descritos de manera detallada. La determinación de sulfato se realizó mediante calcinación de residuo y masada (gravimétricamente) según NCh 2313/18 Of. 97, mientras que la determinación de molibdeno se realizó por fluorescencia de rayos X (FRX), método basado en EPA 6200. También se midieron parámetros complementarios. Muchos de los sedimentos analizados arrojaron resultados muy elevados en cuanto a los contenidos de ambos analitos de interés, sin embargo, los resultados de las muestras de agua, se encuentran dentro de la norma. La norma sólo establece estos criterios para cuerpos

de agua y no aplica en este caso a los sedimentos. Se discute detalladamente las concentraciones de analito y su impacto. Las concentraciones más relevantes de este estudio corresponden a las estaciones E10 y E11, las cuales presentan niveles extremadamente altos en relación a los términos de la norma (la cual no aplica en este caso por ser sedimento) encontrando concentraciones de hasta 321 mg/Kg de molibdeno y 22.249 mg/l de sulfato.

De acuerdo a los resultados obtenidos, se puede concluir que es necesario regular de manera más eficaz este tipo de descargas, ya que, la acumulación de los analitos durante el tiempo, se ve reflejada en los sedimentos de la zona.

## ABSTRACT

Due to significant growth experienced by the mining industry in Chile, it generates an environmental problem due to increased production, and a deterioration in the environment by the discharge of liquid waste (mainly in sediments). The rules governing emissions are not always achieved by the establishments, which raises the work in which we review a "special" standard for Codelco's El Teniente Division. This standard (SD 80/2006) corresponds to a decree unilaterally that only regulates the Division above, this rule has a great feature because it allows the company to discharge at least twice of the concentration in terms of sulfate ( $\text{SO}_4^{-2}$ ) and molybdenum (Mo), with set levels of 2000 ppm and 1.6 ppm (mg/l) respectively. All companies are governed stations in the country, they do so by SD 90/2000, where the concentrations for the before mentioned analytes correspond to 1000 mg/l 0.7 mg/l respectively.

All procedures involved in the analysis are described in detail. Dissolved sulphate determination was performed by calcining the residue and weighted (gravimetric) as NCh 2313/18 Of. 97, while determination of molybdenum was performed by X-ray fluorescence (XRF) method based on EPA 6200. Additional parameters were also measured. Many sediments yielded very high results analyzed concerning the contents of both analytes of interest, however, the results of the water samples are within the norm. The rule only establishes the criteria for water bodies and does not apply in this case to the sediments. Detailed discussion about analyte concentrations and impact are specified. Relevant concentrations in this study correspond to E10 and E11 stations, which have extremely high in relation to the terms of the standard (which does not apply in this case for being sediment samples) concentrations found to 321 mg/kg molybdenum and 22.249 mg/l sulfate.



According to the results obtained, we can conclude that it is necessary to regulate more effectively such discharges, because the accumulation of analyte reflects in the zone sediments over the time.

## **I. INTRODUCCIÓN**

### **1. Antecedentes**

#### **1.1. Descripción y utilización del agua**

El agua es un recurso escaso que está sometido a una creciente demanda debido al aumento demográfico, la hidrología, el consumo de agua potable, la minería y otros. La disponibilidad de este recurso está siendo limitada debido al gran aumento de la contaminación, producto de las grandes descargas domiciliarias y residuos tóxicos sobre cuerpos de agua.

Sólo el 1% del agua existente en nuestro planeta puede ser aprovechado hasta ahora por los seres vivos. El 97% se encuentra en los océanos y el 2% restante está congelada. Y esto nos habla de la potencialidad que tiene a futuro el recurso agua. Los recursos hídricos se encuentran en la atmósfera, en la superficie territorial o en el subsuelo. En estos tres tipos de recipientes naturales, el agua se halla almacenada y disponible para su uso por parte de los seres vivos (Hernández, 1999).

El consumo de agua en la actualidad está incrementando de acuerdo a las necesidades y objetivos para el crecimiento del país y su desarrollo. El consumo del agua incluye todas aquellas actividades, en las cuales el uso del agua produce pérdidas en relación a la cantidad inicial suministrada. Por ejemplo, los consumos urbanos e industriales.

El agua utilizada en procesos industriales, por ejemplo en la minería, puede ser reutilizada, debido a la implementación de nuevos procesos que permiten eliminar los contaminantes que estas aguas han incorporado durante los procesos industriales (COCHILCO, 2008).

En lo que concierne a la industria minera, sus procesos son altamente dependientes de un continuo acceso y consumo de agua para su desarrollo, por ende constituye un recurso estratégico para la actividad. Si se considera que la minería en Chile se desarrolla esencialmente en la zona norte del país, la cual es una zona de extrema aridez en la que el agua tanto superficial como subterránea es un bien escaso, el agua constituye un insumo crítico, estratégico y de alto costo, por lo tanto, la disponibilidad y gestión del agua resultan clave en la minería.

En el año 2008 la mesa público privada nacional de la gestión del recurso hídrico, generó información clave, utilizando datos sólo hasta el año 2006, sobre la situación de la minería respecto al recurso hídrico a través del estudio "Derechos, extracciones y tasas unitarias de consumo de agua del sector minero, regiones centro-norte de Chile", elaborado por Proust Consultores (representando al Consejo Minero y la Sociedad Nacional de la Minería) en conjunto con la Dirección General de Aguas. Este trabajo fue el paso inicial en dar a conocer los consumos de agua de la minería en el país y además, informar sobre los avances del sector en la eficiencia en el consumo unitario de agua fresca en los procesos de concentración e hidrometalurgia en el periodo 2000-2006. (COCHILCO, 2010).

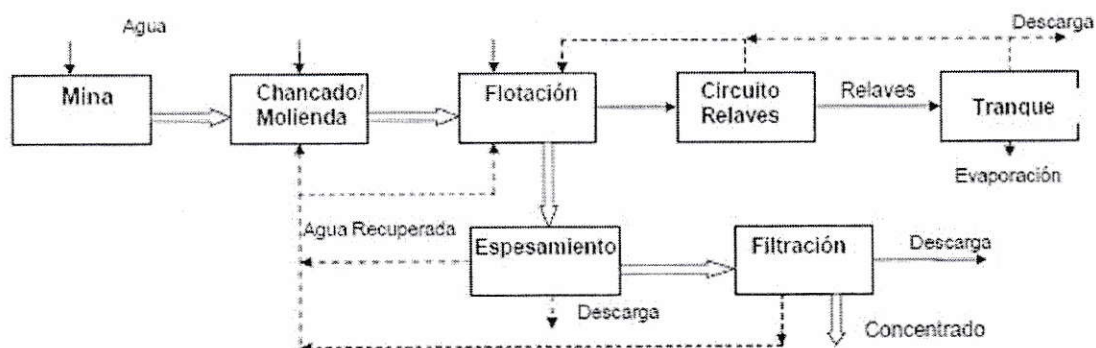
## 1.2. Extracciones de agua en la minería del cobre

### 1.2.1. Consumo de agua en la minería del cobre en Chile

El consumo de agua incluye todas aquellas actividades en las que el uso de agua produce pérdidas en relación a la cantidad inicial suministrada.

En la minería del cobre, el agua se utiliza fundamentalmente en el proceso de concentración para la producción de concentrados, y en el proceso hidrometalúrgico para la producción de cátodos. En particular, dentro de la cadena productiva del cobre, el agua utilizada en el procesamiento de minerales representa el mayor consumo de agua con respecto a los volúmenes totales.

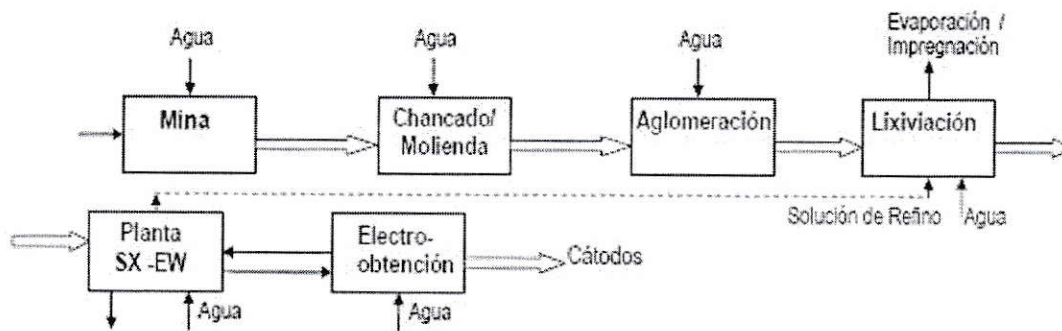
En las plantas concentradoras el tratamiento de minerales sulfurados involucra los siguientes procesos, ilustrados en la Figura 1.



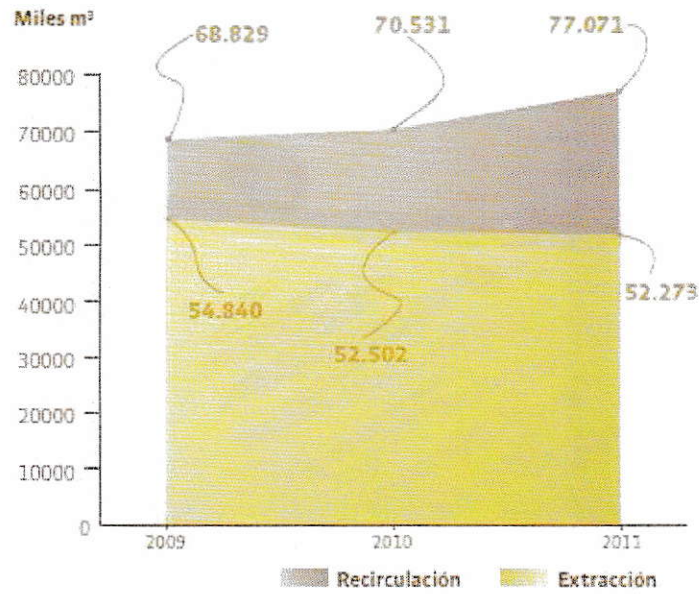
**Figura 1.** Proceso de minerales sulfurados por flotación, para la obtención de concentrado de cobre.



En tanto la recuperación de cobre a partir de minerales oxidados y de algunos sulfuros secundarios de cobre, se hace a través del proceso hidrometalúrgico, que consta de los procesos de lixiviación (LX), extracción por solventes (SX) y electro-obtención (EW) (Figura 2). Los factores más variables en cuanto a consumo de agua, son la evaporación en las pilas, el descarte de soluciones (el que depende, entre otros factores, de la cinética de dilución del mineral) y el lavado de las soluciones orgánicas (COCHILCO, 2010).



**Figura 2.** Proceso hidrometalúrgico de producción de cobre para la obtención de cátodos de cobre.



**Figura 3.** Procedencia y porcentaje de agua utilizado por división El Teniente de CODELCO.

La Figura 3 muestra la cantidad de agua utilizada por la división El Teniente y las cantidades que se utilizan tanto de la extracción como de la recirculación (agua recuperada). Del total de agua captada por El Teniente, el 89,4% proviene de fuentes superficiales y sólo 0,9% proviene de aguas subterráneas. La proporción restante y minoritaria, corresponde a aguas minas y red pública (CODELCO, 2013)

### 1.3. Estero Carén

El embalse Carén (Figura 4) desde el año 1987 forma parte de la infraestructura principal del sistema productivo del cobre de la Estatal Chilena CODELCO y su División El Teniente, es un depósito donde se van almacenando los relaves generados por dicha faena minera. Está ubicado al interior de la Hacienda Loncha (propiedad de Codelco) en el valle del estero Carén, comuna de Alhué, provincia de Melipilla, Región Metropolitana de Santiago, Chile. Nace aproximadamente a 20 Km al oeste de Rancagua, recorre aproximadamente 10 Km hasta formar una laguna homónima (el embalse), la cual se estrecha para recorrer otros 6,8 Km y desembocar en el estero Alhué. Ambos esteros son subsidiarios de la cuenca del río Rapel, que tras unirse avanzan 19 Km para desaguar finalmente en el embalse del mismo nombre (Beltrán, 2007).

Esta gran obra de ingeniería de la División El Teniente de CODELCO fue realizada para depositar con seguridad los relaves de la mina. Desde los inicios de la explotación del yacimiento El Teniente, en 1905, se manifestó la necesidad de depositar los materiales descartados de la extracción cuprífera, en embalses. Grandes dificultades geográficas, de orografía y relieve, fueron superadas para conducir, por medio de canoas, la masa de relave hacia dichos grandes tranques artificiales. Desde 1987 hasta la actualidad, el embalse Carén es el depositario de los relaves de El Teniente. Fue construido en dicho lugar aprovechando las características de la hoya hidrográfica del estero Carén, en la provincia de Melipilla.



La planta concentradora de Colón (dentro de la división) es el punto de inicio desde el cual se conducen los relaves hasta el valle del estero Carén. La conducción del relave se efectúa con las tecnologías, diseños y materiales más avanzados, a través de cascadas, sifones, túneles, puentes y otras obras de ingeniería, hasta el embalse. Son 87 kilómetros, en los que no existe pérdida de material de relave. La canalización del relave desde Colón a Carén ha exigido de muchos estudios y grandes obras, como el túnel Carén de 10 km de longitud, y el sifón que posibilita sortear el río Cachapoal. Un sistema de evacuación de las aguas del embalse, incluyendo una torre de hormigón empotrada en la ladera del cerro, túnel y canal de descarga, permite controlar el vaciado de las aguas hacia el estero Carén. Estas aguas que se separan (por decantación) del relave son denominadas Aguas Claras (CODELCO, 2013).



**Figura 4.** Embalse Carén, comuna de Alhué.



#### **1.4. División El Teniente (CODELCO)**

La mina El Teniente (formalmente llamada CODELCO División El Teniente), es una mina de cobre chilena, ubicada bajo el cerro del mismo nombre, en la comuna de Machalí, Región del Libertador General Bernardo O'Higgins. Se localiza aproximadamente a 120 kilómetros al sur de Santiago, a 50 kilómetros al Este de la ciudad de Rancagua y a 2.300 m.s.n.m.

El Teniente se compone de más de 3.000 km de galerías subterráneas, por lo que se considera la mina subterránea de cobre más grande del mundo. Se puede acceder a ella mediante la Carretera del Cobre, construida en la década de 1960 especialmente para acceder a la mina.

##### **1.4.1. Breve descripción de los orígenes, desarrollo y explotación**

La mina ha sido trabajada desde antes de la llegada de los Españoles, por las culturas precolombinas. En el periodo de la Conquista, fue explotada por los españoles, quienes enviaban cobre al Virreinato del Perú, principalmente para la fabricación de cañones y utensilios domésticos (calderos, jarros, campanas y ollas).

En 1897 la mina El Teniente fue comprada por Enrique Concha y Toro, quién vendería la mina, a través del ingeniero de minas Marcos Schiapponi, al norteamericano William Braden en 1903. Así se inició la industrialización del complejo minero.

A través del tiempo, la Corporación del Cobre, adquirió en 1967 el 51% de las acciones de la Braden Copper Co., en el marco de la "Chilenización" del cobre iniciada por el gobierno de Eduardo Frei Montalva, debido a que la mayor parte correspondía a inversionistas extranjeros. Al mismo tiempo, el mineral pasó a manos de la Sociedad Minera El Teniente S.A.

El proceso concluyó en 1971, con la «Nacionalización del cobre», en el gobierno de Salvador Allende, donde el Estado expropió la totalidad de las acciones de la Sociedad Minera. Ese mismo año se inició la "Operación Valle", consistente en el traslado de los habitantes del campamento Sewell a Rancagua, ya que el Estado no podía asumir los gastos del poblado cordillerano, y la posterior construcción de la Carretera del Cobre. En 1976, el mineral pasó a manos de la Corporación Nacional del Cobre de Chile (CODELCO).

En la década de 1980 se empezó hacer evidente un agotamiento del mineral secundario y se dio comienzo a la explotación del mineral primario, es decir, roca más dura y de menor ley que el anterior. Esto ha significado la incorporación de nuevos equipos mecánicos, eléctricos y electro-hidráulicos, lo que ha provocado un aumento del consumo de energía eléctrica y por consiguiente una elevación del costo de producción.

Al año 2006, la mina producía 418.332 toneladas métricas finas anuales de cobre, que se procesan en el mismo complejo minero y luego se envían a la fundición Caletones, donde se produce el producto final de lingotes refinados a fuego (RAF) y ánodos de cobre.

Además como subproductos se obtiene molibdeno (4.749 toneladas métricas, año 2006), ácido sulfúrico, plata y oro.

El año 2012 las ventas físicas de cobre llegaron a 1.602 millones de tmf (tonelada métrica fina), de producción propia. (CODELCO, 2013).

#### **1.4.2. Breve descripción del proceso productivo en la explotación de minerales de cobre y/u otros.**

Una serie de pasos son necesarios en la producción de cobre, a continuación se da una visión explicativa muy breve en relación a los procesos que se llevan a cabo.

##### **a) Exploración geológica**

En la exploración se identifica la presencia de un yacimiento y sus características, se determina la ley de mineral y la forma de explotarlo.

##### **b) Extracción**

Las rocas mineralizadas extraídas de la mina (a rajo abierto o subterránea) y de un tamaño adecuado, son cargadas y transportadas a la planta en camiones o tren en forma eficiente y segura, para continuar el proceso productivo del cobre.

##### **c) Distintos procesos de refinación de cobre**

Existen dos formas de extraer el cobre de las rocas mineralizadas del tipo de mineral. Para los minerales oxidados, el proceso productivo implica someter el material a una solución de lixiviación, luego a un proceso de extracción con solventes y

posteriormente a un sistema de electroobtención. En el caso de los minerales sulfurados pasan primero por el chancado y la molienda, para ser fundidos y luego electrorefinados.

En ambos casos como resultado final se obtienen cátodos de cobre con 99,99% de pureza.

#### **d) Chancado**

A partir de las etapas de chancado primario y secundario (eventualmente terciario), se obtiene un material mineralizado de un tamaño máximo de 1,5 a 1,¾ pulgadas, el que se ordena en pilas para realizar la lixiviación.

En tres etapas y utilizando grandes chancadores eléctricos, se reduce el tamaño de los fragmentos más grandes de material mineralizado que vienen de la mina, hasta obtener un tamaño uniforme de no más de ½ pulgada (1,27 cm).

#### **e) Molienda**

Mediante el trabajo de molinos, se continúa reduciendo el tamaño de las partículas de mineral hasta obtener un tamaño máximo de 180 micrones (0,18 mm), con el que se forma una pulpa con agua, espumantes, activadores y depresores, la cual se lleva a flotación.

#### **f) Flotación**

En las celdas de flotación, se genera espuma cuyas burbujas arrastran el cobre y otros minerales sulfurados contenidos en la pulpa, mediante hidrofobicidad del mineral que permite su adherencia a éstas. Luego de varios ciclos, se recolecta y seca esta espuma para obtener el concentrado de cobre que continúa su purificación.

#### **g) Fundición**

Para separar el cobre de otros minerales e impurezas, el concentrado de cobre seco se trata a grandes temperaturas en hornos especiales. Luego de varios procesos se obtiene cobre RAF (refinado a fuego) el que es moldeado en placas de un peso aproximado de 225 kg llamadas ánodos.

#### **h) Electrorrefinación**

Los ánodos provenientes de la fundición se llevan a celdas electrolíticas para su refinación. De este proceso se obtienen cátodos de alta pureza o cátodos de cobre electrolítico de 99,99% de cobre y de un peso entre 70 y 80 kg.

#### **i) Lixiviación**

Sobre las pilas de material mineralizado se riega una solución de agua con ácido sulfúrico que disuelve el cobre contenido en los minerales oxidados, formando una solución de sulfato de cobre, que se purifica y se concentra antes de llevarla a la electroobtención.



#### **j) Electroobtención**

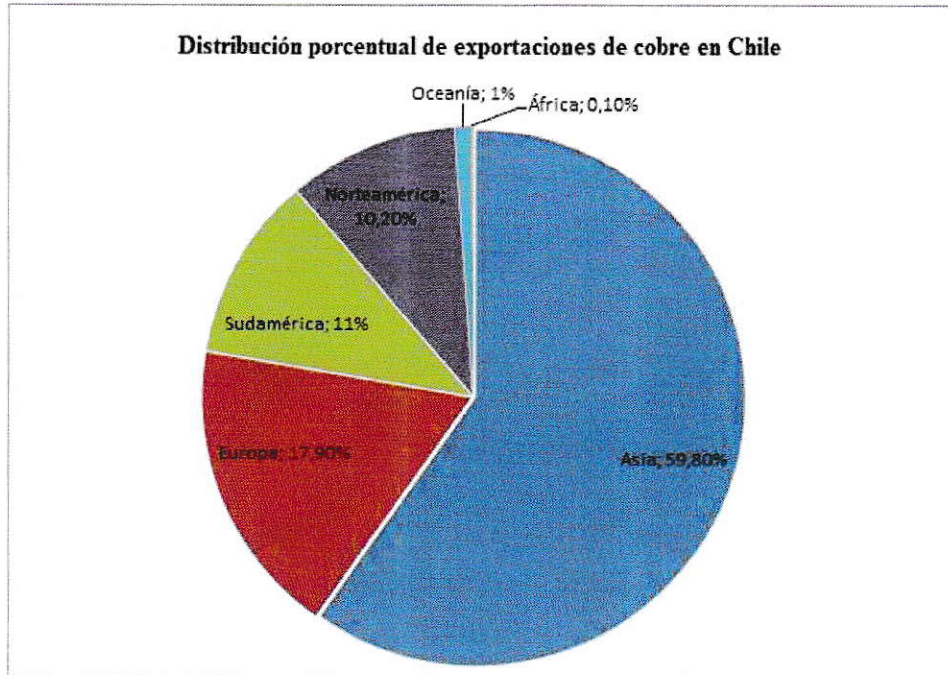
El proceso de electroobtención consiste en una electrólisis mediante la cual se recupera el cobre de la solución proveniente de la lixiviación, obteniéndose cátodos de alta pureza (99,99%).

#### **k) Cátodos**

Los cátodos, los cuales son un producto con un nivel superior al 99,99% de pureza, obtenidos del proceso de electrorrefinación y de electroobtención son examinados cuidadosamente para asegurar la calidad, y aquellos seleccionados son apilados, pesados y enzunchados para su despacho.

#### **l) Exportación**

Los cátodos son despachados en trenes o camiones a los puertos de embarque y luego enviados por mar a los diferentes clientes en el mundo, con distinta presencia en los continentes. En la Figura 5 se puede apreciar la distribución global de las exportaciones.



**Figura 5.** Destino de las exportaciones de cobre realizadas por Chile en porcentaje.

#### 1.4.3. Descripción del problema

El D.S. 90/2000 tiene como objetivo, la protección ambiental para prevenir la contaminación de las aguas marinas y continentales superficiales de la República de Chile, mediante el control de contaminantes asociados a los residuos líquidos que se descargan a estos cuerpos receptores.

La norma de emisión del D.S. N° 90/2000, fue elaborada teniendo en consideración los siguientes criterios (DS 90/2000):

- a. Cantidad máxima permitida para un contaminante, medida en el efluente de la fuente emisora.
- b. Objetivos de protección ambiental y resultados esperados.
- c. Ámbito territorial de aplicación de la norma.
- d. Tipos de fuentes reguladas.
- e. Plazo de entrada en vigencia.
- f. Programa y plazos de cumplimiento.
- g. Metodologías de medición y control.
- h. Instituciones que fiscalizan.

Todos los establecimientos emisores que se encuentran dentro de la categoría señalada por el decreto, deben cumplir con los límites dispuestos por la misma, sin embargo desde hace algunos años se viene dando una situación excepcional que afecta a la división El Teniente de CODELCO, a través del DS 80/2006.

#### **1.4.4. Emisión de riles al estero Carén**

A comienzos de 2006, se desató una gran polémica derivada de los riles emitidos al estero Carén por la División El Teniente de CODELCO, los cuales eran almacenados en un embalse de relave. La minera “deposita sus relaves en el tranque Carén desde el año 1987, donde se han realizado cuatro etapas de ampliación del muro”<sup>1</sup>. En este periodo la población ha debido abastecerse a través de norias o de manera externa, pues el agua del estero en que se drenan los relaves no es apta para beber.

---

<sup>1</sup> Información en [www.codelco.com/prensa](http://www.codelco.com/prensa) (15/05/06)

Se discute acerca de las concentraciones de diversos minerales presentes en el estero Carén, las que son peligrosas tanto para el consumo humano, como para el desarrollo de la agricultura en la zona.

Esta situación se vio agravada el 16 de abril de 2006, fecha en que se derramaron más de 10 mil litros de relave en el estero Carén, produciéndose un grave daño ecológico, extendiéndose la contaminación por todo el cauce. El hecho motivó al Seremi de Salud de la Región Metropolitana a ordenar la “limpieza total del fondo del cauce del estero y sus riberas” (Beltrán 2007).

#### **1.4.5. Caracterización de los riles**

##### **a. Sulfato**

El ión sulfato,  $\text{SO}_4^{-2}$ , corresponde a sales de moderadamente solubles a muy solubles en agua, entre las que podemos mencionar sulfato de bario ( $\text{BaSO}_4$ ), sulfato de magnesio ( $\text{MgSO}_4$ ), sulfato de calcio ( $\text{CaSO}_4$ ), entre otras. Las aguas dulces contienen de 2 a 150 mg/L, y el agua de mar cerca de 3000 mg/L. Aunque en agua pura se satura a unos 1500 mg/L, como  $\text{CaSO}_4$  la presencia de otras sales aumenta su solubilidad.

Proceden de rocas sedimentarias, sobre todo yeso y anhidrita, y en menor proporción de la oxidación de los sulfuros de la pirita. En función del contenido de calcio, podrían impartirle un carácter ácido al agua.

Los sulfatos de calcio y magnesio contribuyen a la dureza del agua y constituyen la dureza permanente. El sulfato de magnesio confiere al agua un sabor amargo.

Un alto contenido de sulfato puede proporcionar sabor al agua y podría tener un efecto laxante, sobre todo cuando se encuentra presente magnesio, esto debido al equilibrio osmótico que se produce en presencia de la sal y por consiguiente una disminución de la absorción de agua en el intestino, esto a su vez produce una mayor acumulación de agua en el intestino, lo que activa la dilatación del mismo. Este efecto es más significativo en niños y consumidores no habituados al agua que presenta estas condiciones (presencia de sulfato).

Cuando el sulfato se encuentra en concentraciones excesivas en el agua ácida, le confiere propiedades corrosivas. Algunos centenares de mg/L perjudican la resistencia del hormigón. Industrialmente es importante porque, en presencia de iones calcio, se combina para formar incrustaciones de sulfato cálcico.

La remoción de sulfato puede resultar costosa y requerir métodos complicados, por lo cual es preferible elegir fuentes naturales con niveles de sulfato por debajo de los límites aconsejados. El método más empleado para realizar su eliminación es por intercambio iónico.

Por sus efectos laxantes, su influencia sobre el sabor y porque no hay métodos definidos para su remoción, la OMS recomienda que en aguas destinadas al consumo humano, el límite permisible no exceda 250 mg/L, pero indica, además, que este valor está destinado a evitar la probable corrosividad del agua. No afecta especialmente al agua en cantidades moderadas (Moreno, 2011).



La Figura 6 muestra el desarrollo del ciclo del azufre en la naturaleza, señalando de manera directa cual es la procedencia y destino del sulfato dentro de los procesos del ciclo. Las interacciones que se aprecian, suceden tanto en suelos, aire y aguas, sin embargo la forma más directa de interacción en cursos de aguas produce las mismas reacciones que se observan por precipitación de aguas lluvias en contacto con el suelo, teniendo como reacción una oxidación y posteriormente una reducción en ambientes anóxicos.

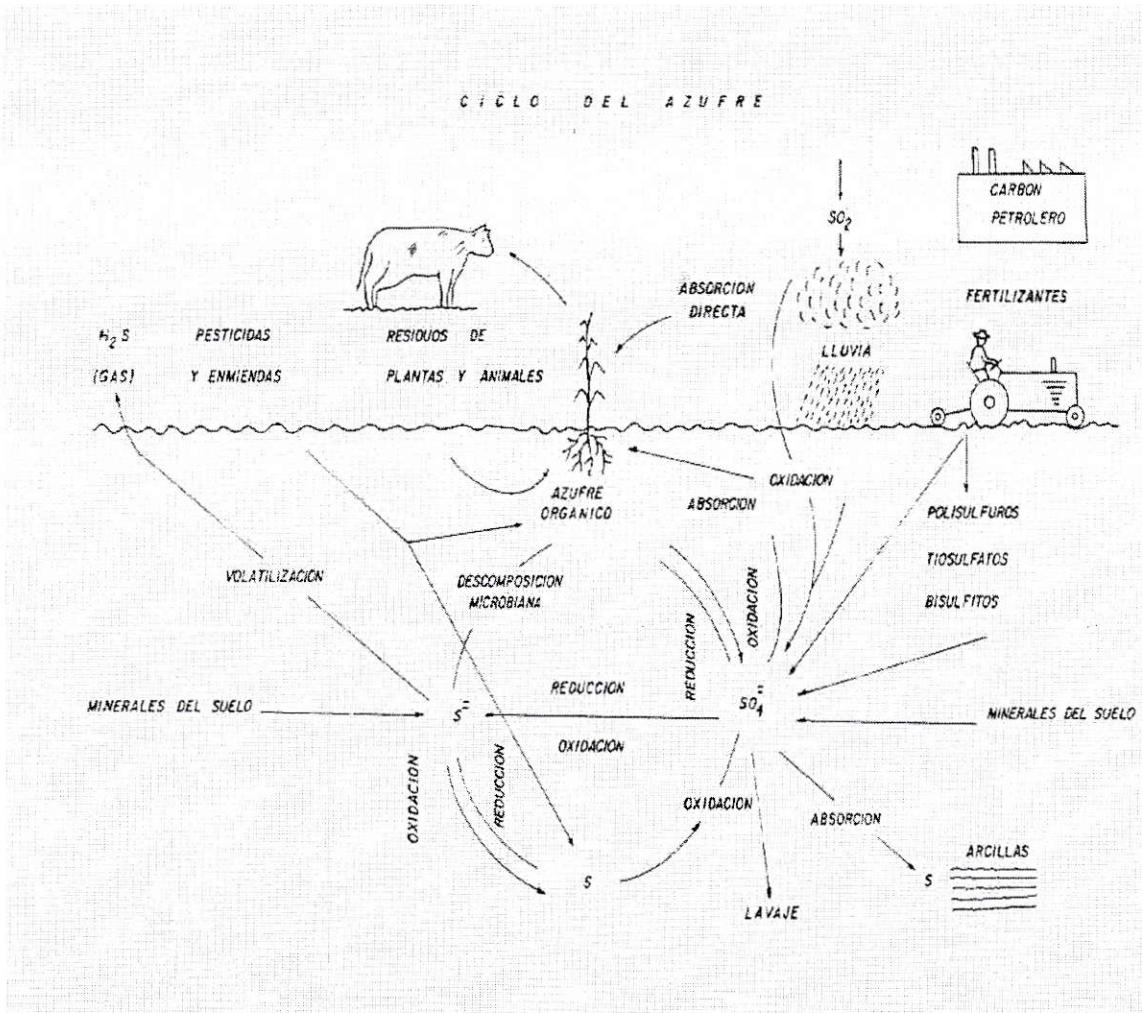


Figura 6. Ciclo del azufre.

## **b. Molibdeno**

El molibdeno (Mo) es un metal pesado que estimula el crecimiento de las algas, posiblemente interviniendo en el sistema enzimático que reduce el nitrógeno ( $N_2$ ) y los nitratos ( $NO_3^-$ ). En las zonas templadas donde los lagos pasan por los periodos de circulación de primavera y otoño, el molibdeno realiza un ciclo similar al del hierro. Durante el invierno es escaso, cuando los sedimentos se oxidan; aumenta al comienzo del verano, coincidiendo con la liberación de fósforo, y disminuye al final de éste, cuando empieza a incrementarse el  $H_2S$  en los fondos anóxicos (Roldán & Ramírez, 2008).

La mayoría de los compuestos de molibdeno tienen baja solubilidad en agua, pero el ion de molibdato  $MoO_4^{2-}$  es soluble y se forma cuando los minerales que contienen molibdeno están en contacto con el oxígeno y el agua. Algunas teorías recientes sugieren que la liberación de oxígeno era importante en la eliminación de molibdeno de un mineral en una forma soluble en los océanos primitivos, donde se utiliza como catalizador de los organismos unicelulares. Esta secuencia puede haber sido importante en la historia de la vida, porque las enzimas que contienen molibdeno se convirtieron en los catalizadores más importantes utilizados por algunas bacterias para descomponerlos en átomos de nitrógeno (Glenn D. Considine, 2005).

#### **1.4.6. Consecuencias medioambientales**

El derrame de relave del embalse Carén de la División El Teniente, de Codelco Chile, contaminó las norias de agua para riego y consumo humano y animal en la comuna de Alhué, Región Metropolitana.

En "todas las norias se analizó agua con elevados contenidos de sulfato y molibdeno, excediendo la norma de riego y agua potable", concluyó un informe del Servicio Agrícola y Ganadero (SAG).

Las aguas superficiales del estero que consumen los animales también mostraron altos niveles de sulfato y molibdeno "inaceptables para usar como bebida".

En una investigación acompañada con dramáticas fotos del daño en la flora y fauna en 17 kilómetros, el SAG concluyó que la contaminación "abarca prácticamente todo el cauce del estero Carén".

Los 10 mil litros que se salieron del relave generaron la muerte de innumerables peces, cinco vacunos, huida de aves y dañaron la flora silvestre. Debieron cortarse árboles y arbustos cercanos al cauce en las faenas de limpieza.

El SAG recordó que el sitio contaminado había sido destacado por Codelco por su riqueza faunística y la flora nativa, estableciendo un "humedal" con instalaciones para la observación de las especies, con un proyecto de enseñanza ecológica.

Incluso, apenas a 200 metros del estero hay extensos predios de viñas y frutales, que según algunos parceleros estarían dañados por el agua contaminada.

El SAG concluyó que el evento amerita ser seguido hasta rehabilitar el sitio afectado. También recomienda estudiar alternativas para que la comunidad prescinda del uso de las aguas del estero.

En las necropsias que se realizaron a los animales, se hallaron alteraciones en el sistema digestivo, inflamación y daño hepático, daño y congestión a nivel del bazo, hemorragias y enfisema pulmonar marcado, y material arenoso irritativo en los preestómagos, estos daños fueron ocasionados principalmente por ingesta y exposición a contaminantes provenientes de la división. Los daños hepáticos y digestivos fueron ocasionados principalmente por altas concentraciones de sulfato.

Los "resultados son concluyentes: en animales muertos la causa corresponde a intoxicación semiaguda por metales". En el ganado vivo ribereño en el estero se observa "intoxicación crónica por cobre".

La investigación se realizó en tres etapas: evaluar el estatus sanitario de los animales, ejecutar necropsias en terreno para visualizar lesiones, extraer una muestra de tejidos en los animales muertos, y evaluar los niveles séricos de metales pesados y bioquímica sanguínea en el ganado ribereño al estero Carén.

La seremi de Salud ordenó a Codelco efectuar "limpieza total del fondo del cauce del estero y sus riberas", en una resolución del 23 de mayo de 2006.



José Ignacio Gómez, director metropolitano del SAG, dijo que "hubo un efecto de contaminación agudo, pero no debería haber efectos crónicos. No quedan agentes contaminantes".

El diputado Gonzalo Uriarte, quien ha seguido de cerca el problema, dijo que la contaminación es "gravísima" porque afecta la cuenca de Alhué y la salud de las personas.

El parlamentario denunció que los servicios públicos obligados a fiscalizar la contaminación que se ha acumulado en los 20 años han estado "ausentes".

Los problemas potenciales que se generan en el sector corresponden principalmente a la presencia de contaminantes que no se encuentran biodisponibles, esto quiere decir, que no pueden ser metabolizados por los seres vivos, porque no se encuentran las condiciones físicas o químicas para su absorción. Uno de los parámetros más importantes corresponde al pH de las aguas, ya que, la disponibilidad de metales está relacionada directamente con esta variable.

### **1.5. Normas de emisión**

Establecen límites a la cantidad de contaminantes emitidos al aire o al agua que pueden producir las instalaciones industriales o fuentes emisoras en general. El objetivo de estas normas puede ser la prevención de la contaminación o de sus efectos, o bien ser un medio para restablecer los niveles de calidad del aire o del agua cuando éstos han sido sobrepasados. Su aplicación puede ser a nivel nacional o a nivel local dependiendo del objetivo de protección que tenga la norma. Estas normas se establecen mediante Decreto Supremo (DS), el que debe señalar su ámbito territorial de aplicación. Si se tratase de materias que no corresponden a un ministerio determinado, serán mediante decreto del Ministerio de Secretaria General de la Presidencia. El respectivo decreto se publica en el diario oficial (SINIA, 2010).

Corresponderá a la Ministerio del Medio Ambiente proponer, facilitar y coordinar la dictación de normas de emisión, para lo cual deberá sujetarse a las etapas señaladas en el artículo 32, inciso tercero (Ley 19.300, modificada por Ley 20.417), y en el respectivo reglamento, en lo que fueren procedentes, considerando las condiciones y características ambientales propias de la zona en que se aplicarán.

## **1.6. Importancia del Decreto Supremo 90/2000**

El DS 90/2000 es una norma de emisión para la regulación de contaminantes asociados a las descargas de residuos líquidos a aguas marinas y continentales superficiales.

La norma tiene como objetivo de protección ambiental prevenir la contaminación de las aguas marinas y continentales superficiales de la República, mediante el control de contaminantes asociados a los residuos líquidos que se descargan a estos cuerpos receptores. Con lo anterior, se logra mejorar sustancialmente la calidad ambiental de las aguas, de manera que éstas mantengan o alcancen la condición de ambientes libres de contaminación, de conformidad con la Constitución y las Leyes de la República (DS 90/2000), por lo tanto ésta regula los límites máximos permitidos en base a los efectos nocivos que éstos pueden presentar dentro de los ecosistemas y en general a los seres vivos, y es aquí donde reside la importancia del decreto para regular este recurso tan importante que se describió anteriormente.

### **1.7. Origen legal del Decreto Supremo 80/2006**

El Ministerio de la Secretaría General de la Presidencia (Segpres) presenta las razones que lo llevan a establecer la norma de emisión del DS 80 en los considerandos de la misma norma. En ellos se establece un resumen de lo obtenido en la “carpeta administrativa” que el organismo creó para el efecto de estudiar la factibilidad de la aprobación del decreto, así como las razones técnicas pertinentes.

En primer término -y de modo general-, enuncia en los considerandos 4º y 5º la procedencia de una norma territorial específica, debido a las especiales características que poseen las aguas en que se drenan los desechos industriales en cuestión. De este modo, resultaría procedente la aplicación de una excepción en el caso específico de los relaves emitidos al estero Carén, debido a la existencia de “antecedentes técnicos, económicos y ambientales”, según expone en el considerando 6º; aquellos “han sido revisados por diversos especialistas y autoridades en el proceso de elaboración de la norma” (considerando 8º).

La norma debió dictarse a través de un Decreto Supremo, según lo ordenado en el artículo 3º del “Reglamento para la dictación de normas de calidad ambiental y de emisión”, establecido en el Decreto Supremo Nº 93 de 1995. El Tribunal Constitucional, siguiendo al profesor Alejandro Silva Bascuñán, ha señalado que un “decreto supremo es aquella disposición de gobierno o administración del Estado que, fundada en la Constitución o en la ley, dicta el Presidente de la República con carácter especial y particular”. (Beltrán, 2007)



## **1.8. Decreto Supremo 80/2006**

### **1.8.1. Objeto y ámbito de aplicación**

Establécese la Norma de Emisión para Molibdeno y Sulfatos de Efluentes Descargados desde Tranques de Relaves al Estero Carén.

La presente norma tiene como objetivo ambiental la protección de los recursos hídricos del estero Carén, ubicado en la comuna de Alhué en la Región Metropolitana, mediante la regulación de las descargas al estero Carén de los residuos líquidos provenientes de tranques de relaves, que contengan sulfatos y molibdeno.

La norma de emisión establece las concentraciones máximas de sulfatos y molibdeno permitidas en los residuos líquidos que son descargados desde tranques de relaves al estero Carén, en la comuna de Alhué, Región Metropolitana.

Para efectos de esta norma se entiende por tranques de relaves, aquellos depósitos de relaves regulados por el D.S. Nº 86 de 1970, del Ministerio de Minería.

### 1.8.2. Límites máximos permitidos para descargas de residuos líquidos

Las descargas de residuos líquidos a que se refiere el presente decreto deberán cumplir con los límites máximos de concentración para sulfato y molibdeno establecidos, determinados de acuerdo a los resultados de los análisis que se efectúen, conforme a lo dispuesto en el ítem 1.8.6., respecto a los demás contaminantes, deberán cumplir con lo establecido en el DS 90/2000, del Ministerio Secretaría General de la Presidencia (Segpres), que establece la "Norma de emisión para la regulación de contaminantes asociados a las descargas de residuos líquidos a aguas marinas y continentales superficiales".

### 1.8.3. Límites máximos permitidos para descargas de residuos líquidos desde tranques de relaves al estero Carén

Se aplicarán los siguientes límites máximos permitidos, según la Tabla 1:

**Tabla 1.** Límites máximos en mg/L del alcance del DS 80/06.

| <b>Analito</b>                 | <b>Concentración<br/>(mg/L)</b> |
|--------------------------------|---------------------------------|
| Molibdeno (Mo)                 | 1,6                             |
| Sulfato ( $\text{SO}_4^{-2}$ ) | 2000                            |

#### **1.8.4. Programa y plazos de cumplimiento de la norma**

Los tranques de relaves que, a la fecha de entrada en vigencia de la presente norma, estén vertiendo sus residuos líquidos al estero Carén, deberán cumplir con los límites máximos de sulfatos y molibdeno establecidos en la presente norma, a contar del día 3 de septiembre del 2006.

Los tranques de relaves que viertan sus residuos líquidos al estero Carén, deberán informar los antecedentes existentes sobre la concentración ambiental de los contaminantes normados en las aguas del estero Carén y del suelo a su alrededor, en los plazos que señale la Dirección General de Aguas y el Servicio Agrícola y Ganadero, respectivamente.

## **1.8.5. Procedimientos de monitoreo y control**

### **1.8.5.1. Frecuencia de monitoreo**

La frecuencia del monitoreo será semanal de un día predeterminado a la semana.

### **1.8.5.2. Número de muestras**

Se obtendrá una (1) muestra compuesta representativa del volumen descargado el día de control.

Cada muestra compuesta estará constituida por doce (12) muestras puntuales tomadas cada dos (2) horas, cada una con alícuotas proporcionales a los respectivos volúmenes descargados en el intervalo de tiempo transcurrido entre dos (2) muestras puntuales.

Cada muestra puntual estará constituida por la mezcla homogénea de dos (2) submuestras de igual volumen, extraídas de acuerdo a las condiciones estipuladas en el numeral 6.3 del D.S. N° 90 del 2000, del Ministerio Secretaría General de la Presidencia.

En cada muestra puntual se deberá registrar el caudal del efluente mediante cámara de medición y caudalímetro con registro diario.



### 1.8.6. Criterios de cumplimiento de la norma

Para sulfatos se deberá cumplir en forma simultánea:

- a) Ninguna muestra semanal supere en un 15% el límite máximo establecido en la Tabla 1.
- b) El promedio de las muestras semanales de los últimos 12 meses no exceda el valor establecido en la Tabla 1.

Para el molibdeno se deberá cumplir en forma simultánea:

- a) Del total de muestras anuales, sólo el 80% de ellas podrán exceder hasta en un 25% el límite máximo establecido en la Tabla 1, es decir, 2,0 mg/L. Para el período comprendido entre el 1 de abril hasta el 30 de septiembre, el 20% de las muestras anuales totales, podrán exceder hasta en un 45% el límite máximo establecido en la Tabla 1, es decir, 2,32 mg/L.
- b) El promedio de las muestras semanales de los últimos 12 meses no exceda el valor establecido en la Tabla 1.

## **1.9. Fundamentos teóricos y alcance de los métodos**

### **1.9.1. Fundamentos de la fluorescencia de rayos X**

#### **1.9.1.1. Objetivo**

El objetivo de este método es proporcionar las pautas a seguir para realizar el ensayo de metales por fluorescencia de rayos X, conforme a los estándares de calidad establecidos en el Sistema de Gestión del Laboratorio de Química Ambiental de CENMA.

#### **1.9.1.2. Alcance**

Este método es aplicable principalmente a las determinaciones In Situ de una amplia variedad de componentes en suelos y sedimentos, los elementos que pueden ser cuantificados por este método son de interés medioambiental, no obstante pueden haber algunos interferentes debido a cambios en la composición elemental de la matriz.

Algunos elementos considerados livianos, no pueden ser detectados por el campo de fluorescencia de rayos X. Generalmente los elementos con un número atómico de 16 o mayor pueden ser cuantificados por este método.

El instrumento analizador portátil FRX, utilizado para esta determinación posee una técnica de análisis no destructiva que detecta emisiones de fluorescencia inducidas por

rayos X. El equipo tiene una tecnología tal que no posee en su constitución elementos radiactivos, sino tubos generadores de rayos X que exclusivamente al ser energizados (con baterías o corriente eléctrica) y encendidos a través de un gatillo, emiten un nivel bajo de radiación, es decir, no se trata de una fuente radiactiva, sino solo de un equipo generador de radiación. El equipo tiene dimensiones tales que le permite ser transportado en terreno fácilmente para realizar las mediciones que permiten cuantificar en segundos hasta 42 elementos (en unidades de % ó ppm).

La principal fortaleza del método es la rapidez de la medición y la eficacia del mismo.

#### **1.9.1.3. Seguridad**

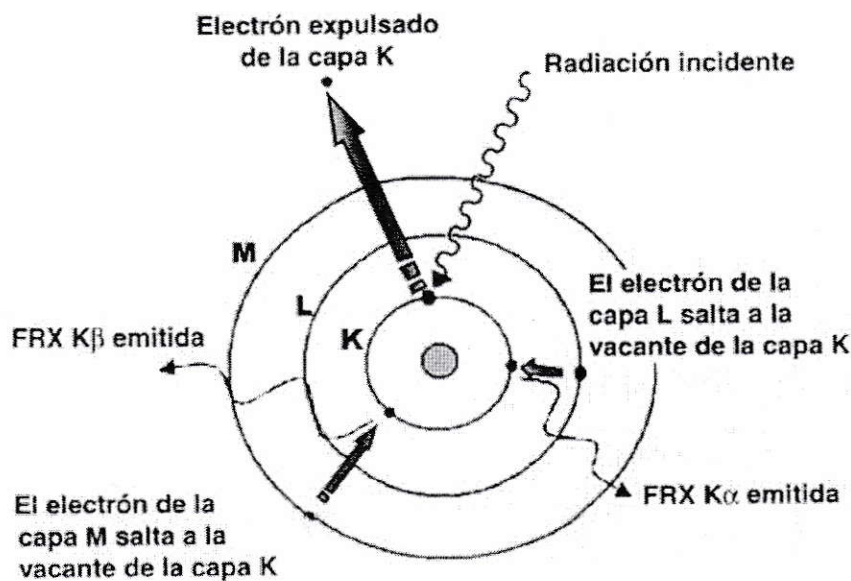
Un analizador de rayos X, debe ser utilizado sólo por usuarios que hayan aprobado un curso de seguridad certificado específico para la manipulación de este tipo de instrumentos.

#### **1.9.1.4. Principio teórico y descripción de la actividad**

Principio: El método se basa en la detección de rayos X secundarios característicos de cada elemento químico, que son emitidos cuando una muestra es bombardeada con rayos X de alta potencia o rayos gamma.

La fluorescencia de rayos X (FRX) es una técnica analítica no destructiva que mide la composición elemental de una sustancia generalmente sólida al ser expuesta a una radiación de rayos X.

Los rayos X poseen una energía tal que al incidir sobre la muestra pueden ionizarla expulsando electrones de las capas más internas. Estos iones son altamente inestables y esas vacantes son ocupadas por electrones de capas superiores en cascada. Estos saltos de electrones de un nivel de mayor energía, a uno de menor, desprenden una radiación característica que es la fluorescencia de rayos X (Figura 7). El conjunto de los saltos electrónicos entre capas de un elemento forma el espectro característico del elemento y es único.



**Figura 7.** Esquema de la emisión de la radiación de fluorescencia de rayos X.

El análisis cualitativo se obtiene a partir de la energía característica, o su longitud de onda, de la radiación de fluorescencia de rayos X emitida. El análisis cuantitativo se



obtiene por conteo de los rayos X para una longitud de onda determinada. Los contenidos elementales son totales, sin distinción de estados de oxidación.

Respecto de la Competencia Técnica: Este instructivo es aplicado por personal entrenado y evaluado conforme a los requisitos de CENMA, para la realización del ensayo en el laboratorio.

El personal que realiza este ensayo debe haber cursado y aprobado el curso de "Protección Radiológica" y estar autorizado por el MINSAL para desempeñarse. (Informe final Versión 1, 2012)

## **1.9.2. Fundamentos de la determinación de sulfato disuelto por calcinación de residuo.**

### **1.9.2.1. Objetivo y alcance**

Esta norma establece el método para la determinación de sulfato disuelto en aguas residuales<sup>2</sup> mediante calcinación y determinación gravimétrica.

### **1.9.2.2. Principios**

El sulfato disuelto es precipitado en medio de ácido clorhídrico como sulfato de Bario, por adición de una solución de cloruro de Bario.

---

<sup>2</sup> Aguas que se descargan después de haber sido usadas en un proceso, o producidas por éste, y que no tienen ningún valor inmediato para este proceso.

La precipitación se realiza a temperatura cercana al punto de ebullición y luego de un periodo de digestión, el precipitado se separa por filtración, se calcina a 800 °C, se enfría y se pesa.

### 1.9.2.3. Cálculos

$$\text{Sulfato, mg/l} = \frac{(A - B) * 411,6}{V} \quad (1)$$

En que: A = Peso del crisol más peso del precipitado de BaSO<sub>4</sub>, mg; B = Peso del crisol de porcelana, mg; V = Volumen de la muestra, mL.

El valor 411,6 es una constante utilizada que contabiliza sólo el analito en cuestión (sulfato) y no el bario en el cálculo de los resultados.

### 1.9.2.4. Interferencias

#### 1.9.2.4.1. Interferencias positivas

La sílice, precipitante con BaCl<sub>2</sub>, nitratos, sulfitos y oclusión de agua madre en el precipitado, son los principales factores que llevan al error positivo. La materia suspendida puede estar presente tanto en la muestra como en la solución precipitante. Los silicatos solubles pueden insolubilizarse y el sulfito puede oxidarse a sulfato

durante el análisis. El nitrato de Bario, cloruro de Bario y el agua son ocluidos en alguna medida en el precipitado de  $\text{BaSO}_4$ , aunque el agua puede eliminarse si la temperatura de calcinación es suficientemente alta.

#### **1.9.2.4.2. Interferencias negativas**

Los sulfatos de metales alcalinos frecuentemente dan resultados bajos. La absorción de sulfatos alcalinos en el  $\text{BaSO}_4$  provoca la sustitución de elementos de menor peso atómico que el del Bario en el precipitado. Los sulfatos ácidos alcalinos actúan similarmente y además se descomponen con la temperatura.

Los metales pesados tales como cromo y hierro provocan resultados bajos por interferir en la completa precipitación del sulfato y por formación de sulfatos de metales pesados.

El sulfato de Bario presenta una pequeña pero significativa solubilidad, la cual aumenta en presencia de ácido. Aunque el medio ácido es necesario para evitar la precipitación de fosfato y carbonato de Bario, es importante acotar su concentración para evitar la solubilización.

### 1.9.3. Fundamentos de los métodos complementarios

#### 1.9.3.1. Potencial Redox

El potencial redox es una medida de la actividad de los electrones. Está relacionado con el pH y con el contenido de oxígeno. Es análogo al pH ya que el pH mide la actividad de protones y el potencial redox mide la de los electrones. El potencial redox se calcula como:

$$Eh = 1,234 - 0,058 pH + 0,0145 \log P_o \quad (2)$$

Siendo  $P_o$  la presión parcial de oxígeno expresada en atmósferas.

En las aguas si el oxígeno está en equilibrio con el atmosférico y el pH es de 7, el valor es de + 0,86 mV a 0 °C y de + 0,80 mV a 25 °C. En las aguas dulces y marinas raramente baja de + 0,3 mV excepto cuando hay gran escasez de oxígeno.

Cambios en el potencial redox generan, a su vez, cambios en el estado redox de varios nutrientes esenciales. La solubilidad de muchos micronutrientes esenciales como el hierro (Fe) y el manganeso (Mn) es afectada por el estado redox de la molécula.

Cuando el potencial redox es alto, hierro y manganeso existen en forma trivalente y tetravalente respectivamente ( $Fe^{+3}$ ;  $Mn^{+4}$ ). Estas formas ionizadas son insolubles y no accesibles para el consumo microbiano. Las formas bivalentes de estos metales ( $Fe^{+2}$  y  $Mn^{+2}$ ) se generan a potenciales bajos, son solubles en agua y fáciles de incorporar



por los microorganismos. Las reacciones redox favorecen la disolución de algunas especies químicas (ej.  $\text{Fe}(\text{OH})_3 \rightarrow \text{Fe}^{+2}$ ) y la inmovilización o escape de otras (ej.  $\text{Fe}^{+2} \rightarrow \text{FeS}$ ;  $\text{CO}_2 \rightarrow \text{CH}_4$ ).

Generalmente, el potencial redox es afectado por la concentración de oxígeno disuelto. Según baja el potencial redox en aguas y sedimentos, se observa una disminución en la concentración de oxígeno disuelto y la reducción de iones y moléculas importantes para la nutrición de microorganismos y formas de vida superior. Dicha relación es particularmente observada en ambientes acuáticos eutróficos, en cuerpos de agua con una estratificación termal marcada y en cuerpos de agua contaminados con altas concentraciones de materia orgánica oxidable. Ambientes de agua dulce en equilibrio con el oxígeno atmosférico, tienen valores Eh alrededor de +800 mV (0.8V), mientras que el potencial redox para aguas oceánicas superficiales generalmente oscila entre +400 y +435 mV (a un pH entre 7.6 y 8.3). Cuando la tensión de oxígeno en dichos ambientes disminuye, el potencial redox también baja.

### **1.9.3.2. Materia orgánica**

La materia orgánica es toda clase de sustancia que involucra dentro de su estructura molecular el carbono, en el estudio ambiental hace referencia a dos tipos:

- a. La de origen viviente, que comprende todos los residuos y desechos provenientes de organismos vivos, incluso los mismos organismos.

- b. La de origen antrópico, en la que entran todas las sustancias sintetizadas por el hombre a través de procesos industriales.

Existen tres procedimientos para la determinación del contenido orgánico en suelos, que pueden aplicarse también a muestras secas de sedimentos. Estos son:

- Pérdida por ignición
- Oxidación con peróxido de hidrógeno
- Oxidación con dicromato

El Método del Dicromato es uno de los recomendados en la BS1377:1975 (The British Standard), como el procedimiento estándar para suelos. Fue introducido primeramente por Walkley en 1935. Se ha encontrado que da resultados reproducibles y aunque la exactitud no es absoluta, es suficiente para propósitos de ingeniería. En suelos que contienen sulfuros o cloruros da resultados altos. Si estas sustancias están presentes, deben ser removidas de la muestra en la etapa de preparación mediante un tratamiento químico adecuado, como se describe en el procedimiento.

#### **1.9.3.2.1. Alcance y aplicación**

Este método es aplicable a todo tipo de sedimento de origen marino o continental. La exactitud no es absoluta pero es suficiente para propósitos de ingeniería.

### 1.9.3.2.2. Cálculos

Calcular el volumen, en mL (V), de dicromato de potasio usado, para oxidar la materia orgánica en el sedimento a partir de la siguiente ecuación:

$$V = 10 * \left(1 - \frac{Y}{X}\right) \quad (3)$$

Sea:

Y = Volumen de sulfato ferroso utilizado en la titulación de la muestra

X = Volumen utilizado en la estandarización.

Expresado como porcentaje el cálculo de materia orgánica presente con base a peso seco de muestra es:

$$\% \text{ de M. O.} = 0,67 \times m_2 \times \frac{V}{m_1 \times m_3} \quad (4)$$

Sea:

$m_1$  = Peso de muestra antes de tamizar;  $m_2$  = peso de muestra que pasa a través del tamiz de 10 mm;  $m_3$  = peso de sedimento utilizado en el análisis.

## **1.10. Objetivos del seminario**

### **1.10.1. Planteamiento del problema**

Para este trabajo es necesario plantearse lo siguiente: ¿Es necesario realizar una revisión de las normas de emisión, que regulan los residuos que se emiten desde la División El Teniente? Para responder esta interrogante se plantean los objetivos necesarios, que brindarán una visión amplia respecto a todas las variables y parámetros que se estiman convenientes analizar. Cabe destacar que los análisis realizados mediante las normas que aplican para distintos cuerpos de aguas, son aplicadas de manera arbitraria en el análisis de los sedimentos de éstos, como una forma de analizar de manera objetiva la interacción de los analitos en el entorno. Se utilizan sedimentos, fundamentalmente por la representatividad espacio/temporal de los acontecimientos que se han producido en la zona, desde la intervención antropogénica y sus consecuencias.

### **1.11. Objetivo general**

Evaluar la calidad ambiental<sup>3</sup> de los sedimentos de los esteros Alhue y Carén, incluyendo el sector de la cubeta de Alhue del Embalse Rapel, como apoyo al proceso de revisión del DS80 que rige a la división El Teniente de CODELCO.

---

<sup>3</sup> Se entiende por calidad ambiental a los elementos, compuestos, sustancias, derivados químicos o biológicos, energías, radiaciones, vibraciones, ruidos o combinación de ellos, cuya presencia o carencia en el ambiente pueda constituir un riesgo para la vida o la salud de la población (Fuente: Ley 19.300 de Bases del Medio Ambiente)



### 1.11.1. Objetivos específicos

- Establecer los puntos de muestreo necesarios para la obtención de sedimentos provenientes de los esteros Alhué y Carén. Se utilizan los sedimentos, debido a la homogeneidad de los analitos presentes (debido a la precipitación de los mismos).
- Determinar la concentración de sulfato en los sedimentos, mediante la metodología señalada por la NCh 2313/18 Of 97.
- Determinar la concentración de molibdeno en los sedimentos, mediante la metodología señalada en el instructivo interno de CENMA código ILQAS-0022 fluorescencia de Rayos X, basado en el método EPA 6200.
- Determinar parámetros complementarios de calidad ambiental para sedimentos y aguas provenientes de los esteros Alhué y Carén: pH, potencial redox, materia orgánica, porcentaje de oxígeno, porcentaje de humedad y conductividad.
- Evaluar las medidas necesarias a tomar, a través de los resultados obtenidos en los análisis solicitados.

## II. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1. Reactivos y soluciones

- ❖ Agua destilada
- ❖ Agua para análisis, clase 2 según NCh 416/2
- ❖ Ácido nítrico 65% (HNO<sub>3</sub>), marca MERCK
- ❖ Ácido clorhídrico 37% (HCl) p.a., marca MERCK
- ❖ Cloruro de bario dihidratado (BaCl<sub>2</sub> \* 2H<sub>2</sub>O) p.a., marca MERCK
- ❖ Nitrato de plata (AgNO<sub>3</sub>) p.a., marca MERCK
- ❖ Rojo de metilo sal sódica p.a. , marca MERCK
- ❖ Dicromato de potasio (K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>) p.a.
- ❖ Ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) p.a., marca MERCK, Gravedad específica 1,84.
- ❖ Ácido fosfórico al 85% (Gravedad específica 1,70-1,75)

#### 2.1.1. Soluciones

##### 2.1.1.1. Solución indicadora de rojo de metilo

Se disolvió 100 mg de sal sódica de rojo de metilo en agua para análisis y aforó a 100 mL en un matraz de aforo.

#### **2.1.1.2. Ácido clorhídrico 1:1**

Se diluyó HCl 37% p.a. en una proporción 1:1 con agua para análisis.

#### **2.1.1.3. Solución de cloruro de Bario 10% p/v**

Se disolvió 100 g de  $\text{BaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  p.a. en un (1) litro de agua para análisis. Se filtró a través de filtro de membrana. Un (1) mL de esta solución fue suficiente para precipitar aproximadamente 40 mg de ión sulfato.

#### **2.1.1.4. Solución de ácido nítrico – nitrato de Plata**

Se disolvió 8,5 g de  $\text{AgNO}_3$  p.a. y 0,5 mL de  $\text{HNO}_3$  p.a. en 500 mL de agua para análisis.

#### **2.1.1.5. Solución de dicromato de potasio 1N**

Se disolvió 49,035 g de  $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$  en agua destilada y se completó a un litro de solución.

#### **2.1.1.6. Solución de ácido sulfúrico 0,5N**

Se adicionó 14 mL de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  concentrado en agua destilada y se completó a un litro de solución.

#### **2.1.1.7. Solución de sulfato ferroso de aproximadamente 0,5N**

Se disolvió 140,0 g de sulfato ferroso en ácido sulfúrico 0,5N y se completó a un litro de solución.

Esta solución es inestable al aire; por lo cual, debe mantenerse herméticamente tapada. Semanalmente debe ser estandarizada con solución de dicromato de potasio.

#### **2.1.1.8. Solución indicadora de difenilamina sulfonato de sodio**

Se disolvió 0,25 g de difenilamina sulfonato de sodio en 100 mL de agua destilada. En su defecto se pudo utilizar solución indicadora de ferroína.

## 2.1.2. Materiales, equipos y/o aparatos utilizados

**Tabla 2.** Materiales de vidrio, plástico y otros.

| <b>Material de vidrio</b>                         | <b>Volumen (mL)</b>  | <b>Observaciones</b>                               |
|---|--|--|
| Vaso de precipitado                               | 100; 250; 500 y 1000                                       | Marca Pyrex  |
| Varilla de agitación                              | -  | -  |
| Matraz de aforo                                   | 250; 500 y 1000  | Marca Pyrex  |
| Crisol  | -  | Hecho de porcelana, con tapa.                      |
| Pipeta total                                      | 10; 25; 50 y 100   | Marca Pyrex  |
| Pipeta Parcial                                    | 1; 5 y 10  | Marca Pyrex  |
| Pipeta Pasteur                                    | -  | -  |
| Termómetro  | -  | De 0 a 120 °C                                      |
| Probeta   | 50 y 100   | Marca Pyrex  |
| Matraz Erlenmeyer                                 | 250 y 500  | Marca Pyrex  |
| Mortero   | -  | Porcelana  |
| Bureta  | 50   | Graduada a 0,1mL                                   |
| <b>Material de plástico</b>                       | <b>Volumen (mL)</b>  | <b>Observaciones</b>                               |
| Envases   | 500  | Boca ancha con tapa                                |
| Bolsas  | -  | Tipo Ziploc de diversos tamaños                    |
| Cubetas   | 5000   | -  |
| Pala  | -  | Para extracción de muestras                        |
| Cuerda  | -  | Nylon  |
| Cooler  | -  | Conservación de muestras, con hielo en su interior |
| <b>Otros materiales</b>                           | <b>Observaciones</b>                                       |  |
| Brújula   | Localización puntos de muestreo                            |  |
| Estacas de inspección, banderas, boyas y anclajes | -  |  |
| Cinta métrica                                     | -  |  |
| Etiquetas autoadhesivas                           | Rotulación de muestras                                     |  |
| Equipos de seguridad personal                     | Lentes, botas, arnés, guantes, chaleco reflectante, otros. |  |
| Hojas de dato                                     | -  |  |
| Bitácora de registros                             | -  |  |
| Pinzas metálicas                                  | -  |  |
| Papel absorbente                                  | -  |  |
| Papel pH  | Determinación de pH en muestras para análisis de sulfato   |  |
| Lápiz marcador                                    | -  |  |
| Espátulas   | Metálicas y plásticas                                      |  |
| Tamiz   | 2mm; 10mm y 425 µm tamaño de malla                         |  |



Continuación Tabla 2

| <b>Filtros</b>       | <b>Observaciones</b>   |
|----------------------|--|
| Papel filtro         | Tipo Whatman o equivalente                                   |
| Filtro de membrana   | Con tamaño de poro de 0,45µm (resistente al ataque de ácido) |
| Papel filtro Whatman | N° 42 o equivalente  |

**Tabla 3.** Principales equipos y/o aparatos utilizados en terreno y/o laboratorio.

| <b>Equipo de terreno</b>              | <b>Observaciones</b>                          |
|---------------------------------------|---|
| pH metro portátil                     | -   |
| Cámara Fotográfica                    | Registro visual del sector y toma de muestras |
| Teléfono celular con carga y cargador | -   |

| <b>Equipo de laboratorio</b>        | <b>Observaciones</b>                      |
|-------------------------------------|---|
| pH metro                            | -   |
| Equipo de fluorescencia por rayos X | Portátil                                  |
| Balanza analítica                   | Sensibilidad +/- 0,1 mg                   |
| Desecadora                          | Utilizada con sílica con indicador        |
| Mufla                               | Para operar hasta 800 °C                  |
| Plancha calefactora                 | Con control de temperatura                |
| Extractor tipo campana              | -   |
| Aparato de filtración               | Apropiado para el tipo de filtro a ocupar |
| Estufa                              | Para operar hasta 180 °C                  |

## **2.2. Métodos**

### **2.2.1. Conservación de muestras, recipientes, manejo y almacenamiento.**

La mejor alternativa entre la extracción de la muestra y el análisis fue mantener la muestra a bajas temperaturas. Si el tiempo hasta el análisis supera las 24 horas por razones de transporte de las muestras, las mismas debieran congelarse una vez que se ha efectuado la preparación inicial en terreno (muestras de agua). Para muestras sólidas no es necesaria la adición de preservantes químicos.

Para mantener las porciones de muestras se utilizaron frascos de vidrio, con boca ancha (para análisis de compuestos orgánicos) y bolsas plásticas tipo ziploc, para congelar las porciones destinadas a análisis de materia orgánica y metales.

El volumen de la muestra está relacionado con los requisitos analíticos para lo cual se detallaron recomendaciones generales. En cualquier caso, fue necesario obtener una cantidad suficiente que permitiera mantener contramuestras almacenadas para requerimientos posteriores, las que estaban secas (En el caso de matrices sólidas) y correctamente identificadas. El mandante de un estudio podría solicitar a los encargados de la toma de muestras, que obtuvieran, mantengan y/o entreguen contramuestras secas, debidamente rotuladas e identificadas para repetir análisis y/o corroborar resultados, en el caso que sea necesario.

Una vez que se obtuvo la porción de muestra mediante draga (pala u otro medio también son posibles), se colocó la misma, en un recipiente adecuado que permitió la

homogeneización, que también sirvió para trasladarla íntegramente al laboratorio para su homogeneización.

Se colocaron las etiquetas que permitieron identificar el tipo de muestras (mezclada, homogeneizada, muestra cruda, tamizada, etc) así como los analitos para los cuales fueron requeridos.

Las muestras para el análisis de compuestos orgánicos volátiles fueron manipuladas lo menos posible para minimizar la pérdida debida a la volatilización de los mismos.

Todos los dispositivos de muestreo debieron ser limpiados entre una estación y otra, dependiendo del tipo de análisis que se efectuó. Por ejemplo, para análisis de metales se recomienda envolver las palas con plástico tipo parafilm mientras que para análisis de compuestos orgánicos se puede envolver las palas con papel de aluminio que se desecha entre una estación y otra.

### **2.2.2. Interferencias y problemas potenciales**

Tamaño de partícula y contenido orgánico están directamente relacionadas con la velocidad del agua y características de flujo de un cuerpo de agua. Los contaminantes son más propensos a concentrarse en los sedimentos tipificados por tamaño de partícula fina y un alto contenido orgánico. Este tipo de sedimentos es más probable que se encuentre en las zonas de deposición. Por el contrario, los sedimentos gruesos con bajo contenido orgánico no suelen concentrar contaminantes y se encuentran en zonas de erosión. La selección de un punto de muestreo puede, por lo tanto, influir en gran medida de los resultados analíticos.



### 2.2.3. Método de muestreo

#### 2.2.3.1. Preparación

Se determinó la extensión territorial en la zona de muestreo, esto se realizó mediante cartografía y mediante mapas satelitales que brindan mayor comodidad a la hora de delimitar las zonas en las cuales se desea trabajar. El método de muestreo fue especificado, tanto así como los equipos, materiales y suministros necesarios, los cuales se detallan en las Tablas 2 y 3.



**Figura 8.** Ilustración de la inspección en terreno de los materiales e insumos disponibles.

En casos donde existen recintos privados o con acceso restringido, se debió contar con los permisos necesarios para realizar el muestreo de los sectores que correspondían.

Todos los suministros e implementos que se utilizan en el proceso de muestreo, debieron ser inspeccionados previamente, para asegurar que se encontraran en buenas condiciones y estos no indujeran a errores en el análisis posterior.

Se debió contar con un esquema para realizar el trabajo, especificando horarios e itinerario previsto; también se puede coordinar con el personal, clientes y agencias reguladoras en el caso necesario. Este esquema quedó formalizado en un plan de muestreo, que debió ser supervisado y aprobado.

Antes de realizar el muestreo se tuvo en cuenta todas las medidas de seguridad necesarias para con el personal y a la vez de los implementos necesarios para realizar la tarea.

Se realizó una marcación y posterior delimitación para la identificación de los sectores en los cuales se tomaron las muestras.

Se realizó una recopilación de la información del lugar a modo de apoyo a la interpretación de los resultados; dentro de esta información se incluye: La profundidad de la capa acuosa; régimen de flujo; morfometría de la cuenca, características del sedimento; alcance y naturaleza del contaminante en el lugar de muestreo.

Las condiciones de muestreo se pueden adecuar a las necesidades del muestreador y al acceso que posee al sector, dependiendo de la superficie y morfología del terreno.



### 2.2.3.2. Muestreo

La selección de un dispositivo de muestreo dependió de: (1) La profundidad del agua en la toma de muestras y (2) las características físicas del medio a ser muestreado.

Para sedimentos superficiales, con poca profundidad de agua, se utilizó una pala o una cuchara.

Si la masa de agua superficial es vadeable<sup>4</sup>, la manera más fácil para la obtención de una muestra de sedimentos, fue mediante el uso de un cuchara de acero inoxidable o de plástico.

Se ubicó el punto de muestreo. En esta parte se pueden colocar los instrumentos para medir las características del agua (si resultan de interés).

---

<sup>4</sup> Atravesar un río por un vado o por una zona que se puede cruzar a pie.



**Figura 9.** Condiciones del muestreo: uso de implementos de seguridad personal (botas, guantes, cuerda de vida), colocar los instrumentos para medición en terreno, pala y frasco listos para tomar la muestra de sedimento.

Se ubicó la dirección de la corriente de agua.

El método de muestreo se llevó a cabo metiendo la cuchara en la masa de agua, orientada corriente arriba (en la corriente), recogiendo la muestra a lo largo de la parte inferior de la masa de agua en la dirección de aguas arriba.





**Figura 10.** Toma de muestras introduciendo la pala en sentido aguas arriba de la corriente y colocando la muestra en frasco plástico de boca ancha.

El exceso de agua se retiró. Sin embargo, esto a veces puede resultar en la pérdida de algo de material de tamaño de partícula fina asociada con la parte inferior de la masa de agua superficial.

Este método puede ser utilizado para recoger sedimentos consolidados pero está limitado por la profundidad de la capa acuosa. Muestras precisas y representativas se pueden recoger con este procedimiento en función del cuidado y precisión demostrada por el personal en terreno.





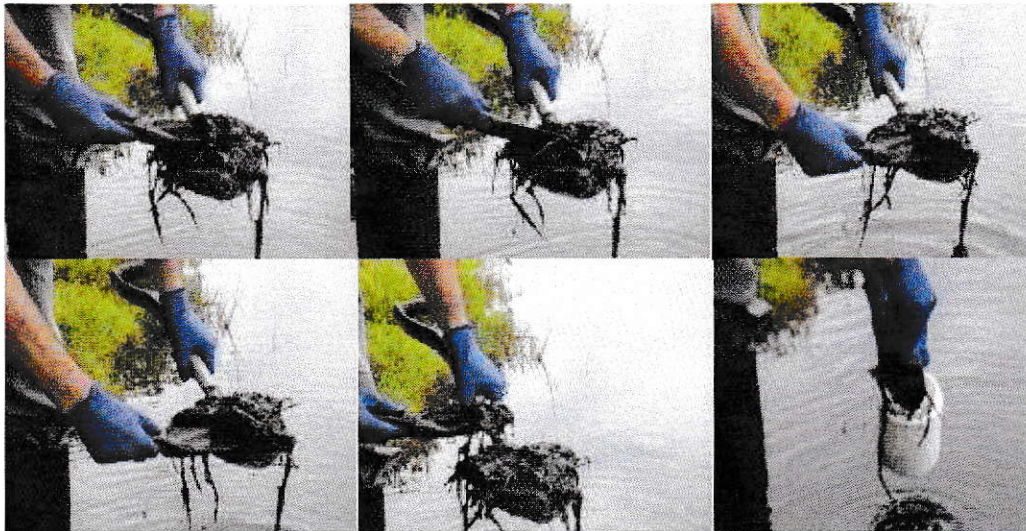
**Figura 11.** Condiciones de registro de información en terreno.

En los cuerpos de agua de superficie que son muy profundos para vadear, pero menos de 8 pies de profundidad, una bola de acero inoxidable o una cuchara unida a una pieza de conducto puede ser usado bien desde los bancos si la masa de agua superficial es estrecha o desde un barco. El sedimento se colocó en un recipiente de vidrio para su homogeneización.

Una bola de acero inoxidable, de plástico o una espátula de laboratorio será suficiente en la mayoría de las aplicaciones. Se debe tener cuidado para evitar el uso de dispositivos chapados con cromo u otros materiales.

Se siguieron los siguientes procedimientos para recoger las muestras de sedimentos con una pala o paleta:

- a. Se utilizó una cuchara de acero inoxidable previamente limpiada o llana, se retiró el espesor deseado de los sedimentos de la zona de muestreo.
- b. Se transfirió la muestra en una bolsa apropiada o recipiente de homogeneización.



**Figura 12.** Utilización de una pala para extraer una porción mayor desde la cual se extrae otra muestra para el ensayo.



### **2.2.3.3. Garantía de calidad/Control de calidad**

No hubo actividades de aseguramiento de calidad específicos que se aplican a la ejecución de estos procedimientos. Sin embargo, para el aseguramiento de la calidad de los resultados obtenidos se requirió que todos los datos e información de terreno fueran documentados en las hojas de datos de campo o dentro de los libros de registro del sitio.

Toda la instrumentación debe ser operada de acuerdo con las instrucciones de operación que suministra el fabricante, a menos que se especifique lo contrario en el plan de trabajo. Equipos de comprobación y actividades de calibración se realizaron antes del muestreo/operación y fueron debidamente documentadas.

## 2.2.4. Determinación de la composición elemental de suelos y sedimentos por fluorescencia de rayos X

### 2.2.4.1. Preparación de curva de calibración

El equipo de medición de rayos X, viene calibrado de fábrica, de acuerdo a matrices pre-establecidas:

- a. **Geoquímica Traza:** Para el análisis de suelo y otras aplicaciones de la minería. Es apropiado para medir concentraciones bajas de metales. Los elementos que pueden ser cuantificados son: Ca, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Se, Rb, Sr, Zr, Nb, Mo, Rh, Pd, Ag, Cd, Sn, Sb, Ce, Hf, Ta, W, Pt, Au, Hg, Pb, Bi, U. Los metales son detectados en su forma elemental
  
- b. **Geoquímica General:** Para matrices minerales, sin información de su composición ni su concentración.

De acuerdo con el estándar establecido se presentan como óxidos: MgO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, K<sub>2</sub>O, CaO, TiO<sub>2</sub>, MnO y Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Los demás elementos se supone que están en forma elemental y se presentan como tales.

Los compuestos y elementos que pueden ser cuantificados son: MgO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, S, Cl, K<sub>2</sub>O, CaO, TiO<sub>2</sub>, V, Cr, MnO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Co, Ni, Cu, Zn, As, Se, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Mo, Rh, Pd, Ag, Cd, Sn, Sb, Ce, Hf, Ta, W, Pt, Au, Hg, Pb, Bi, Th, U.

- c. **Geoquímica Concentrado:** Apropriada para concentrados de mineral y óxidos de alta concentración.

Los compuestos y elementos que pueden ser cuantificados son: MgO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, S, Cl, K<sub>2</sub>O, CaO, TiO<sub>2</sub>, V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MnO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, NiO, CuO, ZnO, As<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Se, Rb, Sr, Y, ZrO<sub>2</sub>, Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, MoO<sub>3</sub>, Rh, Pd, Ag, Cd, SnO<sub>2</sub>, Sb<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CeO<sub>2</sub>, HfO<sub>2</sub>, Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, WO<sub>3</sub>, Pt, Au, Hg, PbO, Bi, Th, U.

Se puede realizar correcciones para minimizar el efecto matriz.

#### **2.2.4.2. Preparación de material de referencia**

Muestra Estándar LE 1520 Duplex 2205 (SAR-M/2, p/n 160.0046), muestra de control proporcionada por el proveedor del instrumento, la cual corresponde a una aleación de metales con rangos de concentración definidos.

#### **2.2.4.3. Protocolo de análisis**

La muestra se preparó antes de la medición, la muestra deben ser partículas pequeñas al momento del análisis (200 µm). Se tomaron aproximadamente 10g de muestra y se traspasaron a un recipiente de vidrio (porcelana u otro material inerte también es aceptado), para ser secada en estufa a 40°C, por 6 a 8 h. Transcurrido el tiempo de secado, la muestra se dejó en una desecadora, hasta que alcanzara temperatura ambiente. La muestra se trituró en un mortero/chancadora de material inerte. La muestra se traspasó a una bolsa plástica y se compactó manualmente, procurando que

no quedaran espacios, para evitar errores de lectura por efecto de dilución (aire). Es preferible siempre medir en la porción donde el tamaño de partícula sea el menor posible, sin humedad.

Para realizar el análisis, se debe encender la unidad del equipo, luego encender el IPAQ (HP) que posee el software que controla el analizador.

En el IPAQ se procede a ejecutar las siguientes actividades:

- ✓ Abrir programa Bruker S1
- ✓ Presionar conectar e ingresar la clave (12345)
- ✓ Presionar "Medición de uso general"
- ✓ verificar que el equipo está configurado con:

Tipo de análisis: FP (Fundamental Parameters)

Parámetros de prueba: Temporizado

Método: GeoChem Trace

Biblioteca: No lib

- ✓ Presionar "Analizar". En esta sección se podrá rotular la medición (de manera que pueda ser identificada posteriormente al momento de descargar los datos).
- ✓ Presionar "Editar info" que tiene 4 campos para ingresar rótulos. Para ingresar el dato se deberá posicionar el cursor en la casilla que se quiera completar y luego se presiona el símbolo del teclado que aparece en la parte inferior de la

pantalla. Una vez puesto el nombre de la muestra se debe presionar "Continuar" (si presiona "Atrás" se perderá la información ingresada).

El equipo está en condiciones para analizar las muestras.

Previo a la lectura de las muestras se realizó el control de calidad con la muestra estándar LE 1520, las concentraciones determinadas deben estar dentro de las tolerancias establecidas en el certificado, si esto no sucede, se debe revisar las etapas de verificación del instrumento y los factores que pudiesen incidir en el no cumplimiento del control. Una vez aprobado el control del estándar, se inició la lectura de las muestras. La bolsa con la muestra homogeneizada se dispuso frente a la ventana de la sonda del analizador portátil de rayos X (opcionalmente la bolsa se abre para que la muestra expuesta sea medida por contacto directo con el lector del analizador de RX), si la bolsa es lo suficientemente delgada, no se requiere abrir la bolsa. Se pulsó control para comenzar a irradiar la muestra. Se debe procurar que el lector no se dirija ninguna persona, para no exponerlo a la radiación. Se realizaron 7 mediciones por muestra, cada una de 70 segundos. En el detector, los rayos X emitidos, característicos de cada compuesto, son transformados a pulsos eléctricos, dada la proporcionalidad que existe se determina la concentración en mg/L o %.



#### 2.2.4.4. Control y aseguramiento de la calidad

La determinación de la composición elemental en suelos y sedimentos, debe ser determinada conjuntamente con los siguientes controles.

- a. **Blanco Matriz:** El Blanco matriz corresponde a una muestra sólida que puede ser cuarzo o sílice sin presencia de los analitos en estudio, de esta forma se detectará oportunamente contaminación cruzada.
- b. **Estándar de referencia:** se analizó un estándar de matriz sólida, que para este caso es el Estándar LE 1520 Duplex 2205 (SAR-M/2, p/n 160.0046).
- c. **Frecuencia:** La frecuencia establecida para el control de calidad tanto de blanco como de estándar de referencia es 1 cada 10 muestras.

##### 2.2.4.4.1. Criterios de aceptabilidad

- a. **Blanco matriz:** menor a igual al LD
- b. **Estándar de referencia:** recuperación porcentual de acuerdo a lo indicado en el certificado de calibración para el estándar LE 1520 Duplex 2205 (SAR-M/2, p/n 160.0046)

**2.2.5. Determinación de sulfato disuelto por calcinación de residuo según norma chilena 2313/18 Of 97**

**2.2.5.1. Procedimiento**

**2.2.5.1.1. Filtración previa**

Pasar una porción de muestra a través de papel filtro para retener sólidos gruesos (Filtro Whatman) y luego filtrar a través de membrana (Filtro de membrana). Tomar un volumen medido de muestra filtrada (V), el cual si fuera diluido a un litro, no debería contener más de 200 mg/L de ión sulfato y, dependiendo si el contenido de sílice insoluble es alto y/o hay una cantidad importante de materia orgánica disuelta, realizar el procedimiento descrito en 2.2.5.1.2. o si no pasar directamente al punto 2.2.5.1.3.

**2.2.5.1.2. Método de eliminación de la sílice y de la materia orgánica**

- a. Si la concentración de sílice es mayor a 25 mg/L y/o tiene un índice de permanganato mayor a 30 mg/L de materia orgánica expresada como  $O_2$ , traspasar el volumen medido de muestra a una cápsula de porcelana y evaporar hasta casi sequedad sobre un baño de agua
- b. Se añadió 1 mL de HCl 1:1 a la cápsula para lograr que el ácido entrara en completo contacto con el residuo.

- c. Se llevó a una plancha calefactora, manteniendo en digestión por media hora y luego evaporar a sequedad.
- d. Se completó el secado en estufa a 180 °C y si existiese materia orgánica presente, se debe carbonizar sobre la llama de un mechero o en una mufla a 700 °C por 30 min.
- e. Se humedeció el residuo con 2 mL de agua para análisis y 1 mL de HCl concentrado.
- f. Se evaporó a sequedad sobre plancha calefactora.
- g. Se añadió 2 mL de HCl 1:1, agua para análisis caliente y se filtró (Filtro Whatman 42)
- h. Se lavó la sílice insoluble con pequeñas porciones de agua para análisis caliente.
- i. Se combinó el filtrado con el agua de lavado y se descartó el residuo del filtro. Se llevó a volumen (V).

### 2.2.5.1.3. Precipitación de sulfato de bario

- a. Se ajustó el volumen de muestra (V) de tal modo que se tuvieran aproximadamente 50 mg de ión sulfato en un volumen de 250 mL.
- b. Se ajustó el pH con HCl 1:1, pH 4,5 a 5,0 utilizando un medidor de pH o el viraje del rojo de metilo como indicador.
- c. Se agregaron 1 a 2 mL de HCl 1:1.
- d. Se calentó a ebullición, luego se agregaron 1 a 2 gotas de solución de BaCl<sub>2</sub>.
- e. Deteniendo la ebullición, se agitó suavemente, luego se añadió lentamente solución de BaCl<sub>2</sub>, dejando decantar entre adiciones y observando si había formación de nuevo precipitado.
- f. Cuando la precipitación se completó, se añadió un exceso de alrededor de 2mL de solución de BaCl<sub>2</sub>.
- g. Se digirió el precipitado a 80 °C - 90 °C, es preferible realizar este proceso durante toda la noche o por un tiempo no menor a 2 horas.

#### 2.2.5.1.4. Filtración y masada

- a. Se añadió una pequeña cantidad de pulpa de papel filtro sin cenizas al vaso que contiene el precipitado de  $\text{BaSO}_4$ .
- b. Se transfirió cuantitativamente el precipitado a un filtro (Whatman 42) y se filtró a temperatura ambiente.
- c. Se lavó el precipitado con pequeñas porciones de agua para análisis caliente, hasta que el agua de lavado estuviera exenta de cloruro y por lo tanto diera reacción negativa con el reactivo  $\text{HNO}_3 - \text{AgNO}_3$ .
- d. Se puso el filtro con el precipitado en un crisol de porcelana previamente pesado (B) y se secó en estufa a  $100\text{ }^\circ\text{C}$ , se calcinó en mufla a  $800\text{ }^\circ\text{C}$  por 1 hora, no dejando que el papel filtro se quemara con la llama.
- e. Se enfrió en desecadora y se masó (A)



## **2.2.6. Métodos complementarios**

### **2.2.6.1. Potencial Redox**

#### **2.2.6.1.1. Procedimiento**

El potencial redox debe medirse de manera inmediata una vez que se haya realizado la toma de la muestra de sedimento, esto principalmente debido a la naturaleza inestable de este parámetro. El potencial redox puede ser medido usando un electrodo de platino en combinación con un pH/milivolt.

- El electrodo debe ser calibrado previamente a su uso, con una solución de ferrocianuro de potasio y ferricianuro de potasio, indicadas en las instrucciones del fabricante.
  
- El electrodo fue insertado directamente en la muestra de sedimento a una profundidad aproximada de 2 centímetros.
  
- Se registró el valor medido una vez que la lectura del electrodo se estabilizó, (medido en mV).

## **2.2.6.2. Materia orgánica**

### **2.2.6.2.1. Toma de muestra, almacenamiento y preservación**

En muestras de sedimento la recolección se hace con draga o corer, se transfirió con cuchara de hierro inoxidable (o plástica) a un contenedor hecho de papel aluminio. Para efectos prácticos, si el análisis no se realiza inmediatamente, es preciso congelar la muestra a una temperatura de  $-20^{\circ}\text{C}$ .

### **2.2.6.2.2. Procedimiento**

#### **a. Preparación de la muestra**

Sólo se requirió una pequeña muestra para el análisis, pero ésta se debe homogeneizar correctamente para que sea representativa.

La muestra se secó en un horno a  $105 - 110^{\circ}\text{C}$ , se enfrió en un desecador y se pesó con una exactitud de  $0,1\%$  ( $m_1$ ).

- Se tamizó a través de poro de 10 mm.
- Se masó el tamizado con una exactitud de  $0,1\%$  ( $m_2$ ). Se debe tener cuidado de no perder cualquier partícula fina, para evitar errores.
- Se redujo la muestra por divisiones sucesivas hasta aproximadamente 100 g.

## **b. Muestras que contienen sulfuros**

Los sulfuros pueden interferir en los resultados, dando valores altos. En el caso que sea necesario se deben eliminar, para este propósito se debe adicionar ácido sulfúrico diluido (2N) hasta que no ocurra ninguna emanación de sulfuro de hidrógeno, luego lavar con agua y posteriormente secar en un horno antes de proceder a la próxima etapa.

### **2.2.6.2.3. Determinación de la materia orgánica**

- Se masó la muestra a tratar (1,0 g) y se colocó en un recipiente cónico (Erlenmeyer de 500 mL es suficiente).
- Se vertió 10 mL de dicromato de potasio ( $K_2Cr_2O_7$ ) a la muestra.
- Se adicionó cuidadosamente con una probeta, 20 mL de ácido sulfúrico concentrado.
- Se mezcló y agitó por 1 minuto, luego se dejó reposar por 30 minutos sobre una base de asbesto (en base de madera también es posible). Mientras se enfriaba ocurría el proceso de oxidación de la materia orgánica. Se protegió el recipiente para evitar rupturas.
- Se adicionaron 200 mL de agua destilada.

- Se adicionaron 10 mL de ácido fosfórico, 1 mL de indicador y se agitó completamente. En el caso que el indicador fuera absorbido por el sedimento se adicionó 1 mL más de indicador y luego se agitó.
- Se realizó la titulación del exceso de dicromato, adicionando sulfato ferroso con incrementos de 0,5 mL y se agitó el recipiente, hasta que se produjo un cambio de coloración azul a verde (con difenilamina sulfonato de sodio como indicador).

#### **2.2.6.2.4. Calibración**

Junto con las muestras, se llevó a cabo un blanco de reactivos, siguiendo el mismo procedimiento que en la muestra, utilizando 1,0 mL de agua destilada.

Fue necesario realizar la estandarización del sulfato ferroso cada vez que se empleara, de acuerdo con el siguiente procedimiento:

- Se midieron 10 mL de solución 1N de dicromato de potasio y se transfirieron hacia un Erlenmeyer.
- Se adicionaron cuidadosamente 20 mL de ácido sulfúrico concentrado. Se agitó la mezcla y se dejó enfriar, luego se puso en una superficie aislante.
- Se adicionaron 200 mL de agua destilada.

- Se adicionaron 10 mL de ácido fosfórico y 1 mL de indicador, y se mezclaron completamente.
  
- Se adicionó sulfato ferroso desde una bureta con incrementos de 0,5 mL, agitando el frasco hasta que se produjera un cambio de color de azul a verde, luego se registró el volumen de solución de sulfato ferroso utilizado.



### **III. RESULTADOS**

Los resultados aquí expuestos corresponden a las concentraciones cuantificadas, tanto en aguas como en sedimentos, se especifica que la mayor parte de las muestras corresponden a sedimentos. Se establece que las muestras de sedimentos son las más representativas en términos de los análisis, por lo tanto, es de esperar, encontrar frases u oraciones que aluden al cumplimiento de la(s) norma(s) (con muestras de sedimentos) como una forma clara para discutir los resultados obtenidos en la siguiente sección de discusiones.

#### **3. Localización de zonas de muestreo y expresión de resultados**

Los resultados obtenidos en relación al objetivo principal se presentan tabulados en el Anexo 1 y las zonas de muestreo con sus respectivos mapas en el Anexo 2.

Los resultados más representativos del estudio, son presentados en esta sección, de manera conjunta y señalando las principales diferencias entre zonas de muestreo. Los diferentes sectores están representados por estaciones, en los que se obtuvo diferentes tamaños de muestras tal como se indica en la metodología (Tabla 5). Los resultados muestran valores medios para las 3 variables consideradas.

De acuerdo con lo planteado en los objetivos, se realizaron mediciones de parámetros complementarios como potencial redox, pH y porcentaje de materia orgánica, los cuales son presentados en la Tabla 6.

La Figura 13 muestra la localización de cada una de las estaciones de muestreo.

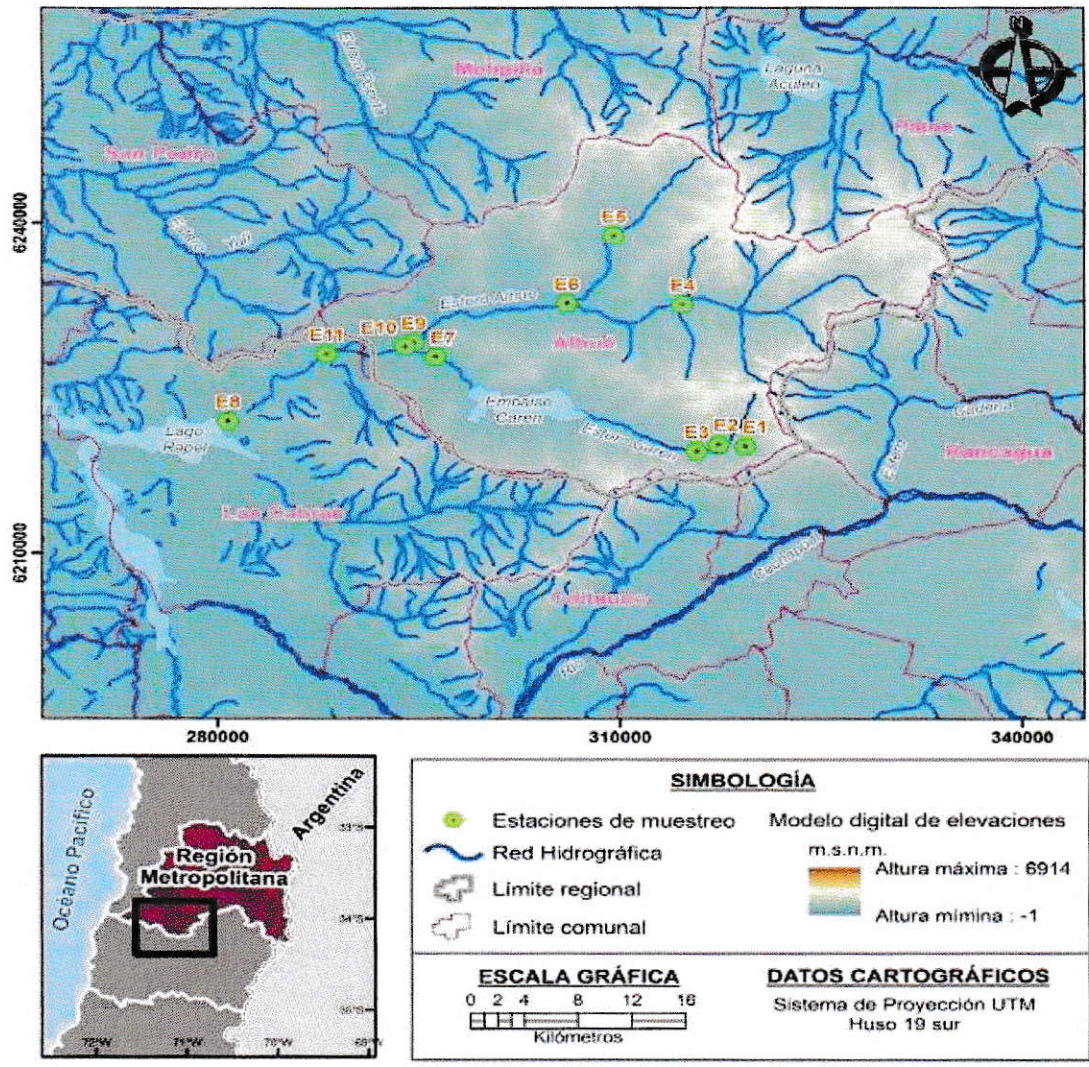


Figura 13. Localización de las estaciones de muestreo de los esteros Alhué y Carén.



### 3.1. Caracterización de las zonas de muestreo

**Tabla 4.** Descripción de las zonas de muestreo y condiciones en la toma de muestra.

| Estaciones | Descripción   |
|------------|---|
| E1         | Quebrada Juan López. Se recolectaron 5 réplicas de sedimentos a aproximadamente 1,5 metros de distancia entre cada replica a lo largo del cauce. El lecho del cauce (2 metros de ancho) presentaba fondo pedregoso con sedimento arenoso y de color amarillo claro. Día despejado soleado.  |
| E2         | Quebrada Aguas Frías. Se recolectaron 5 réplicas de sedimentos a aproximadamente 1,5 metros de distancia entre cada réplica a lo largo del cauce. Cauce de agua 2 metros de ancho. Brazo del cauce que abastece al estero Carén. Cauce de agua clara y cristalina. Sedimento arenoso, limpio. Fondo pedregoso. Día despejado y soleado.   |
| E3         | Sector paso Doña Marcela. Se recolectaron 5 réplicas de sedimentos a aproximadamente 1,5 metros de distancia entre cada réplica a lo ancho del cauce. Cauce de agua 10 metros de ancho. Cauce de agua clara y cristalina. Sedimento arenoso, limpio. Fondo pedregoso. Día despejado y soleado.  |
| E4         | Estero Alhué, sector El Asiento. Se recolectaron 5 réplicas de sedimentos a aproximadamente 2 metros de distancia entre cada réplica a lo ancho y largo del cauce. Cauce de agua 10-15 metros de ancho. Cauce de agua clara y cristalina. Sedimento arenoso, limpio. Muestras E3-3 presenta color negro con aroma a sulfuro. Fondo pedregoso. Día despejado y soleado.  |
| E5         | Esteros sector El Pichi. Se recolectaron 5 réplicas de sedimentos a aprox. 1 metros de distancia entre cada replica a lo ancho del cauce. Cauce de agua 10 metros de ancho. Cauce de agua clara y cristalina. Sedimento arenoso, grueso y limpio. Fondo rocoso. Día despejado y soleado.  |
| E6         | Río paralelo puente Alhué en Villa Alhué. Se recolectaron 5 réplicas de sedimentos a aprox. 1,5 metros de distancia entre cada replica a lo ancho del cauce. Cauce de agua aprox. 30 metros de ancho. Cauce de agua turbia. Se observa presencia de espuma en el cauce y microalgas. Fondo fangoso con presencia de restos de origen orgánico Sedimento arenoso. Fondo rocoso. Día despejado y soleado.   |
| E7         | Esteros Carén Oriente, aguas abajo de Tranque de relaves Carén. Muestreo se realiza en playa del estero. Se recolectaron 3 réplicas de sedimentos a aprox. 1 m de distancia entre cada réplica a lo largo de la playa. Cauce de agua aprox. 15 a 20 metros de ancho. Rivera con maleza y zarzamora. Cauce de agua profundo, por sobre 1 metro. Se observa presencia de gran cantidad de microalgas. Fondo fangoso y con presencia de restos de origen orgánico Sedimento arenoso. Fondo rocoso muy sólido. Muestreo se realiza al término del día con poca luz de día. El sedimento denota color negro con fuerte emanación de sulfuros. Sólo es posible recolectar 3 réplicas debido a la solidez del fondo del cauce. |
| E8         | Puente Alhué en Rapel. Se recolectaron 5 réplicas de sedimentos a aprox. 3 metros de distancia entre cada réplica a lo largo de la rivera del cauce. Cauce de agua aprox. 30 metros de ancho. Cauce de agua turbia. Fondo rocoso con presencia de restos de origen orgánico Sedimento gredoso y oscuro. Se denota presencia de Sulfuro. Día nublado.  |

Continuación Tabla 4

|            |  |
|------------|--|
| <b>E9</b>  | Estero Alhué antes de junta con estero Carén. Cantidad notoria de especies vegetales acuáticas. Microalgas y otras mayores. Estero con profundidad aparente de más de 1 metro. El sedimento se aprecia claro y arenoso.  |
| <b>E10</b> | Estero Carén. Sitio con caudal amplio, verde, mucha vegetación acuática. Rivera fangosa. Presencia notoria de sulfuros al realizar extracción de muestra de sedimentos. Rivera presenta capas arenosas negras. Sedimento negro con olor a H <sub>2</sub> S. Sedimento presenta brillo a la luz solar.  |
| <b>E11</b> | Estero Alhué después de la junta con estero Carén. Hay cierre al paso del estero para tránsito peatonal. El cauce pasa por tuberías. Hay leve estancamiento de aguas por estrechos de paso. Se recolectan 6 réplicas de sedimentos a 3 metros de distancia entre ellas a lo largo de la rivera del cauce. Una de las réplicas (6) se toma aguas arriba del paso peatonal. Presencia de vegetación acuática. El sedimento se aprecia como arenoso, claro y limpio. Presencia de piedras. Cauce de aproximadamente 15 metros de ancho. |

**Tabla 5.** Resumen de los valores de parámetros, en sedimentos como componente fundamental de los ecosistemas lóticos que conforman los esteros Alhué y Carén.

|   | Sector          | S1     |        |        | S2     |        |        |        | S3     |       | S4     |        |
|---|-----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|
|   | Estaciones      | E1     | E2     | E3     | E4     | E5     | E6     | E9     | E7     | E10   | E8     | E11    |
|   | <b>n</b>        | 5      | 5      | 5      | 5      | 5      | 5      | 5      | 3      | 5     | 5      | 6      |
| <b>Mo</b><br>(mg/Kg)                          | $X_{Mo}$        | 7      | 7      | 7      | 14,7   | 18,4   | 10,0   | 5,80   | 40,3   | 95,6  | 7,00   | 37,6   |
| <b>SO<sub>4</sub><sup>-2</sup></b><br>(mg/Kg) | $X_{SO_4^{-2}}$ | 369,80 | 263,80 | 164,60 | 305,40 | 205,10 | 238,20 | 657,40 | 6712,6 | 11370 | 976,40 | 637,10 |
| <b>pH</b>                                     | $X_{pH}$        | 7,65   | 7,95   | 7,91   | 7,79   | 7,51   | 8,29   | 8,09   | 7,21   | 8,09  | 7,23   | 8,25   |

S1 = Zona aguas arriba de las descargas del ducto de relaves de El Teniente;

S2 = Zona correspondiente a aguas arriba de la confluencia del estero Alhué con el Carén;

S3 = Zona del estero Carén aguas debajo de la confluencia de los esteros Alhué y Carén;

S4 = Zona aguas debajo de la confluencia de los esteros Alhué y Carén;

N = Número de muestras por estación;

X = Valor medio para cada parámetro



**Tabla 6.** Parámetros complementarios en muestras de sedimentos en las diferentes estaciones de muestreo.

| Estación | % de humedad | pH  | % Materia orgánica | Estación | % de humedad | pH  | % Materia orgánica |
|----------|--------------|-----|--------------------|----------|--------------|-----|--------------------|
| E1-1     | 0,50         | 7,0 | 1,19               | E6-3     | 0,47         | 7,3 | 0,93               |
| E1-2     | 0,52         | 7,5 | 1,12               | E6-4     | 0,55         | 7,3 | 1,27               |
| E1-3     | 0,54         | 7,4 | 1,47               | E6-5     | 0,38         | 7,4 | 0,79               |
| E1-4     | 0,43         | 7,5 | 1,24               | E7-1     | 0,65         | 7,0 | 1,21               |
| E1-5     | 0,54         | 7,3 | 1,34               | E7-2     | 0,72         | 6,9 | 2,25               |
| E2-1     | 0,55         | 7,4 | 0,94               | E7-3     | 1,54         | 7,0 | 4,82               |
| E2-2     | 0,58         | 7,7 | 1,05               | E8-1     | 2,75         | 6,7 | 4,89               |
| E2-3     | 0,56         | 7,5 | 1,19               | E8-2     | 0,43         | 7,1 | 0,97               |
| E2-4     | 0,63         | 7,4 | 1,61               | E8-3     | 0,57         | 7,4 | 1,27               |
| E2-5     | 0,60         | 7,2 | 1,33               | E8-4     | 0,33         | 7,0 | 0,69               |
| E3-1     | 0,39         | 7,2 | 0,88               | E8-5     | 0,66         | 7,0 | 1,76               |
| E3-2     | 0,45         | 7,4 | 0,90               | E9-1     | 0,43         | 6,7 | 1,16               |
| E3-3     | 0,48         | 7,3 | 1,14               | E9-2     | 0,46         | 7,2 | 1,14               |
| E3-4     | 0,48         | 7,0 | 1,39               | E9-3     | 0,31         | 6,8 | 0,75               |
| E3-5     | 0,48         | 7,3 | 1,24               | E9-4     | 0,30         | 7,0 | 0,62               |
| E4-1     | 0,40         | 7,3 | 0,98               | E9-5     | 0,33         | 7,4 | 0,73               |
| E4-2     | 0,51         | 6,7 | 1,61               | E10-1    | 2,14         | 7,0 | 7,03               |
| E4-3     | 0,45         | 6,9 | 1,16               | E10-2    | 4,65         | 7,0 | 13,7               |
| E4-4     | 0,51         | 7,1 | 1,00               | E10-3    | 1,77         | 7,2 | 4,39               |
| E4-5     | 0,37         | 7,5 | 0,70               | E10-4    | 0,58         | 7,2 | 1,47               |
| E5-1     | 0,77         | 7,6 | 1,90               | E10-5    | 1,00         | 6,6 | 2,25               |
| E5-2     | 0,77         | 7,4 | 1,67               | E11-1    | 0,28         | 7,2 | 0,62               |
| E5-3     | 0,78         | 7,7 | 6,66               | E11-2    | 0,33         | 7,7 | 0,78               |
| E5-4     | 0,71         | 7,7 | 1,66               | E11-3    | 0,36         | 7,3 | 0,80               |
| E5-5     | 0,81         | 7,2 | 1,74               | E11-4    | 0,33         | 7,4 | 0,67               |
| E6-1     | 0,53         | 7,3 | 1,41               | E11-5    | 0,33         | 7,3 | 0,78               |
| E6-2     | 0,50         | 7,3 | 1,05               | E11-6    | 0,28         | 7,2 | 0,61               |

## **3.2. Resultados para molibdeno desglosados por zona**

### **3.2.1. Zona 1**

Esta zona corresponde a la parte alta del estero Carén, antes del tranque de relave. En esta zona los valores de concentración para este metal son bajos, quedando bajo el límite de detección (7 mg/Kg).

### **3.2.2. Zona 2**

Esta zona corresponde específicamente al estero Alhué, aguas arriba de la junta con el estero Carén. Esta zona presenta valores claramente mayores (en relación al límite de detección del instrumento). Estos valores pueden deberse a las características geológicas de las rocas, asociados a otras actividades mineras existentes en la localidad de El Asiento. La estación que presentó mayor concentración corresponde a la E5-5, con una concentración de 64 mg/Kg.

### **3.2.3. Zona 3**

Esta zona se encuentra ubicada aguas debajo de la descarga de los riles del tranque de relave Carén. Aquí se obtuvieron valores más elevados de este metal, siendo los valores medios entre 2,2 a 5,2 veces superiores a los de la zona del estero Alhué (zona 2), mientras que estos se elevan entre 5,7 y 13,6 veces a los valores obtenidos en la zona del estero Carén (zona 1). La estación con mayor concentración de molibdeno corresponde a la E10-2 con una concentración de 321 mg/Kg.

#### **3.2.4. Zona 4**

Esta zona está ubicada aguas abajo de la confluencia entre los esteros Carén y Alhué. En esta zona los valores del metal disminuyen, alcanzando valores medios superiores en más de 2 veces para una de las estaciones, mientras que la otra se presenta en los mismos rangos de la zona 2.

Estos resultados ilustran que el molibdeno se presenta en valores muy superiores en la zona 3, aguas debajo de las descargas del tranque Carén, respecto de las otras zonas de los esteros Alhué y Carén, es decir, el estero ha acumulado valores superiores a los encontrados en el resto de los sedimentos de la cuenca del estero Alhué.

### **3.3. Resultados para sulfato desglosados por zona**

#### **3.3.1. Zona 1**

Esta zona tiene valores bajos en relación a otras zonas de muestreo, los valores fluctúan entre los 41,10 y 536,0 mg/Kg de sulfato ( $\text{SO}_4^{-2}$ ) obtenidos en sedimentos; para los valores obtenidos en las muestras de aguas, los valores que fluctúan entre los 0,0 y 5,1 mg/L.

### **3.3.2. Zona 2**

En esta zona no se aprecian grandes cambios en relación a la zona anterior. Las concentraciones fluctúan entre los 41,10 y 1608 mg/Kg de sulfato en sedimentos. Las muestras de agua representativas de la zona presentan valores similares a la zona anterior, el valor más elevado corresponde a 1039 mg/L.

### **3.3.3. Zona 3**

En esta zona ya empezamos a encontrar anomalías significativas en cuanto a las concentraciones de sulfato. Los valores fluctúan entre los 823,00 y 22249 mg/Kg de sulfato en sedimentos. Las muestras de agua representativas de la zona presentan valores que se encuentran dentro de los límites establecidos por el DS 90/2000, el valor más elevado de esta zona corresponde a 1647 mg/L de sulfato. Esta zona presenta las concentraciones más elevadas en relación a las otras zonas.

### **3.3.4. Zona 4**




Las muestras analizadas correspondientes a esta zona, presentan valores que fluctúan entre los 41,20 y 1608 mg/Kg de sulfato en sedimentos. Los valores para las muestras representativas de agua tienen valores normales que cumplen con el DS 90/2000, con una concentración máxima de 1612 mg/L de sulfato.



### 3.4. Resumen de los valores de concentraciones más significativos en las zonas de muestreo

**Tabla 7.** Parámetros complementarios y concentraciones de los analitos en estudio.

| Muestra |            | Mo<br>(mg/Kg) | % de<br>humedad | pH  | MO % | SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup><br>(mg/Kg) |
|---------|------------|---------------|-----------------|-----|------|--|
| E4-5    | Sedimentos | 46            | 0,37            | 7,5 | 0,70 | 165                                      |
| E5-5    | Sedimentos | 64            | 0,81            | 7,2 | 1,74 | 371                                      |
| E6-3    | Sedimentos | 22            | 0,47            | 7,3 | 0,93 | 206                                      |
| E7-1    | Sedimentos | 40            | 0,65            | 7,0 | 1,21 | 8806                                     |
| E7-2    | Sedimentos | 16            | 0,72            | 7,0 | 2,25 | 823                                      |
| E7-3    | Sedimentos | 65            | 1,54            | 7,0 | 4,82 | 10509                                    |
| E8-1    | Sedimentos | <7            | 2,75            | 6,7 | 4,89 | 1179                                     |
| E8-3    | Sedimentos | <7            | 0,57            | 7,4 | 1,27 | 1479                                     |
| E8-5    | Sedimentos | <7            | 0,66            | 7,0 | 1,76 | 1608                                     |
| E9-2    | Sedimentos | <7            | 0,46            | 7,2 | 1,14 | 1028                                     |
| E9-5    | Sedimentos | 8             | 0,33            | 7,4 | 0,73 | 657,0                                    |
| E10-1   | Sedimentos | 67            | 2,14            | 7,0 | 7,03 | 10005                                    |
| E10-2   | Sedimentos | 321           | 4,65            | 7,0 | 13,7 | 14839                                    |
| E10-3   | Sedimentos | 22            | 1,77            | 7,2 | 4,39 | 22249                                    |
| E10-4   | Sedimentos | 22            | 0,58            | 7,2 | 1,47 | 4541                                     |
| E10-5   | Sedimentos | 46            | 1,00            | 6,6 | 2,25 | 5216                                     |
| E11-1   | Sedimentos | <7            | 0,28            | 7,2 | 0,62 | 1524                                     |
| E11-2   | Sedimentos | 17            | 0,33            | 7,7 | 0,78 | 575                                      |
| E11-3   | Sedimentos | 85            | 0,36            | 7,3 | 0,80 | 863                                      |
| E11-4   | Sedimentos | 19            | 0,33            | 7,4 | 0,67 | 123                                      |
| E11-5   | Sedimentos | 58            | 0,33            | 7,3 | 0,78 | 287                                      |
| E11-6   | Sedimentos | 9             | 0,28            | 7,2 | 0,61 | 451                                      |

 Mayores concentraciones de Mo en muestras de sedimentos  
 Concentraciones de sulfato entre 1000 y 2000 mg/L  
 Concentraciones de sulfato superiores a 2000 mg/L



La Tabla 8 muestra los valores de las concentraciones de sulfato en las muestras de aguas ambos esteros.

**Tabla 8.** Concentración de sulfato en las muestras de agua de las distintas zonas de estudio.

| Muestra | Concentración de sulfato $\text{SO}_4^{-2}$ (mg/L) |
|---------|--|
| E1-A1   | 5,10   |
| E2-A1   | 1,15   |
| E3-A1   | 0,00   |
| E4-A1   | 7,41   |
| E5-A1   | 2,14   |
| E6-A1   | 45,6   |
| E7-A1   | 161  |
| E8-A1   | 103  |
| E9-A1   | 46,3   |
| E10-A1  | 164  |
| E11-A1  | 118  |
| E4-BCO1 | 0,66   |
| E4-BCO2 | 0,16   |

**Fecha de análisis:** 12.11.2012 - 27.12.2012

#### IV. DISCUSIÓN

Una de las primeras consideraciones que se tratan en esta sección, corresponde al ajuste que se realizó en cuanto a las mediciones de los analitos. El método para el análisis de sulfato, se obtiene a partir de la NCh 2313/18 Of. 97, sin embargo, las muestras que se analizaron, fueron “adaptadas” para este análisis, debido a que las muestras representativas del estudio pertenecen a sedimentos como se mencionó al comienzo de este trabajo, esto se puede justificar con el hecho que las muestras de aguas no son representativas en este caso, debido al constante flujo que posee el curso de agua, por lo cual los análisis se modifican para poder realizar las mediciones correspondientes. El análisis completo, incluye once muestras de agua en 11 estaciones (zonas donde se obtuvo las muestras de sedimento). El sedimento se elige para determinar las concentraciones de los analitos principalmente porque actúa como una “huella dactilar” de lo que el curso de agua pueda llevar. Todos aquellos compuestos o elementos que se encuentran en un sedimento dan información clave de lo que se está vertiendo en el cuerpo de agua, por lo tanto, de cierto modo representa lo que ha sucedido durante el tiempo.

Teniendo las muestras de sedimento secas, se procedió a masar un gramo de muestra y agregarlo a un vaso de precipitado de 500 mL para luego agregar 250 mL de agua desionizada, por lo tanto, de esta manera se realizó el método que se describe (ver 2.2.5.), al realizar este paso, se puede realizar la cuantificación de sulfato como lo describe el método, por lo cual también es necesario adecuar la expresión del resultado en relación a la cantidad de sedimento que se utilizó, con esto se pudo observar que las concentraciones de sulfato son cuantificables mediante el método.

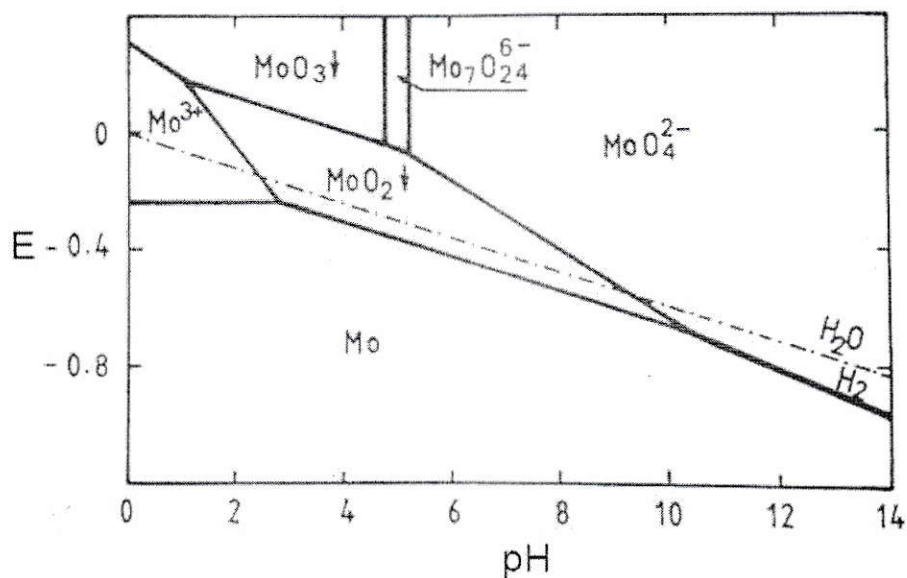
Como el flujo es variable, con distintas concentraciones de descarga de riles durante los años, no se puede determinar la concentración real de lo que ahí existe si se toman muestras de agua residual, debido a las alteraciones de los caudales de descarga, si se realizara un monitoreo, esta situación podría describirse de una manera más cercana a la realidad, sin embargo, existe información del caudal de riles que se emiten desde la División, por lo cual se puede realizar una estimación.

Las muestras de agua no varían significativamente en cuanto a los niveles de sulfato, pero se puede apreciar diferencias significativas en cuanto a concentración que los sedimentos analizados.

Como se explicó anteriormente (ver 1.9.1.4.), la fluorescencia de rayos X, se basa en un principio en el cual la cuantificación de un determinado analito es determinada mediante la longitud de onda característica de cada elemento; lamentablemente, este método no diferencia los estados de oxidación de los elementos a analizar; esto es de gran importancia en el tema medioambiental, debido a que los análisis como éste, sólo consideran la concentración de elemento, lo cual conduce a un resultado que probablemente no exprese la realidad de la zona de estudio.

La mayor parte de los compuestos de molibdeno, poseen una baja solubilidad en agua, pero el ion de molibdato  $\text{MoO}_4^{-2}$  es soluble, éste se forma cuando los minerales que contienen molibdeno están en contacto con oxígeno y agua. No reacciona con oxígeno o agua a temperatura ambiente. A temperaturas elevadas, se forma el óxido de molibdeno VI.

En la Figura 14 se puede apreciar el diagrama de potencial (E) en función del pH para el molibdeno. Puede observarse que teóricamente el molibdeno elemental puede causar una reducción del agua en todo el margen de pH; sin embargo, la poca diferencia de potencial entre el sistema  $H_2O / H_2$  y los sistemas en los que participa el Mo metal, así como el fenómeno de pasivación<sup>5</sup>, hace que el metal molibdeno sea bastante estable. Los ácidos no oxidantes prácticamente no lo atacan; el  $H_2SO_4$  concentrado y caliente lo disuelve con facilidad. El  $HNO_3$  diluido lo ataca apreciablemente, pero el concentrado lo pasiva por oxidarlo a  $MoO_3$  insoluble. Los mejores disolventes ácidos son el agua regia o una mezcla de  $HNO_3$  y  $HF$ . En medio alcalino prácticamente no se disuelve, pero es fácilmente transformado en  $MoO_4^{2-}$ , soluble, por fusión alcalina ( $KNO_3 + NaOH$  ó  $Na_2O_2$ ) (Burriel y col.1994).



**Figura 14.** Diagrama de potencial en función del pH del molibdeno.  $C=10^{-2}$  M.

<sup>5</sup> Se refiere a la formación de una película relativamente inerte, sobre la superficie de un material (frecuentemente un metal), que lo enmascara en contra de la acción de agentes externos. Aunque la reacción entre el metal y el agente externo sea termodinámicamente factible a nivel macroscópico, la capa o película pasivante no permite que éstos puedan interactuar, de tal manera que la reacción química o electroquímica se ve reducida o completamente impedida.



Según lo expuesto en el párrafo anterior, cabe mencionar que las descargas de residuos líquidos provenientes de la minera, en general se encuentran a temperaturas por sobre la temperatura ambiente (debido principalmente a la utilización de ácido muy concentrado), por lo cual es de esperar que las descargas posean grandes cantidades de molibdeno disuelto y dependiendo del pH existirá una especie u otra.

Según la información disponible sobre las descargas de riles en la división El Teniente, no se especifica la manera en que los residuos son tratados para su posterior descarte, sólo se menciona que se realiza un tratamiento primario (prácticamente físico al remover los sólidos del residuo líquido), de esto podemos realizar una retrospectiva de la situación y decir que el vertido de residuos líquidos a los cuerpos de agua, determinan las propiedades fisicoquímicas del entorno debido a la constante sedimentación de especies químicas exógenas.

Como se mencionó anteriormente, la norma sólo rige para cuerpos de agua, por lo cual el análisis del sedimento, sólo se considera porque refleja el efecto acumulativo del compuesto o elemento de interés. Esta consideración es sin duda el mayor argumento en cuanto al análisis corresponde, ya que, todas las especies poseen una solubilidad que depende del pH entre otros factores; como los analitos antes mencionados, se encuentran en esta zona en particular (donde existen descargas de riles), es de esperar que en algún momento se puedan producir cambios en el pH de las aguas, fundamentado con el hecho que uno de los productos más utilizados en la minería del cobre corresponde al ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) que se utiliza en la lixiviación (ver 1.4.2. letra i).



## V. CONCLUSIONES

En general se pudo determinar que existen cambios significativos (concentración) en cuanto a los elementos y/o compuestos a los cuales se refiere este estudio. Se asume que existía una línea base<sup>6</sup> de la cual, la desviación que sufrió durante el tiempo fue considerable debido a las descargas de riles, sin embargo, los impactos considerados dentro de ese análisis, se ven superados en la actualidad. Las continuas descargas de riles realizadas a los esteros, han provocado muchos cambios en la zona e incluso daños irreparables (ver 1.4.6.).

Se puede considerar el hecho que una empresa sea "privilegiada" para emitir casi el doble de concentración de los analitos en cuestión, de acuerdo a un decreto de carácter excepcional que sólo afecta a la División mencionada anteriormente. Es ilógico pensar que esto no genera mayores cambios ni impactos como lo considera Codelco. Sólo se puede asumir que constituye una destrucción de la flora y fauna de una zona e incluso llega a afectar a los seres humanos por el consumo de animales y/o vegetales provenientes de la zona. Esta conclusión se basa en los detalles que se especificaron anteriormente, sobre la caracterización de los analitos en cuestión y además sobre los datos obtenidos principalmente de las zonas con mayores concentraciones de éstos. Éstas corresponden principalmente a las estaciones E7 y E10 que presentan concentraciones de sulfato superiores a 2000 mg/L y las estaciones E4, E5, E6, E7, E9, E10 y E11 con concentraciones de molibdeno superiores a los 7 mg/Kg.

---

<sup>6</sup> Es la primera medición de todos los indicadores contemplados en el diseño de un proyecto de desarrollo social y, por ende, permite conocer el valor de los indicadores al momento de iniciarse las acciones planificadas, es decir, establece el 'punto de partida' del proyecto o intervención

La evaluación de la calidad ambiental de la zona, en este caso es desfavorable, ya que, afecta las zonas aledañas e incluso existen zonas donde los olores que emanan, incluso hasta producen malestares en la población y probablemente esa no sea el único molestia. No es posible que en un lugar así pueda existir asentamiento humano, pero lamentablemente existen agricultores y otros que deben convivir con eso a diario. Esto se plantea sobre la base experimental, debido principalmente a la recepción de muestras de la zona en el laboratorio, en el cual, se tuvo que utilizar mascarilla para poder manipular y analizar las muestras, a causa de los malos olores provenientes de las mismas.

En el lugar se pudieron establecer los puntos de muestreo y todos los análisis solicitados fueron realizados en los laboratorios de CENMA.

En términos prácticos se obtuvo cincuenta y cuatro (54) muestras de sedimentos y once (11) muestras de aguas de las zonas de estudio. Las muestras más relevantes en cuanto a concentración corresponden a las zonas S3 y S4. La estación E10 es aquella que contempla los mayores niveles en cuanto a sulfato y molibdeno, incluso con niveles de 22249 mg/Kg de sulfato y 321 mg/Kg de molibdeno. Las demás estaciones cercanas a los puntos de los tranques de relaves (ver tabla 6), también presentan niveles elevados de los analitos, estas estaciones corresponden a E4, E5, E6, E7, E9, E10 y E11, siendo los niveles de concentración más significativos las estaciones E10 y E11 (Tabla 8).

Se determinaron todos los parámetros complementarios que pudieran entregar información relevante al estudio del trabajo, con lo cual se pudo realizar una discusión de la importancia que estos tienen sobre los procesos que ocurren en general en aguas y suelos, principalmente por la disponibilidad y biodisponibilidad de los elementos o compuestos en general. Resulta importante mencionar que las normas decretadas son para el beneficio de la sociedad y esto representa el porqué de este tipo de enfoque. En general los pH de las muestras fluctuaron entre seis (6) y ocho (8), lo cual se puede considerar como un rango relativamente neutro considerando el tipo de descargas que se realizan en la zona.

Las muestras de agua no resultaron ser representativas del estudio, por las razones que se mencionaron anteriormente, sin embargo, esto mostró la gran diferencia que existe entre analizar un sedimento y una muestra de agua en el mismo lugar de estudio, debido a que el sedimento poseía grandes concentraciones de los analitos y las muestras de agua siempre se encontraron dentro del rango de la norma, sin embargo, aunque estas muestras se encontraban dentro de los límites del DS 80/2006, algunas muestras excedían por lo menos un 50% los límites establecidos por el DS 90/2000 en cuanto a sulfato (1000 mg/L).

Como enfoque final, se puede decir que las muestras analizadas dieron información relevante en cuanto a la situación actual de la zona y probablemente de lo que sucederá durante el tiempo, por lo cual, se hace necesario fiscalizar de manera más estricta este tipo de emisiones, debido al daño que producen y además por las libertades que se le dan a la Empresa para poder emitir más que el resto de establecimientos del país. Lamentablemente la norma (DS 80/2006) sólo aplica al

curso de agua, debido a que es necesario crear normas que apliquen directamente a los sedimentos o suelos (que en este caso sería lo representativo), para que pudiera existir un control real de lo que ahí sucede.

## VI. REFERENCIAS

- Beltrán Ángel. 2007. El DS 80/06: Discusión, tramitación y consecuencias de una norma de emisión especial, Centro de estudios Fiscalía del medio ambiente (FIMA), p. 3-6-7.
  
- Burriel M. Fernando, Lucena Conde Felipe, Arribas Jimeno Sirio, Hernández Méndez Jesús. 1994. Química analítica cuantitativa. X Ed., PARANINFO S.A. Madrid, España. P 544-545.
  
- Hernández Millán Abelardo. 1999. El Cuidado del Medio Ambiental. 1<sup>ra</sup> Ed. México, Universidad Autónoma de México. p. 23-24.
  
- CHILE. D.S. 80. 2006. Norma de emisión para molibdeno y sulfatos de efluentes descargados desde tranques de relaves al estero Carén.
  
- CHILE. D.S. N° 90. 2000. Norma de emisión para la regulación de contaminantes asociados a las descargas de residuos líquidos a aguas marinas y continentales superficiales. Ministerio Secretaría General de la Presidencia (DO 07.03.2001).
  
- CHILE. Ministerio del medio ambiente. 1994. Ley 19.300 sobre bases generales del medio ambiente, Marzo 1994.
  
- COCHILCO. 2008. Buenas Prácticas y uso eficiente del agua en la industria minera. Comisión Chilena del cobre. p. 18.



- COCHILCO. 2010. Consumo del agua en la minería del cobre 2009. Dirección de estudios y políticas, 10/10, pág. 3.
- CODELCO 2013. División El Teniente [En línea], Santiago, Chile. <<https://www.codelcoeduca.cl/codelco/divisiones/t-teniente.html>> [Consulta: 2 de Enero 2013]
- EPA 6200 *Method. Field portable x-ray fluorescence spectrometry for the determination of elemental concentrations in soil and sediment.*
- Glenn D. Considine, Van Nostrand's. 2005. *Encyclopedia of Chemistry. New York: Wiley-Interscience.* pp. 1038–1040.
- Gómez Uziel. 2006. En la comuna de Alhué, Derrame de relave en estero Carén: Codelco contaminó aguas de riego y consumo. El mercurio, Chile, 10/7/06.
- Moreno Antonio Ros. 2011. El agua. Calidad y contaminación, España.
- Norma Chilena 2313/18 Of. 97. 1997. Determinación de sulfato disuelto por calcinación de residuo.
- Roldán Pérez Gabriel, Ramírez Restrepo John. 2008. Fundamentos de limnología neotropical, 2° Ed., Colombia, Editorial Universidad de Antioquía. p. 239.

- SINIA. 2013. Sistema nacional de información ambiental [En línea]. Chile. <<http://www.sinia.cl/1292/w3-propertyvalue-15905.html>> [Consulta: 22 de mayo 2013]
- *Web elements: The periodic table on the web. Molybdenum the essentials.* [En línea]. <<http://www.webelements.com/molybdenum/chemistry.html>> [Consulta: 14 de julio 2013].

## **VII. ANEXOS**

**ANEXO 1. CÓDIGOS Y COORDENADAS  
DE MUESTRAS Y ZONAS DE  
MUESTREO.**

**Tabla 9.** Códigos y coordenadas de las muestras con fechas de muestreo y recepción en CENMA.

| Código muestra cliente | Código muestra CENMA | Descripción de la muestra | Coordenadas en UTM Datum WGS 84, Huso 19H |         | Muestreado por | Fecha de muestreo | Fecha recepción CENMA |
|------------------------|----------------------|---------------------------|---|---------|----------------|-------------------|-----------------------|
|                        |                      |                           | ESTE                                      | NORTE   |                |                   |                       |
| E1-1                   | 48689                | Sedimento                 | 319356                                    | 6219770 | Proyecto       | 18.10.2012        | 19.10.2012            |
| E1-2                   | 48690                | Sedimento                 | 319356                                    | 6219770 | Proyecto       | 18.10.2012        | 19.10.2012            |
| E1-3                   | 48691                | Sedimento                 | 319356                                    | 6219770 | Proyecto       | 18.10.2012        | 19.10.2012            |
| E1-4                   | 48692                | Sedimento                 | 319356                                    | 6219770 | Proyecto       | 18.10.2012        | 19.10.2012            |
| E1-5                   | 48693                | Sedimento                 | 319356                                    | 6219770 | Proyecto       | 18.10.2012        | 19.10.2012            |
| E2-1                   | 48694                | Sedimento                 | 317388                                    | 6219945 | Proyecto       | 18.10.2012        | 19.10.2012            |
| E2-2                   | 48695                | Sedimento                 | 317388                                    | 6219945 | Proyecto       | 18.10.2012        | 19.10.2012            |
| E2-3                   | 48696                | Sedimento                 | 317388                                    | 6219945 | Proyecto       | 18.10.2012        | 19.10.2012            |
| E2-4                   | 48697                | Sedimento                 | 317388                                    | 6219945 | Proyecto       | 18.10.2012        | 19.10.2012            |
| E2-5                   | 48698                | Sedimento                 | 317388                                    | 6219945 | Proyecto       | 18.10.2012        | 19.10.2012            |
| E3-1                   | 48699                | Sedimento                 | 315726                                    | 6219319 | Proyecto       | 18.10.2012        | 19.10.2012            |
| E3-2                   | 48700                | Sedimento                 | 315726                                    | 6219319 | Proyecto       | 18.10.2012        | 19.10.2012            |
| E3-3                   | 48701                | Sedimento                 | 315726                                    | 6219319 | Proyecto       | 18.10.2012        | 19.10.2012            |
| E3-4                   | 48702                | Sedimento                 | 315726                                    | 6219319 | Proyecto       | 18.10.2012        | 19.10.2012            |
| E3-5                   | 48703                | Sedimento                 | 315726                                    | 6219319 | Proyecto       | 18.10.2012        | 19.10.2012            |
| E4-1                   | 48707                | Sedimento                 | 314670                                    | 6232740 | Proyecto       | 19.10.2012        | 22.10.2012            |
| E4-2                   | 48708                | Sedimento                 | 314670                                    | 6232740 | Proyecto       | 19.10.2012        | 22.10.2012            |
| E4-3                   | 48709                | Sedimento                 | 314670                                    | 6232740 | Proyecto       | 19.10.2012        | 22.10.2012            |
| E4-4                   | 48710                | Sedimento                 | 314670                                    | 6232740 | Proyecto       | 19.10.2012        | 22.10.2012            |
| E4-5                   | 48711                | Sedimento                 | 314670                                    | 6232740 | Proyecto       | 19.10.2012        | 22.10.2012            |
| E5-1                   | 48712                | Sedimento                 | 309556                                    | 6238922 | Proyecto       | 19.10.2012        | 22.10.2012            |



Continuación tabla 9

|       |       |           |        |         |          |            |            |
|-------|-------|-----------|--------|---------|----------|------------|------------|
| E5-2  | 48713 | Sedimento | 309556 | 6238922 | Proyecto | 19.10.2012 | 22.10.2012 |
| E5-3  | 48714 | Sedimento | 309556 | 6238922 | Proyecto | 19.10.2012 | 22.10.2012 |
| E5-4  | 48715 | Sedimento | 309556 | 6238922 | Proyecto | 19.10.2012 | 22.10.2012 |
| E5-5  | 48716 | Sedimento | 309556 | 6238922 | Proyecto | 19.10.2012 | 22.10.2012 |
| E6-1  | 48717 | Sedimento | 306049 | 6232822 | Proyecto | 19.10.2012 | 22.10.2012 |
| E6-2  | 48718 | Sedimento | 306049 | 6232822 | Proyecto | 19.10.2012 | 22.10.2012 |
| E6-3  | 48719 | Sedimento | 306049 | 6232822 | Proyecto | 19.10.2012 | 22.10.2012 |
| E6-4  | 48720 | Sedimento | 306049 | 6232822 | Proyecto | 19.10.2012 | 22.10.2012 |
| E6-5  | 48721 | Sedimento | 306049 | 6232822 | Proyecto | 19.10.2012 | 22.10.2012 |
| E7-1  | 48722 | Sedimento | 296266 | 6227919 | Proyecto | 19.10.2012 | 22.10.2012 |
| E7-2  | 48723 | Sedimento | 296266 | 6227919 | Proyecto | 19.10.2012 | 22.10.2012 |
| E7-3  | 48724 | Sedimento | 296266 | 6227919 | Proyecto | 19.10.2012 | 22.10.2012 |
| E8-1  | 48725 | Sedimento | 280769 | 6222026 | Proyecto | 19.10.2012 | 22.10.2012 |
| E8-2  | 48726 | Sedimento | 280769 | 6222026 | Proyecto | 19.10.2012 | 22.10.2012 |
| E8-3  | 48727 | Sedimento | 280769 | 6222026 | Proyecto | 19.10.2012 | 22.10.2012 |
| E8-4  | 48728 | Sedimento | 280769 | 6222026 | Proyecto | 19.10.2012 | 22.10.2012 |
| E8-5  | 48729 | Sedimento | 280769 | 6222026 | Proyecto | 19.10.2012 | 22.10.2012 |
| E9-1  | 48730 | Sedimento | 294626 | 6229226 | Proyecto | 19.10.2012 | 22.10.2012 |
| E9-2  | 48731 | Sedimento | 294626 | 6229226 | Proyecto | 19.10.2012 | 22.10.2012 |
| E9-3  | 48732 | Sedimento | 294626 | 6229226 | Proyecto | 19.10.2012 | 22.10.2012 |
| E9-4  | 48733 | Sedimento | 294626 | 6229226 | Proyecto | 19.10.2012 | 22.10.2012 |
| E9-5  | 48734 | Sedimento | 294626 | 6229226 | Proyecto | 19.10.2012 | 22.10.2012 |
| E10-1 | 48735 | Sedimento | 293999 | 6228832 | Proyecto | 19.10.2012 | 22.10.2012 |
| E10-2 | 48736 | Sedimento | 293999 | 6228832 | Proyecto | 19.10.2012 | 22.10.2012 |

Continuación tabla 9

|         |       |                  |        |         |          |            |            |
|---------|-------|------------------|--------|---------|----------|------------|------------|
| E10-3   | 48737 | Sedimento        | 293999 | 6228832 | Proyecto | 19.10.2012 | 22.10.2012 |
| E10-4   | 48738 | Sedimento        | 293999 | 6228832 | Proyecto | 19.10.2012 | 22.10.2012 |
| E10-5   | 48739 | Sedimento        | 293999 | 6228832 | Proyecto | 19.10.2012 | 22.10.2012 |
| E11-1   | 48740 | Sedimento        | 288164 | 6228156 | Proyecto | 19.10.2012 | 22.10.2012 |
| E11-2   | 48741 | Sedimento        | 288164 | 6228156 | Proyecto | 19.10.2012 | 22.10.2012 |
| E11-3   | 48742 | Sedimento        | 288164 | 6228156 | Proyecto | 19.10.2012 | 22.10.2012 |
| E11-4   | 48743 | Sedimento        | 288164 | 6228156 | Proyecto | 19.10.2012 | 22.10.2012 |
| E11-5   | 48744 | Sedimento        | 288164 | 6228156 | Proyecto | 19.10.2012 | 22.10.2012 |
| E11-6   | 48745 | Sedimento        | 288164 | 6228156 | Proyecto | 19.10.2012 | 22.10.2012 |
| E1-A1   | 48704 | Agua superficial | 319356 | 6219770 | Proyecto | 18.10.2012 | 19.10.2012 |
| E2-A1   | 48705 | Agua superficial | 317388 | 6219945 | Proyecto | 18.10.2012 | 19.10.2012 |
| E3-A1   | 48706 | Agua superficial | 315726 | 6219319 | Proyecto | 18.10.2012 | 19.10.2012 |
| E4-A1   | 48746 | Agua superficial | 314670 | 6232740 | Proyecto | 19.10.2012 | 22.10.2012 |
| E5-A1   | 48747 | Agua superficial | 309556 | 6238922 | Proyecto | 19.10.2012 | 22.10.2012 |
| E6-A1   | 48748 | Agua superficial | 306049 | 6232822 | Proyecto | 19.10.2012 | 22.10.2012 |
| E7-A1   | 48749 | Agua superficial | 296266 | 6227919 | Proyecto | 19.10.2012 | 22.10.2012 |
| E8-A1   | 48750 | Agua superficial | 280769 | 6222026 | Proyecto | 19.10.2012 | 22.10.2012 |
| E9-A1   | 48751 | Agua superficial | 294626 | 6229226 | Proyecto | 19.10.2012 | 22.10.2012 |
| E10-A1  | 48752 | Agua superficial | 293999 | 6228832 | Proyecto | 19.10.2012 | 22.10.2012 |
| E11-A1  | 48753 | Agua superficial | 288164 | 6228156 | Proyecto | 19.10.2012 | 22.10.2012 |
| E4-BCO1 | 48754 | Agua superficial | 314670 | 6232740 | Proyecto | 19.10.2012 | 22.10.2012 |
| E4-BCO2 | 48755 | Agua superficial | 314670 | 6232740 | Proyecto | 19.10.2012 | 22.10.2012 |

**ANEXO 2. PARÁMETROS  
COMPLEMENTARIOS EN MUESTRAS  
DE AGUAS.**



**Tabla 10.** Parámetros complementarios de las muestras de aguas según estación.

| Código muestra cliente | Código muestra CENMA | pH   | T °C | Oxígeno disuelto |      | Conductividad (µS/cm) | Observaciones        |
|------------------------|----------------------|------|------|------------------|------|-----------------------|----------------------|
|                        |                      |      |      | %                | mg/L |                       |                      |
| E1-A1                  | 48704                | 7,60 | 13,2 | -                | -    | -                     | Quebrada Juan López  |
|                        |                      | 7,73 | 13,1 | -                | -    | -                     |                      |
|                        |                      | 7,78 | 13,0 | -                | -    | -                     |                      |
|                        |                      | 7,59 | 12,8 | -                | -    | -                     |                      |
|                        |                      | 7,54 | 12,9 | -                | -    | -                     |                      |
| E2-A2                  | 48705                | 7,92 | 12,7 | -                | -    | -                     | Aguas frías          |
|                        |                      | 7,93 | 12,7 | -                | -    | -                     |                      |
|                        |                      | 7,93 | 12,6 | -                | -    | -                     |                      |
|                        |                      | 7,97 | 12,6 | -                | -    | -                     |                      |
|                        |                      | 8,03 | 12,6 | -                | -    | -                     |                      |
| E3-A1                  | 48706                | 8,06 | 16,6 | -                | -    | -                     | Paso Doña Marcela    |
|                        |                      | 7,99 | 16,5 | -                | -    | -                     |                      |
|                        |                      | 7,93 | 16,4 | -                | -    | -                     |                      |
|                        |                      | 7,81 | 16,3 | -                | -    | -                     |                      |
|                        |                      | 7,77 | 16,3 | -                | -    | -                     |                      |
| E4-A1                  | 48746                | 7,66 | 15,3 | 111,6            | 10,7 | 140,0                 | El Asiento           |
|                        |                      | 7,97 | 15,5 | 106,6            | 10,2 | 140,0                 |                      |
|                        |                      | 7,49 | 15,1 | 89,50            | 8,25 | 859,0                 |                      |
|                        |                      | 7,97 | 15,6 | 111,2            | 10,7 | 140,0                 |                      |
|                        |                      | 7,90 | 15,6 | 104,8            | 10,0 | 140,0                 |                      |
| E5-A1                  | 48747                | 7,61 | 17,2 | 97,70            | 9,07 | 85,00                 | El Pichi             |
|                        |                      | 7,54 | 17,1 | 98,50            | 9,18 | 85,00                 |                      |
|                        |                      | 7,61 | 17,2 | 97,50            | 9,12 | 85,00                 |                      |
|                        |                      | 7,45 | 17,1 | 94,00            | 8,79 | 69,00                 |                      |
|                        |                      | 7,35 | 17,0 | 97,00            | 9,11 | 85,00                 |                      |
| E6-A1                  | 48748                | 8,51 | 19,8 | 94,00            | 8,90 | 254,0                 | Villa Alhue          |
|                        |                      | 8,44 | 19,3 | 82,50            | 7,39 | 227,0                 |                      |
|                        |                      | 8,31 | 18,4 | 104,9            | 9,51 | 260,0                 |                      |
|                        |                      | 8,14 | 18,1 | 100,8            | 9,11 | 261,0                 |                      |
|                        |                      | 8,07 | 17,7 | 82,60            | 7,51 | 260,0                 |                      |
| E7-A1                  | 48749                | 7,13 | 18,1 | 82,40            | 7,58 | 3560                  | Estero Carén oriente |
|                        |                      | 7,27 | 16,5 | 85,60            | 7,70 | 3505                  |                      |
|                        |                      | 7,25 | 17,5 | 74,00            | 6,43 | 3507                  |                      |

Continuación tabla 10

|        |       |      |      |       |      |       |                               |
|--------|-------|------|------|-------|------|-------|-------------------------------|
| E8-A1  | 48750 | 7,24 | 15,6 | 70,00 | 6,75 | 2091  | Puente Alhue<br>en Rapel      |
|        |       | 7,33 | 15,6 | 91,30 | 8,77 | 2076  |                               |
|        |       | 7,29 | 15,5 | 86,00 | 8,25 | 2104  |                               |
|        |       | 7,30 | 15,2 | 85,00 | 8,19 | 2096  |                               |
|        |       | 6,99 | 14,9 | 0,000 | 0,00 | 1980  |                               |
| E9-A1  | 48751 | 7,59 | 16,2 | 107,0 | 10,3 | 242,0 | Estero Alhue<br>antes junta   |
|        |       | 7,62 | 16,1 | 122,8 | 11,9 | 211,0 |                               |
|        |       | 8,20 | 16,2 | 131,0 | 12,6 | 156,0 |                               |
|        |       | 8,44 | 16,4 | 132,0 | 12,6 | 198,0 |                               |
|        |       | 8,61 | 16,7 | 134,0 | 12,8 | 262,0 |                               |
| E10-A1 | 48752 | 8,18 | 16,5 | 123,0 | 11,7 | 3518  | Estero Carén<br>antes junta   |
|        |       | 8,06 | 17,1 | 108,6 | 10,3 | 3460  |                               |
|        |       | 8,04 | 17,3 | 113,7 | 10,8 | 3591  |                               |
|        |       | 8,06 | 18,5 | 112,0 | 10,8 | 3600  |                               |
|        |       | 8,13 | 17,2 | 116,0 | 11,0 | 3604  |                               |
| E11-A1 | 48753 | 7,83 | 17,4 | 125,8 | 11,8 | 2232  | Estero Alhue<br>después junta |
|        |       | 7,94 | 17,2 | 126,0 | 11,9 | 2216  |                               |
|        |       | 8,49 | 17,2 | 122,0 | 11,4 | 2237  |                               |
|        |       | 8,54 | 17,3 | 123,0 | 11,5 | 2235  |                               |
|        |       | 8,39 | 17,3 | 120,7 | 11,3 | 2219  |                               |
|        |       | 8,31 | 17,3 | 121,4 | 11,4 | 2235  |                               |



**ANEXO 3. CONCENTRACIONES DE  
SULFATO, MOLIBDENO Y OTROS  
PARÁMETROS EN MUESTRAS  
ANALIZADAS.**

**Tabla 11.** Concentraciones y otros parámetros para sulfato y molibdeno en las muestras analizadas.

| Muestra |            | Concentración<br>(mg/Kg), BMS | % de humedad | pH   | MO % | SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> (mg/Kg) |
|---------|------------|-------------------------------|--------------|------|------|---------------------------------------|
|         |            | Mo                            |              |      |      |                                       |
| E1-1    | Sedimentos | <7                            | 0,50         | 7,03 | 1,20 | 328                                   |
| E1-2    | Sedimentos | <7                            | 0,52         | 7,46 | 1,12 | 247                                   |
| E1-3    | Sedimentos | <7                            | 0,54         | 7,39 | 1,47 | 536                                   |
| E1-4    | Sedimentos | <7                            | 0,43         | 7,51 | 1,24 | 369                                   |
| E1-5    | Sedimentos | <7                            | 0,54         | 7,28 | 1,34 | 369                                   |
| E2-1    | Sedimentos | <7                            | 0,55         | 7,44 | 0,94 | 246                                   |
| E2-2    | Sedimentos | <7                            | 0,58         | 7,68 | 1,05 | 413                                   |
| E2-3    | Sedimentos | <7                            | 0,56         | 7,53 | 1,19 | 124                                   |
| E2-4    | Sedimentos | <7                            | 0,63         | 7,39 | 1,61 | 124                                   |
| E2-5    | Sedimentos | <7                            | 0,60         | 7,21 | 1,33 | 412                                   |
| E3-1    | Sedimentos | <7                            | 0,39         | 7,15 | 0,88 | 370                                   |
| E3-2    | Sedimentos | <7                            | 0,45         | 7,43 | 0,90 | 41,1                                  |
| E3-3    | Sedimentos | <7                            | 0,48         | 7,32 | 1,14 | 289                                   |
| E3-4    | Sedimentos | <7                            | 0,48         | 6,59 | 1,39 | 0,00                                  |
| E3-5    | Sedimentos | <7                            | 0,48         | 7,30 | 1,24 | 123                                   |
| E4-1    | Sedimentos | <7                            | 0,40         | 7,31 | 0,98 | 494                                   |
| E4-2    | Sedimentos | <7                            | 0,51         | 6,74 | 1,61 | 207                                   |
| E4-3    | Sedimentos | <7                            | 0,45         | 6,91 | 1,16 | 413                                   |
| E4-4    | Sedimentos | <7                            | 0,51         | 7,09 | 1,00 | 248                                   |
| E4-5    | Sedimentos | 46                            | 0,37         | 7,50 | 0,70 | 165                                   |
| E5-1    | Sedimentos | <7                            | 0,77         | 7,60 | 1,90 | 449                                   |

Continuación tabla 11

|       |            |     |      |      |      |       |
|-------|------------|-----|------|------|------|-------|
| E5-2  | Sedimentos | <7  | 0,77 | 7,38 | 1,67 | 41,4  |
| E5-3  | Sedimentos | <7  | 0,78 | 7,70 | 6,66 | 123   |
| E5-4  | Sedimentos | <7  | 0,71 | 7,65 | 1,66 | 41,1  |
| E5-5  | Sedimentos | 64  | 0,81 | 7,23 | 1,74 | 371   |
| E6-1  | Sedimentos | <7  | 0,53 | 7,28 | 1,41 | 164   |
| E6-2  | Sedimentos | <7  | 0,50 | 7,28 | 1,05 | 205   |
| E6-3  | Sedimentos | 22  | 0,47 | 7,27 | 0,93 | 206   |
| E6-4  | Sedimentos | <7  | 0,55 | 7,28 | 1,27 | 411   |
| E6-5  | Sedimentos | <7  | 0,38 | 7,44 | 0,79 | 205   |
| E7-1  | Sedimentos | 40  | 0,65 | 6,95 | 1,21 | 8806  |
| E7-2  | Sedimentos | 16  | 0,72 | 6,90 | 2,25 | 823   |
| E7-3  | Sedimentos | 65  | 1,54 | 7,04 | 4,82 | 10509 |
| E8-1  | Sedimentos | <7  | 2,75 | 6,73 | 4,89 | 1179  |
| E8-2  | Sedimentos | <7  | 0,43 | 7,10 | 0,97 | 575   |
| E8-3  | Sedimentos | <7  | 0,57 | 7,39 | 1,27 | 1479  |
| E8-4  | Sedimentos | <7  | 0,33 | 6,98 | 0,69 | 41,2  |
| E8-5  | Sedimentos | <7  | 0,66 | 6,97 | 1,76 | 1608  |
| E9-1  | Sedimentos | <7  | 0,43 | 6,74 | 1,16 | 696   |
| E9-2  | Sedimentos | <7  | 0,46 | 7,23 | 1,14 | 1028  |
| E9-3  | Sedimentos | <7  | 0,31 | 6,82 | 0,75 | 617   |
| E9-4  | Sedimentos | <7  | 0,30 | 6,98 | 0,62 | 289   |
| E9-5  | Sedimentos | 8   | 0,33 | 7,36 | 0,73 | 657   |
| E10-1 | Sedimentos | 67  | 2,14 | 6,98 | 7,03 | 10005 |
| E10-2 | Sedimentos | 321 | 4,65 | 7,04 | 13,7 | 14839 |
| E10-3 | Sedimentos | 22  | 1,77 | 7,23 | 4,39 | 22249 |
| E10-4 | Sedimentos | 22  | 0,58 | 7,21 | 1,47 | 4541  |

Continuación tabla 11

|                     |            |                            |            |           |            |                            |
|---------------------|------------|----------------------------|------------|-----------|------------|----------------------------|
| E10-5               | Sedimentos | 46                         | 1,00       | 6,63      | 2,25       | 5216                       |
| E11-1               | Sedimentos | <7                         | 0,28       | 7,24      | 0,62       | 1524                       |
| E11-2               | Sedimentos | 17                         | 0,33       | 7,65      | 0,78       | 575                        |
| E11-3               | Sedimentos | 85                         | 0,36       | 7,30      | 0,80       | 863                        |
| E11-4               | Sedimentos | 19                         | 0,33       | 7,36      | 0,67       | 123                        |
| E11-5               | Sedimentos | 58                         | 0,33       | 7,25      | 0,78       | 287                        |
| E11-6               | Sedimentos | 9                          | 0,28       | 7,15      | 0,61       | 451                        |
| Límite de detección |            | 7                          |            |           |            |                            |
| Fecha de análisis   |            | 11.12.2012 -<br>14.12.2012 | 19.11.2012 | 6.12.2012 | 22.11.2012 | 12.11.2012 -<br>29.12.2012 |

## **ANEXO 4. ESQUEMAS SATÉLITALES DE LA ZONA DE MUESTREO.**



Localización de zonas de muestreo

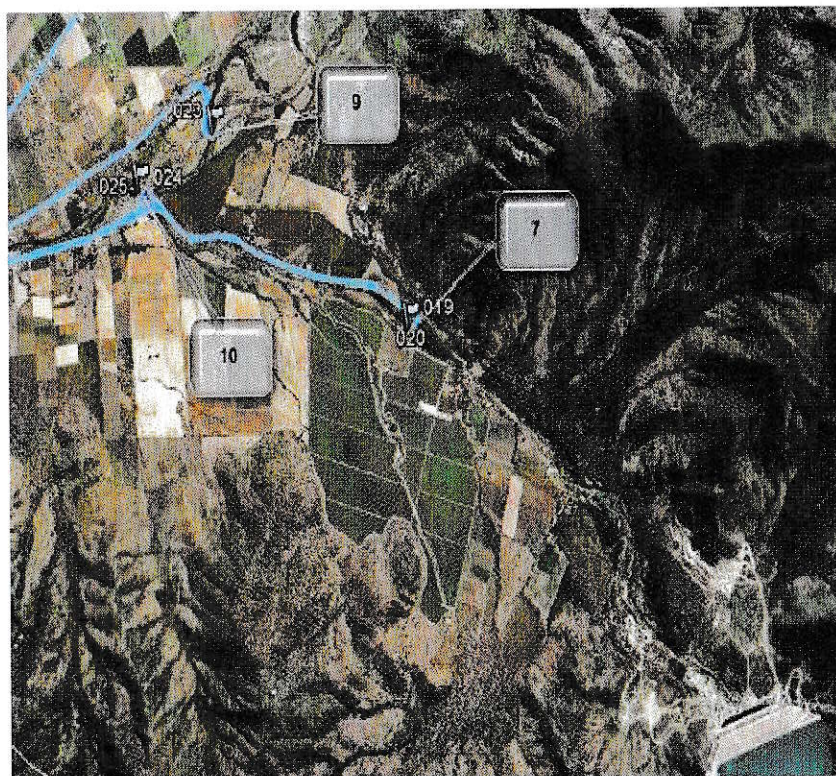


Figura 15. Estaciones E1, E2 y E3.

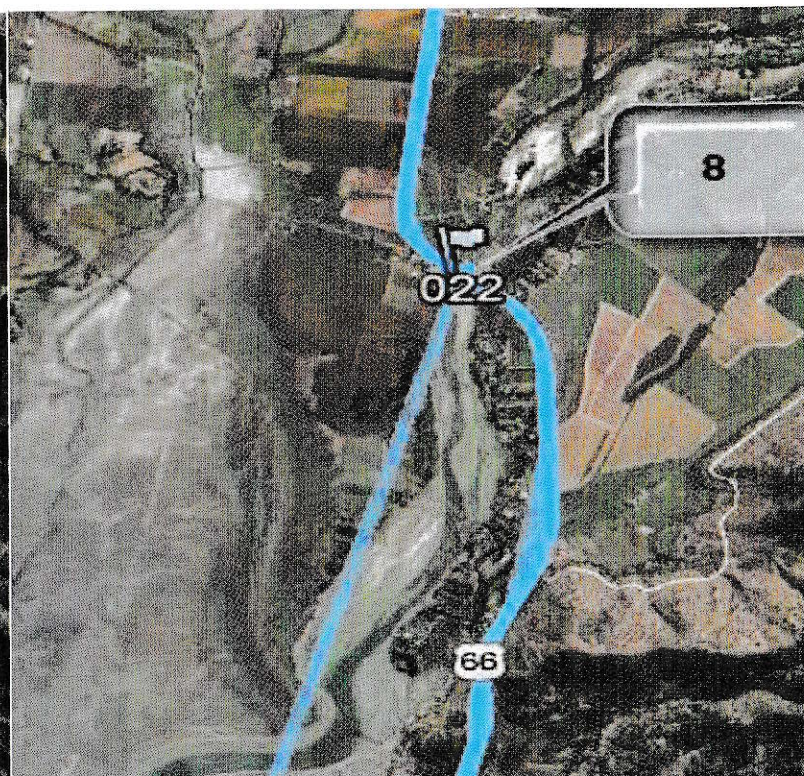


Figura 16. Estaciones E4, E5 y E6.





**Figura 17.** Estaciones E7, E9 y E10.



**Figura 18.** Estación E8.





Figura 19. Estación 11.