

UCH-FC
Q. Ambiental
C207.
C.1



FACULTAD DE CIENCIAS
UNIVERSIDAD DE CHILE

“ESTUDIO DE HUELLA DE AGUA GRIS EN LA MINERIA DEL COBRE EN CHILE”

Seminario de Título entregado a la Universidad de Chile en cumplimiento parcial de los requisitos para optar al Título de:

Químico Ambiental

Víctor Andrés Carmona Guerrero

Director de Seminario de Título: M. Cs. Claudia A. Peña Urrutia
Profesor Patrocinante: Dra. Isel Cortés Nodarse

Diciembre de 2012
Santiago – Chile



INFORME DE APROBACIÓN SEMINARIO DE TÍTULO

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

VICTOR ANDRES CARMONA GUERRERO

“ESTUDIO SOBRE HUELLA DE AGUA GRIS EN LA MINERIA DEL COBRE EN CHILE”

Ha sido aprobado por la Comisión de Evaluación, en cumplimiento parcial de los requisitos para optar al Título de Químico Ambiental

COMISIÓN DE EVALUACIÓN

M. Cs. Claudia A. Peña Urrutia

Director de Seminario de Título

Dra. Isel Cortés Nodarse

Profesor Patrocinante

M. Cs. Sylvia Copaja

Corrector

M. Cs. Irma Vila


Corrector

[Handwritten signature]

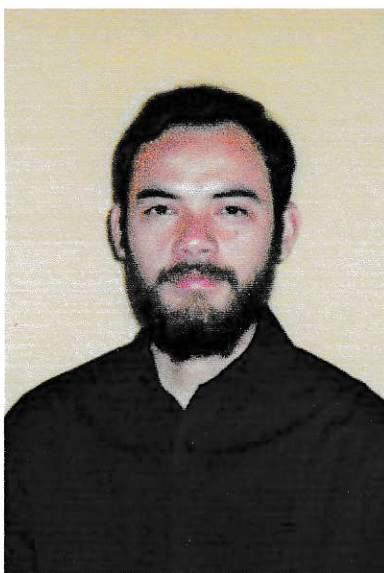
[Handwritten signature]

[Handwritten signature]

[Handwritten signature]



Santiago de Chile, Diciembre de 2012



Nací en Chile en la ciudad de Concepción el 9 de Junio de 1987. Comencé mi educación formal en el colegio “Santa María, La Florida”, establecimiento en el que terminaría mis estudios básicos junto a los cuatro años de educación media. Luego de finalizar el colegio y dar la prueba de selección universitaria (PSU) postulé a la carrera de “Licenciatura en Artes c/m Sonido” de la Universidad de Chile. Ingresé a aquella carrera y alcancé a completar medio semestre, luego del cual decidí retirarme de la misma y estudiar otra carrera. Al siguiente año tomé nuevamente la PSU y postulé a la carrera de “Licenciatura en Ciencias Ambientales c/m Química” también de la Universidad de Chile. Durante mis estudios en ésta realicé mi Unidad de Investigación en el Centro Nacional de Medio Ambiente (CENMA) y egresé al cabo de cinco años por reprobar algunos ramos. Recientemente estuve asistiendo al Centro de Investigación Minera y Metalúrgica (CIMM) con el fin de hacer mi seminario de título sobre Huella de Agua Gris.



Agradecimientos

Le agradezco a la SuperIntendencia de Servicios Sanitarios por brindarme los datos que solicité, ya que gracias a ello pude realizar mi seminario de título.

Quiero agradecer al Centro de Investigación Minera y Metalúrgica (CIMM) y en especial a mi Directora de tesis, la M. Cs. Claudia Peña U. directora del área de Sustentabilidad Industrial en el CIMM, quién confió en mis capacidades y brindo toda su disposición a mis inquietudes. Agradezco también a Isabel Gutiérrez, Paula Marín y Jocelyn Osorio, quienes compartieron su oficina conmigo y me ayudaron en todo.

Le agradezco a Don Francisco González Arredondo trabajador de CODELCO-TENIENTE, que contestó mis múltiples consultas con la mejor disposición y prontitud.

A Manuel Garcés le agradezco la ayuda brindada para aclarar mis dudas respondiendo con el mayor detalle sobre su trabajo.

Agradezco a mi profesora guía la Dra. Isel Cortés Nodarse, profesora adjunta de la Universidad de Chile, que me aclaró y guió a lo largo de todas mis inquietudes.

Quiero agradecer en especial a Nicole Tapia, por el gran apoyo y amor que me entregó durante toda esta etapa, brindándome siempre su ayuda incondicional en todo lo que necesitase, permitiendo que pueda culminar este importante proceso.

A mis amigos Sergio, Daniela, Johan, Nicole S. muchas gracias por el apoyo e interés mostrado en mi seminario, y estar siempre dispuestos a ayudarme en lo que necesitara.

A mis padres les agradezco toda su ayuda, preocupación por mis avances y que estuvieran siempre atentos que no me faltase nada. A mis suegros, Waldo y Cristina, les agradezco sus innumerables atenciones y disposición para ayudarme.

INDICE DE CONTENIDO

I. INTRODUCCION.....	1
1.1 Motivación del Estudio.....	1
1.2 Huella de Agua	2
1.3 Consideraciones del Estudio	5
1.4 Objetivos.....	7
1.5 Sistema de Estudio	9
1.5.1 División el Teniente.....	9
1.5.2 Cuerpo de agua receptor: Estero Alhué	15
II. METODOLOGIA	17
2.1 Método 1, 2 y 3.....	17
2.1.1 Maximum Permissible Addition (MPA).....	18
2.1.2 Concentraciones Actuales (C_{act}).....	21
2.1.3 Decreto Supremo 90 (DS90).....	22
2.1.4 Norma Chilena oficial 409 (NCh409)	23
2.2 Tratamiento de datos.....	23
2.3 Criterios para Tratamiento de datos.....	25
III. RESULTADOS	27
3.1 Metodología general para utilizar HAG en minería.....	27
3.2 Especies químicas consideradas en cálculos	33
3.3 Huellas de Agua Gris (HAGs)	33
3.3.1 Resultados de los tres métodos.....	33
3.3.1.1 HAGs anuales.....	33
3.3.1.2 HAG per ton Cu	36

3.3.2	Comparación HAG con Q_{nat}	39
IV.	DISCUSION.....	42
4.1	Comparación entre Métodos 1, 2 y 3.....	42
4.1.1	HAGs anuales.....	42
4.1.2	HAG per ton Cobre fino.....	44
4.1.3	HAG anuales versus Q_{nat}	45
4.1.4	Método recomendado.....	46
4.2	Comparación de Resultados con literatura.....	47
4.3	Especies más importantes según HAG.....	50
4.3.1	Posibles consecuencias de valores altos de sulfato y molibdeno.....	51
4.4	Análisis de Metodología Utilizada.....	53
4.4.1	Criterio E. Alhué como cuerpo receptor.....	53
4.4.2	Incertidumbre de HAG.....	53
4.4.3	Fuentes Difusas de Contaminación.....	54
4.4.4	Criterio para valores bajo el LD.....	54
4.4.5	Concentración Natural (C_{act}) o Actual (C_{nat}).....	55
4.4.6	Limitaciones Metodología Utilizada.....	56
4.5	Antecedentes bibliográficos del Embalse Rapel.....	57
V.	CONCLUSIONES.....	59
VI.	REFERENCIAS.....	61
VII.	ANEXOS.....	68

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. MPAs descritos para agua dulce utilizados para calcular las HAGs.



INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación general de la minera el Teniente en el sector de la cordillera de los Andes y del Embalse Carén (Depósito de Relaves).

Figura 2. Esquema general de la producción de cobre en DET a través de minerales sulfurados, junto al destino del efluente industrial.

Figura 3. Imagen satelital del embalse Carén, donde se puede observar la zona de Aguas Claras, el Muro del embalse, la Planta de Abatimiento, y la salida de la Canaleta de Relaves de DET.

Figura 4. Esquema del origen hasta la descarga del efluente industrial generado en DET.

Figura 5. Mapa de la subcuenca del Alhué dentro de la cuenca del Rapel (límites de subcuencas en rojo). Se puede observar como el Estero Carén A llega hasta el Embalse Carén, al centro del mapa, y luego continúa aguas abajo por la Zona B del Estero Carén, confluyendo con el Estero Alhué, que desemboca en el Embalse Rapel.

Figura 6. Esquema que indica las tres alternativas para representar la diferencia $C_{max} - C_{nat}$, y que origina los tres **Métodos** de cálculo.

Figura 7. Propuesta de un esquema general en etapas para la aplicación del indicador HAG para un producto minero.

Figura 8. Diagrama que muestra la forma propuesta para manejar la elección de las concentraciones que se utilizarán como C_{nat} y $C_{máx}$.

Figura 9. Esquema que resume las decisiones y formas que se tomaron para el estudio de caso en este seminario.

Figura 10. Resultados de las HAGs anuales para División el Teniente utilizando el **Método 1** (MPA). Se indica la incertidumbre generada por la Desviación Estándar de las concentraciones en la descarga.

Figura 11. Resultados de las HAGs anuales para División el Teniente utilizando el **Método 2** (DS90 – C_{act}). Se indica la incertidumbre generada por la Desviación Estándar de las concentraciones en la descarga.

Figura 12. Resultados de las HAGs anuales para División el Teniente utilizando el **Método 3** (NCh409 – C_{act}). Se indica la incertidumbre generada por la Desviación Estándar de las concentraciones en la descarga.

Figura 13. HAGs per tonelada de cobre fino calculadas con el **Método 1** (MPA) para el cobre producido en DET. Sobre cada barra aparece la especie química responsable del valor más alto en cada año.

Figura 14. HAGs per tonelada de cobre fino calculadas con el **Método 2** (DS90 – C_{act}) para el cobre producido en DET. Sobre cada barra aparece la especie química responsable del valor más alto en cada año.

Figura 15. HAGs per tonelada de cobre fino calculadas con el **Método 3** (NCh409 – C_{act}) para el cobre producido en DET. Sobre cada barra aparece la especie química responsable del valor más alto en cada año.

Figura 16. Comparación del Caudal natural (Q_{nat}) del estero Alhué con las HAGs más altas de cada año utilizando el **Método 1** (MPA). En el recuadro se indica el año de la HAG junto a la especie química que aportó el mayor valor en ese año.

Figura 17. Comparación del Caudal natural (Q_{nat}) del estero Alhué con las HAGs más altas de cada año utilizando el **Método 2** (DS90 – C_{act}). En el recuadro se indica el año de la HAG junto a la especie química que aportó el mayor valor en ese año.

Figura 18. Comparación del Caudal natural (Q_{nat}) del estero Alhué con las HAGs más altas de cada año utilizando el **Método 3** (NCh409 – C_{act}). En el recuadro se indica el año de la HAG junto a la especie química que aportó el mayor valor en ese año.

Figura 19. Comparación entre los valores de HAG anual obtenidos en este estudio (Resultados) y los valores de HAG anual informados en Garcés M. (2011).

Figura 20. Múltiples valores de HAG contrastados con el valor promedio calculado para una tonelada de cobre fino en División el Teniente. Los términos “Ind”, “Past” y

“Mix” están asociados a la naturaleza de la producción, indicando un método Industrial, de Pastoreo y Mixto, respectivamente.

Lista de abreviaturas

C_{nat}	Concentración natural
C_{act}	Concentración actual
C_{max}	Concentración máxima
DET	División El Teniente
HAG	Huella de Agua Gris
MPA	Maximum Permissible Addition
Q_{nat}	Caudal natural
SE	Sistema de Estudio

RESUMEN

Este seminario de título busca estudiar la contaminación de agua dulce por efecto de la producción primaria de cobre en la gran minería del país, por medio del indicador Huella de Agua Gris (HAG). Los objetivos específicos fueron: desarrollar una metodología y un marco conceptual para la determinación del indicador HAG en la producción minera de cobre; calcular la HAG anual y la HAG asociada a la producción de una tonelada de cobre fino por vía pirometalúrgica, en el estudio de caso en División El Teniente – CODELCO (DET); determinar los contaminantes más importantes en los efluentes de esta división y finalmente establecer si se sobrepasó la capacidad de asimilación del Estero Alhué (cuerpo de agua en estudio) de acuerdo a los resultados de la HAG.

La metodología general junto a su marco conceptual para determinar la HAG se obtuvo bajo la forma de cuatro etapas en donde se detalla cada paso a seguir para poder aplicar la HAG en producción minera de cobre u otros metales.

Finalmente por medio del Método de cálculo para HAG que se mostró más apropiado (**Método 2**) entre los 3 utilizados, que contempla los niveles del Decreto Supremo 90, se obtuvieron las siguientes HAG anuales: $1,19 \times 10^8$ m³/año para 2008, $1,11 \times 10^8$ m³/año para 2009 y $8,01 \times 10^7$ m³/año para 2010, indicando los volúmenes de agua requeridos para diluir los contaminantes agregados al Estero Alhué, por efecto de la producción de Cobre anual por vía pirometalúrgica en DET. Por otro lado la HAG de DET referida a producto alcanzó un valor promedio de **262 m³/ton Cu**, tomando en cuenta los tres años estudiados. El contaminante responsable de los valores de HAG descritos y por ende el más importante, fue el sulfato descargado en el efluente y que llega hasta el Estero Alhué. El segundo contaminante más importante fue el molibdeno, que sin embargo nunca superó ni se acercó a los niveles mostrados por el sulfato.

Al hacer la comparación entre los valores de HAG anuales con los caudales naturales del Estero Alhué, se observa que la capacidad de asimilación del cuerpo de agua no fue sobrepasada en 2010, pero si fue superada durante los años 2008 y 2009.

Cabe destacar que dada la situación hídrica en el mundo el papel del indicador Huella de Agua con sus componentes azul, verde y gris, es muy importante dado que puede entregar información valiosa referida a los niveles de agua dulce requeridos por procesos, productos, consumidores, empresas, u otros. En nuestro contexto, para que el cobre u otros productos sean competitivos en el mercado internacional es necesario preocuparse de la HAG, indicador que para su aplicación requiere de más Normas de Calidad Secundarias o estudios similares, que provean a los cálculos de HAG de la sitio-especificidad necesaria para no depender de estándares internacionales u otros que nos dejen en situaciones complicadas en el mercado internacional al mostrar bajos desempeños ambientales, que no representan necesariamente la realidad de nuestros sistemas productivos.



ABSTRACT

This research aims to study the freshwater pollution due to the primary copper production in the large mining sector of the country, through the Grey Water Footprint indicator (GWF). The specific objectives were to develop a methodology and conceptual framework for determining the indicator GWF in copper mine production; calculate the annual GWF and the GWF associated with the production of one ton of copper by pyrometallurgical processes, in the case study in El Teniente - CODELCO (DET); determine the major pollutants in the effluents of this division and finally establish if the assimilative capacity of Estero Alhué (water body under study) was exceeded, according to the results of the GWF.

The general methodology along with its conceptual framework to determine the GWF was obtained in the form of a four-stage scheme, which details each step to follow in order to apply the GWF in mine production of copper or other metals.

Finally using the calculation method for GWF that was more appropriate (**Method 2**) between the 3 used, that includes the levels of Decreto Supremo 90, were obtained the following annual GWF: 1.19×10^8 m³/year for 2008, 1.11×10^8 m³/year for 2009 and $8,01 \times 10^7$ m³/year for 2010, indicating the volumes of water required to dilute pollutants added to the Estero Alhué, by effect of annual copper production from pyrometallurgical processes in DET. On the other hand the GWF of DET referred to product reached an average value of **262 m³/ton Cu**, taking into account the three years studied. The pollutant responsible for GWF values described and therefore the most important, was sulphate discharged in the effluent and that reaches the Estero Alhué. The second major pollutant was molybdenum, yet never approached or exceeded the levels shown by sulfate.

By making the comparison between the values of annual GWF and the natural flows of the Estero Alhué, it is observed that the assimilative capacity of the water body was not surpassed in 2010, but was exceeded during the years 2008 and 2009. Given the water situation in the world, the role of the Water Footprint indicator with his components blue, green and gray, is very important because it can provide valuable information relating to the levels required by freshwater processes, products, customers, companies, or others. In our context, for copper or other products to be competitive in the international market we need to worry about the GWF, indicator that requires for its application more Secondary Quality Standards or similar studies, that provide the GWF calculations the necessary site-specificity to not depend on international standards or others that leave us in difficult situations in the international market for showing low environmental performances, which do not necessarily represent the reality of our production systems.

I. INTRODUCCION

1.1 Motivación del Estudio

El agua dulce en el planeta representa uno de los recursos naturales esenciales para la vida, además de ser un recurso básico para toda actividad humana, incluyendo las industriales. Esto, junto a una disponibilidad limitada además de una distribución espacial heterogénea, hace que su consumo y uso en diversas aplicaciones deba estar bajo el concepto de una gestión sustentable, que permita su adecuada renovación y conservación en términos de cantidad y calidad. Por consiguiente existe preocupación en torno al recurso hídrico a nivel global y local, que se ve reflejada en la industria minera chilena que produce principalmente en áreas de gran aridez, y por ello tiene como prioridad avanzar hacia una gestión sustentable del recurso agua (COCHILCO, 2008). Cabe señalar que la minería del cobre es considerada un sector productivo estratégico de gran apoyo en el desarrollo económico de Chile representando en 2010 y 2011, el 17,4% y 15,9% respectivamente del Producto Interno Bruto (COCHILCO, 2012), y que además cuenta con grandes proyectos de inversión que aumentarán la producción de cobre de 5,4 millones de toneladas durante el período 2010-2011 a 8 millones de toneladas en el 2018 (SONAMI, 2011), de modo que en vista del presente y las estimaciones del sector, se hace evidente la necesidad de tener una gestión sustentable del recurso hídrico que permita como tal, el desarrollo minero y agrícola de la zona, y también satisfaga la demanda de las comunidades sin comprometer su calidad y disponibilidad futura (COCHILCO, 2008). Una forma en que la industria minera del cobre de Chile puede abordar la sustentabilidad del recurso es sobre la base de etapas en que se alcance primero el uso eficiente del agua, luego una

segunda etapa donde se logre una utilización efectiva, y finalmente la etapa de uso sustentable (Cote y col., 2010). En este contexto, la determinación del indicador Huella de Agua tiene el potencial para mejorar la gestión del recurso agua al aportar valiosa información en la actividad productiva del cobre, y al considerar específicamente la huella de agua gris (HAG), la componente que se preocupa de las aguas contaminadas o grises, indicar el grado de contaminación de agua dulce que puede ser asociado a la industria de este metal.

Tomando en consideración los estudios conducidos hasta ahora de Huella de Agua, se puede observar que una gran parte de los relacionados a huellas de productos (Hoekstra, 2010; Aldaya & Hoekstra, 2010; Chapagain & Hoekstra, 2011; Aldaya y col., 2010; Mekonnen & Hoekstra, 2010, 2010b, 2011; Ercin y col., 2012; Gerbens-Leenes y col., 2011; Van Oel & Hoekstra, 2012) están dirigidos al sector agropecuario, ya que, es éste el responsable del consumo mayoritario a nivel global de agua dulce (Hoekstra y col., 2011), mientras que en Chile sólo se han dado los primeros pasos: por una parte la viña Concha y Toro que midió su huella de agua convirtiéndose en pionera de la industria vitivinícola a nivel mundial (Concha y Toro, 2011), y en el caso de productos mineros un estudio de Huella de Agua realizado a División el Teniente de CODELCO (Garcés M., 2011), por lo que el presente estudio es parte de los pioneros en la materia.

1.2 Huella de Agua

El concepto de Huella de Agua desarrollado por Hoekstra y Chapagain hace referencia al indicador integral del uso directo e indirecto de agua dulce, que muestra los volúmenes de consumo de agua por fuente y los volúmenes de agua contaminada

por tipo de contaminación, generados durante un proceso, en la elaboración de un producto, por consumidor o por área geográfica, entre otros (Hoekstra y col., 2011).

De esta manera, la Huella de Agua de un producto es el volumen de agua dulce usada para producir aquel producto, medida a través de la cadena de producción completa. Esta información puede alimentar el debate con respecto al uso sustentable y equitativo del agua, además de constituir una buena base para la evaluación local de los impactos ambientales, sociales y económicos. Dependiendo del tipo de agua considerada se pueden establecer tres huellas:

- Huella de agua azul: Hace referencia al consumo de aguas superficiales y subterráneas a lo largo de la cadena de suministro de un producto, entendiendo “consumo” como la pérdida de agua disponible desde un cuerpo de agua subterránea-superficial en un área de captación, al ser evaporada, al ser devuelta a otra área de captación o al mar, o cuando es incorporada a un producto.
- Huella de agua verde: Se refiere al consumo de agua de precipitaciones que no experimentó escorrentía ni recargó aguas subterráneas, sino que quedó almacenada temporalmente en la parte superior del suelo o la vegetación.
- Huella de agua gris (HAG): Asociada a la contaminación, y definida como el volumen de agua dulce necesaria para asimilar una carga de contaminantes basándose en concentraciones naturales basales y estándares ambientales de calidad de agua (Hoekstra y col., 2011).

De acuerdo al Water Footprint Assessment Manual debemos entender la “concentración natural basal” a la que hace referencia la definición de HAG, como la concentración de una especie química en el cuerpo de agua receptor de la carga

contaminante, que existiría si no hubiese perturbaciones humanas en la cuenca hidrográfica, mientras que el “estándar ambiental de calidad de agua” sería la máxima concentración admisible en aquel cuerpo de agua.

Cabe señalar que un paso importante en el análisis a los valores de la HAG, es la comparación que se hace de este volumen con el Caudal natural (Q_{nat}) del cuerpo de agua considerado, bajo una escala temporal común, de manera de comprobar si se está sobrepasando o no la capacidad de asimilación del mismo.

Dentro de este trabajo se utilizaron las concentraciones actuales (C_{act}) del cuerpo de agua analizado como las concentraciones naturales basales, y para los estándares ambientales de calidad de agua se utilizaron: los Maximum Permissible Addition (MPA), las concentraciones máximas de descarga del Decreto Supremo 90¹ (DS90), y las concentraciones máximas de calidad de la Norma Chilena de Agua Potable (NCh409). A partir de la utilización de cada uno de estos valores se derivaron los distintos **Métodos** de cálculo para determinar las HAGs, como se explica en la **Metodología** (pág. 17).

Por último cabe señalar que para calcular una HAG, ésta debe estar referida a una especie contaminante específica, sin embargo dado que este indicador contempla la contaminación de manera general, hasta ahora la práctica común consiste en representar el valor de la huella a través del contaminante “más importante”, en otras palabras aquella especie química que tiene asociada un mayor valor de HAG. Por ejemplo, al calcular la HAG para un proceso industrial que posee una descarga líquida sobre un río, se tiene que existe presencia de hierro y cobre en la descarga, por lo que

¹ Se utilizaron los niveles establecidos en la *Tabla 1* del DS90: “Límites máximos permitidos para la descarga de residuos líquidos a cuerpos de agua fluviales”. Ver **Anexo 1**.

mediante los cálculos se determinó que la HAG asociada al hierro es de 400 m³/año mientras que la asociada al cobre es de 1000 m³/año. En este caso, el contaminante más importante sería el cobre debido a que los volúmenes de agua necesarios para diluir su aporte en el río (1000 m³/año) cubren los asociados al hierro.

1.3 Consideraciones del Estudio

Dentro de este estudio la huella de agua azul no se considera debido a que ya ha sido calculada para la minería del cobre, en un estudio en revisión para la producción de cátodos de cobre (Peña & Huijbregts, 2012), ni tampoco la huella de agua verde, ya que, agua almacenada temporalmente en la parte superior del suelo o la vegetación no es utilizada en la producción de cobre, por lo que sólo la HAG se estudiará en este seminario de título. De esta forma este seminario puede ser complementario al estudio de huella de agua azul indicado en lo que se refiere a aportar una idea más completa de la huella de agua detrás de la producción de cobre.

El estudio de caso presentado en este trabajo fue concebido con un enfoque de ciclo de vida considerando un sistema de la “cuna a la puerta” (cradle-to-gate), para la obtención de los productos comercializables de cobre de División el Teniente (DET) por vía pirometalúrgica² a través de minerales sulfurados, evaluando a través del indicador HAG el grado de contaminación producida en los cuerpos de agua. En este enfoque la “cuna” estaría contemplada por la extracción de los minerales en la mina, y la “puerta” estaría dada por el momento en el que los productos de cobre están listos para la venta. Dado que la información disponible referida a la contaminación de DET indicaba

² La pirometalurgia es una rama de la metalurgia en que la obtención y refinación de los metales se realiza utilizando calor, como en el caso de la fundición. La vía pirometalúrgica aplicada a los minerales sulfurados de cobre consiste en el proceso tradicional de concentración por flotación seguido de fusión y electro-refinación.

sólo descargas de líquidos sobre cuerpos de agua, es que la HAG se basó sólo en estos caudales descargados.

Los procesos usados para la obtención de cobre en DET se basan en las vías pirometalúrgica e hidrometalúrgica³, sin embargo se consideró el aporte de esta última vía como despreciable dentro de la HAG de la División completa, ya que el agua usada y consumida por la vía pirometalúrgica es en promedio más de 6 veces el agua consumida por la vía hidrometalúrgica (COCHILCO, 2008); a su vez la contribución en volumen dentro de los caudales totales del sistema estudiado en DET es mínima, indicando en promedio un 7% del volumen total (Garcés M., 2011); y por último y más importante, la producción de cobre por vía hidrometalúrgica es cercana al 0,9% del total producido por DET (Vergara y col., 2010). Por lo que aunque los resultados de HAG están hechos con datos que representan a la División completa, esto es considerando ambas vías, en realidad las HAG calculadas representan una buena aproximación de la contaminación generada por la producción de cobre por vía pirometalúrgica.

De acuerdo al concepto de la cuna a la puerta utilizando el enfoque de ciclo de vida, hasta ahora consideramos como límites del Sistema de Estudio desde el momento en que se extrae el mineral en el yacimiento, hasta la obtención de los productos de cobre listos para la venta. El resultado de tales límites sería la obtención de una huella de agua "directa", que contempla sólo la fase de producción. Sin embargo, dado que el enfoque de ciclo de vida indica que se debe analizar la

³ La Hidrometalurgia es una rama de la metalurgia en la cual el elemento de interés es extraído desde una solución que lo contiene. La vía hidrometalúrgica en el cobre consiste en un proceso de lixiviación, seguido de la extracción por solventes (SX-EW) y por último la electro-obtención. Esta vía es aplicada generalmente a los minerales oxidados, mediante la lixiviación en pilas.

relevancia de la cadena de suministros de los recursos (Baumann & Tillman, 2004) utilizados en grandes cantidades en la producción, también se deben agregar a este sistema aquellos procesos de apoyo vinculados a la obtención de éstos productos de cobre, es decir los que darían cuenta de la huella de agua “indirecta”. Considerando la parte directa e indirecta se contabilizan todas aquellas salidas de agua del mismo que puedan contaminar y por ende contribuir en la HAG. Sin embargo, dado que el desarrollo y aplicación de métodos para calcular huellas de agua es reciente, existe escaso registro de los datos adecuados, por lo que el cálculo de la HAG indirecta, se dejó fuera del estudio por la dificultad que presentaba obtener aquella información, además de la necesidad de acotar la profundidad del estudio a un sistema mas abordable.

Por otro lado la unidad funcional del sistema, es decir, la unidad que debe ilustrar la función que ejerce el producto (o conjunto de productos en este caso) de manera cuantificable (Weidema y col., 2004) será la producción de 1 tonelada de cobre fino. No se utilizó como unidad funcional a los cátodos de cobre u otro producto particular debido a que la naturaleza de la información y del sistema estudiado, impedía hacer una separación efectiva entre los productos generados por DET.

1.4 Objetivos

General:

Estudiar el estado de la contaminación de agua dulce en la producción primaria del cobre en la gran minería del país, por medio del indicador HAG.

Específicos:

- 1) Desarrollar una metodología y un marco conceptual para la determinación del indicador huella de agua gris en la producción minera de cobre.
- 2) Determinar la HAG anual y la HAG asociada a la producción de una tonelada de cobre fino por vía pirometalúrgica, a partir de los productos comercializables en el estudio de caso en División El Teniente – CODELCO.
- 3) Determinar los contaminantes más importantes en los efluentes del estudio de caso de acuerdo a los resultados de la HAG.
- 4) Establecer si se está sobrepasando la capacidad de asimilación del cuerpo de agua en estudio de acuerdo a los resultados de la HAG.

1.5 Sistema de Estudio

El Sistema de estudio como tal se separa en dos partes de interés que son: el lugar del que proviene la descarga de los residuos líquidos, y el cuerpo de agua que recibe tal descarga y por ende asimila los contaminantes. Como se mencionó anteriormente, el lugar en el que se estudiaron las descargas de residuos líquidos fue la DET, y para el cuerpo de agua afectado por éstas se consideró al Estero Alhué.

1.5.1 División el Teniente



Figura 1. Ubicación general de la minera el Teniente en el sector de la cordillera de los Andes y del Embalse Carén (Depósito de Relaves).

CODELCO-Chile División El Teniente, se localiza a 80 km al sur de Santiago en la sexta región de Chile (Fig. 1), en la cordillera de Los Andes a 2.500 m.s.n.m. y centra sus operaciones en la explotación subterránea de sus yacimientos productivos (ICE EIA, 2008). Se considera la mina subterránea de cobre más grande del mundo y realiza la explotación más austral dentro de las grandes mineras de cobre en Chile, por lo que no presenta los mismos niveles de escasez de agua que los procesos mineros en el desierto de Atacama (Garcés M., 2011). Cabe señalar que DET produce el 25%

del total estatal y el 7%⁴ del total nacional de cobre (SONAMI, 2012). Sus principales productos a la fecha son: cobre en calidad de ánodos, cátodos de cobre de alta pureza, ácido sulfúrico y concentrado de molibdenita (González F., 2012), y hasta diciembre de 2011 (CODELCO, 2011) lingotes de cobre RAF.

Para poder adentrarse en el funcionamiento de DET debemos hacer la diferencia entre dos lugares físicos importantes, separados por una gran distancia: el lugar de la extracción de minerales, “Minera el Teniente”, y el “Embalse Carén” (Fig. 1), lugar creado por DET con el propósito de depositar los relaves. Ahora considerando la Fig. 2 podemos apreciar cuales son de manera general los procesos involucrados en la producción de cobre y además la descarga de riles que hace la división.

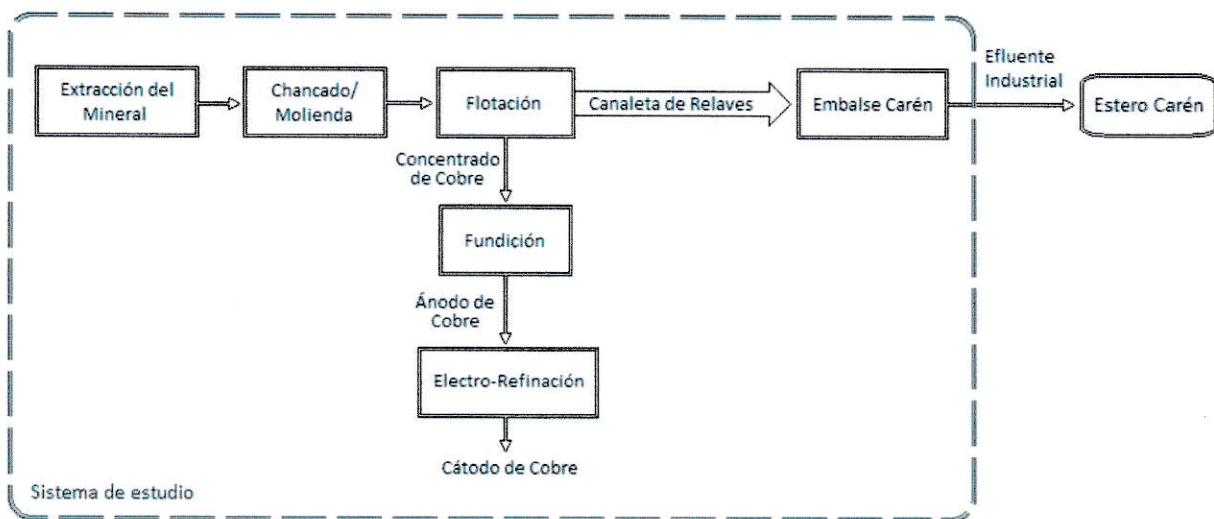


Figura 2. Esquema general de la producción de cobre en DET a través de minerales sulfurados, junto al destino del efluente industrial.

⁴ Ambos porcentajes fueron calculados a partir del promedio que representa la producción de DET entre 2008 a 2010.

Para analizar las descargas de residuos líquidos hechas por DET se utilizó la información oficial que llega a la Superintendencia de Servicios Sanitarios (SISS) y que debe entregar DET, de acuerdo a la legislación vigente en Chile sobre descargas a cuerpos de agua. A partir de éste medio y tal como se señala en la **Fig. 2**, se extrajo que DET sólo da cuenta de la descarga de riles que hace al Estero Carén. Esto no significa que sea la única descarga, ya que también existe una sobre el río Coya que representa menos del 3% del caudal de la descarga al Carén (González F., 2012), sino que mas bien es la que en acuerdo con la autoridad se estimó necesario monitorear constantemente dada su naturaleza. Respecto de esta situación este estudio tomará en cuenta sólo aquella descarga para calcular la HAG.

A continuación se hace una descripción general de cada uno de los procesos descritos en la **Fig. 2**, relacionados con la producción de cobre en DET:

- **Extracción del mineral:** En DET se realiza de manera subterránea por medio de la construcción de labores subterráneas horizontales como túneles, verticales o piques y también rampas. Estas labores se construyen por medio de explosivos en distintos niveles, que luego son reforzadas y se destinan a áreas de producción y servicios e infraestructura. Para explotar el mineral el método más utilizado es el de hundimiento por bloques (block caving), que desprende y fragmenta una columna de roca mineralizada utilizando explosivos en su base (CODELCO, 2012a).
- **Chancado/Molienda:** Debido a que el mineral proveniente de la mina tiene una granulometría variada, en primera instancia el Chancado homogeniza y disminuye el tamaño de las partículas mayores hasta un máximo de 1,27 cm. Luego en la Molienda a través de grandes molinos de forma cilíndrica, se logra llegar a un tamaño máximo de partícula de 180 µm, con lo que la mayor parte de los minerales

de cobre terminan en forma de partículas individuales. Finalmente al material resultante se le agrega agua suficiente para formar un fluido lechoso, y los reactivos necesarios para realizar el siguiente proceso de flotación (CODELCO, 2012b).

- Flotación: Se trata de un proceso físico-químico realizado en las “Plantas Concentradoras” que permite la separación en este caso, de los minerales sulfurados de cobre y molibdeno del resto de los minerales que componen la roca original. Para realizar esta separación, la pulpa proveniente de la molienda se introduce en las celdas de flotación, receptáculos parecidos a piscinas, en donde se burbujea aire desde el fondo y se mantiene una agitación constante, de manera que las partículas hidrofóbicas se adhieran a las burbujas y se produzca la separación (CODELCO, 2012b). Por medio de la modificación de las propiedades hidrofóbicas (o aerofílicas) realizada a través de los reactivos agregados en la Molienda, se logran mejores resultados en la separación de las especies mineralógicas. De esta forma, las burbujas van transportando los minerales de cobre a la superficie de la celda y la fracción que no se adhiere a las burbujas permanece en la pulpa y constituye la cola o relave. Los relaves se procesan con espesadores para recuperar parte importante del agua, que luego es retornada al proceso (DIA, 2007). Luego de varios ciclos en que las burbujas rebasan el borde de las distintas celdas que se encuentran conectadas, se obtiene el concentrado en el que el contenido de cobre ha sido aumentado desde valores del 1% (en la roca original) hasta un 31% de cobre total (CODELCO, 2012b). El concentrado final es entonces secado mediante filtros y llevado al proceso de Fundición.

- Canaleta de Relaves: Se trata de una estructura de hormigón de 85 km por la que se conducen los relaves descargados por los espesadores, desde la comuna de Machalí hasta su deposición final en el Embalse Carén (DIA, 2007).

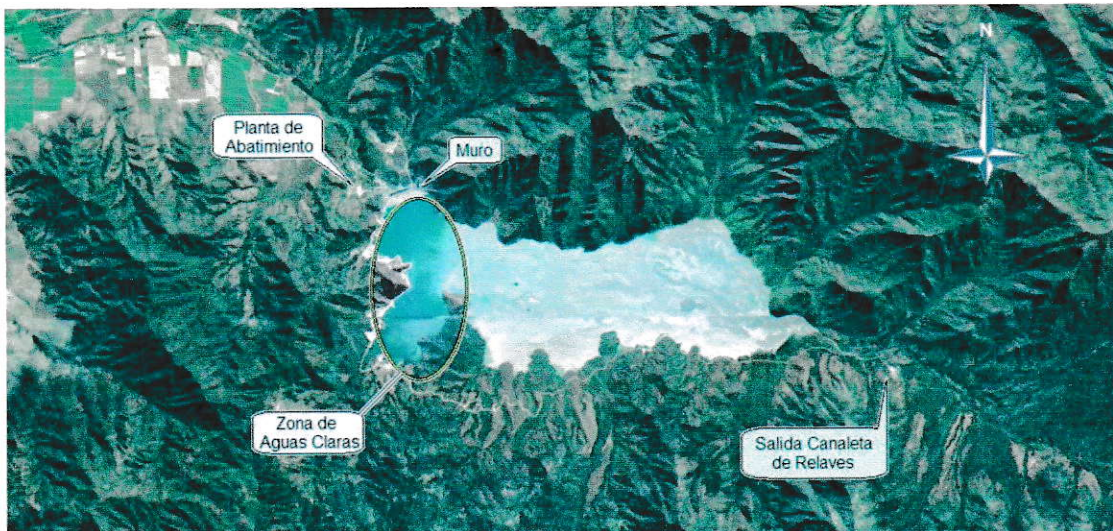


Figura 3. Imagen satelital del embalse Carén, donde se puede observar la zona de Aguas Claras, el Muro del embalse, la Planta de Abatimiento, y la salida de la Canaleta de Relaves de DET.

- Embalse Carén: Ubicado en la Hacienda Loncha, comuna de Alhué, forma parte de la infraestructura de DET almacenando desde 1986 los relaves descartados por la división (DIA, 2007). Debido al efecto de la deposición del relave en el extremo opuesto del muro (**Fig. 3**), se produce un almacenamiento de la parte sólida del relave a lo largo del embalse, llegando a formarse en la cercanía del muro una zona de aguas claras, las que son descartadas a través del sistema de evacuación del embalse y vaciadas sobre la cuenca del estero Carén. Estas aguas constituyen el

efluente de DET, formado previamente de la mezcla de aguas claras tratadas en una Planta de Abatimiento para mejorar las condiciones de pH y las concentraciones de molibdeno, y aguas sin tratar (Fig. 4).

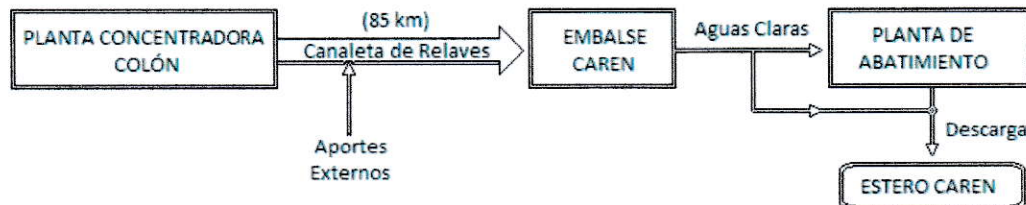


Figura 4. Esquema del origen hasta la descarga del efluente industrial generado en DET.

- **Fundición:** Se trata de un conjunto de procesos que buscan aumentar la concentración de cobre por medio de la fusión, conversión y refinación. En primer lugar el concentrado de cobre seco se funde en los Convertidores Teniente, aproximadamente a 1240° C, obteniéndose el Metal Blanco (73-76% Cobre). Luego éste es llevado a los Convertidores Pierce Smith para generar el Cobre Blíster ($\geq 96\%$ de Cobre). Finalmente el cobre blíster es sometido a la refinación a fuego RAF (99,9% de Cobre) o a la refinación anódica (99,7% de Cobre), obteniéndose los lingotes y ánodos de cobre respectivamente (Arias D., 2008).
- **Electro-Refinación:** Se trata del último paso en la refinación del cobre para lo que se emplean los ánodos, y en la cual se utiliza la electrólisis para cumplir el objetivo. Dentro de enormes celdas electrolíticas y gracias a la aplicación de una corriente eléctrica se va depositando el cobre contenido en los ánodos en los cátodos, prácticamente sin impurezas produciendo concentraciones de cobre de un 99,99%.

1.5.2 Cuerpo de agua receptor: Estero Alhué

El Alhué, estero principal de la subcuenca del mismo nombre presenta un régimen netamente pluvial con sus mayores caudales durante Junio y Agosto. Desde Noviembre a Abril se presentan caudales bastantes bajos en la subcuenca, sin embargo el periodo de menores caudales o estiaje se ve estrictamente durante el trimestre dado por Febrero, Marzo y Abril, debido al desarrollo agrícola existente en la zona que se traduce en un uso intensivo de agua para el riego (DGA, 2004).

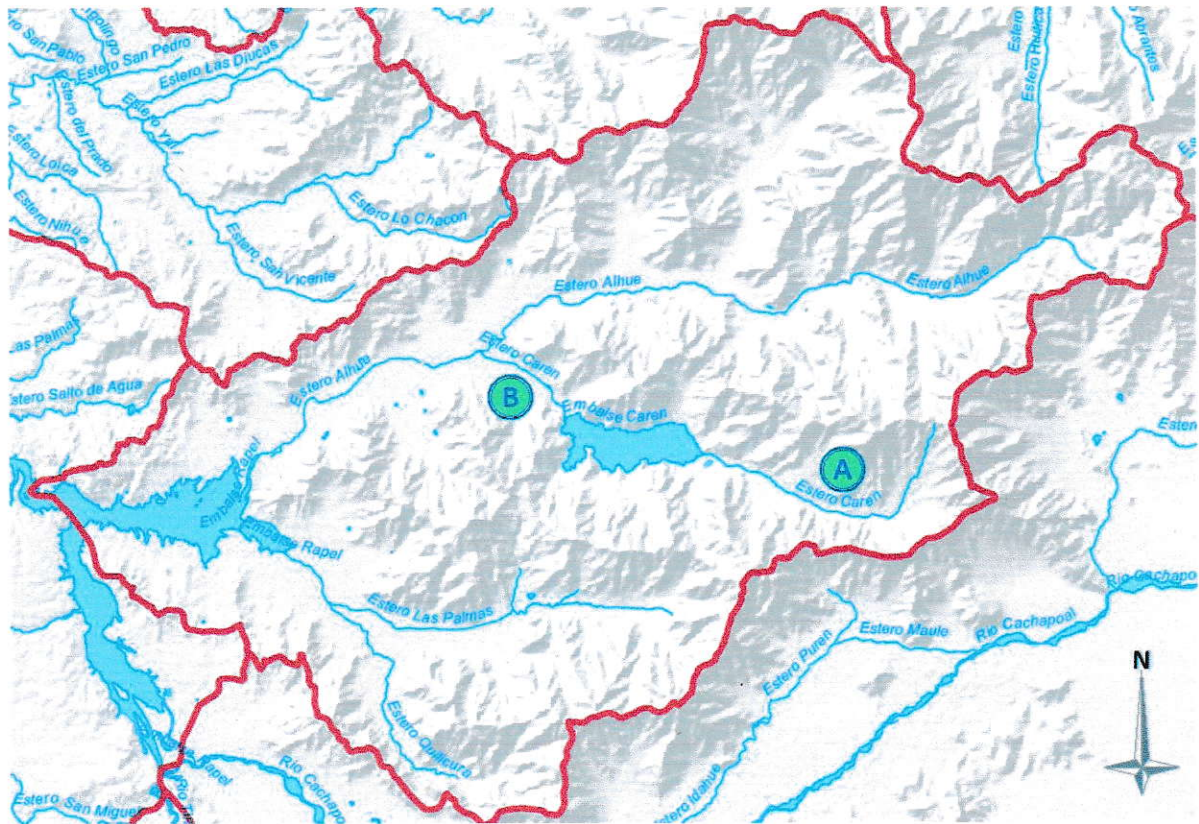


Figura 5. Mapa de la subcuenca del Alhué dentro de la cuenca del Rapel (límites de subcuencas en rojo). Se puede observar como el Estero Carén A llega hasta el Embalse Carén, al centro del mapa, y luego continúa aguas abajo por la Zona B del Estero Carén, confluyendo con el Estero Alhué, que desemboca en el Embalse Rapel.

Al observar la subcuenca del Alhué en la **Fig. 5** se observa claramente que la descarga desde el Embalse al estero Carén, llega finalmente al Estero Alhué y por ende diluye su contenido. Luego de la confluencia con el Carén, el Alhué sigue su curso por unos 19 km aprox. hasta desembocar en el embalse Rapel.

Como se indicó al inicio del punto 3 el cuerpo de agua que se considerará impactado por la descarga de DET es el Estero Alhué, y no el Carén, que es el que recibe directamente la descarga. Esto es debido a que el concepto de HAG contempla la disolución de contaminantes en cuerpos de agua, por lo que se debe considerar que el lugar de la descarga de DET en el Estero Carén aguas abajo del Embalse (E. Carén B en la **Fig. 5**), no constituye un cuerpo de agua en condiciones de diluir, ya que, el caudal del estero es el volumen de la propia descarga. En otras palabras sin descarga, el Estero Carén B tiene un caudal prácticamente despreciable, del cual son sólo responsables las filtraciones del mismo Embalse (Garcés M., 2012). Por este motivo es que el cuerpo de agua considerado como afectado por las descargas de DET es el Alhué, estero que cuenta con un caudal propio y recibe indirectamente a través del Carén las descargas de la división.

II. METODOLOGIA

En primera instancia se recopiló la información de las descargas de residuos industriales líquidos a cuerpos de agua superficiales realizados por DET. Esta información fue suministrada por la Super-intendencia de Servicios Sanitarios (SISS) por medio de una solicitud hecha en su página de internet, la cual contenía los detalles de volumen, concentración de las distintas especies químicas y niveles de los parámetros físicos requeridos por el DS90 (MINSEGPRES, 2001, Ver **Anexo 1**) a las descargas de las fuentes emisoras. A partir de aquella información se decidió trabajar con el período 2008 a 2010, y tomando en cuenta los datos referidos al sulfato y a los metales. Finalmente se calcularon las HAG anuales de cada sustancia para 2008, 2009 y 2010, se compararon aquellos valores más altos con el Q_{nat} considerado para el estero Alhué y se calculó la HAG asociada a la producción de una tonelada de cobre fino.

A continuación se describen algunas adaptaciones de la metodología recomendada que derivaron en distintos **Métodos** específicos de cálculo, según los criterios y ecuaciones utilizadas.

2.1 Método 1, 2 y 3

De acuerdo a lo que establece The Water Footprint Assessment Manual (Hoekstra et al. 2011) la HAG de un proceso (HAG_{proc}) se calcula al dividir la carga contaminante (L_x , en masa/tiempo), por la diferencia entre el estándar ambiental de calidad de agua (C_{max} , en masa/volumen) y la concentración natural en el cuerpo de agua receptor (C_{nat} , en masa/volumen) referidas a un contaminante, como se ve en la ec. (1):

$$HAG_{proc} = \frac{L_x}{C_{max} - C_{nat}} \quad [\text{volumen/tiempo}] \quad \text{ec. (1)}$$

A su vez podemos definir la carga contaminante de una sustancia x , L_x , como el producto de la concentración de aquella sustancia, C_x por el caudal del efluente, Q_{ef} , que estemos considerando como lo muestra la ec. (2):

$$L_x = C_x \times Q_{ef} \quad [\text{masa/tiempo}] \quad \text{ec. (2)}$$

Ahora para la diferencia del denominador de la Ec.(1) se ocuparán 3 posibles formas de abordar el cálculo como lo muestra la Fig. 6, derivando en el cálculo de la HAG a través de 3 métodos:

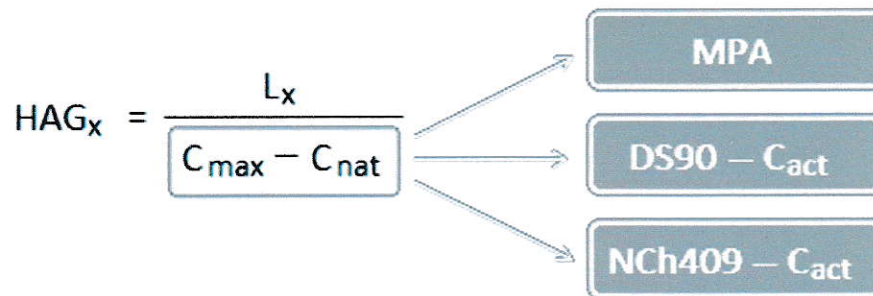


Figura 6. Esquema que indica las tres alternativas para representar la diferencia $C_{max} - C_{nat}$, y que origina los tres **Métodos** de cálculo.

2.1.1 Maximum Permissible Addition (MPA)

La MPA o Máxima Adición Permitida se trata de una concentración calculada a partir de datos disponibles de ensayos de toxicidad de laboratorio, que da cuenta de la

máxima cantidad aceptable de una sustancia que puede ser añadida por sobre la concentración basal (C_b), basándose en la fracción de seres vivos que pueden potencialmente ser afectadas debido a la concentración biodisponible de la sustancia considerada. Por otro lado, la MPC o Máxima Concentración Permisible, un valor que se obtiene a través de la utilización de las MPAs, considera dentro de su valor una concentración basal genérica⁵, reflejando condiciones naturales más una posible contribución antropogénica, quedando expresada en la ec. (3) como la suma de la concentración basal (C_b) más la MPA:

$$MPC = MPA + C_b \quad \text{ec. (3)}$$

Ambos conceptos se encuentran relacionados dentro del enfoque de riesgo añadido ("added risk approach") adoptado para calcular los límites de riesgo para diferentes compartimientos ambientales en la legislación holandesa, donde el punto de partida es el cálculo de las MPAs⁶. Luego a través de los MPCs y otros valores de concentraciones como los NCs (Negligible Concentration) y los MACs (Maximum Acceptable Concentration), el gobierno Holandés obtiene sus Estándares de Calidad Medioambiental (EQS), los que son ocupados para evaluar la calidad ambiental de un área o sitio, apoyar las estrategias de reducción orientadas a fuentes de emisión y para el otorgamiento de permisos, entre otros (Crommentuijn y col., 1997; Crommentuijn y col., 2000; RIVM, 2009).

⁵ Concentraciones obtenidas a partir de modelos, y con el objetivo de representar la realidad holandesa (Crommentuijn y col., 1997).

⁶ Calculadas utilizando datos disponibles de pruebas de laboratorio en organismos que sean representativos de la situación holandesa (Crommentuijn y col., 1997).

Ahora bien tomando en cuenta lo descrito por la ec. (3) y reordenando se puede obtener la ec. (4):

$$MPA = MPC - Cb \quad \text{ec. (4)}$$

A través de esta última ecuación, y al considerar la MPC como el C_{max} , y a la Cb como la C_{nat} , la MPA se puede entender como un equivalente de la expresión [$C_{max} - C_{nat}$] (Hoekstra y col., 2011), el denominador de la ec. (1), por lo que el cálculo de la huella de agua gris a través del **Método 1**, queda expresado por la ec. (5) como:

$$HAG_{proc} = \frac{L}{MPA} \quad [\text{volumen/tiempo}] \quad \text{ec. (5)}$$

Bajo esta lógica se utilizaron los MPAs descritos para metales en Crommentuijn y col. (2000), valores que son parte de una publicación recomendada por The Water Footprint Assessment Manual (Hoekstra y col., 2011), y en la cual se han utilizado condiciones muy estrictas para la selección de estudios considerando fiables sólo aquellos que estuvieran en concordancia a las directrices internacionales aceptadas, como las de la OECD (Crommentuijn y col., 2000). Los valores utilizados en este estudio se encuentran en la **Tabla 1**, que corresponden a los metales que son parte de los análisis realizados a las descargas a cuerpos de agua.

Cabe señalar que la utilización de los MPAs se debe entender como una prueba o posible método para al cálculo de una HAG en el caso de metales, considerando estándares genéricos, que no tomarían en cuenta las concentraciones basales locales, y en ese aspecto forme parte de una primera aproximación con el fin de generar una

comparabilidad basada en la utilización de estándares internacionales avalados por la comunidad científica.

Tabla 1. MPAs descritos para agua dulce utilizados para calcular las HAGs.

Elemento	MPA agua dulce, µg/L
Arsénico	24
Cadmio	0,34
Cromo	8,5
Cobre	1,1
Plomo	11
Mercurio	0,23
Molibdeno	290
Níquel	1,8
Selenio	5,3
Zinc	6,6

(Crommentuijn y col., 2000)

2.1.2 Concentraciones Actuales (C_{act})

Como se ve en la Fig. 6, la segunda y tercer forma para representar [$C_{max} - C_{nat}$] contienen en el lugar de C_{nat} el término C_{act} que hace referencia a la utilización de las concentraciones actuales del cuerpo de agua receptor. Esta decisión fue tomada luego de ver la imposibilidad de obtener valores naturales del estero Alhué dentro de la información disponible.

De esta forma se llegó a los valores registrados por la Dirección General de Aguas en la estación "Estero Alhué antes Estero Carén" (DGA, 2004). Estación de monitoreo ubicada aguas arriba de la confluencia con el estero Carén, que muestra al menos las condiciones actuales del Alhué sin la perturbación del estero Carén, permitiendo así su utilización dentro del estudio. Con los valores estacionales de esta estación se calcularon promedios anuales (Ver Anexo 2) con los cuales se trabajó para las HAG.

2.1.3 Decreto Supremo 90 (DS90)

El Decreto Supremo 90 es una norma de emisión de la República de Chile que busca la regulación de contaminantes asociados a las descargas de residuos líquidos hacia aguas marinas y continentales superficiales, por medio del establecimiento de valores máximos de concentración y parámetros físicos, con el fin de prevenir la contaminación de los receptores descritos.

Este decreto, ante la imposibilidad de contar con una norma de calidad para el receptor del caso de estudio (Estero Alhué), aparece como una posible alternativa para representar de manera general el término C_{max} en los cálculos de la HAG, y así tener valores máximos aceptables en el estudio que tengan un origen local al menos. Sin embargo, no hay que olvidar que el DS90 se generó dentro de un contexto distinto, y que si bien busca prevenir la contaminación de los cuerpos de agua, está hecho para crear un tope en las condiciones de descarga y no establecer límites ideales bajo los cuales se resguarde el bienestar de algún objeto de protección.

Entonces, para la segunda forma de cálculo se asumirá como denominador de la ec.(1), la expresión (DS90 - C_{act}) o **Método 2** descrito por la ec. (6), de la cual se entenderá la utilización de los valores de concentraciones máximas del Decreto Supremo 90 (MINSEGPRES, 2001), de su *Tabla 1*, referida a los límites máximos permitidos para la descarga de residuos líquidos a cuerpos de agua fluviales (Ver **Anexo 1**), menos el término C_{act} .

$$HAG_{proc} = \frac{L}{DS90 - C_{act}} \quad \text{ec. (6)}$$

2.1.4 Norma Chilena oficial 409 (NCh409)

La Norma Chilena oficial 409 (INN, 2005) es un instrumento legal de calidad primaria, es decir tiene por objeto proteger la salud de las personas, que establece los requisitos mínimos que debe el cumplir el agua potable en el territorio chileno.

Esta norma al ser utilizada en el contexto de la HAG, como la máxima concentración admisible (C_{max}), tiene la característica de tomar al cuerpo de agua receptor de la descarga como una potencial fuente de agua potable. De manera que considera entonces el límite hasta el cual la dilución de las sustancias en el cuerpo de agua receptor, no genere problemas en la población que la utilice como agua potable.

En esta última forma también se utilizan las concentraciones actuales del Alhué, en la forma de (NCh409 – C_{act}), constituyendo el **Método 3** descrito en la ec. (7).

$$HAG_{proc} = \frac{L}{NCh409 - C_{act}} \quad \text{ec. (7)}$$

Los valores utilizados de la NCh409 para la ec.(7) se encuentran en el **Anexo 1**.

2.2 Tratamiento de datos

Para poder calcular las HAG anuales del sulfato y los metales, se optó por utilizar la resolución temporal de los datos recopilados y calcular HAG mensuales que sumadas dieran las correspondientes HAG anuales. De esta forma, el primer paso fue calcular las cargas contaminantes mensuales de las especies químicas consideradas, es decir sulfato y metales, a través de la ec. (2), por medio de concentraciones mensuales, y de caudales mensuales del efluente, a partir de la información entregada por la SISS (en

la que se detallan los valores diarios). Como se mostró anteriormente la ecuación 2 es la siguiente:

$$L_x = C_x \times Q_{ef} \quad [\text{masa/tiempo}]$$

Primero, para obtener las concentraciones mensuales (C_x) se calcularon promedios aritméticos y desviaciones estándar de los valores diarios en cada sustancia (Ver **Anexo 3**), y para los caudales mensuales (Q_{ef}) se sumaron los registros diarios de cada mes (Ver **Anexo 4**). Las desviaciones fueron calculadas con el fin de mostrar la dispersión de los datos utilizados y evidenciar una cierta incertidumbre en el cálculo final. Luego con las variables mensuales de concentración y caudal, se calcularon las cargas contaminantes mensuales.

Paralelamente al trabajo con las cargas contaminantes, se calcularon los valores de C_{act} requeridos por el segundo y tercer **Método** (**Fig. 6**) a través de los valores característicos de las estaciones del año descritos en DGA, 2004, con los que se calcularon promedios anuales para el sulfato y los metales (Ver **Anexo 2**).

Posteriormente con las cargas contaminantes mensuales, los MPA, los valores del DS90, de la NCh409 y los C_{act} , se calcularon las HAG mensuales con cada **Método** (**Fig. 6**), las que finalmente se sumaron para cada año dando por resultado las HAG anuales. A continuación se entrega un ejemplo de este procedimiento con los datos de Arsénico utilizando el **Método 1**:

- Arsénico (As): $L^{Ene-2010} = 13 \text{ kg/mes};$
 - **Método 1:** $[C_{max} - C_{nat}] = MPA^{As} = 24 \text{ ug/L}$
- $\Rightarrow \text{HAG}^{Ene-2010} = L^{Ene-2010} / MPA^{As} = 5,33 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{mes}$

$$\Rightarrow \text{HAG}^{2010} = \text{HAG}^{\text{Ene-2010}} + \text{HAG}^{\text{Feb-2010}} + \text{HAG}^{\text{Mar-2010}} + \dots + \text{HAG}^{\text{Dic-2010}}$$

$$\Rightarrow \text{HAG}^{2010} = (5,33 \times 10^5 + 3,74 \times 10^5 + 4,05 \times 10^5 + \dots + 3,02 \times 10^5) \text{ m}^3/\text{año}$$

$$\Rightarrow \text{HAG}^{2010} = 1,07 \times 10^7 \text{ m}^3/\text{año}$$

Por otro lado, con el fin de hacer la comparación de las HAG anuales con el caudal natural (Q_{nat}), se utilizó la información fluviométrica de otra estación descrita en DGA, 2004, la estación “Estero Alhué en Quilamuta” donde se muestran los caudales mensuales del Alhué aguas abajo de la confluencia con el Estero Carén, con distintas probabilidades de excedencia. De esta información se ocuparon los valores correspondientes al 50% de excedencia, que indican los caudales que se esperaría registrar en promedio cada 2 años, y que al ser sumados entregaron un caudal anual del Alhué en Quilamuta utilizable para hacer las comparaciones con las HAGs anuales.

También se calcularon a partir de las HAGs anuales y tomando en cuenta la producción en cobre fino para el período 2008-2010 (SONAMI, 2012. Ver **Anexo 5**), las HAG per tonelada de cobre producido.

2.3 Criterios para Tratamiento de datos

- Valores bajo el límite de detección (LD): Esta situación era aislada dentro de las concentraciones diarias de algunas sustancias químicas, mientras que en otras correspondía a la totalidad de los registros. El criterio que se tomó luego de probar varias alternativas, fue reemplazar los valores bajo el límite de detección por cero, tomando en cuenta que al hacerlo las HAGs resultantes arrojarían el mínimo de los valores dentro del rango posible de concentraciones entre el cero y el LD.
- Incertidumbre de las HAGs: Partiendo por la incertidumbre de las concentraciones promedio, dada por su desviación estándar, se ocupó la propagación de errores en

productos y cocientes, de manera de mantener el error relativo de las concentraciones hasta llegar a los valores de HAG mensual. Luego dado que se sumaban las HAG mensuales para llegar al valor anual, se utilizó la propagación de errores en sumas para obtener la incertidumbre anual.

- Validación de HAGs anuales: Se estableció arbitrariamente el criterio de establecer que no eran válidas aquellas HAGs anuales que se calculaban en base a más de un 50% de concentraciones mensuales que fueran igual a 0. Este criterio dejó fuera del análisis a varios metales (Cd, Pb, Cr, Hg, Ni y Se) que dentro de los registros suministrados por la SISS aparecían casi en la totalidad de los días bajo el LD.
- Cobre como caso especial: Aun cuando el Cu se encontraba dentro del criterio anterior (Validación de HAGs anuales) dejando sus HAGs de 2009 y 2010 como inválidas, se decidió incluirlas de todas formas de manera de no perder en el análisis al metal objeto de la producción misma, por lo que se resolvió que éste fuera la única excepción al criterio de validación de las HAGs anuales.

III. RESULTADOS

3.1 Metodología general para utilizar HAG en minería

A continuación se presenta la metodología junto a su marco conceptual, explicado en 4 etapas: A, B, C y D, siguiendo el esquema de la Fig. 7:

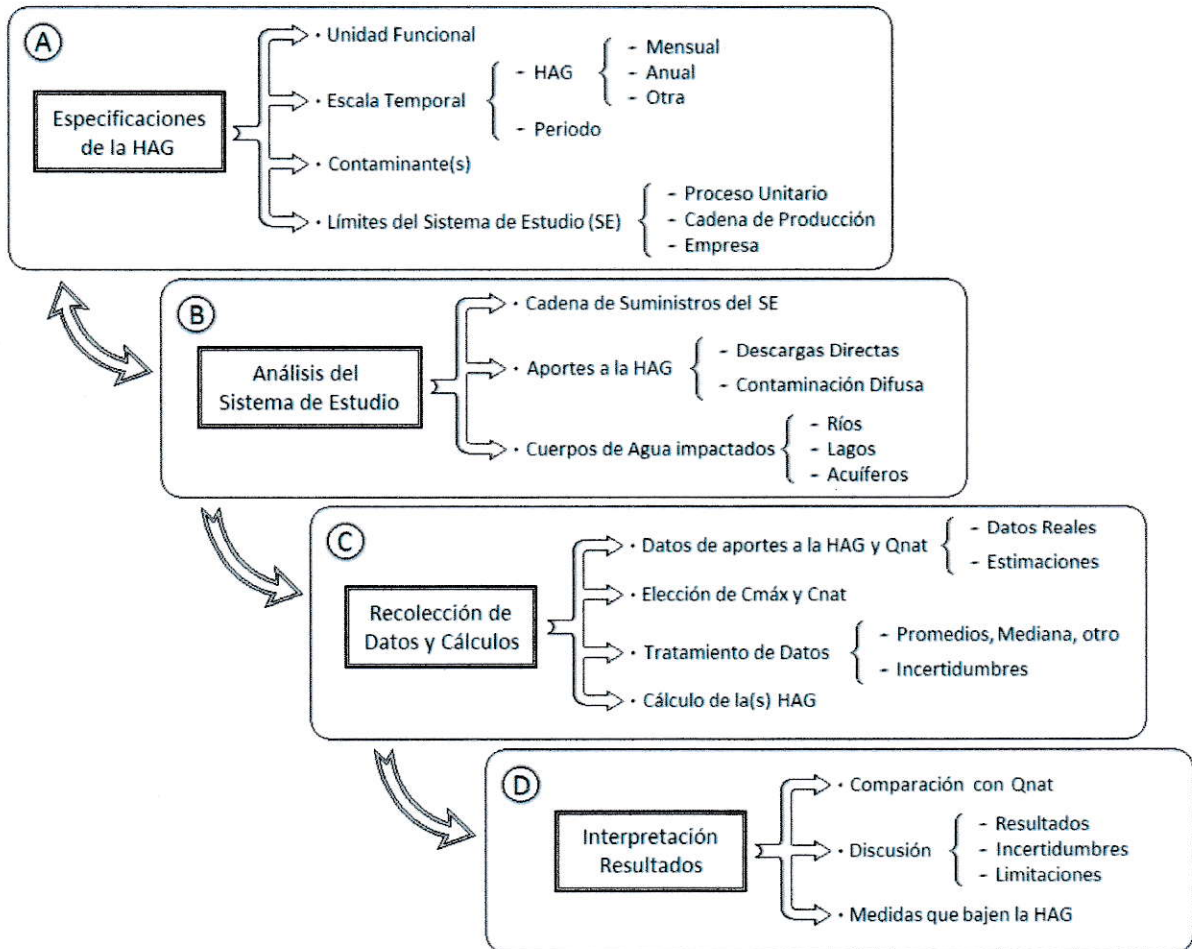


Figura 7. Propuesta de un esquema general en etapas para la aplicación del indicador HAG para un producto minero.

A. Especificaciones de la HAG

Aquí se escogerán los criterios necesarios para desarrollar el cálculo:

- Unidad Funcional: La que debe elegirse para representar la función que ejerce el producto que se estudiará de manera cuantificable. Por ejemplo: 1 ton de cátodos de cobre, 1 kton de concentrado, etc.
- Escala Temporal: Se debe decidir dentro dos ámbitos, por un lado si es necesario el cálculo de una HAG mensual, anual, o con otra medida, y el período de tiempo con el que se trabajará, es decir si se estudiará un semestre, un año, 10 o 50 años, decisión ligada a la existencia de los datos necesarios.
- Contaminante(s): Elección sujeta al contexto en el que se requiere al indicador, ya que la decisión de una o un grupo de especies químicas puede hacerse sobre la base de lo que la legislación nacional o internacional requiera, o de acuerdo a algún sistema de gestión ambiental aplicado en la industria. De esta forma podría quedar bajo el análisis: metales, compuestos orgánicos, una única especie química o un grupo de contaminantes.
- Límites del "Sistema de Estudio" (SE): Los que definirán hasta donde llegará el estudio, pudiendo incluir en un análisis preliminar un Proceso Unitario individual, o en estudios más detallados la Cadena de Producción completa involucrada con la Unidad Funcional, una Empresa o un Grupo de ellas, dependiendo de la información disponible y la profundidad requerida del estudio.

B. Análisis del Sistema de Estudio

En esta etapa se comienza a trabajar directamente con el SE definido. Como se indica en la Fig. 7, la ejecución de esta segunda etapa implica una revisión de

la etapa I, y viceversa. Se recopilan antecedentes y se analizan a través de los siguientes puntos:

- Cadena de Suministros del SE: Se revisa la información de los suministros de la cadena de producción escogida, de manera de conocer cuales son los materiales y recursos utilizados en mayor cantidad y así incluirlos dentro del SE, en el caso de que se desee integrar el enfoque de ciclo de vida, integrando la HAG indirecta.
- Aportes a la HAG: Es decir, se identifican todas aquellas salidas de residuos líquidos desde el SE que lleguen a un cuerpo de agua y se decide con cual o cuales se trabajará. Dentro de los aportes se cuentan las descargas directas de residuos, y la contaminación difusa por medios indirectos como las infiltraciones en el suelo hacia acuíferos.
- Cuerpos de Agua Impactados: Pudiendo ser éstos ríos, lagos o acuíferos, afectados por las descargas de los aportes a la HAG, identificándolos en mapas y ubicando el lugar en el que reciben tales descargas.

C. Recolección de Datos y Cálculos

- Datos de Aportes a la HAG y Q_{nat} : Implica la obtención de la información de los caudales de las descargas y las concentraciones de los contaminantes en las mismas, para el período que se requiera. También se deben obtener los valores de caudal característicos para los cuerpos de agua impactados (Q_{nat}). Toda esta información puede provenir de datos reales o de estimaciones, las que no deben olvidarse dentro de las limitaciones del estudio.

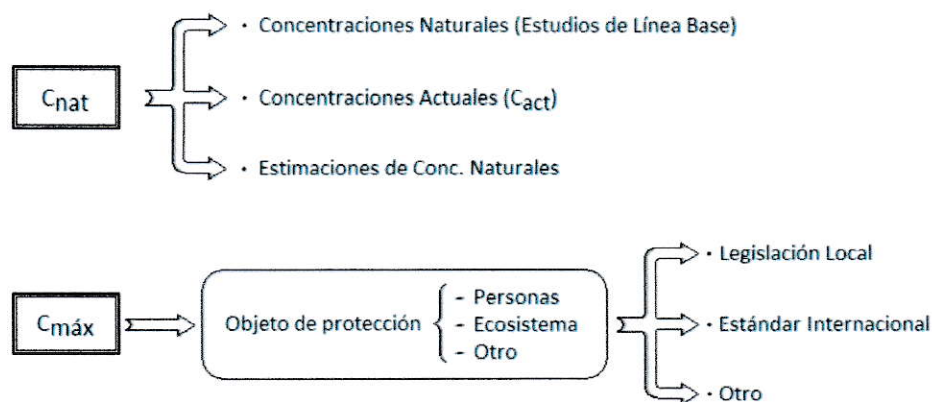


Figura 8. Diagrama que muestra la forma propuesta para manejar la elección de las concentraciones que se utilizarán como C_{nat} y $C_{m\acute{a}x}$.

- **Elección de $C_{m\acute{a}x}$ y C_{nat} :** Decisión fundamental en el cálculo de la HAG. Primero para la obtención de C_{nat} se deben buscar datos que representen las concentraciones “naturales” de los cuerpos impactados en la zona de la descarga, preferentemente de estudios de línea base o similares que justifiquen sus valores. Ante la imposibilidad de obtener estas concentraciones “naturales”, se podrían utilizar las concentraciones actuales (C_{act}) de los cuerpos impactados, o estimaciones de las concentraciones naturales (**Fig. 8**) presentadas con una debida justificación, obtenidas por ejemplo de datos de una cuenca con características similares o a través de modelos que calculen estas estimaciones. En segundo lugar, para decidir que tipo de concentraciones representarán $C_{m\acute{a}x}$, una alternativa es resolver primero que es lo que se buscará proteger con los estándares: la salud de las personas, los ecosistemas, ambos u otro grupo. Luego buscar dentro de la legislación local si existe algún estándar que cumpla con el objetivo de protección, acorde al cuerpo de agua afectado. En caso de no existir algún estándar asimilable al $C_{m\acute{a}x}$ necesario en

la legislación local, alternativamente se puede ocupar algún estándar internacional o valores aislados que sirvan para tal propósito justificadamente. Esta vía para decidir el $C_{m\acute{a}x}$ se plantea en la Fig. 8.

- Tratamiento de Datos: De modo de elegir cual será el método a través del cual se representarán los valores característicos de las series de datos que se manejan (concentraciones en la descarga, Q_{nat} , entre otros), por ejemplo a través del promedio, mediana, otro percentil u otro método. También se debe elegir como se representará la incertidumbre de los valores calculados (Desviación Estándar, Coeficiente de Variación, entre otros). Se debe indicar por otro lado como se trabajará con los valores bajo el límite de detección para datos de concentraciones, si se utilizará algún método para eliminar outliers o cualquier otro tratamiento de datos.
- Cálculo de la(s) HAG: Utilizando las ecuaciones adecuadas del The Water Footprint Assessment Manual (Hoekstra y col. 2011) se calculan entonces la o las HAGs.

D. Interpretación de Resultados

- Comparación con Q_{nat} : En el caso de haber calculado más de una HAG, se elige aquella que posee un mayor volumen per unidad de tiempo, y se compara con el valor característico del caudal del cuerpo de agua afectado (Q_{nat}). Si la HAG es mayor se entiende que la capacidad de dilución se está sobrepasando por efecto de la descarga, mientras que si es menor, quiere decir que se aun queda capacidad de dilución sin utilizarse.

- **Discusión:** Se realiza con respecto a los resultados y a la comparación con el Q_{nat} de manera de mostrar las consecuencias de los valores y las relaciones encontradas. También se debe hacer referencia a las incertidumbres de aquellos resultados, a las limitaciones del SE y la información utilizada.
- **Medidas que bajen la HAG:** Propuestas que se indicarán y analizarán para poder bajar los valores encontrados de HAG.

A modo de resumen en la **Fig. 9**, utilizando como base el esquema de la **Figura 7**, se presentan las decisiones y opciones utilizadas en el estudio de caso en el Teniente. En ella se omitió la parte de la “Elección de $C_{m\acute{a}x}$ y C_{nat} ” (explicada en **Metodología**) y también la etapa D completa, que se encuentra ampliamente descrita en la **Discusión**:

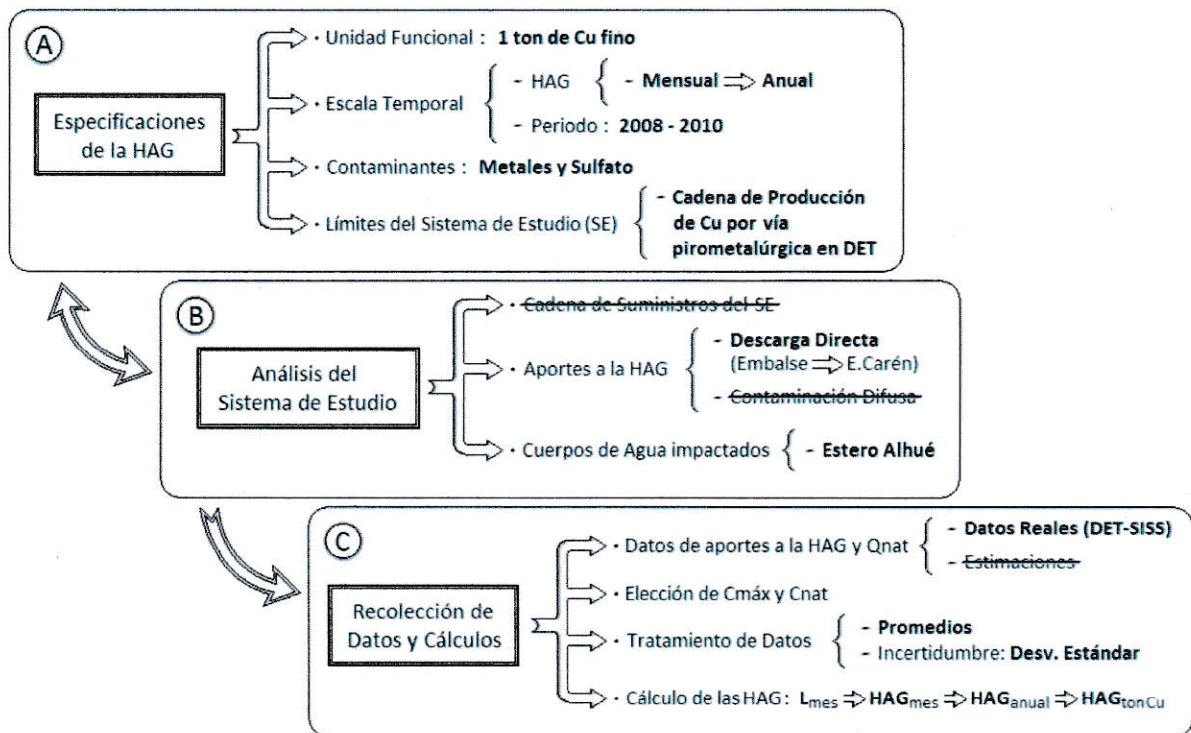


Figura 9. Esquema que resume las decisiones y formas que se tomaron para el estudio de caso en este seminario.

3.2 Especies químicas consideradas en cálculos

Las especies químicas consideradas para el estudio de las que se obtuvo al menos una HAG anual que cumpliera el criterio de validación, son:

- Arsénico (As)
- Cobre (Cu)
- Molibdeno (Mo)
- Zinc (Zn)
- Aluminio (Al)
- Hierro (Fe)
- Manganeso (Mn)
- Sulfato (SO_4^{2-})

3.3 Huellas de Agua Gris (HAGs)

3.3.1 Resultados de los tres métodos

3.3.1.1 HAGs anuales

Los resultados obtenidos para las HAGs anuales con los tres **Métodos** de cálculo se muestran a continuación. En la **Fig. 10** se pueden ver los resultados obtenidos con el **Método 1** (MPA), y en las **Fig. 11** y **12** los obtenidos con el **Método 2** ($\text{DS90} - C_{act}$) y **3** ($\text{NCh409} - C_{act}$), respectivamente.

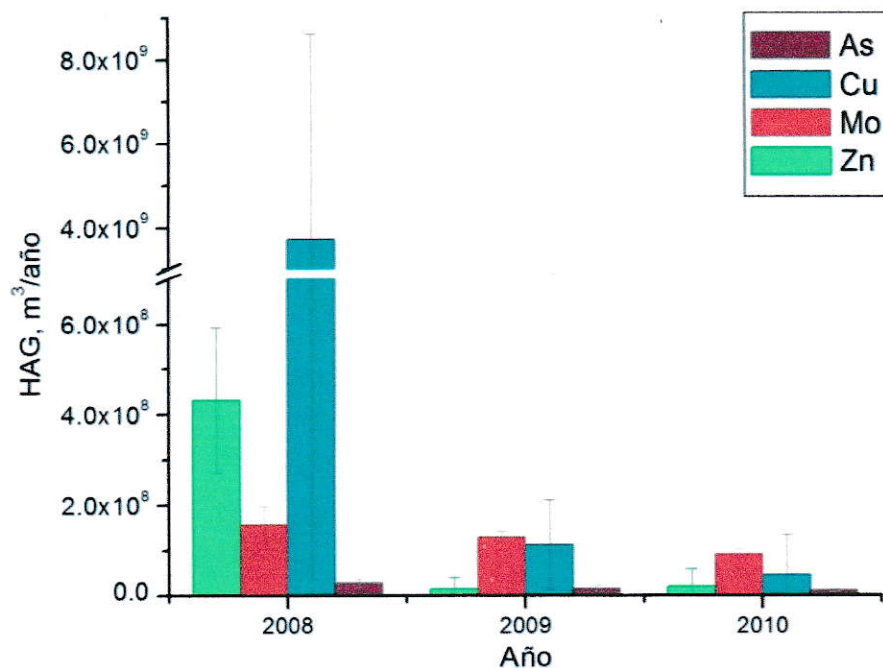


Figura 10. Resultados de las HAGs anuales para División el Teniente utilizando el **Método 1** (MPA). Se indica la incertidumbre generada por la Desviación Estándar de las concentraciones en la descarga.

En la **Fig. 10**, que contiene los resultados con el **Método 1**, se observa una tendencia decreciente a través de los años, destacando el año 2008 en donde aparece el cobre con un valor muy alto respecto del resto. Se observa además que el 2008 es el único que tiene al cobre como la especie química con el valor más alto, acompañado en importancia por el zinc, sin embargo el valor entregado por el cobre se hace desconfiable debido a su amplio rango de incertidumbre que llega hasta cero. Para 2009 y 2010, se observa un comportamiento distinto al 2008 entre especies químicas, con el molibdeno con el mayor valor seguido por el cobre, el zinc y arsénico. El cobre además para 2009 y 2010 mantiene su alto rango de incertidumbre.

Al observar los resultados del **Método 2** en la **Fig.11** se ve una tendencia decreciente a través del tiempo, que además posee una clara similitud en el orden que toman las especies químicas de los valores más altos, repitiéndose en los tres años en orden de importancia, el sulfato destacando con el mayor volumen, seguido por el molibdeno y el manganeso.

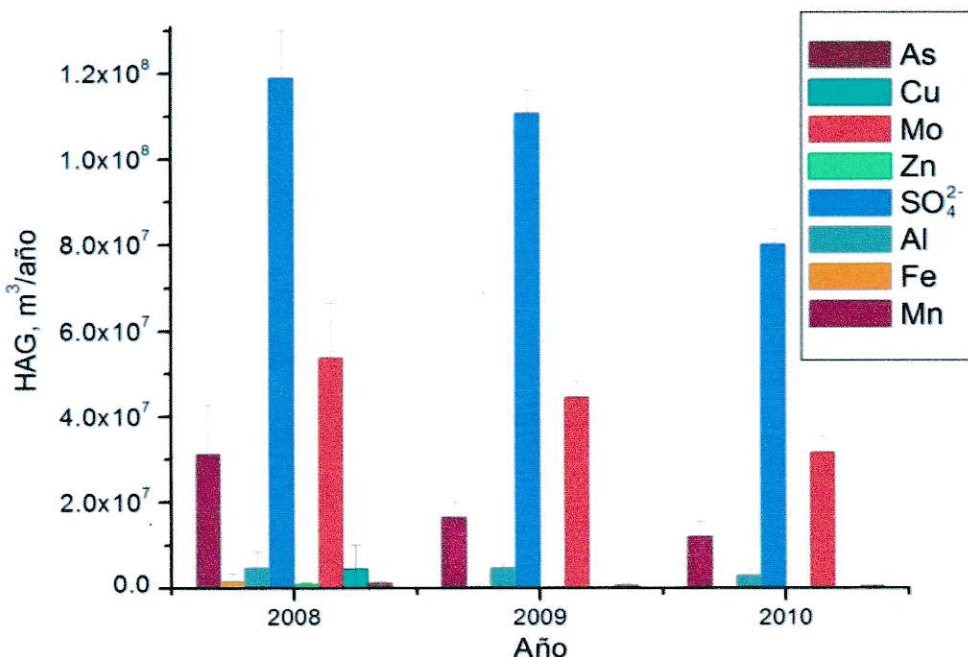


Figura 11. Resultados de las HAGs anuales para División el Teniente utilizando el **Método 2** ($DS_{90} - C_{act}$). Se indica la incertidumbre generada por la Desviación Estándar de las concentraciones en la descarga.

Para las HAGs anuales obtenidas con el **Método 3** descritas en la **Fig. 12**, se observa la misma tendencia decreciente desde 2008 a 2010, manteniendo al sulfato como la especie que aporta el mayor volumen. El resto de las especies químicas como el hierro con una marcada tendencia decreciente y gran incertidumbre, en 2008 aparece como el segundo valor más alto pero para 2009 y 2010 baja al tercer y cuarto

lugar con valores cada vez menores, en cambio el arsénico que muestra una leve tendencia decreciente aparece como el segundo valor más importante para 2009 y 2010.

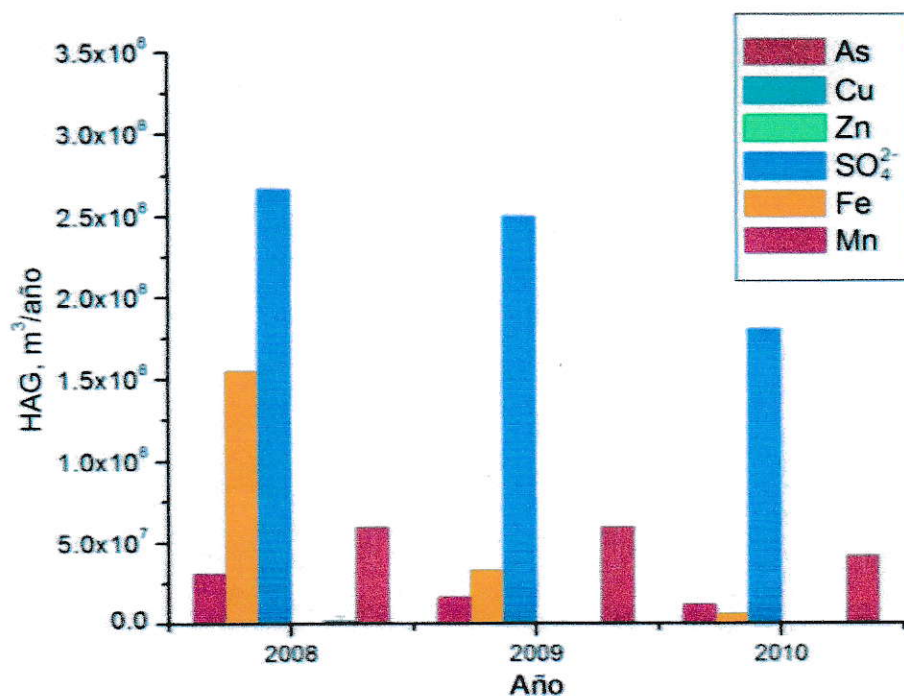


Figura 12. Resultados de las HAGs anuales para División el Teniente utilizando el **Método 3** (NCh409 – C_{act}). Se indica la incertidumbre generada por la Desviación Estándar de las concentraciones en la descarga.

3.3.1.2 HAG per ton Cu

A continuación se muestran los resultados que describen las HAGs per tonelada de cobre fino producido en DET, calculadas con las HAGs anuales más altas de cada año y con los datos de producción anual (**Anexo 5**). En las **Fig. 13, 14 y 15** se muestran los valores encontrados por medio del **Método 1, 2 y 3** respectivamente.

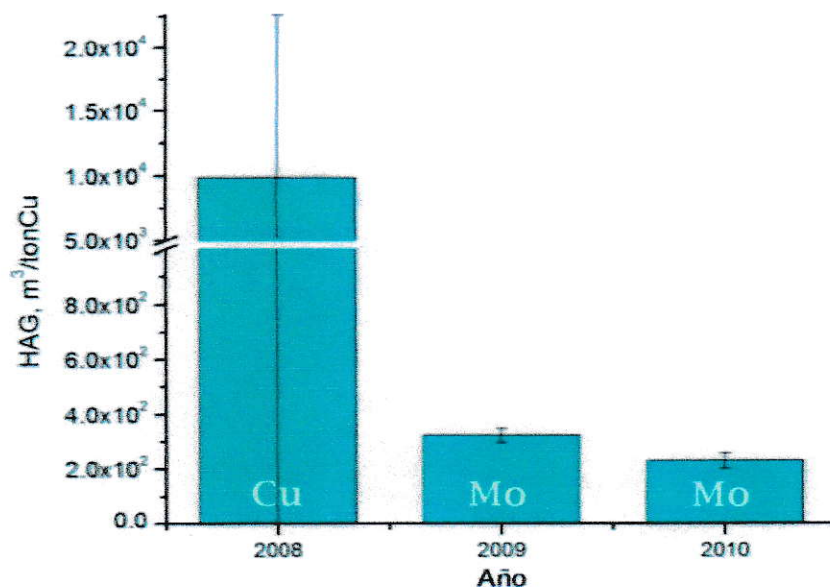


Figura 13. HAGs per tonelada de cobre fino calculadas con el **Método 1** (MPA) para el cobre producido en DET. Sobre cada barra aparece la especie química responsable del valor más alto en cada año.

Al analizar la **Fig.13** se puede observar el alto valor del cobre en 2008 con el **Método 1**, tal como en las HAGs anuales del mismo **Método** en la **Fig. 10**, sobrepasando los valores del resto de los años en dos órdenes de magnitud, aunque manteniendo el alto grado de incertidumbre de la HAG anual que le dio origen.

Al igual que en la **Fig. 13**, las **Fig. 14** y **15**, de los **Métodos 2** y **3** respectivamente, mantienen la tendencia decreciente de las HAGs anuales que les dan origen. Mientras que en el **Método 2** los valores caen desde aproximadamente 300 hasta 200 m³/tonCu, en el **Método 3** éstos lo hacen desde aproximadamente 700 hasta 450 m³/tonCu, mostrando valores distintos y sin embargo una tendencia decreciente muy similar. Por otro lado la incertidumbre no parece ser significativa de acuerdo a lo ilustrado en los **Métodos 2** y **3**.

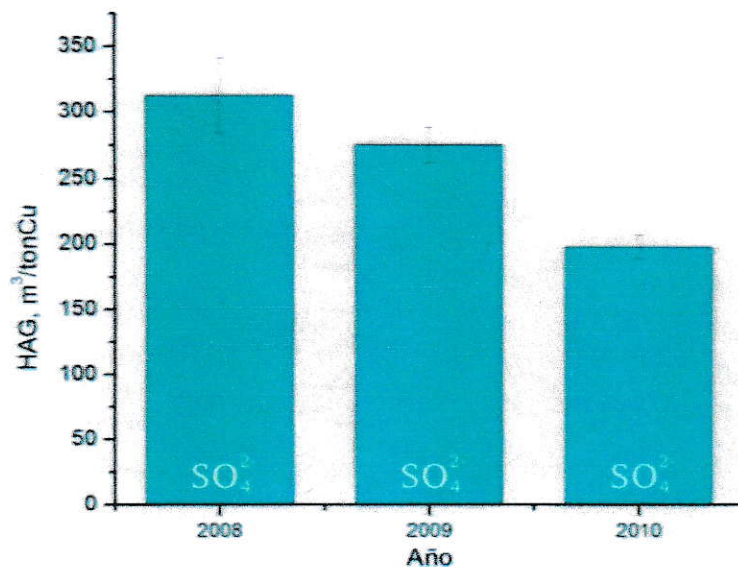


Figura 14. HAGs per tonelada de cobre fino calculadas con el Método 2 (DS90 – C_{act}) para el cobre producido en DET. Sobre cada barra aparece la especie química responsable del valor más alto en cada año.

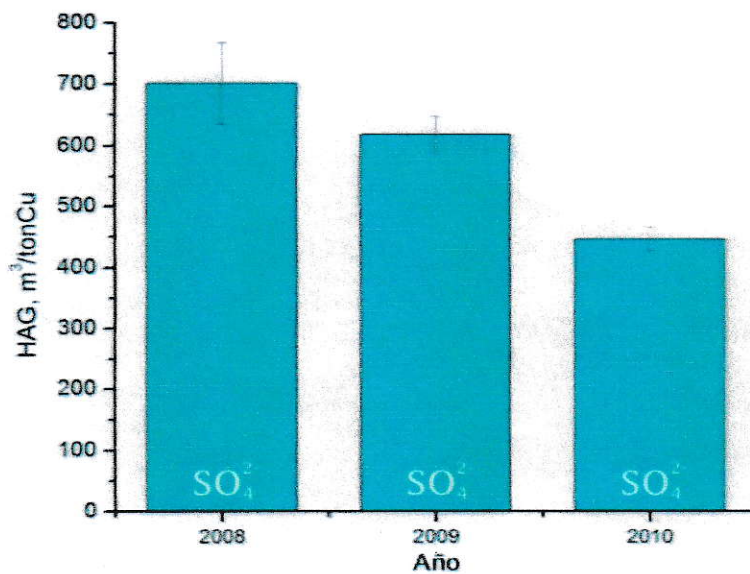


Figura 15. HAGs per tonelada de cobre fino calculadas con el Método 3 (NCh409 – C_{act}) para el cobre producido en DET. Sobre cada barra aparece la especie química responsable del valor más alto en cada año.

3.3.2 Comparación HAG con Q_{nat}

A continuación en las Fig. 16, 17 y 18, se presenta la comparación de los valores más altos de HAGs anuales obtenidas con cada Método, respecto del Caudal natural (Q_{nat}) del estero Alhué.

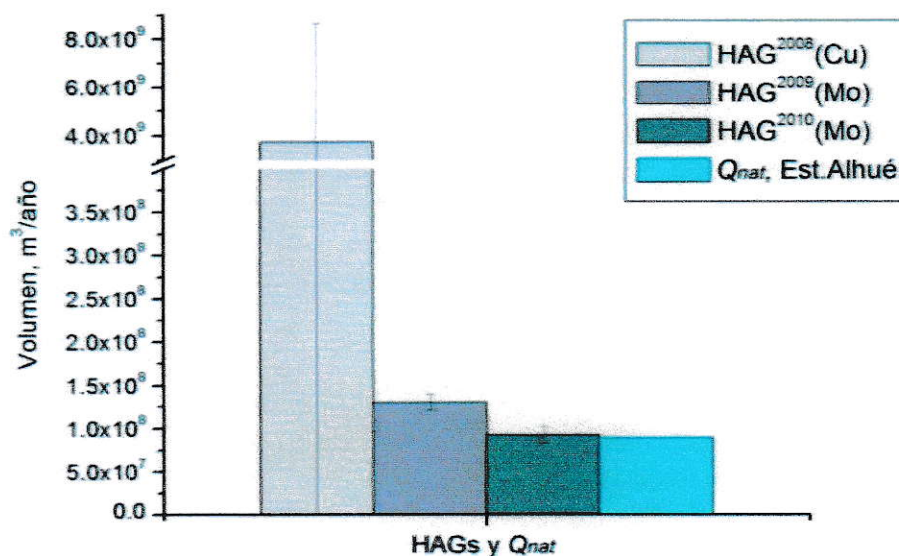


Figura 16. Comparación del Caudal natural (Q_{nat}) del estero Alhué con las HAGs más altas de cada año utilizando el Método 1 (MPA). En el recuadro se indica el año de la HAG junto a la especie química que aportó el mayor valor en ese año.

Observando la Fig. 16 se destaca nuevamente la HAG de 2008 con el cobre como la especie responsable, que aunque supere en un orden de magnitud a la huella de 2009, y en dos a la de 2010, no es un valor confiable debido a la incertidumbre que le acompaña. Analizando ahora la comparación con el volumen del estero Alhué, se destaca el hecho de que las HAGs de los dos primeros años superan el Q_{nat} del estero, mientras que el valor central de 2010 y su incertidumbre se aproximan bastante al volumen del estero, por lo que se podría decir que la HAG de 2010 alcanzó el valor del caudal natural, a diferencia de la HAG de 2009 que superó el Q_{nat} de manera clara.

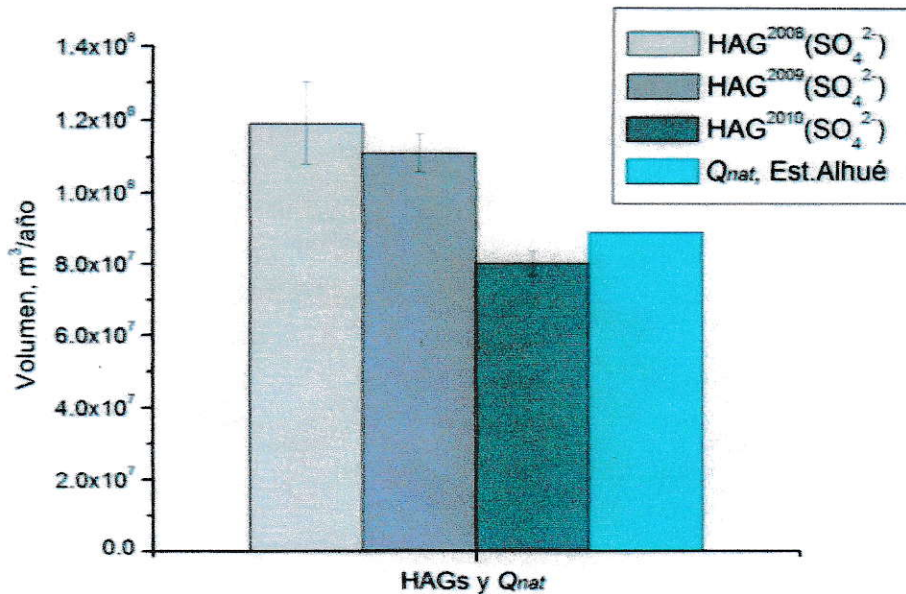


Figura 17. Comparación del Caudal natural (Q_{nat}) del estero Alhué con las HAGs más altas de cada año utilizando el **Método 2** (DS90 – C_{act}). En el recuadro se indica el año de la HAG junto a la especie química que aportó el mayor valor en ese año.

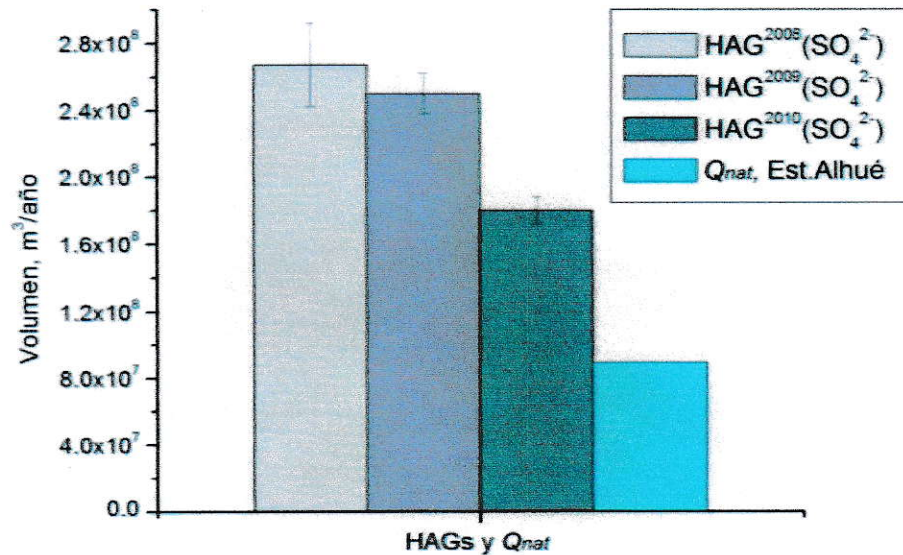


Figura 18. Comparación del Caudal natural (Q_{nat}) del estero Alhué con las HAGs más altas de cada año utilizando el **Método 3** (NCh409 – C_{act}). En el recuadro se indica el año de la HAG junto a la especie química que aportó el mayor valor en ese año.

Con respecto a la comparación de las HAGs anuales calculadas con el **Método 2** (Fig.17) se observa como los valores de 2008 y 2009 superan en valor de Q_{nat} , mientras el volumen asociado a 2010 se encuentra por debajo del volumen característico del estero.

Con una tendencia e incertidumbres porcentuales equivalentes al **Método 2**, la Fig. 18 indica como los resultados de las HAGs anuales calculadas con el **Método 3** se encuentran por sobre el Q_{nat} independientemente del año analizado.

IV. DISCUSION

4.1 Comparación entre Métodos 1, 2 y 3

A partir de aquí se hará una comparación entre los **Métodos** considerando las HAGs anuales, las HAGs per tonelada de cobre fino, y las comparaciones con el Q_{nat} con el fin de discutir puntos importantes y obtener el **Método** recomendado para este estudio de caso y otros posteriores.

4.1.1 HAGs anuales

Se puede observar al mirar las HAGs anuales que las especies responsables de los valores más altos cambian según el método de cálculo, siendo en el **Método 1**: el cobre y el molibdeno los responsables; en el **Método 2**: el sulfato y el molibdeno; y para el **Método 3**: el sulfato, el hierro y el arsénico. En primera instancia podemos ver los elementos comunes a los tres **Métodos**, donde el más relevante parece ser el sulfato marcando los mayores valores de HAG anual en los **Métodos 2 y 3**, (Fig. 11, 12) seguido por el molibdeno en **1 y 2** (Fig. 10 y 11), indicándonos que a ambas especies se les debería prestar atención. Dentro de las diferencias en los resultados, el hecho de que el cobre aparezca solo en el **Método 1** será explicado en el párrafo a continuación; mientras que la ocurrencia del arsénico y el hierro con valores altos únicamente para el **Método 3** (Fig. 12), obedece principalmente a que estas sustancias poseen restricciones más altas (límites más bajos) en lo que se exige en el contenido del agua potable (NCh409), a diferencia de las condiciones que requiere un efluente descargado a un cuerpo de agua (DS 90), reflejando menores valores de HAG para estas sustancias en el **Método 2**.

Al analizar los resultados de todas las HAGs anuales (Fig. 10, 11 y 12) podemos ver que el mayor volumen es entregado por el valor de 2008 a través del **Método 1** (MPA), que aunque posee una gran incertidumbre, su valor central supera en un orden de magnitud al resto de los volúmenes del mismo **Método**, así como también a los valores de los **Métodos 2 y 3**. Debido a que el resto de los valores si son comparables entre sí, independientemente del **Método** utilizado, es que se considera al valor de 2008 del **Método 1** como una diferencia excepcional, que se atribuye en parte al estrecho margen de dilución que entrega el MPA del cobre (1,1 µg/L), en relación al valor por el que es reemplazado para dividir a la carga contaminante (Ec.1) en los demás **Métodos**, como por ejemplo en el **Método 3** (más estricto que el **Método 2**), en donde:

$$\begin{aligned}
 (C_{max} - C_{nat}) &= (NCh409 [Cu] - C_{act}[Cu]) \\
 (C_{max} - C_{nat}) &= (2000 \mu\text{g/L} - 70 \mu\text{g/L}) \\
 (C_{max} - C_{nat}) &= 1930 \mu\text{g/L (NCh409)} \gg \gg 1,1 \mu\text{g/L (MPA)} \\
 &\Rightarrow (C_{max} - C_{nat}) \text{ Método 3 } \gg \gg (C_{max} - C_{nat}) \text{ Método 1}
 \end{aligned}$$

De esta forma se ilustra lo alejado que se encuentra el valor del **Método 1** (MPA) para el cobre en relación a lo que permitiría el **Método 3** (NCh409), diferencia que obedecería principalmente a la falta de sitio-especificidad del MPA, que fue desarrollado para representar la realidad holandesa. Además se debe indicar que durante 2009 y 2010 el cobre registró en su mayoría valores bajo el límite de detección, y por ello sólo sobresalió con un alto valor durante 2008 en los cálculos hechos con el **Método 1**.

4.1.2 HAG per ton Cobre fino

A través de las Fig. 13, 14 y 15 podemos ver ahora las HAGs representando los volúmenes utilizados en la producción de una tonelada de cobre en División el Teniente, donde al igual que en las HAGs anuales el valor de 2008 con el **Método 1** se destacó, siendo mayor casi en 2 ordenes de magnitud al resto de los valores del mismo y de los otros **Métodos**. Esta diferencia se explica en parte por las razones planteadas en el punto anterior, es decir el estrecho margen de dilución que entrega el MPA del cobre, además de ser aumentada por la introducción de la producción de cobre anual para obtener las HAG per ton de cobre. Esto es debido a que al dividir las distintas HAGs anuales por la correspondiente cantidad de toneladas de cobre producidas cada año, el volumen de 2008 es el que se divide por la menor cantidad (producción de cobre aumenta en el tiempo), aumentando la diferencia con las HAGs per ton de cobre fino de 2009 y 2010.

Por medio de las Fig. 13, 14 y 15 podemos también distinguir claramente la especie responsable (indicada en cada barra) del mayor volumen en cada año, pudiendo establecer nuevamente claras diferencias entre el **Método 1** con el cobre y el molibdeno como responsables, y los **Métodos 2 y 3** en donde solo se indica al sulfato.

Se observa además tal como en las HAGs anuales, la tendencia decreciente a través de los tres años estudiados indistintamente del Método ocupado, la que se puede atribuir en una parte importante al comportamiento decreciente que ha tenido el caudal descargado por DET sobre el estero Carén (**Anexo 4**), el cual llegó a cerca de 75×10^6 m³/año en 2008, y bajó a 42×10^6 m³/año en 2010, lo que finalmente se traduce en una menor carga contaminante hacia el estero Alhué.

4.1.3 HAG anuales versus Q_{nat}

Gráficamente en estos resultados se presenta nuevamente la disminución de los valores de HAGs anuales a lo largo de los años estudiados, tendencia que como se explicó en el punto anterior obedece en gran medida a la disminución sistemática de los caudales descargados por parte de DET.

Al comparar luego los valores se observa que el Q_{nat} es superado con los tres **Métodos** (Fig. 16, 17 y 18) siendo las únicas excepciones las HAGs de 2010 del **Método 1** y **2**. En la referida al **Método 1** (MPA) se dijo que esta había alcanzado el valor del Q_{nat} , revelando entonces que se utilizó justamente la capacidad de dilución del Alhué y las aguas del estero entonces habrían llegado a la concentración $C_{máx}$ dada por el **Método 1**, es decir el MPA del molibdeno. En el caso de la HAG de 2010 del **Método 2** (Fig. 17) que mostró un volumen menor al del caudal natural, se estaría indicando que la descarga de DET fue probablemente diluida por debajo del límite del DS90 (de sulfato) durante 2010, mientras que fue sobrepasado durante 2008 y 2009 (Fig. 17), superando la capacidad de dilución del Alhué dada por el **Método 2**. Como se mencionó, también fueron sobrepasados en el Alhué los límites máximos “más estrictos” de los **Métodos 1** y **3**.

Viendo la tendencia de los resultados parece probable esperar que para 2011 y los siguientes años, las HAGs anuales de DET sobre el Alhué sigan disminuyendo y con ello se logre estar por debajo del Q_{nat} del Alhué por lo menos con los **Métodos 1** y **2**, ya que a través del **Método 3** se ve una mayor diferencia entre el volumen de la HAG de 2010 y el Q_{nat} . Esta mayor diferencia mostrada por el **Método 3** nos estaría indicando que al menos para DET sería muy difícil conseguir las concentraciones aceptables dadas por la Norma chilena de agua potable.

4.1.4 Método recomendado

De modo general al tomar en cuenta todos los resultados de HAG con las 3 formas de cálculo, se observa que solamente el **Método 2** logró entregar resultados para todas las especies químicas consideradas, ya que, no existe MPA (**Método 1**) para sulfato, aluminio, hierro ni manganeso, y la NCh409 (**Método 3**) no tiene valores límite para el aluminio ni molibdeno. Debido a esta situación es que se podría tomar como válido el **Método 2** en este estudio de caso, sin embargo, los límites de una norma de emisión como el DS90 buscan primordialmente establecer un techo de descarga a nivel nacional sin mayores especificaciones locales, y lo que se necesita son estándares o niveles descritos en una norma de calidad secundaria del cuerpo de agua afectado donde se aseguren las condiciones aceptables para el mismo.

En cuanto a los otros métodos podría argumentarse que no correspondería aplicar el **Método 3**, porque aunque sea una norma de calidad no representa el ideal de ningún cuerpo de agua natural, sino sólo los niveles aceptables para potabilizar el agua; mientras que el **Método 1** tampoco sería recomendable debido a que generó un margen muy estrecho de dilución (MPA del cobre) en comparación a lo que permitía el **Método 3** con los niveles del agua potable, provocando finalmente valores exagerados en las HAG de 2008 (Fig. 10, 13 y 16), además de que sus estándares no guardan ninguna relación con las características locales chilenas. De modo que aunque ninguno de los métodos de cálculo muestre las características necesarias, es el **Método 2** el que muestra menos debilidades al contener un gran número de variables y parámetros (mejor que **Método 1** y **3**), presentar una cierta especificidad en cuanto al contenido natural de las aguas chilenas (mejor que **Método 1**), y contiene niveles más exigibles a cuerpos de agua, a diferencia del **Método 3**. Por lo que el **Método 2** sería el método

recomendado pudiendo utilizarse en el cálculo de HAGs para los productos comercializables de DET u otros productos mineros en condiciones similares.

Cabe señalar que la utilización del **Método 1** (estándares internacionales) y el **Método 3** (niveles locales más estrictos), dejaría en una situación más complicada la comercialización del cobre para DET, al mostrar un bajo desempeño ambiental por exagerados valores de HAG, que finalmente haría a los productos menos competitivos en el mercado internacional. Al contrario, el **Método 2** probablemente muestre una situación subestimada por tratarse de niveles de descarga y no de calidad, por lo que queda pendiente el desarrollo de normas secundarias o estudios similares por parte de empresas, en aquellos cuerpos de agua que estén afectados por descargas de contaminantes, de manera de utilizarlas en HAGs para obtener resultados más fidedignos, en pro de las ventajas que ofrece este indicador a nivel local, como del posible valor agregado sobre productos chilenos en el mercado internacional al transparentar la situación del recurso agua detrás de éstos productos.

4.2 Comparación de Resultados con literatura

Las siguientes comparaciones de valores se hicieron considerando las HAGs obtenidas con el **Método** recomendado o **Método 2**, que considera los niveles máximos del DS90 junto a las C_{act} .

En primer lugar, para realizar la comparación de valores se hizo una revisión de estudios de Huella de Agua disponibles que indicaran valores de HAG referidos al cobre, otros metales y productos de otra naturaleza. De esta revisión se obtuvo sólo un estudio referido al cobre (Garcés M., 2011), ninguno a otros metales, y una gran cantidad de estudios referidos a productos agrícolas y ganaderos.

Con respecto al cobre, en la Fig. 19 se muestra la comparación de los resultados de HAGs anuales obtenidos en este estudio y los informados en Garcés M. (2011).

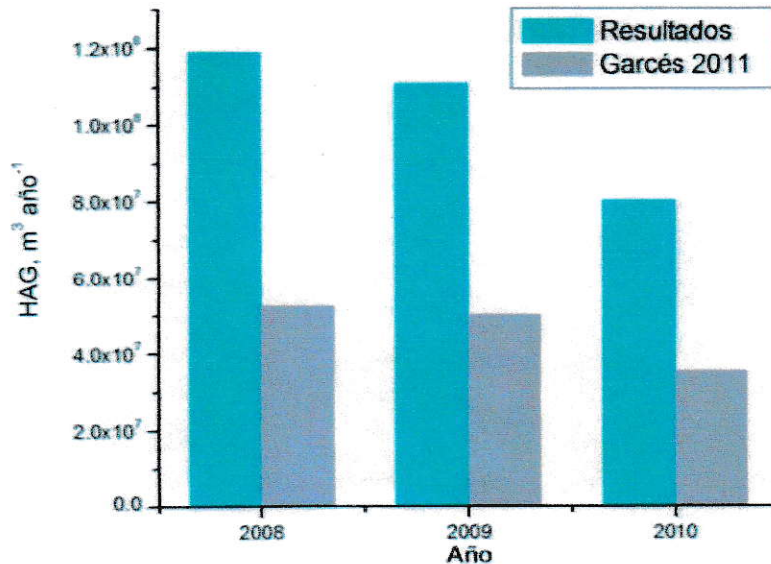


Figura 19. Comparación entre los valores de HAG anual obtenidos en este estudio (Resultados) y los valores de HAG anual informados en Garcés M. (2011).

Como antecedentes de Garcés M. (2011), se detalla que también se realizó sobre División el Teniente, utilizó el mismo periodo de tiempo, y también ocupó las concentraciones descritas en el DS90 para representar su $C_{m\acute{a}x}$. Al igual que en este estudio los resultados obtenidos en Garcés M. (2011), indicaron que la especie química responsable de los mayores volúmenes de HAG era el sulfato. Cabe señalar además que este estudio de 2011 midió sus HAGs considerando al Est. Carén como cuerpo de agua afectado y no el Alhué como en este seminario de título, sin embargo conceptualmente la carga contaminante calculada es la misma en ambos estudios.

Al analizar la Fig. 19 se observa que los resultados en Garcés M. (2011), siguen la misma tendencia decreciente en el tiempo, aunque los valores son menores durante los tres años. Estas magnitudes distintas entre estudios, que presentan una diferencia

porcentual de entre un 55 y 56%, se podrían explicar debido a que el estudio de 2011 utilizó una metodología distinta a la presentada en este seminario, derivando en una fórmula distinta para el cálculo de sus HAGs. Otra diferencia entre estudios es que en Garcés M. (2011), se consideró como cero las concentraciones naturales del Estero Carén, mientras que en este seminario se ocuparon las C_{act} al no tener las correspondientes C_{nat} , diferencia que independientemente de la magnitud de los valores utilizados, provoca en el estudio de 2011 una disminución de las HAGs al dejar ceros en el lugar de la C_{nat} (ec.(1)). De esta forma, se observa la significativa diferencia que puede producir tener metodologías y criterios ligeramente distintos a la hora de contrastar resultados, tal como se comprobó cuando se compararon los distintos métodos de cálculo propuestos en este seminario, y por ende lo importante que es tener una base común para poder hacer una comparación real entre HAGs u otros indicadores.

Por otro lado en la Fig. 20 se presentan los valores de múltiples HAGs asociadas a productos, informados en publicaciones reconocidas por el Water Footprint Network, junto al valor promedio de las HAGs per tonelada de cobre (DET) calculadas de los años 2008, 2009 y 2010, correspondiente al valor de $262 \text{ m}^3/\text{ton Cu}$. A pesar de que la selección de los productos para realizar esta última comparación fue arbitraria, se puede ver que el volumen necesario de agua correspondiente a la HAG del cobre de DET pertenece más bien a un rango medio-bajo dentro del universo considerado, quedando sólo por encima del chocolate, las espinacas, el arroz, el aceite de oliva y azúcar refinadas. Sin embargo, dado que este es un estudio con una profundidad acotada a la HAG directa y a las fuentes puntuales de contaminación, no sería extraño ver aumentado el valor de HAG per tonelada de cobre de DET si se agregaran la HAG

indirecta (análisis de ciclo de vida) y las fuentes de contaminación difusa (filtraciones del tranque de relaves Carén).

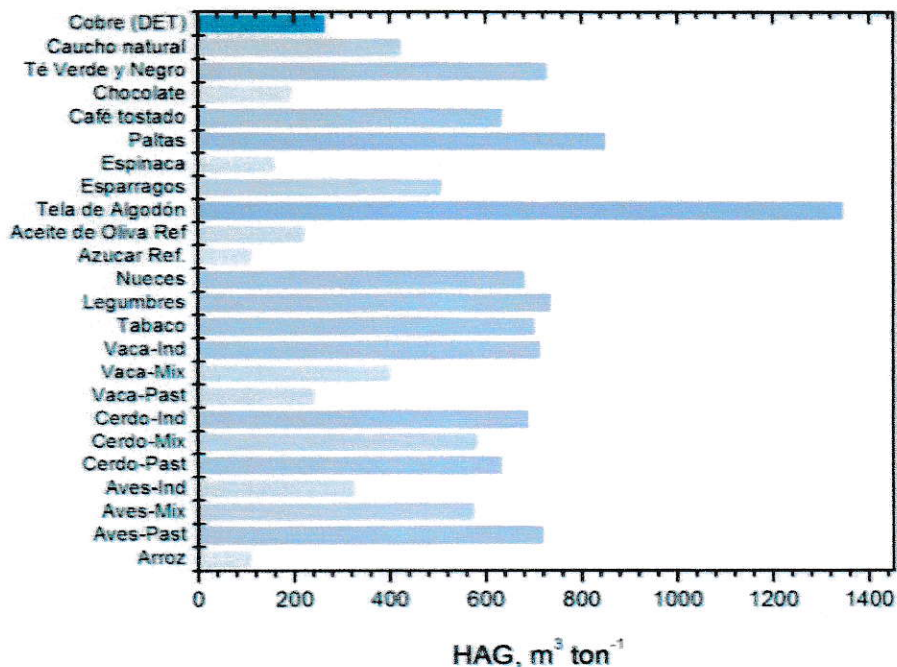


Figura 20. Múltiples valores de HAG contrastados con el valor promedio calculado para una tonelada de cobre fino en División el Teniente. Los términos “Ind”, “Past” y “Mix” están asociados a la naturaleza de la producción, indicando un método Industrial, de Pastoreo y Mixto, respectivamente.

4.3 Especies más importantes según HAG

Tomando en consideración el **Método** recomendado o **Método 2** (DS90), se tiene que la especie química responsable de los mayores volúmenes de HAG anuales y por consiguiente la más preocupante de la descarga de DET, es el sulfato, seguido únicamente por el molibdeno que representa aproximadamente la mitad del volumen calculado para el sulfato durante los tres años.

4.3.1 Posibles consecuencias de valores altos de sulfato y molibdeno

Desde el punto de vista toxicológico, el sulfato no parece representar una amenaza en agua potable. Datos obtenidos en lechones y en humanos indican un efecto laxativo a concentraciones de 1000-1200 mg/L, mientras que la presencia de sulfato en agua puede dar un sabor indeseable, perceptible a aproximadamente 250 mg/L (WHO 2004).

De acuerdo a la literatura disponible existen significativas diferencias interespecie respecto a la tolerancia al sulfato, muchos organismos acuáticos, en especial los que viven en aguas con altos niveles naturales, tienen una relativamente alta tolerancia. Por ejemplo, el musgo acuático *Fontinalis antipyretica* muestra sensibilidad hacia el sulfato en concentraciones de 1500 mg/L. Sin embargo, la dureza reduce significativamente la toxicidad del sulfato por lo que para evaluar posibles efectos nocivos de esta especie química siempre debe tomarse en cuenta la química del agua (Davies, 2007). Por otro lado, los invertebrados tienden a exhibir una sensibilidad mayor que la de los peces (Davies y col. 2003) y algunos mamíferos pueden tolerar relativamente altos niveles de sulfato en agua (cerdos hasta 3000 mg/L) (WHO, 2004).

La contaminación por sulfato en aguas superficiales y subterráneas, a pesar de su baja toxicidad, representa una considerable amenaza ecológica ya que afecta a la biodiversidad y el funcionamiento biogeoquímico, por lo que las emisiones de sulfato en el ambiente deberían estar controladas. Estudios faunísticos de aguas dulces ricas en sulfato son escasos. Sin embargo, se ha encontrado que propiedades de hábitat específicas de lagos sulfatados influyen la comunidad zooplanctónica al reducir el número de especies y llevando a la dominación de una especie (Kuznetsova and bayanov, 2011; Stanković y col., 2011). Otros estudios muestran que altas

concentraciones de sulfato interfieren fuertemente con el ciclo biogeoquímico del hierro y el fósforo promoviendo la eutroficación, que aumenta aun más la toxicidad (Geurts y col., 2009, Lamers y col., 2002), y también promueve la toxicidad del sulfuro, sustancia que se puede producir por reducción del sulfato en condiciones anóxicas y que los peces sólo podrían tolerar a bajas concentraciones debido a alteraciones de las funciones metabólicas y la actividad enzimática (Torrans y Clemens, 1982; Yusoff y col. 1998).

Finalmente tomando en consideración los antecedentes planteados, el sulfato no es una especie química que pueda considerarse inocua por lo que es necesario establecer a que concentraciones el estero Alhué presenta problemas con las comunidades acuáticas y terrestres que dependen de él, y con respecto a los usos antrópicos que posee, en otras palabras establecer la concentración que correspondería colocar dentro de una hipotética norma de calidad secundaria para el Alhué.

Evaluando ahora al Molibdeno, el segundo contaminante más importante basándose en los resultados de las HAG, tenemos que la tolerancia a excesos de Mo en la dieta varía con las especies, la cantidad y forma química del Mo ingerido, con el nivel de Cu en el animal y el contenido de azufre en la dieta (DGA, 1993). Los animales bovinos son los menos tolerantes a toxicidad por Mo, seguido por ovinos, equinos y porcinos. También se ha reseñado en pollos detención del crecimiento con 200 ppm de Mo (Gray y Daniel, 1954). Las manifestaciones de toxicidad por Mo también son particulares para diferentes especies, dado que por ejemplo la diarrea es sólo un síntoma de bovinos, mientras que el retardo en el crecimiento y la pérdida del apetito son comunes a otros animales domésticos (Underwood, 1981). Se ha sostenido

(N.R.C., 1980) que bovinos alimentados por varios meses con 6 ppm de Mo presentan síntomas de molibdenosis, sugiriendo que este efecto a largo plazo es acumulativo.

De esta forma los posibles efectos que produzca el Molibdeno en el Alhué, como en el Lago Rapel aguas abajo, en conjunto con los ecosistemas terrestres involucrados deberían estar estudiados y controlados de manera de asegurar la salud de los mismos.

4.4 Análisis de Metodología Utilizada

4.4.1 Criterio E. Alhué como cuerpo receptor

La utilización del Alhué es una adaptación de la metodología propuesta por Hoekstra y col. 2011, donde se está asumiendo que lo que aporta la División en contaminantes hacia el Estero Carén, es equivalente a lo que llega realmente hasta al Estero Alhué. Evidentemente falta una buena estimación de esta fuente de incertidumbre, para ver si existe una diferencia significativa entre los dos puntos, sin embargo no parece exagerado asumir que efectivamente lo que se descarga al E. Carén, no difiere de manera significativa con lo que llega al E. Alhué, ya que la distancia entre el lugar de descarga en el Carén (Zona B del Estero en la Fig. 5) y la confluencia con el Alhué es de 7 km aprox., dejando poco espacio para una sedimentación u otros procesos que puedan cambiar de manera dramática el contenido en la confluencia.

4.4.2 Incertidumbre de HAG

Como se indicó antes, para la incertidumbre de las HAGs únicamente se tomó en cuenta la dispersión, en la forma de Desviación Estándar, de los promedios de las

concentraciones diarias, por lo que se necesita mejorar la estimación de la incertidumbre del indicador, incluyendo en su cálculo el resto de las fuentes de incertidumbre que puedan ser importantes, de manera de poder mostrar un cierto porcentaje de confiabilidad en los resultados y de esta forma caracterizar mejor los valores de HAG.

4.4.3 Fuentes Difusas de Contaminación

Dentro de estas fuentes se puede considerar la disposición de residuos sólidos (como los relaves), el uso de fertilizantes o pesticidas sobre el suelo, para los que se suele asumir que sólo una fracción del total de los contaminantes se filtra y llega hasta el agua subterránea o escurre hasta un curso de agua, de manera difusa. De modo que probablemente un aporte importante estaría dado por las filtraciones del mismo Embalse Carén, hecho reconocido y estudiado por la División (González F., 2012), que desde 1987 recibe relaves desde la mina el Teniente por lo que hasta la fecha se estaría afectando la calidad de las aguas subterráneas que pertenecen a la subcuenca del Alhué. Sin embargo en este estudio no fueron consideradas por falta de la información necesaria, por lo que queda pendiente una estimación de esta contribución junto a otras fuentes difusas en términos de HAG.

4.4.4 Criterio para valores bajo el LD

Este criterio que como se explicó consiste en remplazar por cero los valores de concentración que se encuentren bajo el límite de detección, utiliza en definitiva el mínimo valor dentro del rango de concentraciones posibles. Una situación parecida se produce al mirar hacia el cálculo de los promedios de concentración, ya que el criterio provoca el mínimo valor posible nuevamente. Esta "elección" del cero frente a un dato

que se informe bajo el LD dista de ser ideal, ya que, no se está considerando que todos los valores entre el cero y el LD son igual de probables (al analizar individualmente), por lo que debe estudiarse un método que permita tener resultados más reales. Aunque reemplazar por cero no fue la primera opción para trabajar con este tipo de datos, se utilizó en vista de que no se encontró un método que se acomodara a cálculos de promedios de tipo mensual que contenían sólo 4 datos. Una posibilidad podría ser el trabajar con promedios anuales de manera de tener alrededor de 40 datos, y desde ahí utilizar algún método estadístico que permita obtener información de la distribución de los datos anuales. De todas maneras se necesita aplicar un método que solucione el problema, en vista de que los análisis no se realizarán con una mayor precisión de la que exige la normativa.

Por otro lado es importante señalar que las grandes incertidumbres mostradas por el cobre en la Fig. 10, y el hierro en la Fig. 13 no fueron excepcionales, sino que se repitieron en cada especie química que tuviera una cantidad considerable de datos bajo el límite de detección, ya que, al reemplazarlos por cero la dispersión de los promedios aumentaba drásticamente. De este modo estas incertidumbres deberían disminuir cuando se tenga un mejor criterio para trabajar con los datos bajo el LD.

4.4.5 Concentración Natural (C_{act}) o Actual (C_{nat})

The Water Footprint Assessment Manual indica que para calcular la HAG de un proceso se debe utilizar la concentración natural del cuerpo receptor como referencia y no la concentración actual, debido a que la HAG es un indicador de la capacidad de asimilación apropiada. Por otro lado al utilizar la C_{act} , se estará observando la capacidad de asimilación restante, que estará cambiando constantemente y será función entonces del nivel actual de contaminación en un tiempo dado (Hoekstra et al.

2011). Sin embargo, cuando se requiere ver si la capacidad de asimilación de un cuerpo ha sido sobrepasada, al utilizar la C_{nat} se estará ignorando cualquier aporte de otros posibles actores que estén contaminando el mismo cuerpo aguas arriba, o el simple contenido actual del cuerpo, que puede ser mayor al natural. De este modo conclusiones al usar la C_{nat} sobre la superación de la capacidad de asimilación, no tienen una buena base ya que puede que no se hayan considerado todos los aportes. Esta situación se corrige al usar las C_{act} , las que consideran cualquier aporte que esté por encima del contenido natural aguas arriba. Por lo tanto si se requiere ver si se ha sobrepasado la capacidad de asimilación del cuerpo receptor, se debería recomendar el cálculo de una HAG especial utilizando sólo las C_{act} , y para representar la capacidad de asimilación apropiada de un proceso, producto u otro, realizar el cálculo tradicional de HAG utilizando la C_{nat} .

Con respecto a la utilización de las C_{act} para los cálculos de todas las HAGs, sólo en el caso de que las C_{nat} resultaran significativamente menores a las concentraciones actuales (de sulfato y molibdeno), sólo entonces las HAGs calculadas estarían sobrestimadas.

4.4.6 Limitaciones Metodología Utilizada

Queda preguntarse si el comportamiento anual del indicador y sus variables nos entrega la información suficiente como para asegurar la calidad y/o impactos sobre un cuerpo de agua. Por un lado parece correcto utilizar estos promedios y valores anuales en el contexto de las características de producción bajo las cuales se presenta en el mercado un cierto producto. Mientras que por otra parte, los enfoques mensuales o diarios se harían más útiles cuando se estén tomando decisiones con respecto a los impactos ambientales locales derivados de tal producción. Sin embargo,

independiente de la utilización del comportamiento anual, mensual u otro, la mejor aproximación será la que tenga más datos confiables y por ende sea representativa de la escala temporal escogida.

4.5 Antecedentes bibliográficos del Embalse Rapel

Numerosos trabajos (Soto y col. 1984; Vila y col., 1997; Lavanderos y col. 1994; Montecino, V. & Cabrera, S., 1982; Vila y col. 2000) han estudiado por años distintas aristas del Embalse Rapel, lago artificial en el que desemboca el Estero Alhué (Fig. 5), en parte dado por la preocupación existente en cuanto a su eutroficación y contaminación por sulfato y metales. Preocupación avalada, entre otros motivos, por las características propias de un lago artificial, las que deberían conducir a una mayor eutroficación (Thorton y col., 1990), además de las características de la subcuenca del Alhué, que dentro de los tres subsistemas dentro del Embalse Rapel, es la que presenta la tasa de renovación de agua más lenta, estimada en 14 meses, significativamente más lenta que el resto del embalse estimada en 28 días (Contreras y col. 1994).

Bajo el contexto de estos estudios previos, está claro que existe un interés por la calidad de las aguas que llegan hasta el embalse, en especial las del Estero Alhué por lo señalado anteriormente y además por la contribución de las descargas de DET. De esta forma la determinación de la HAG considerando la descarga al Alhué nos entrega una idea preliminar, corroborada con los estudios previos, de que aún existe al menos una contribución importante de SO_4^{2-} que se integra al sistema hídrico Estero Carén – E. Alhué – Embalse Rapel, haciendo necesaria su monitorización, seguimiento histórico y control efectivo, en conjunto con el desarrollo de los límites respectivos que permitan preservar la salud de este sistema hidrológico y sus sistemas asociados.

V. CONCLUSIONES

La metodología general junto a su marco conceptual para determinar el indicador de HAG se estableció de manera satisfactoria para que sea aplicado en producción minera de cobre u otros metales. En la Fig. 7 se indica el esquema general a seguir.

Se consideró el **Método 2**, que contempla los niveles del DS90 para las C_{max} , como el recomendado entre los tres utilizados. Por medio de éste se obtuvieron las siguientes HAG anuales: $1,19 \times 10^8$ m³/año para 2008, $1,11 \times 10^8$ m³/año para 2009 y $8,01 \times 10^7$ m³/año para 2010, indicando los volúmenes de agua requeridos para diluir los contaminantes agregados al Estero Alhué, por efecto de la producción de cobre anual por vía pirometalúrgica en DET. En base al mismo **Método** también se obtuvo la HAG de DET referida a producto llegando a un valor promedio de 262 m³/ton Cu, tomando en cuenta los tres años estudiados.

El contaminante responsable de los valores descritos y por ende el más importante, es el sulfato descargado en el efluente y que llega hasta el Estero Alhué. El segundo contaminante más importante es el molibdeno, en relación a los valores de HAG encontrados, sin embargo nunca superó ni se acercó a los niveles mostrados por el sulfato.

Por otro lado, al comparar los valores de HAGs anuales con los caudales naturales del Estero Alhué, utilizando valores de probabilidad de excedencia de un 50%, se observa que la capacidad de asimilación del cuerpo de agua no fue sobrepasada en 2010, pero si fue superada durante los años 2008 y 2009.

Finalmente se sostiene que dada la situación hídrica en el mundo el papel del indicador Huella de Agua con sus componentes azul, verde y gris, es muy importante

dado que puede entregar información valiosa referida a los niveles de agua dulce requeridos por procesos, productos, consumidores, empresas, países u otros, por lo que para que el cobre u otros productos sean competitivos en el mercado internacional es necesario preocuparse por la HAG, indicador que para su aplicación requiere de más Normas de Calidad Secundarias o estudios similares, que provean a los cálculos de HAG de la sitio-especificidad necesaria de manera de no depender de estándares internacionales (**Método 1**) u otros que nos dejen en situaciones complicadas en el mercado internacional al mostrar bajos desempeños ambientales, que no representan necesariamente la realidad de nuestros sistemas productivos.

VI. REFERENCIAS

Publicaciones:

- Aldaya, M.M. and Hoekstra, A.Y., 2010. The water needed for Italians to eat pasta and pizza, *Agricultural Systems*, 103: 351-360.
- Aldaya, M.M., Muñoz, G. and Hoekstra, A.Y., 2010. Water footprint of cotton, wheat and rice production in Central Asia, *Value of Water Research Report Series No.41*, UNESCO-IHE.
- Arias D., 2008. Optimización del consumo de agua en los procesos productivos de fundición Caletones, División el Teniente, CODELCO-CHILE, Trabajo de Titulación, Dpto. Ingeniería Geográfica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Santiago de Chile.
http://www.digeo.cl/doc/Arias%20del%20Mauro_Daniela.pdf
- Chapagain, A.K. and Hoekstra, A.Y., 2011. The blue, green and grey water footprint of rice from production and consumption perspectives, *Ecological Economics*, 70(4): 749-758.
- Contreras, M., Villagrán, H. y Salazar, C., 1994. Características Hidrodinámicas del Embalse Rapel. *Medio Ambiente* 12 (1): 41-49.
- Cote, C. M., Moran, C. J., Acosta O.J., 2010. Progressing towards Sustainability: From Water Efficiency to Water Effectiveness at the Collahuasi Mine. *Water in Mining 2010*. Santiago, Chile: 33-46.
- Crommentuijn T., Polder M. D., Posthumus R., Van de Plassche, E., 1997. Maximum Permissible Concentrations and Negligible Concentrations for Metals, Taking Background Concentrations into Account. *National Institute of Public Health and the Environmental, RIVM report no. 601501001*.
<http://rivm.openrepository.com/rivm/bitstream/10029/10113/1/601501001.pdf>
- Crommentuijn T., Sijm D., De Bruijn J., Van den Hoop M., Van Leeuwen K., Van de Plassche E., 2000. Maximum permissible and negligible concentrations for metals and metalloids in the Netherlands, taking into account background concentrations, *Journal of Environmental Management*, vol 60, pp121-143
- Davies, T.D., Pickard, J.S., Hall, K.J., 2003. Sulphate toxicity to fresh water organisms and molybdenum toxicity to rainbow trout embryos/alevins. In: *Proceedings of the British Columbia Mine Reclamation Symposium, 2003*.
- Davies, T.D., 2007. Sulphate toxicity to the aquatic moss, *Fontinalis antipyretica*. *Chemosphere* 66,444-451.
- DIA, 2007. Declaración de Impacto Ambiental: Incremento de producción a 140 kt/d, División el Teniente, CODELCO Chile.

- DGA, 1993. Análisis crítico de los estudios de evaluación de impacto ambiental de los efluentes del *Embalse Carén*. Departamento de Conservación y Protección de Recursos Hídricos, Dirección General de Aguas.
- DGA, 2004. Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad. Cuenca del Río Rapel, Dirección General de Aguas, Cade-Idepe, 190 pp.
- Ercin, A.E., Aldaya, M.M. and Hoekstra, A.Y., 2012. The water footprint of soy milk and soy burger and equivalent animal products, *Ecological Indicators*, 18: 392–402.
- Garcés M., 2011. Análisis Técnico de la Huella Hídrica como indicador de sustentabilidad del uso del agua en la producción del concentrado de cobre en División El Teniente de CODELCO, Memoria de título, Dpto. Ingeniería Civil, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile. http://www.cybertesis.uchile.cl/tesis/uchile/2011/cf-garces_mv/pdfAmont/cf-garces_mv.pdf
- Gerbens-Leenes, P.W., Mekonnen, M.M. and Hoekstra, A.Y., 2011. A comparative study on the water footprint of poultry, pork and beef in different countries and production systems, *Value of Water Research Report Series No. 55*, UNESCO-IHE.
- Geurts, J.J.M., Sameel, J.M., Willers, B.J.C., Roelofs, J.G.M., Verhoeven, J.T.A., Lamers, L.P.M., 2009. Environmental interacting effects of sulphate pollution, sulphide toxicity and eutrophication on vegetation development in fens: a mesocosm experiment. *Environ. Pollut.* 157, 2072–2081.
- Gray, L y Daniel, L., 1954. Some effects of excess molybdenum on the nutrition of the rat. *The Journal of Nutrition*. Vol. 53 no. 1, 43-51.
- Hoekstra, A.Y., 2010. The water footprint of animal products, In: D'Silva, J. and Webster, J. (eds.) *The meat crisis: Developing more sustainable production and consumption*, Earthscan, London, UK, pp. 22-33.
- ICE EIA, 2008. Informe Consolidado de Evaluación del Estudio de Impacto Ambiental proyecto: Peraltamiento embalse carén, División el Teniente, CODELCO Chile.
- INN 2005. Norma Chilena Oficial Nch409/1. Of 2005. Agua Potable - Parte 1: Requisitos. Instituto Nacional de Normalización, INN. Santiago, Chile.
- Kuznetsova, M.A., Bayanov, N.G., 2001. On the classification of aquatic communities: an example of zooplanktonic cenoses of karst lakes in the north of European Russia. *Russ. J. Ecol.* 4, 255–260.
- Lamers, L.P., Falla, S.J., Samborska, E.M., VanDulken, I.A.R., VanHengstum, G., Roelofs, J.G.M., 2002. Factors controlling the extent of eutrophication and toxicity in sulfate-polluted fresh water wetlands. *Limnol. Oceanogr.* 47, 585–593.

- Lavanderos, L., Villagrán, H., & Mühlhauser, H., 1994. Temporal and spatial changes in primary biomass as a diagnosis and prognosis in environmental impact (Rapel reservoir, central Chile). *Environmental Monitoring and Assessment* 29: 53-64.
- Mekonnen, M.M. and Hoekstra, A.Y., 2010. A global and high-resolution assessment of the green, blue and grey water footprint of wheat, *Hydrology and Earth System Sciences*, 14(7), 1259–1276
- Mekonnen, M.M. and Hoekstra, A.Y., 2010b. The green, blue and grey water footprint of farm animals and animal products, *Value of Water Research Report Series No.48*, UNESCO-IHE.
- Mekonnen, M.M. and Hoekstra, A.Y., 2011. The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products, *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(5): 1577-1600.
- MINSEGPRES, 2001. Decreto Supremo N° 90 de 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. Santiago, Chile: Diario Oficial de Chile 07 de marzo de 2001.
- Montecino, V. & Cabrera, S., 1982. Phytoplankton activity and standing crop in an impoundment of central Chile. *Journal of Plankton Research* 4: 943-950.
- N.R.C., 1980. Mineral tolerance of domestic animals. National Research Council. National Academy Press: Washington, DC.
- Peña, C., Huijbregts, M., 2012. The Blue Water Footprint of Copper Cathode Production in Northern Chile. *Journal of Industrial Ecology*, in press.
- RIVM, 2009. Maximum Acceptable Concentrations within the context of the Water Framework Directive: An initial evaluation, RIVM Letter Report. <http://www.rivm.nl/bibliotheek/rapporten/601714012.pdf>
- Soto, D., Vila, I., & Villalobos, B., 1984. Temporal and spatial distribution of rotifera in a Chilean reservoir: a possible effect of impoundment hydrodynamics. *Hydrobiologia* 114: 67-74.
- Stankovic´, I., Ternjej, I., Mihaljevic´, Z., Furacˇ, L., Kerovec, M., 2011. Crustacean plankton community (Crustacea: Copepoda & Cladocera) in gypsum karst lakes and their relation to abiotic parameters. *Hydrobiologia* 666 (1), 145–153.
- Thorton, K. W., Kimmel, B., y Payne, F., 1990. Reservoir limnology: Ecological perspectives. A Wiley-Interscience Publication, 246 pp.
- Torrans, E.L., Clemens, H.P., 1982. Physiological and biochemical effects of acute exposure of fish to hydrogen sulfide. *Comp. Biochem. Physiol.* C71,183–190.

- Underwood, E., 1981. The mineral nutrition of livestock. Commonwealth Agricultural Bureaux. London.
- Van Oel, P.R. and Hoekstra, A.Y., 2012. Towards quantification of the water footprint of paper: A first estimate of its consumptive component, *Water Resources Management*, in press.
- Vila, I., Contreras, M. y Pizarro, J., 1997. Eutrophication and phytoplankton selective responses in a temperate reservoir. *Verth. Internat. Verein. Limnol.* 26: 798-802.
- Vila, I., Contreras, M., Montecino V., Pizarro J. & Adams, D.D., 2000. Rapel: a 30 years temperate reservoir: eutrophication or contamination? *Archives für Hydrobiologie* 55: 31-44.
- Weidema B., Wenzel H., Petersen C., Hansen K., 2004. The Product, Functional Unit and Reference Flows in LCA. Danish Environmental Protection Agency. Environmental News No. 70.
- Yusoff, F.M., Law, A.T., Teo, H.Y., Hoque, M.T., 1998. Effects of hydrogen sulfide on the early developmental stages of Javanese carp, *Puntius gonionotus* (Bleeker). *Asian Fish. Sci.* 11, 231-238.

En Libro:

Baumann H. & Tillman A., 2004. The Hitch Hiker's Guide to LCA.

COCHILCO, 2008. Buenas Prácticas y Uso Eficiente de Agua en la Industria Minera. Comisión Chilena del Cobre.

Hoekstra A. Y., Chapagain A. K., Aldaya M. M. & Mekonnen M. M., 2011. The Water Footprint Assessment Manual: Setting the global standard, Water Footprint Network.

<http://www.waterfootprint.org/downloads/TheWaterFootprintAssessmentManual.pdf>

Visitado 28 de Septiembre 2012.

Vergara F., Parada F., Sánchez M., 2010. Un caso paradigmático de manejo de aguas en minería subterránea en Chile: caso de la Mina El Teniente. En 1ra Jornada Iberoamericana de Medio Ambiente Subterráneo y Sostenibilidad, Métodos de Explotación y Ambiente Subterráneo, MASyS 2010-1, Ayacucho, Perú, 30 Junio al 2 de Julio, 2010.

<http://cerena.ist.utl.pt/masysnet/books/MetodosExplotacionAmbienteSubterráneo.pdf>

Visitado 1 Agosto 2012.

En Internet:

COCHILCO, 2012. Boletín Mensual Electrónico. Cap. 3: El Sector Minero y la Economía Chilena. Tabla 14.1: Producto Interno Bruto por Clase de Actividad Económica a Precios Corrientes – Anual y Trimestral.

http://www.cochilco.cl/productos/boletin.asp?anio=2012&mes=03&tabla=tabla17_1.

Visitada 9 Mayo 2012.

CODELCO, 2012a. Extracción: Información básica.

<https://www.codelcoeduca.cl/proceso/extraccion/extraccion.asp>

Visitada 10 Octubre 2012.

CODELCO, 2012b. Chancado y Molienda: Información básica.

<https://www.codelcoeduca.cl/proceso/chancado/t-basica.html>

Visitada 3 Junio 2012.

CODELCO, 2011. El Teniente fundió último lingote refinado a fuego (RAF). Noticias, El Teniente, Operaciones, Portada. CODELCO.

http://www.codelco.com/el-teniente-fundio-ultimo-lingote-refinado-a-fuego-raf/prontus_codelco/2011-12-28/162828.html

Visitada 9 Octubre 2012.

Concha y Toro, 2011. Sustentabilidad, Noticias de Sustentabilidad.

<http://www.conchaytoro.com/web/sustentabilidad-es/concha-y-toro-finaliza->

[medici%C3%B3n-de-su-huella-h%C3%ADdrica-con-positivos-resultados/?lang=es](#)
Visitada 8 de Octubre 2012.

Garcés M., 2012. Contacto Personal: Preguntas a través de e-mails sobre caudales del Estero Carén.

González F., 2012. Contacto Personal: Trabajador de CODELCO-TENIENTE. Preguntas a través de e-mail.

SONAMI, 2012. Producción Minera Nacional de Cobre por Principales Empresas, Estadísticas, Portal Infominero.
http://www.sonami.cl/index.php?option=com_content&view=article&id=256&Itemid=122
Visitada 23 Mayo 2012.

SONAMI, 2011. Memoria Anual 2010 – 2011. Disponible en internet:
<http://sonami.cl/digital/memoria/memoria20102011/>
Visitada 15 Septiembre 2012.

WHO, 2004. Sulfate in drinking-water, World Health Organization.
http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/chemicals/sulfate.pdf
Visitada 13 Septiembre 2012.

VII. ANEXOS

Anexo 1: Límites máximos descritos en el DS-90 y la NCh409.

Contaminante	Unidad	Límite Máximo			
		DS-90			NCh409
		Tabla 1: Fluviales	Tabla 2: Fluviales c/Cap.Dil.	Tabla 3: Lacustres	
pH	-	6,0 - 8,5	6,0 - 8,5	6,0 - 8,5	6,5 - 8,5
Poder espumógeno	mm	7	7	-	-
Sólidos Sedimentables	mL/L/h	-	-	5	-
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	80	300	80	-
Sólidos disueltos totales	mg/L	-	-	-	1500
Temperatura	°C	35	40	30	-
Aluminio	mg/L	5	10	1	-
Arsénico	mg/L	0,5	1	0,1	0,01
Boro	mg/L	0,75	3	-	-
Cadmio	mg/L	0,01	0,3	0,02	0,01
Cobre	mg/L	1	3	0,1	2
Cromo Hexavalente	mg/L	0,05	0,2	0,2	-
Cromo Total	mg/L	-	-	2,5	0,05
Estaño	mg/L	-	-	0,5	-
Hierro	mg/L	5	10	2	0,3
Manganeso	mg/L	0,3	3	0,5	0,1
Mercurio	mg/L	0,001	0,01	0,005	0,001
Molibdeno	mg/L	1	2,5	0,07	-
Níquel	mg/L	0,2	3	0,5	-
Plomo	mg/L	0,05	0,5	0,2	-
Zinc	mg/L	3	20	5	3
Magnesio	mg/L	-	-	-	125
Cianuro	mg/L	0,2	1	0,5	0,5
Cloruros	mg/L	400	2000	-	-
Fósforo	mg/L	10	15	2	-
Fluoruro	mg/L	1,5	5	1	1,5
N total Kjeldahl	mg/L	50	75	-	-
N-Nitrito+N-Nitrato	mg/L	-	-	-	1
Nitrógeno Total	mg/L	-	-	10	-
Nitrato	mg/L	-	-	-	50
Nitrito	mg/L	-	-	-	3
Selenio	mg/L	0,01	0,1	0,01	0,01
Sulfatos	mg/L	1000	2000	1000	500
Sulfuros	mg/L	1	10	1	-
Amoníaco	mg/L	-	-	-	1,5
Aceites y Grasas	mg/L	20	50	20	-
Benceno	mg/L	-	-	-	0,01
Colif. Fecales o termotolerantes	NMP/100mL	1000	1000	1000-70	-
Indice de Fenol	mg/L	0,5	1	0,5	-
DBOS	mg O ₂ /L	35	300	35	-
Hidrocarburos Fijos	mg/L	10	50	-	-
Hidrocarburos Totales	mg/L	-	-	5	-
Pentaclorofenol	mg/L	0,009	0,01	-	0,009
SAAM	mg/L	-	-	10	-
Tetracloroetano	mg/L	0,04	0,4	-	0,04
Tolueno	mg/L	0,7	7	-	0,7
Triclorometano	mg/L	0,2	0,5	-	-
Xileno	mg/L	0,5	5	-	0,5
DDT + DDD + DDE	ug/L	-	-	-	2
2,4 - D	ug/L	-	-	-	30
Lindano	ug/L	-	-	-	2
Metoxicloro	ug/L	-	-	-	20
Compuestos Fenólicos	ug/L	-	-	-	2

Anexo 2: Información recopilada de la DGA.

Tabla B - 1. Valores de Variables Químicas en Estación DGA: "Estero Alhué antes Estero Carén".

Variable Química	Unidad	Estación del año				Cact
		Verano	Otoño	Invierno	Primavera	Promedio
Conductividad Eléctrica	uS/cm	444,3	531,4	144,0	214,2	333,48
Oxígeno Disuelto	mg/L	8,5	10,2	9,8	8,7	9,30
pH	-	7,4	7,5	7,4	7,9	7,55
Sulfato	mg/L	195,5	153,5	19,8	29,4	99,55
Cobre	µg/L	130	110	20	20	70,0
Hierro	mg/L	0,3	0,2	0,2	0,3	0,25
Manganeso	mg/L	0,05	0,05	0,01	0,02	0,033
Molibdeno	mg/L	0,30	0,25	0,03	0,04	0,16
Zinc	mg/L	0,03	0,01	0,02	0,01	0,02
Aluminio	mg/L	0,4	0,4	0,9	0,8	0,63
Arsénico	mg/L	0,004	0,004	0,004	0,003	0,0038

Fuente: Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad. Cuenca del Río Rapel, Dirección General de Aguas, Cade-Idepe, 2004.

Tabla B - 2. Valores de Caudal en el Estero Alhué según Probabilidad de Excedencia de un 50%, en Estación DGA: "Estero Alhué en Quilamuta".

Mes	Caudal, (m ³ /mes)
Abril	806112
Mayo	2804285
Junio	11391840
Julio	25452835
Agosto	22455706
Septiembre	12786336
Octubre	7362922
Noviembre	2923776
Diciembre	1317773
Enero	508896
Febrero	401587,2
Marzo	932083,2
	Caudal, (m ³ /año)
Suma	8,91E+07

Fuente: Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad. Cuenca del Río Rapel, Dirección General de Aguas, Cade-Idepe, 2004.

Anexo 3: Valores promedios de la información entregada por la SISS, de la descarga que realiza DET al Estero Carén.

Concentraciones medias de la Especie Química en efluente por mes, para cada año										
Especie Química	Mes	2010			2009			2008		
		Conc.(As), mg/L	Obs.	Desv.Est., mg/L	Conc.(As), mg/L	Obs.	Desv.Est., mg/L	Conc.(As), mg/L	Obs.	Desv.Est., mg/L
Arsénico, As	Enero	0,0055		0,0017	0,0053		0,0019	0,000	x	0,000
	Febrero	0,0050		0,0016	0,0033	** (1)	0,0006	0,000	x	0,000
	Marzo	0,0053		0,0019	0,0045		0,0013	0,000	x	0,000
	Abril	0,0035	*(1)	0,0029	0,0030		0,0000	0,000	x	0,000
	Mayo	0,0040		0,0014	0,0030		0,0012	0,000	x	0,000
	Junio	0,0058		0,0013	0,0033	*(2)	0,0038	0,0033	*(2)	0,0039
	Julio	0,0093		0,0010	0,0055		0,0017	0,0053		0,0017
	Agosto	0,0070		0,0014	0,0060		0,0022	0,011		0,003
	Septiembre	0,0070		0,0014	0,014		0,007	0,017		0,003
	Octubre	0,0060		0,0016	0,0065		0,0024	0,012		0,004
	Noviembre	0,0058		0,0005	0,0048		0,0013	0,009		0,004
	Diciembre	0,0038	*(1)	0,0026	0,0025	*(1)	0,0017	0,0055		0,0017
Especie Química	Mes	2010			2009			2008		
		Conc.(Cu), mg/L	Obs.	Desv.Est., mg/L	Conc.(Cu), mg/L	Obs.	Desv.Est., mg/L	Conc.(Cu), mg/L	Obs.	Desv.Est., mg/L
Cobre, Cu	Enero	0,000	x	0,000	0,015	*(3)	0,030	0,01	*(2) ** (1)	0,017
	Febrero	0,000	x	0,000	0,000	** (1) x	0,00	0,015	*(1)	0,010
	Marzo	0,000	x	0,000	0,000	x	0,00	0,013	*(1)	0,010
	Abril	0,000	x	0,000	0,000	x	0,00	0,015	*(1)	0,010
	Mayo	0,000	x	0,000	0,000	x	0,00	0,015	*(1)	0,010
	Junio	0,000	x	0,000	0,000	x	0,00	0,018	*(1)	0,013
	Julio	0,000	x	0,000	0,000	x	0,00	0,174	*(2)	0,314
	Agosto	0,000	x	0,000	0,013	*(3)	0,025	0,0253	*(2)	0,0394
	Septiembre	0,000	x	0,000	0,000	x	0,00	0,0708	*(1)	0,0677
	Octubre	0,015	*(3)	0,030	0,000	x	0,00	0,103		0,0715
	Noviembre	0,000	x	0,000	0,000	x	0,00	0,022	*(1)	0,016
	Diciembre	0,000	x	0,000	0,000	x	0,00	0,000	x	0,000

Obs:
 *(n): n valores bajo el límite de detección
 ** (n): n valores que faltan de los 4 correspondientes
 x: todos los valores disponibles no detectados

Concentraciones medias de la Especie Química en efluente por mes, para cada año										
Especie Química	Mes	2010			2009			2008		
		Conc.(Mo), mg/L	Obs.	Desv.Est., mg/L	Conc.(Mo), mg/L	Obs.	Desv.Est., mg/L	Conc.(Mo), mg/L	Obs.	Desv.Est., mg/L
Molibdeno, Mo	Enero	0,58		0,0500	0,75		0,0577	0,343	** (1)	0,2003
	Febrero	0,60		0,1633	0,73	** (1)	0,0577	0,315		0,0379
	Marzo	0,55		0,1291	0,58		0,0500	0,41		0,1187
	Abril	0,68		0,0500	0,65		0,0577	0,64		0,2092
	Mayo	0,60		0,1155	0,65		0,0577	0,455		0,0759
	Junio	0,60		0,0816	0,63		0,0500	0,62		0,1147
	Julio	0,63		0,0500	0,70		0,0816	0,6755		0,3215
	Agosto	0,68		0,0500	0,55		0,0577	0,575		0,1682
	Septiembre	0,68		0,0500	0,60		0,0000	0,6723		0,0318
	Octubre	0,58		0,0500	0,68		0,0500	0,6625		0,0909
	Noviembre	0,80		0,0816	0,53		0,0500	0,659		0,0729
	Diciembre	0,63		0,2217	0,58		0,0957	0,60		0,2160
Especie Química	Mes	2010			2009			2008		
		Conc.(Zn), mg/L	Obs.	Desv.Est., mg/L	Conc.(Zn), mg/L	Obs.	Desv.Est., mg/L	Conc.(Zn), mg/L	Obs.	Desv.Est., mg/L
Zinc, Zn	Enero	0,00	x	0,00	0,00	x	0,00	0,03	*(1)**(1)	0,02
	Febrero	0,02	*(3)	0,05	0,00	** (1) x	0,00	0,043		0,005
	Marzo	0,02	*(3)	0,04	0,00	x	0,00	0,02	*(2)	0,023
	Abril	0,02	*(3)	0,030	0,020	*(3)	0,040	0,008	*(2)	0,010
	Mayo	0,00	x	0,00	0,00	x	0,00	0,038		0,010
	Junio	0,00	x	0,00	0,00	x	0,00	0,11		0,01
	Julio	0,00	x	0,00	0,00	x	0,00	0,051		0,008
	Agosto	0,00	x	0,00	0,00	x	0,00	0,014	*(1)	0,010
	Septiembre	0,00	x	0,00	0,00	x	0,00	0,05		0,04
	Octubre	0,00	x	0,00	0,00	x	0,00	0,046		0,019
	Noviembre	0,00	x	0,00	0,00	x	0,00	0,003	*(2)	0,004
	Diciembre	0,00	x	0,00	0,00	x	0,00	0,00	x	0,00
Obs:										
*(n): n valores bajo el límite de detección										
**(n): n valores que faltan de los 4 correspondientes										
x: todos los valores disponibles no detectados										

Concentraciones medias de la Especie Química en efluente por mes, para cada año										
Especie Química	Mes	2010			2009			2008		
		Conc.(SO4), mg/L	Obs.	Desv.Est., mg/L	Conc.(SO4), mg/L	Obs.	Desv.Est., mg/L	Conc.(SO4), mg/L	Obs.	Desv.Est., mg/L
Sulfato, SO4	Enero	1831		45,6764	1855		71,3647	1802	** (1)	159,0849
	Febrero	1856		238,9426	1946	** (1)	21,8251	1859		93,4434
	Marzo	1847		293,8180	1870		130,3956	2009		104,7807
	Abril	2020		22,1284	1934		34,0233	2051		84,1685
	Mayo	1889		51,3355	1871		30,5287	1853		272,4861
	Junio	1694		168,3021	1754		154,1655	1420		107,0930
	Julio	1503		40,4557	1640		37,3854	1596		197,8962
	Agosto	1542		58,4637	1510		179,9491	1209		150,2983
	Septiembre	1542		58,4637	1400		88,3832	1273		84,8386
	Octubre	1680		46,9042	1589		57,7372	1387		130,3572
	Noviembre	1806		35,4436	1708		28,0520	1712		93,8274
	Diciembre	1852		34,6939	1785		60,3455	1743		50,2693
Especie Química	Mes	2010			2009			2008		
		Conc.(Al), mg/L	Obs.	Desv.Est., mg/L	Conc.(Al), mg/L	Obs.	Desv.Est., mg/L	Conc.(Al), mg/L	Obs.	Desv.Est., mg/L
Aluminio, Al	Enero	0,40		0,1414	0,38		0,0500	0,30	** (1)	0,1000
	Febrero	0,40		0,1414	0,30	** (1)	0,1000	0,23		0,0957
	Marzo	0,63		0,4573	0,48		0,0957	0,25	* (1)	0,2082
	Abril	0,38		0,0957	0,50		0,2160	0,28		0,0957
	Mayo	0,23		0,0500	0,33		0,0500	0,18	* (1)	0,1258
	Junio	0,38		0,2363	0,33		0,0500	0,28		0,0957
	Julio	0,40		0,1414	0,33		0,0957	0,295		0,2515
	Agosto	0,20		0,1414	0,28		0,0957	0,41		0,3436
	Septiembre	0,20		0,1414	0,35		0,0577	0,13	* (2)	0,2375
	Octubre	0,15	* (1)	0,1291	0,30		0,0000	0,23	* (1)	0,1645
	Noviembre	0,38		0,1258	0,30		0,0000	0,13	* (2)	0,1654
	Diciembre	0,28		0,0957	0,43		0,0500	0,28		0,0500

Obs:
*(n): n valores bajo el límite de detección
**(n): n valores que faltan de los 4 correspondientes
x: todos los valores disponibles no detectados

Concentraciones medias de la Especie Química en efluente por mes, para cada año										
Especie Química	Mes	2010			2009			2008		
		Conc.(Fe), mg/L	Obs.	Desv.Est., mg/L	Conc.(Fe), mg/L	Obs.	Desv.Est., mg/L	Conc.(Fe), mg/L	Obs.	Desv.Est., mg/L
Hierro, Fe	Enero	0,02	*(3)	0,0400	0,03	*(3)	0,0500	0,13	** (1)	0,0702
	Febrero	0,01	*(3)	0,0250	0,15	** (1) *(1)	0,2157	0,07	*(2)	0,0846
	Marzo	0,03	*(2)	0,0356	0,09	*(1)	0,0841	0,29		0,3516
	Abril	0,01	*(3)	0,0250	0,13	*(3)	0,2500	0,21	*(1)	0,1637
	Mayo	0,00	x	0,0000	0,00	x	0,0000	0,46	*(1)	0,6479
	Junio	0,00	x	0,0000	0,07	*(3)	0,1400	0,038	*(2)	0,0450
	Julio	0,00	x	0,0000	0,00	x	0,0000	0,188		0,1654
	Agosto	0,01	*(3)	0,0200	0,00	x	0,0000	0,07	*(2)	0,0872
	Septiembre	0,01	*(3)	0,0200	0,02	*(3)	0,0450	0,05	*(1)	0,0398
	Octubre	0,00	x	0,0000	0,00	x	0,0000	0,10	*(1)	0,0887
	Noviembre	0,00	x	0,0000	0,00	x	0,0000	0,12	*(2)	0,1607
	Diciembre	0,02	*(3)	0,0450	0,02	*(3)	0,0350	0,15	*(3)	0,3050
Especie Química	Mes	2010			2009			2008		
		Conc.(Mn), mg/L	Obs.	Desv.Est., mg/L	Conc.(Mn), mg/L	Obs.	Desv.Est., mg/L	Conc.(Mn), mg/L	Obs.	Desv.Est., mg/L
Manganeso, Mn	Enero	0,09		0,0216	0,12		0,0100	0,22	** (1)	0,0458
	Febrero	0,08		0,0222	0,11	** (1)	0,0252	0,20		0,0141
	Marzo	0,09		0,0150	0,07		0,0096	0,18		0,0370
	Abril	0,06		0,0171	0,07		0,0050	0,16		0,0208
	Mayo	0,05		0,0189	0,08		0,0163	0,18		0,0222
	Junio	0,09		0,0096	0,08		0,0100	0,11		0,0435
	Julio	0,07		0,0171	0,08		0,0443	0,172		0,0661
	Agosto	0,08		0,0245	0,07		0,0141	0,07		0,0205
	Septiembre	0,08		0,0245	0,06		0,0150	0,09		0,0227
	Octubre	0,10	*(1)	0,0741	0,07		0,0096	0,12		0,1185
	Noviembre	0,07		0,0222	0,10		0,0141	0,11		0,0525
	Diciembre	0,10		0,0082	0,07		0,0082	0,08		0,0000

Obs:
*(n): n valores bajo el límite de detección
**(n): n valores que faltan de los 4 correspondientes
x: todos los valores disponibles no detectados

Anexo 4: Caudales mensuales y anuales de la descarga de DET.

Tabla D - 1. Caudales por mes y año de la descarga que realiza DET.

Mes	2010		2009		2008	
	Q, m3/mes	Obs.	Q, m3/mes	Obs.	Q, m3/mes	Obs.
Enero	2323728		1449014		1222560	
Febrero	1796010	*(25)	1251187	*(21)	1408752	
Marzo	1833410		2784758		1414109	
Abril	3533760		4524854		1356826	
Mayo	4026240		6634310		1929053	
Junio	4872960		4535402	*(26)	8948189	
Julio	6985440		8027643	*(28)	9517824	
Agosto	5018371		8227181		24123917	
Septiembre	3882557		9990950		9942566	
Octubre	3279571		7207747		7216819	
Noviembre	2661984		2303420		6230131	
Diciembre	1935446		3154460		1449000	
	Q, m3/año		Q, m3/año		Q, m3/año	
Suma	42149478		60090926		74759746	

Obs.
*(n): Calculado con la media de n datos en el mes, multiplicado por el número de días del mes

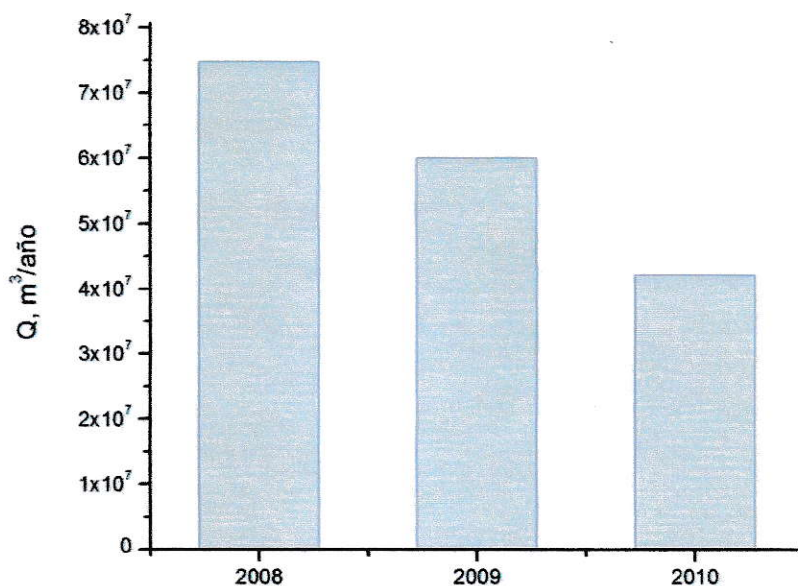


Figura D - 1. Caudales anuales de la descarga realizada por DET.

Anexo 5: Producción anual de Cobre de División el Teniente:

Año	Cobre, ton fino/año
2008	381200
2009	404100
2010	403600

Fuente: SONAMI, 2012. Producción Minera Nacional de Cobre por Principales Empresas, Estadísticas, Portal Infominero.