



**UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL**

**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 PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

MANUEL ANTONIO GARCÉS VALENZUELA

PROFESOR GUÍA:

MARCELO OLIVARES ALVEAL

PROFESORES DE LA COMISIÓN:

MAURICIO TOLEDO VILLEGAS

CARLOS ESPINOZA CONTRERAS

Santiago de Chile

Mayo, 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.”

El objetivo de este trabajo es evaluar, desde una perspectiva técnica, el potencial uso de la Huella Hídrica (WFP, por su sigla en inglés), como un indicador de sustentabilidad en la minería del cobre en Chile, aplicado a la producción de concentrado de cobre en la División El Teniente (DET) de Codelco.

La WFP es un indicador que determina la cantidad de agua consumida por un producto a lo largo de su cadena de suministro y posteriormente, mide los diferentes impactos asociados a estos consumos. Este indicador tiene tres componentes, dependiendo del origen del agua consumida y las alteraciones con que el agua es devuelta al sistema: la WFP Verde, la WFP Azul y la WFP Gris. Para aplicar este indicador, se usó la metodología propuesta por el Water Footprint Manual 2009 (HOEKSTRA, et al., 2009 a), a los procesos de producción del concentrado de cobre de la DET.

Se desarrolló, además, un esquema simplificado de los procesos de la DET y su manejo de agua, se realizó un cálculo preliminar sobre la WFP del concentrado de cobre de la DET para los años 2008, 2009 y 2010, y se analizaron los resultados obtenidos. La WFP del concentrado de cobre varió entre los 40 y los 61 $m^3_{\text{agua}}/\text{tonelada}$ de concentrado de cobre, dependiendo de los límites geográficos definidos. Del análisis realizado, se desprende que las principales contribuciones a la WFP del concentrado de cobre en la DET fueron: el agua con alto contenido de sulfato descargada al estero Carén (WFP Gris), el agua trasvasijada de cuenca hacia el tranque Carén (WFP Azul) y el agua evaporada (WFP Azul).

En la aplicación de la metodología de la WFP en la DET se encontraron las siguientes limitaciones: las variaciones de su valor aplicado a la DET están influenciadas por la cantidad de lluvia caída, más que por cambios en el manejo de agua de la División, su metodología no es precisa en cuanto al criterio para delimitar los límites geográficos del sistema, su cálculo no considera la calidad de agua de las fuentes, aunque esto se podría considerar en la etapa de evaluación de impactos de la WFP, y las normas ambientales que rijan el sistema en estudio determinan el valor de la WFP Gris. Además, se determinó que su valor está influido por la ley del mineral, lo cual es una ventaja con respecto al *make up*, desde un punto de vista del uso sustentable de recursos.

Se concluye que la WFP es una herramienta adecuada como indicador de consumo de agua. Sin embargo, se deben realizar nuevos estudios para adecuar la metodología de la WFP, referidos a definición de límites geográficos, consideración de calidad de agua de las fuentes y estandarización en la aplicación de diferentes normas ambientales. Además, se debe desarrollar por parte de la DET y la minería en general, sistemas de manejo de datos de consumo y gestión de agua, con el fin de mejorar el uso de este indicador en la industria minera, permitiendo una contribución al desarrollo sustentable del país.

“TECHNICAL ANALYSIS OF THE WATER FOOTPRINT AS AN INDICATOR OF
SUSTAINABILITY OF WATER USE IN THE PRODUCTION OF COPPER CONCENTRATE IN
DIVISION EL TENIENTE OF CODELCO”

The aim of this study is to assess, from a technical perspective, the potential use of the Water Footprint (WFP) as an indicator of sustainability in the copper mining in Chile, applied to the production of copper concentrate in the *División El Teniente* (DET) of Codelco.

The WFP is an indicator that determines the amount of water consumed by a product along its supply chain and then it measures the impact that such consumption generates. This indicator identifies three components, depending on the source of the water consumed and the quality of the water returned to the system: the Green WFP, the Blue WFP and the Gray WFP.

The methodology chosen for this work was the proposed by the Water Footprint Manual 2009 (HOEKSTRA, et al., 2009 a), applied to the processes of production of copper concentrate in the DET.

A simplified model of the DET productive and water management processes was developed, obtaining a preliminary value of the WFP of copper concentrate from the DET for the years 2008, 2009 and 2010. The analysis of the results determined that the WFP's copper concentrate varied between 40 and 60 m³ water/ton of copper concentrate, depending on the defined geographic boundaries. However these values were not comparable with those of other mining companies, as this is the first approach of applying this methodology to mining. The analysis shows that the main contributions to WFP of copper concentrate were: water with high sulfate content discharged to the Carén estuary (Gray WFP), water draining to a different basin (Blue WFP) and water evaporated (Blue WFP).

I found the following limitations after applying the methodology of the WFP in the DET: variations in the value applied to the DET are influenced by the amount of rainfall, rather than by changes in water management of the Division; the WFP's methodology is not precise for defining the boundaries of the system; the WFP's calculations do not consider the quality of water sources, although this could be considered in the impact assessment phase of the WFP; and environmental regulations governing the system under study determine the value of the Gray WFP. Also, I observed that the WFP's value is influenced by the grade of ore, which is an advantage with respect to the use of the current water accounting system "make up", from a perspective of sustainable use of resources.

In conclusion, WFP is a valuable tool as an indicator of water consumption. However, further studies should be conducted to improve the methodology of the WFP, relating to definition of geographic boundaries, consideration of quality of water sources and standardization in the application of differing environmental standards. Also, is necessary the development by the DET and mining in general of data management systems and management of water consumption, for improve the use of this indicator in the mining industry, allowing a contribution to sustainable development of the country.

Agradecimientos

Resulta muy difícil nombrar en esta hoja a todos los que de alguna u otra manera me ayudaron a llegar hasta este punto. Desde ya espero que sepan entender si alguno o alguna se me queda en el tintero y no le agradezco como debiera.

Me sería imposible comenzar sin agradecer a mis padres y a mis hermanas, debido a que sin su apoyo, es inimaginable escribir estas líneas. A mi papá le agradezco por todas las veces que me presionó, en todos esos momentos en que una apretada era lo que necesitaba, pero además, por escucharme siempre con atención y mostrar interés en todo lo que yo aprendía. A mi mamá, agradecerle por quitarme presión, en aquellos momentos en que me angustiaba, y siempre ayudarme a poner las cosas en perspectiva. También agradecerle por darme la certeza que siempre podía contar con su apoyo. Además, debo agradecerles a ambos por todo el tiempo y el esfuerzo que invirtieron para ayudar a corregir y editar este trabajo. Sé que todo esto es una muestra de amor, y lo agradezco profundamente.

A mis compañeros de la Universidad, que hicieron grato el estudio y el tiempo vivido en esta Facultad. Por ser ellos quienes se desvelaron conmigo, y por estar siempre dispuestos a explicarme, enseñarme o escucharme, cuando así lo requerí. En especial, gracias Pía.

También debo agradecer a mis viejos amigos del colegio, los que me hacían olvidar los fines de semana la carga de la semana y me hacían empezar con energías renovadas todos los lunes.

A Javiera, que estuvo a mi lado durante este trabajo, con la cual compartí, aprendí y discutí. Tengo la certeza que muchos de los conocimientos adquiridos, y que espero se vean reflejados más adelante en este informe, se deben a ella.

Debo agradecer también a Marcelo Vera, Jefe de la Unidad de Planificación y Desarrollo de la Superintendencia de Recursos Hídricos de la División El Teniente de Codelco, por el interés mostrado, y por estar siempre dispuesto a colaborar en esta investigación.

Finalmente debo agradecer al Profesor Mauricio Toledo por sus valiosas contribuciones y sus siempre constructivas preguntas, a Alejandra Acuña, que realizó grandes aportes a esta investigación, además de hacer gratas y amenas todas nuestras salidas a terreno, y al Profesor Marcelo Olivares, por haber confiado en mí para la realización de este trabajo, haberme introducido en este tema, haberme motivado a que lo siguiera, y haberme guiado a lo largo de este proceso.

Índice de contenidos

Capítulo 1: Introducción y objetivos	1
1.1. Introducción	1
1.2. Objetivos	2
1.2.1. Objetivo general	2
1.2.2. Objetivos específicos	2
Capítulo 2: Revisión de antecedentes	3
2.1. Indicadores de sustentabilidad y WFP	3
2.2. Procesos de obtención de cobre en la DET y usos de agua en minería.....	10
Capítulo 3: Metodología	15
Capítulo 4: Cálculo de la WFP	18
4.1. Definición del producto a estudiar, alcance y límites de la WFP.....	18
4.1.1. Definición del producto a estudiar	18
4.1.2. Definición de los alcances y límites de la WFP del concentrado de cobre en la DET	19
4.2. Desarrollo de un modelo conceptual simplificado de los procesos de obtención de concentrado de cobre e integración de éste con un modelo de manejo de aguas en la DET	22
4.2.1. Extracción de agua utilizada en obtención de concentrado de cobre en la DET.....	24
4.2.2. Descargas de agua de la DET	25
4.2.3. Uso de agua en el sistema	25
4.2.4. Recirculación de agua en el proceso.....	25
4.2.5. Consumo de agua en el sistema (WFP Azul).....	26
4.3. Identificación de requerimientos de información.....	27
4.3.1. Datos solicitados a la DET para el cálculo de la WFP del concentrado de cobre.....	27
4.3.2. Evaluación de los datos disponibles	32
4.3.3. Datos estimados u obtenidos de bibliografía	32
4.4. Cálculo de la WFP del concentrado de cobre en la DET y análisis de los datos obtenidos	36
4.4.1. Resultados preliminares de la WFP	37
4.4.2. Análisis de valores obtenidos	41
4.5. Análisis crítico respecto del uso del indicador WFP en la minería del cobre en Chile.....	46
Capítulo 5: Conclusiones y recomendaciones	50
Referencias	53

Índice de Figuras

Figura 2.1 Componentes de la WFP.....	9
Figura 2.2: Procesos de obtención del concentrado de cobre en la DET y uso de agua en los procesos.	11
Figura 3.1: Esquema de la metodología utilizada.	15
Figura 4.1 Variación en las componentes de la WFP del concentrado de cobre en la DET dependiendo de los límites geográficos del sistema.....	20
Figura 4.2: Cuenca del embalse Rapel, del tranque Carén y de la bocatoma Pangal.....	21
Figura 4.3: Modelo sistema de obtención de concentrado de cobre en la DET, escenario 1.	23
Figura 4.4: Modelo sistema de obtención de concentrado de cobre en la DET, escenario 2.	23
Figura 4. 5: Datos solicitados a la DET para el cálculo de la WFP.	29
Figura 4.6: Datos entregados por la DET para el cálculo de la WFP.....	30
Figura 4.7: Ubicación de evaporímetros clase A utilizados.	33
Figura 4.8: Tranque Carén. Vista aérea.....	34
Figura 4.9: Zona de aguas claras del tranque Carén.....	34
Figura 4.10: Zona de lodos del tranque Carén.	35
Figura 4.11: Aporte porcentual a la WFP del concentrado de cobre de los distintos consumos de agua	41
Figura 4.12: Valor de las componentes del WFP del concentrado de cobre, según escenarios.	42
Figura 4.13: Detalle mensual de la WFP del concentrado de cobre, para el escenario 1 año 2009.	43
Figura 4.14: Variación mensual de caudal y calidad del efluente del tranque Carén, año 2009.....	43
Figura 4.15: Detalle mensual de la WFP del concentrado de cobre, para el escenario 2 año 2009.	44
Figura 4.16: Valor de la WFP del concentrado de cobre, según año.	45
Figura 4.17: Valor de las componentes de la WFP del concentrado de cobre, según año.	45
Figura 4.18: Relación entre la WFP del concentrado de cobre y la precipitación anual.....	46

Índice de ecuaciones

(1) Componentes de la WFP Azul.....	6
(2) Cálculo de la WFP Gris.....	7

Índice de Tablas

Tabla 2.1 Límites máximos permitidos por las normas de descarga en Chile de los contaminantes a estudiar en la WFP Gris del concentrado de cobre en la DET.	9
Tabla 2.2: Producción de cobre RAF y molibdeno en la DET.....	10
Tabla 4.1: Datos solicitados a la DET para el cálculo de la WFP del concentrado de cobre.....	27
Tabla 4.2: Datos de evaporación de estaciones Quelentaro y Pangal.	33
Tabla 4.3: Áreas de los espejos de agua de la DET.	35
Tabla 4.4: WFP concentrado de cobre de la DET de los años 2008, 2009 y 2010, para el escenario 1.....	37
Tabla 4.5: WFP concentrado de cobre de la DET de los años 2008, 2009 y 2010 para el escenario 2.....	38
Tabla 4.6: WFP concentrado de cobre, valores mensuales del año 2009 para el escenario 1.....	39
Tabla 4.7: WFP concentrado de cobre, valores mensuales del año 2009 para el escenario 2.....	40

Anexos

Anexo A: Cálculo de la evaporación desde espejos de agua y de relaves	I
Anexo B: Cálculo de la WFP Gris	II
Anexo C: Fotografías de los procesos productivos de la DET.....	III
Anexo D: Cálculo de la WFP Gris del concentrado de cobre, producto de las descargas de sulfato, molibdeno y alteraciones al pH desde el tranque Carén hacia el estero Carén.	V
Anexo E: Cálculo mensual de la WFP del concentrado de cobre de la DET, años 2008 y 2010.....	VIII

Capítulo 1: Introducción y objetivos

El propósito del presente trabajo de título es evaluar, desde una perspectiva técnica, el potencial uso de la Huella Hídrica (WFP por sus siglas en inglés) como un indicador de sustentabilidad del uso del agua en la minería de cobre en Chile, aplicada específicamente en la División El Teniente (DET) de Codelco. Para ello, se adaptará la metodología propuesta en el *Water Footprint Manual* (HOEKSTRA, et al., 2009 a), para calcular la WFP en la producción de concentrado de cobre en la DET y se evaluará las limitaciones del indicador WFP aplicado en la minería de cobre, luego de analizar los valores obtenidos para tres años consecutivos: 2008, 2009 y 2010.

1.1. Introducción

En la industria minera existe un creciente interés por los temas de sustentabilidad. Sin embargo, este concepto es difícil de aplicar de manera concreta a un sector productivo. Para superar esta dificultad, en los últimos años se han propuesto diversos indicadores de sustentabilidad entre los que destacan la Huella Ecológica, la Huella de Carbono y de manera más reciente la WFP. Estos 3 indicadores siguen el Análisis del Ciclo de Vida (LCA por sus siglas en inglés) de un producto, y en el caso de la WFP, en base a ese análisis, cuantifica el total de agua consumida en la producción de éste.

Por otra parte, la industria minera en Chile ha realizado numerosos esfuerzos en el último tiempo para analizar y mejorar la eficiencia del uso del agua en sus procesos. En este contexto surge el propósito de este trabajo. Este estudio fue encargado por la DET de Codelco a la División de Recursos Hídricos y Medioambiente del Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, de la Universidad de Chile.

En el trabajo realizado, se analiza la factibilidad técnica de utilizar el indicador WFP en el concentrado de cobre en la DET, utilizando como punto de partida el *Water Footprint Manual* (HOEKSTRA, et al., 2009 a), que entrega alineamientos generales para estudios de WFP.

En cuanto a los alcances de este trabajo, se debe indicar que por tratarse de un tema pionero en Chile, y por no existir estudios previos sobre WFP en minería (OLIVARES & Garcés, 2010), se pretende establecer un punto de partida para futuros estudios relacionados, indagando acerca de los aspectos metodológicos y prácticos que puedan presentar problemas o dificultades en el cálculo de la WFP en una mina de cobre en Chile.

Como parte integrante de este capítulo, se detalla, a continuación, el objetivo general y los objetivos específicos que se espera alcanzar al término de este trabajo. En el capítulo 2, se explora y realiza una síntesis sobre indicadores de sustentabilidad, en particular, el indicador WFP, y además se indaga sobre

los principales usos de agua en la minería del cobre. En el capítulo 3, se explica las actividades desarrolladas en el proceso de investigación, con el fin de responder a los objetivos planteados en este trabajo. Posteriormente, en el capítulo 4, se detalla todas las tareas realizadas para calcular la WFP del concentrado de cobre y el análisis de los valores obtenidos. Finalmente, en el capítulo 5, se enfatizan algunos aspectos que se consideran relevantes e indispensables, si se desea conocer y controlar los impactos que las grandes empresas mineras pueden generar, y que permita, a través del uso de indicadores o herramientas adecuadas, contribuir al desarrollo sustentable del sector minero del país.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Evaluar, desde una perspectiva técnica, el potencial uso de la WFP como un indicador de sustentabilidad del uso del agua en la minería de cobre en Chile, aplicada específicamente a la DET de Codelco.

1.2.2. Objetivos específicos

- i. Adaptar la metodología propuesta en el manual de la WFP, para calcular la Huella Hídrica en la producción de concentrado de cobre en la DET.
- ii. Determinar los datos necesarios para el cálculo de la WFP del concentrado de cobre de la DET y evaluar la disponibilidad de éstos.
- iii. Identificar los procesos más relevantes de la producción de concentrado de cobre en la DET con respecto al uso de agua y su contribución a la WFP.
- iv. Obtener un valor preliminar de la WFP del concentrado de cobre de la DET para los años 2008, 2009 y 2010 y analizar los valores obtenidos.
- v. Evaluar las limitaciones del indicador WFP aplicado en la minería de cobre.

Capítulo 2: Revisión de antecedentes

En este capítulo se presenta, en primer lugar, una síntesis sobre indicadores de sustentabilidad, incluyendo el indicador WFP. Se explica el objetivo de este indicador, las componentes que lo conforman, y las fórmulas que pueden ser utilizadas para su cálculo. A continuación, se explican los procesos que se realizan en la DET para la producción del cobre. En tercer lugar, se muestran los consumos de agua en la minería de cobre en Chile. Por último, se describe la normativa que regula las descargas de residuos líquidos a los cuerpos de agua superficiales en Chile, y que serán utilizados para el cálculo de la WFP.

2.1. Indicadores de sustentabilidad y WFP

A mediados de la década del 90, se comenzó a desarrollar un índice único que pudiera ser utilizado para medir sustentabilidad, la Huella Ecológica. Este índice comenzó midiendo los impactos que produce una población, expresados en las hectáreas de ecosistemas que requiere dicha población para generar los recursos naturales consumidos por ésta y la degradación y asimilación de los desechos que produce, utilizándose, de este modo, para medir niveles de sustentabilidad de regiones y países. Posteriormente, esta herramienta comenzó a ser utilizada por empresas y cualquier tipo de organización, transformándose en un indicador reconocido a nivel mundial (WACKERNAGEL & Rees, 1996; DOMÉNECH, 2009). A partir de este indicador comienza a surgir una nueva gama de instrumentos, cuyo objetivo es cuantificar variados aspectos relacionados con la sustentabilidad. Un indicador especialmente popular asociado al tema del calentamiento global es la Huella de Carbono. Además, comienza a surgir en las grandes empresas, interés por temas de sustentabilidad, como parte de su “responsabilidad social corporativa” (HOEKSTRA, 2010 a). Actualmente, los indicadores son cada vez más reconocidos como herramienta útil para la formulación de políticas y para la comunicación pública acerca de la transmisión de información sobre los rendimientos de los países y las industrias, en campos como el medio ambiente, la economía, la sociedad o el desarrollo tecnológico (SINGH, et al., 2009).

Sin embargo, en un pasado reciente han existido pocas reflexiones en la ciencia y en la práctica, sobre la gestión del agua en cuanto a su consumo y contaminación, a lo largo de toda la producción de los bienes y su cadena de suministro (HOEKSTRA, et al., 2009 a). Las empresas, en general, manejan mucha información sobre el agua que utilizan, pero no realizan un adecuado manejo de esta información, tanto al interior de la empresa, como en la presentación de esta información hacia el exterior (CÔTE, 2010). Es por ello que existe escasa conciencia acerca de los factores efectivamente influyentes en el consumo de los volúmenes de agua (temporal y espacialmente) y la contaminación asociados con un producto de consumo final (HOEKSTRA, et al., 2009 a). Una mayor comprensión de este fenómeno puede servir de base para mejorar la gestión de los recursos de agua dulce del planeta y puede ser útil para descubrir la

relación entre el uso y el consumo del agua. De esta manera, se pueden generar además, la formulación de nuevas estrategias de gestión del agua, al identificar nuevos factores que pueden influir en el uso adecuado de este elemento (HOEKSTRA, et al., 2009 a; CÔTE, 2010).

Aunque en la actualidad se ha comenzado a masificar el uso de protocolos internacionales de notificación de sustentabilidad, como el *Global Reporting Initiative* (GRI) (COCHILCO, 2008), aún existen dudas con respecto a su significado y utilidad. Algunos aspectos fundamentales dentro del correcto conteo del agua en los procesos, no son incluidos en estos reportes, tales como: la cantidad de agua reciclada que se utiliza, el impacto que tiene la extracción de ésta, los lugares de donde es extraída, o la calidad de las diversas aguas utilizadas (CÔTE, 2010; MUDD, 2008).

Con el fin de intentar resolver las dificultades anteriormente nombradas, han surgido diversos indicadores relacionados con el uso de agua para la producción de bienes. Los más utilizados son el Agua Virtual, el Agua Incorporada y la WFP, los cuales usan diversas metodologías para su aplicación, siendo la más utilizada la Contabilidad del Agua.

La Contabilidad de Agua, más conocida por su nombre en inglés, *Water Accounting*, propone un modelo simplificado de cuantificación del agua utilizada en un proceso de producción de bienes (CÔTE, 2010). En este modelo se reconoce tanto las entradas y salidas del sistema, como las acciones de operación dentro de éste.

De los indicadores mencionados, el Agua Virtual mide la cantidad de agua que se utiliza para la producción de un bien, el que al ser posteriormente exportado, genera un flujo de agua hacia el exterior del país o la región en que fue producido. Japón, por ejemplo, importa cerca del 65% del agua que usa para producir los bienes y servicios que consume su población. Al importar cultivos y bienes que utilizan agua para su producción, se importa Agua Virtual desde otros países (BARLOW, 2009).

El Agua Incorporada es el total de agua utilizada para producir un bien o servicio, la que puede obtenerse utilizando los datos reportados por las empresas en sus informes de sustentabilidad. Este indicador no explicita aspectos fundamentales que pueden afectar su valor, tales como: las condiciones climáticas, el origen del agua, el lugar donde el agua es devuelta al medio, y en el caso de la minería, el manejo de relaves, las descargas de agua de la mina y el diseño de ésta, por nombrar algunos (MUDD, 2008). Estudios muestran que el agua incorporada en la producción de cobre es, en promedio, 1,22 m³ de agua por tonelada de mineral procesado, o 172 m³ de agua por tonelada de cobre refinado (MUDD, 2008).

Finalmente el indicador WFP, propuesto el año 2002, cuantifica, realizando un Análisis de Ciclo de Vida (LCA), los consumos de agua originados tanto en la producción del producto, como en la alteración del agua utilizada. En los últimos años se han realizado numerosos estudios sobre la WFP de diversos productos de consumo humano, entre los que se encuentran, por citar algunos ejemplos, el chocolate (24.000 litros de agua por kg producido); el pollo (3.900 litros de agua por kg producido) y el algodón (2.700 de agua por una camisa de 250 gr de algodón) (HOEKSTRA, 2010 a). La WFP, es un indicador internacional que suma adeptos y que está en estudio para ser considerado próximamente como norma regulada por la *International Organization for Standardization (ISO)*.

WFP y Análisis de Ciclo de Vida:

La WFP de un bien se define como el volumen total de agua consumida para la fabricación de dicho bien, medido a lo largo de su cadena de suministros. Este indicador muestra, específicamente en el espacio y el tiempo, los volúmenes de agua consumida de las diversas fuentes utilizadas y los volúmenes de agua alterada por tipo de contaminante (HOEKSTRA, et al., 2009 a) (HOEKSTRA, et al., 2009 b). Para calcular la WFP se realiza un LCA del producto en estudio.

El LCA es una metodología desarrollada y formalizada en 1990 por la SETAC (Sociedad Toxicológica Medioambiental y Química), utilizada por diversas instituciones a nivel mundial en la evaluación y planificación ambiental. Esta metodología está orientada a la determinación de los impactos ambientales del sistema en estudio. El Análisis de Ciclo de Vida contempla todas las etapas de la vida de un producto, y considera a su vez, el LCA de todas las materias primas que se utilizan para su producción (Vergara, 2002). En el indicador WFP, se realiza un LCA para identificar todos los consumos, directos e indirectos de agua dulce en la producción del producto, así como la generación de aguas residuales.

El primer paso en la aplicación de la WFP, consiste en realizar una contabilidad de agua, en otras palabras, medir toda el agua que se consume en la fabricación de un producto. Después de esto, se debe realizar una evaluación de los impactos asociados a ese consumo de agua, y finalmente una evaluación de todos los impactos agregados, que son asociados al consumo de agua de este producto (HOEKSTRA, et al., 2009 b). En este trabajo, por tratarse de una primera aplicación de la metodología de la WFP en la minería de cobre, sólo se estudiará el primero de estos pasos, correspondiente a la contabilidad del consumo de agua en la fabricación de un bien.

La WFP se puede dividir en tres componentes, definidos por los tipos de consumo de agua, diferenciándose nominalmente por un color determinado: la WFP Verde, la WFP Azul y la WFP Gris.

WFP Verde:

La WFP Verde corresponde al volumen total de agua que proviene de las precipitaciones y que cae directamente sobre plantas y suelo, para posteriormente evapotranspirarse. Para que el agua que se evapotranspira contribuya al proceso en estudio, es necesario que las plantas de donde es evapotranspirada sean parte de los insumos o procesos necesarios para la producción del bien estudiado (HOEKSTRA, et al., 2009 a). Desde dicha perspectiva, resulta particularmente relevante la contribución de la WFP Verde para la producción agrícola, ganadera y forestal, especialmente en zonas donde no se requiere riego.

WFP Azul:

La WFP Azul, es un indicador del consumo de agua fresca, proveniente de fuentes superficiales o subterráneas. En general, toda aquella agua que no corresponda a agua verde, y que sea manipulada o controlada para ser utilizada en los procesos en estudio, se considera agua azul.

El agua consumida que contribuye a la WFP Azul se calcula como aparece en (1) y se explican a continuación (HOEKSTRA, et al., 2009 a).

$$WFP_{Azul} = A. azul evaporada + A. azul incorporada + A. que es devuelta fuera del sistema + A. devuelta en otro período de tiempo \quad (1)$$

- Agua azul evaporada: Corresponde a toda el agua azul que se evapora desde suelos, cultivos, o espejos de agua.
- Agua azul que es incorporada dentro del producto: Corresponde al agua que está contenida en el producto final del proceso que se esté estudiando.
- Agua que es devuelta fuera del sistema: Para el cálculo de la WFP, es necesario definir de manera previa, cuáles son los límites espaciales de los procesos en estudio, los que pueden corresponder, por ejemplo, a los límites geográficos de una cuenca hidrográfica. Una vez que estos límites hayan sido definidos, el agua que sea extraída de estos límites generará un aporte a la WFP Azul, por tratarse de un trasvasije de cuenca.
- Agua que es devuelta en otro período de tiempo: Agua que es captada en el período seco y que es devuelta en el mismo lugar, pero en el período húmedo, correspondería a un ejemplo de este consumo de agua azul.

El término “agua consumida” no significa que el agua desaparezca, ya que dentro del ciclo del agua, esta siempre regresa a algún lugar, sino que se refiere a que es agua que deja de estar disponible en el sistema definido previamente, para otros posibles usos.

Debido a que la mayoría de los estudios sobre WFP tiene relación con procesos agropecuarios, dentro de las categorías de consumo de agua azul recién descritas, el agua evaporada es generalmente la más significativa (HOEKSTRA, et al., 2009 a). Las ecuaciones para el cálculo de la evaporación desde espejos de agua y desde relaves que se utilizaron en este trabajo (TUCCI, 2000; FAO, 2006), se muestran y explican en el Anexo A.

WFP Gris:

La WFP Gris es un indicador que busca cuantificar las alteraciones de la calidad del agua fresca que ha sido utilizada en los procesos y ha sido devuelta a un cuerpo de agua receptor. Se define como el volumen total de agua fresca de un cuerpo de agua, que es requerido para diluir los elementos que se han descargado a este cuerpo de agua debido al proceso de producción en estudio, hasta llevarlos a los niveles máximos permitidos por la norma de calidad ambiental que rija el lugar donde fue realizada la descarga de agua. En otras palabras, la WFP Gris también mide consumo de agua de un proceso, sólo que, a diferencia de las otras dos componentes, mide el agua que se consume en diluir las descargas a cuerpos de agua. En (2), se muestra la ecuación que se utiliza para el cálculo de la WFP Gris. Si se desea mayor detalle acerca de (2), remitirse al Anexo B:

$$WFP_{gris} = \frac{V_{ef} * (C_{ef} - C_{nat})}{(C_{max} - C_{nat})} \quad (2)$$

Donde:

WFP_{Gris} : WFP Gris asociada al producto (m^3).

V_{ef} : Volumen de agua descargada o devuelta al sistema (m^3).

C_{ef} : Concentración del contaminante en estudio, que se descarga al sistema (mg/l).

C_{nat} : Concentración natural de dicho contaminante en el lugar de descarga (mg/l).

C_{max} : Concentración máxima permitida por norma para el efluente (mg/l).

Actualmente en Chile existen anteproyectos de normas secundarias de calidad ambiental de aguas continentales para algunas cuencas del país. Entre esos anteproyectos, se encuentra la norma que regula la calidad ambiental de aguas para la cuenca del río Cachapoal (CONAMA, 2006), cuenca que abarca la

zona donde se emplaza la mina El Teniente. Sin embargo, ni ésta ni ninguna de las normas ambientales de calidad de agua ha entrado en vigencia en el país. Por otro lado, como se explicará posteriormente, la principal descarga de la DET se realiza al estero Carén, estero que se encuentra fuera de los límites de la cuenca del río Cachapoal, y el cual no posee ningún anteproyecto de norma que regule la calidad ambiental del agua de su cuenca.

Por los motivos descritos, al aplicar (2) para calcular la WFP Gris en este estudio, no se utilizaron normas de calidad ambiental de aguas. En su lugar, se utilizaron las concentraciones máximas permitidas en las normas de emisión a cuerpos de agua en Chile. Con esta adaptación, la WFP Gris calculada pierde su significado físico de consumo de agua, y además, su valor puede ser menor al obtenido en caso de aplicarse una norma de calidad ambiental, debido a que las normas de calidad ambiental son generalmente más restrictivas que las normas de emisión. Sin embargo, este cálculo aún permite dimensionar los posibles impactos a los cuerpos receptores que generan las descargas.

WFP Gris y normativas de descarga en Chile:

Como la WFP Gris se calculó aplicando normas de emisión en Chile, se describen brevemente los elementos que se controlaron para realizar este cálculo, además de las normas que los regulan y las concentraciones máximas permitidas por esas normas.

El Decreto Supremo 90 dictado el año 2000, y revisado el año 2010 (DS90, 2010), establece la norma de emisión para la regulación de contaminantes asociados a las descargas de residuos líquidos a aguas marinas y continentales superficiales de la República de Chile y se aplica para todo el territorio nacional. Sin embargo, en Julio del año 2006 se promulga el Decreto Supremo 80 (DS80, 2006), el que establece normas de emisión para molibdeno y sulfatos de efluentes descargados desde tranques de relave, al estero Carén. Para todos los otros contaminantes regulados en el DS90, los valores que aparecen en éste, regirán las máximas concentraciones de descarga al estero Carén. Como se verá en el Capítulo 4, dados los alcances y los límites del sistema definido para el cálculo de la WFP del concentrado de cobre en la DET, la única descarga que aporta a la WFP Gris, corresponde a la realizada desde el tranque de relaves Carén hacia el estero Carén. En el capítulo 4 se revisará, además, los posibles parámetros críticos que aportan a la WFP Gris, pH (regulado por el DS90), molibdeno y sulfato (regulados por el DS80). En la Tabla 2.1se muestra el rango permitido para el pH de la descargada realizada y las concentraciones máximas de molibdeno y sulfato.

Tabla 2.1 Límites máximos permitidos por las normas de descarga en Chile de los contaminantes a estudiar en la WFP Gris del concentrado de cobre en la DET.

Contaminante	Unidad	Expresión	Límite máximo permitido	Decreto que lo regula
pH	unidad	pH	6,0-8,5 (Rango)	DS90
Molibdeno	mg/l	Mo	1,6	DS80
Sulfatos	mg/l	SO ₄ ²⁻	2000	DS80

Fuente: DS80; DS90.

En caso de realizar un análisis de WFP Gris para las concentraciones de diversos elementos, sus respectivas WFP Gris no se suman. Se selecciona el elemento que provoca un mayor aporte a la WFP y solamente se suma ese aporte a la contabilidad total de la WFP.

En la Figura 2.1 se puede observar esquemáticamente los flujos de agua que corresponden a contribuciones de WFP Azul, Verde y Gris.

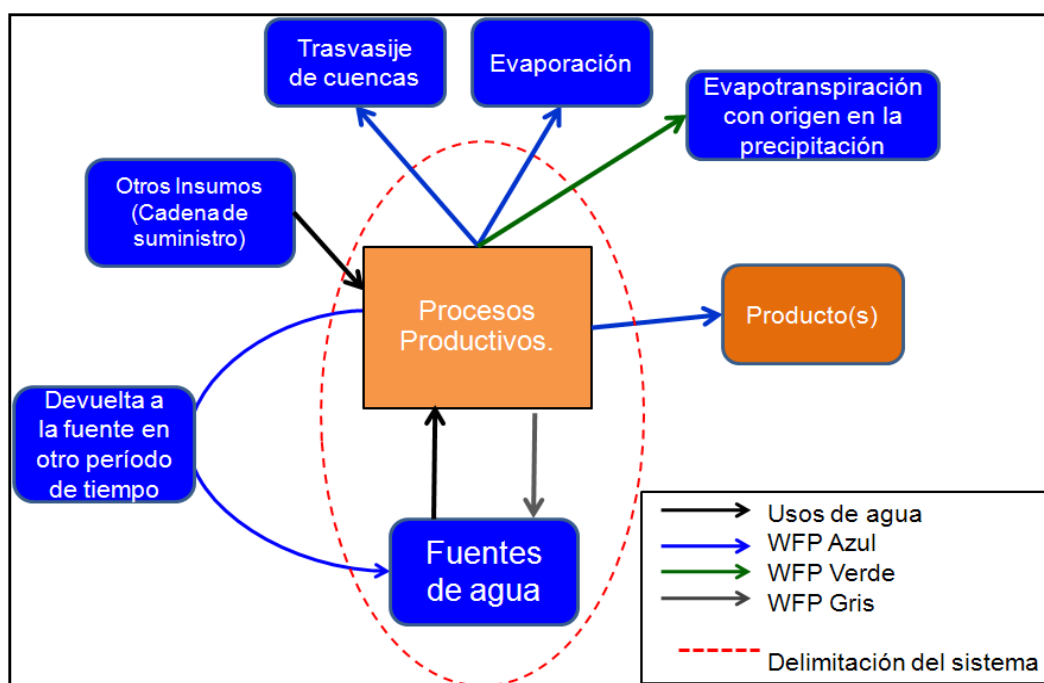


Figura 2.1 Componentes de la WFP.

2.2. Procesos de obtención de cobre en la DET y usos de agua en minería

La DET de Codelco, está emplazada en el sector de la cordillera de Los Andes de la sexta región de Chile, a una altura promedio de 2.100 metros sobre el nivel medio del mar. Es la más austral dentro de las grandes mineras de cobre existentes en Chile, razón por la cual no presenta los mismos niveles de estrés hídrico que los procesos mineros ubicados en el desierto de Atacama, al norte del país (VERA, 2010 b). Es considerada la mina subterránea de cobre más grande del mundo, estimándose que su yacimiento cuenta con suficientes reservas para ser explotado durante el próximo siglo (CODELCO, 2008).

Los principales productos de la DET son lingotes de cobre refinado a fuego (RAF), y en menor proporción, ánodos y cátodos de alta pureza y concentrado de cobre, producto intermedio en la producción de cobre RAF. Además, se obtiene como subproducto, concentrado de molibdeno y ácido sulfúrico (CODELCO, 2006).

A continuación en la Tabla 2.2 se muestra la producción de cobre RAF y molibdeno de la DET en los años 2008 y 2009:

Tabla 2.2: Producción de cobre RAF y molibdeno en la DET

Año	2008	2009
Cobre RAF [Ton]	381.224	404.035
Molibdeno [Ton]	4.500	5.179

Fuente: www.codelco.cl

El proceso de producción del cobre en la DET, se puede separar en cuatro etapas básicas. Estas etapas, junto con el uso de agua en dichos procesos, se describen a continuación y se puede observar en la Figura 2.2:

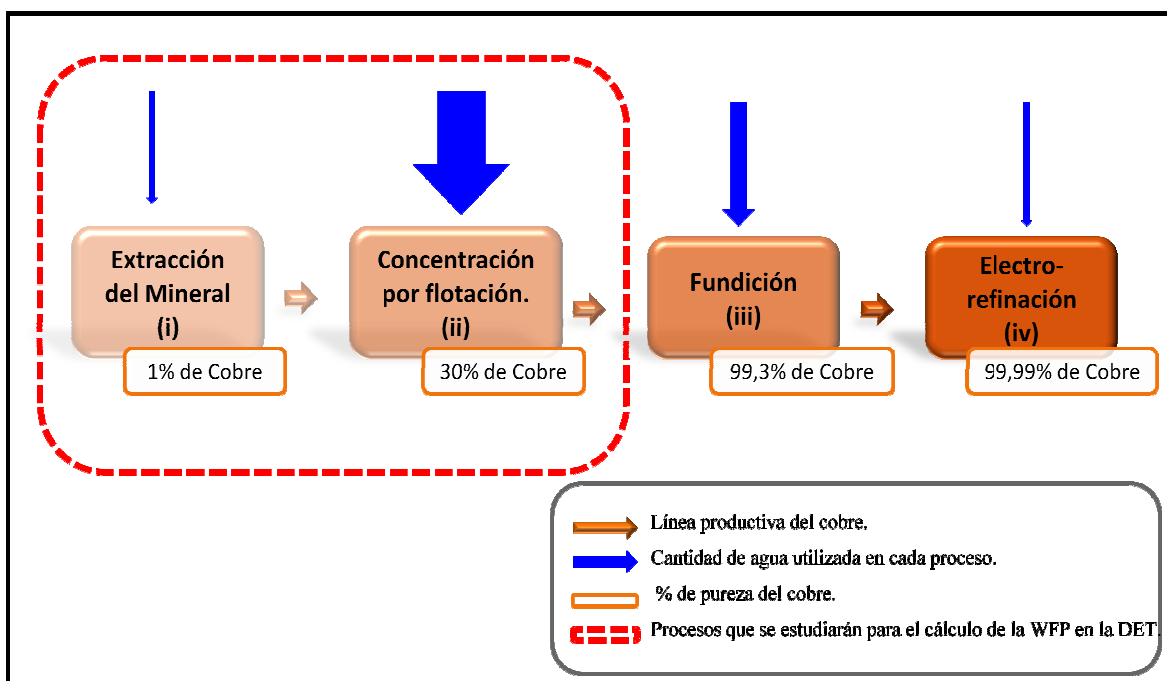


Figura 2.2: Procesos de obtención del concentrado de cobre en la DET y uso de agua en los procesos.

(i) Extracción del mineral.

Esta etapa se realiza en el interior de la mina y se desarrolla en diversas áreas. En las capas superiores, producto de la mayor riqueza del mineral, la extracción se lleva a cabo por el método de *block caving* (hundimiento de bloques), cayendo el mineral por gravedad desde el nivel de extracción hacia el de producción. En los sectores de mayor profundidad, en que existe roca de mayor dureza y menor ley, el método extractivo es a través de Jumbos, cargadores LHD (*Load Haul Dump*, conocidos como *scoops*) y martillos picadores hidráulicos (CODELCO, 2008).

Uso de agua en el proceso: por ser una mina subterránea, el uso de agua de la DET en esta etapa es bajo, cercano a los 80 l/s (HATCH, 2010), lo cual representa menos del 5% del consumo total de la División. Por el contrario, el desafío consiste en sacar el agua de la mina, proveniente del afloramiento de la napa o de las precipitaciones (COCHILCO, 2008).

(ii) Concentración por flotación.

Estos procesos son desarrollados en el pueblo de Sewell y en la concentradora Colón y Colón Bajo. Debido a que la ley del cobre en la roca extraída en esta mina es del orden de un 1%, porcentaje demasiado bajo para realizar una fundición directa, se recurre al aislamiento de los minerales de cobre utilizando una planta concentradora por flotación. Una vez que el mineral es extraído, es llevado a la planta Colón, donde es acondicionado para el posterior tratamiento por flotación, a través de dos procesos que se desarrollan de forma paralela: un proceso de molienda semi-autógena (SAG), y un proceso

tradicional de chancado secundario terciario, con molienda unitaria. La planta SAG cuenta con dos líneas de chancado primario, en los que el mineral es molido hasta llegar a no más de 1,2 centímetros y a continuación, a dos líneas de molienda semi-autógena, cuyo producto no supera los 0,18 mm de diámetro. Luego, es enviado a la planta de flotación colectiva de Colón Bajo (CODELCO, 2006). En forma paralela se realiza un proceso de molienda tradicional, en que el mineral es procesado por una planta de chancadores secundarios y terciarios, y luego es harneado para ser procesado en una planta de molienda con molinos unitarios. El producto de los molinos es enviado a la planta de flotación colectiva de Colón Bajo (CODELCO, 2006). Como producto del proceso de flotación, el mineral transita desde una ley inicial de alrededor del 1%, hasta valores que bordean el 30% o 40%.

El proceso de flotación se basa en las propiedades hidrofílicas e hidrofóbicas de los minerales que es necesario separar y considera el comportamiento de ciertos minerales frente al agua. Los sulfuros de metales son hidrofóbicos, es decir, repelen el agua. Los minerales que son óxidos, sulfatos, silicatos, carbonatos y otros, son hidrofílicos. Se puede observar, además, que los minerales hidrofóbicos son, a su vez aerofílicos, y tienen una gran afinidad con las burbujas de aire, adhiriéndose con facilidad a ellas. Los minerales hidrofílicos, en cambio, son aerofóbicos, no adhiriéndose normalmente a las burbujas de aire. En las plantas concentradoras de flotación, las propiedades hidrofóbicas de los minerales que se busca obtener, se incrementan a través de reactivos, llamados colectores (CODELCO, 2006). De esta manera, todo el material proveniente de las moliendas, es mezclado con grandes cantidades de agua e instalado en estanques aireados, provocando que los minerales deseados se adhieran a las burbujas de aire ascendente y sean recolectados posteriormente, para luego pasar el concentrado obtenido a través de filtros, y llevarlo a la fundición. El resto del material que no ha sido capturado, por sus características hidrofílicas, se lleva a espesadores para recuperar la mayor cantidad de agua posible y recircularla, siendo llevado posteriormente, a un tranque de relaves.

En el caso particular de la DET, tanto el cobre como el molibdeno aparecen vinculados a minerales sulfurados (CODELCO, 2008), por lo que presentan características hidrofóbicas, y ambos son obtenidos a través de la planta de flotación colectiva Colón. Posteriormente, el concentrado se pasa a flotación selectiva, donde se obtiene concentrado de molibdeno, que es filtrado y envasado, y además se obtiene una pulpa de concentrado de cobre, que es enviado a la planta de filtrado y de fundición Caletones.

Uso de agua en el proceso: En esta etapa, por lo general el mineral es acondicionado para el proceso de flotación en una fase previa a la molienda, en que se agregan grandes cantidades de agua y algunos reactivos necesarios para la etapa de flotación. En el caso de la DET, este proceso utiliza una cantidad de agua que supera 1 m³/segundo, lo que, dadas las cantidades de mineral procesado por la División, es

equivalente a consumos de alrededor de $0,9 \text{ m}^3$ por tonelada de mineral procesado (VERA, 2010 a; CODELCO, 2005). Como resultado de este proceso, se obtiene el concentrado de cobre como producto, que posteriormente es dirigido a fundición, y los relaves, que son transportados al tranque de relaves Carén como desecho del proceso. Las principales pérdidas de agua en este proceso se producen por: evaporación, infiltración y proceso de secado. La evaporación se produce especialmente en el tranque de relave, en los espesadores y en los acopios de concentrado, el que generalmente tienen una humedad cercana al 10% (100 litros de agua por tonelada de concentrado) (ESPINOZA, 2005).

Tal como se explica en detalle en el capítulo 4, el estudio realizado se enfocó en el cálculo de la WFP del concentrado de cobre de la DET. Es por esta razón, que el mayor interés en esta sección debe corresponder a la comprensión de los procesos que llevan a la obtención del concentrado y los usos de agua de estos procesos. Sin embargo, con el objetivo de conocer de manera global los procesos de la DET y su manejo de agua, se explican a continuación los procesos posteriores al concentrado de cobre, los cuales permiten continuar aumentando la pureza del mineral.

(iii) Fundición.

Esta etapa se lleva a cabo en la fundición de Caletones, ubicada a 6 kilómetros al suroeste del pueblo de Sewell. Para separar el concentrado de cobre de otros minerales como fierro, azufre o sílice y otras impurezas, el material es sometido a fundición, donde el concentrado puede pasar por tres procesos consecutivos: fusión, conversión y piro-refinación. La fusión y la conversión generan aumentos relevantes en la pureza del mineral. Luego de estos dos procesos se obtiene cobre metálico líquido en forma de cobre blíster, con una pureza cercana al 99,3%. Este puede ser moldeado en hornos para ser posteriormente vendido, o continuar con el proceso de piro-refinación, donde se obtiene cobre RAF, el cual es moldeado en placas gruesas en forma de ánodos (COCHILCO, 2008). Este es el principal producto de venta de la DET, a pesar que una fracción de los ánodos continúa su refinación el proceso de electro-refinación.

En el proceso de fundición se generan gases que se encuentran a altas temperaturas y que es necesario enfriarlos y tratarlos antes de liberarlos hacia el medio ambiente. Al enfriar y filtrar estos gases se obtiene como subproducto ácido sulfúrico, el cual también es un producto vendido por la DET.

Usos de agua en el proceso: Para fundir el mineral de manera eficiente, es necesario producir oxígeno, proceso en que se consume agua. Además, se utiliza agua para enfriamiento de gases, tanto directamente para la fusión, como para la producción de ácido sulfúrico. Datos promedios muestran un consumo de agua en torno a los $3,6 \text{ m}^3$ por cada tonelada de concentrado que ingresa a la fundición, aunque el consumo de agua en estos procesos puede variar considerablemente de una fundición a otra. En general, se estima

que el consumo de agua de una fundición de cobre puede variar entre 8 y 15 m³/tonelada de cobre blíster producido (COCHILCO, 2008).

(iv) Electro - refinación.

Éste es el último proceso de la vía piro metalúrgica de la recuperación del cobre. En él, se disuelven electroquímicamente los ánodos provenientes de la fundición, para eliminar las impurezas, por lo general metálicas, que varían entre un 0,1% y un 0,3% y depositar el cobre, con una pureza mayor al 99,99%, en los cátodos.

Usos de agua en este proceso: En la electrorrefinación, las pérdidas de agua se asocian principalmente a la evaporación y al descarte de soluciones. La evaporación ocurre en la parte superior de las celdas electrolíticas, y es aumentada por la temperatura del electrolito, que es cercana a los 60°C (COCHILCO, 2008). Aunque en la actualidad se utilizan esferas plásticas que flotan sobre el electrolito y reducen la evaporación en forma sustancial, el consumo de agua en esta parte del proceso es del orden de los 0,25 m³ por tonelada de cátodo de cobre producido (ESPINOZA, 2005).

Otros consumos de agua en la DET: consumo en campamentos y oficinas.

En los campamentos y oficinas el agua se utiliza principalmente para bebida, riego, higiene y baños. Se estima que el consumo fluctúa entre 130 y 200 litros por persona/día. (VERA, 2010 a). Cabe destacar que en empresas de grandes dimensiones, como es el caso de la DET, se estima que este consumo es menor al 1% del consumo total de agua (COCHILCO, 2008).

Capítulo 3: Metodología

En este capítulo se explican las actividades desarrolladas en el proceso de investigación, con el fin de responder a los objetivos planteados en este trabajo. La Figura 3.1 muestra un esquema de la metodología.

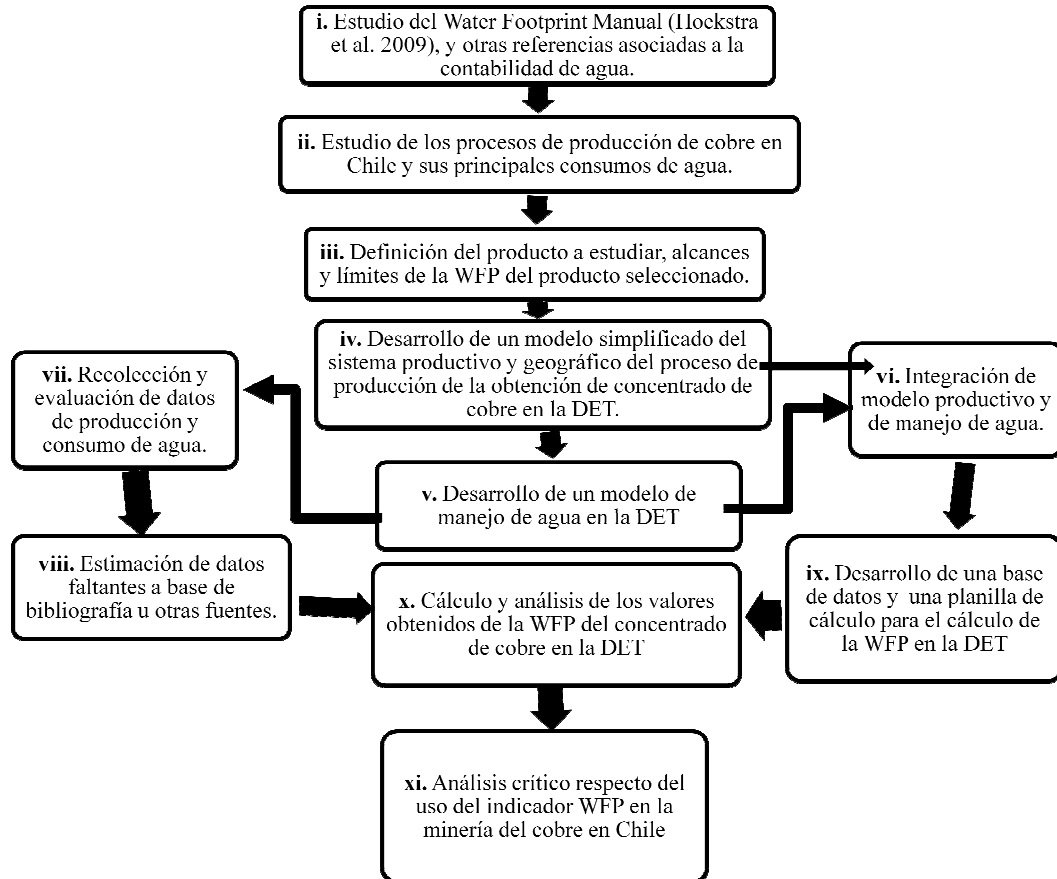


Figura 3.1: Esquema de la metodología utilizada.

A continuación se explica en detalle estas actividades.

- i. Estudio del Water Footprint Manual (HOEKSTRA, et al., 2009 a) y otras referencias asociadas a la contabilidad de agua.

En primer lugar, se estudió las guías y las definiciones que presentaba el WFP manual (HOEKSTRA, et al., 2009 a) y se revisó algunas publicaciones relacionadas con contabilidad de agua en procesos mineros, buscando, además, una que calculara la WFP de algún proceso minero.

- ii. Estudio de los procesos de producción de cobre en Chile y sus principales consumos de agua.

Se revisó la bibliografía disponible sobre la obtención del concentrado de cobre, tanto a nivel nacional, como en particular, en la DET.

- iii. Definición del producto a estudiar, alcances y límites de la WFP del producto seleccionado.

Se definió el producto de la DET al cual se le calcularía la WFP. Luego se definió los alcances del estudio, es decir, el nivel de precisión que se buscaría en la contabilidad, y cuáles serían los límites geográficos y temporales del sistema a estudiar.

- iv. Desarrollo de un modelo simplificado del sistema productivo y geográfico del proceso de producción de la obtención de concentrado en la DET.

A base de lo estudiado en relación a la producción de concentrado de cobre en la DET y teniendo como complemento, las visitas a terreno realizadas para complementar esta información, se desarrolló un modelo que resume de manera simple, la cadena de producción que se realiza en la DET, hasta la obtención del concentrado de cobre.

- v. Desarrollo de un modelo de manejo de agua en la DET.

Se identificaron los ingresos de agua utilizada para los procesos en la División, tanto por su lugar de ingreso como por su volumen y su manejo. Además, a base de visitas a terreno y de entrevistas realizadas a profesionales de la División, se identificaron los lugares y las características de los procesos de recirculación de agua, los lugares donde se realizan las descargas de agua residual y las características más relevantes de éstas.

- vi. Integración de modelo productivo y de manejo de agua.

Se unieron ambos modelos, formando un esquema, que permitió, por una parte, comprender de manera sencilla la relación entre el uso de agua y la producción de concentrado de cobre, y por otra, visualizar los requerimientos de información sobre caudales de agua y concentración de contaminantes necesarios para el cálculo de la WFP.

- vii. Recolección y evaluación de datos de producción y consumo de agua.

Se solicitó a la DET los datos necesarios para el cálculo de la WFP del concentrado de cobre, para los años 2008, 2009 y 2010. Luego fue necesario evaluar la validez y utilidad de los datos proporcionados, identificando los necesarios para el trabajo a desarrollar y consultando por aquéllos donde se detectó diferencias entre ellos.

viii. Estimación de los datos faltantes a base de bibliografía u otras fuentes.

Se identificó aquellos datos no disponibles en la DET y que era necesario estimar, siendo el fundamental, la determinación de la evaporación desde cuerpos de agua. Para lo anterior, se entrevistó a profesores del departamento de Ingeniería Civil Hidráulica de la Universidad de Chile y se consultó la bibliografía pertinente.

ix. Desarrollo de una base de datos y una planilla para el cálculo de la WFP del concentrado de cobre en DET.

Se diseñó una planilla de cálculo que permitiera, ingresando los datos solicitados, facilitar, transparentar y automatizar un cálculo preliminar de la WFP del concentrado de cobre de la DET, para cualquier año de producción. Además, con la información obtenida, se creó una base de datos para el cálculo preliminar de la WFP de los años 2008, 2009 y 2010.

x. Cálculo y análisis de los valores obtenidos de la WFP del concentrado de cobre en la DET.

Se calculó un valor preliminar de la WFP del concentrado de cobre de la DET para los años 2008, 2009 y 2010, y luego se realizó un análisis de los datos obtenidos, en cuanto a la variación anual y mensual de éstos y los aportes de los diversos componentes de la WFP.

xi. Análisis de las limitaciones del indicador WFP en minería de cobre.

Se efectuó un análisis de las limitaciones de la metodología utilizada para el cálculo de la WFP, las que surgieron a través del desarrollo del trabajo.

Capítulo 4: Cálculo de la WFP

A continuación se presenta el trabajo desarrollado a partir de la metodología, para lo cual, en primer lugar, se definió el producto al que se le aplicaría el indicador y el alcance y los límites de la WFP en este producto, tanto en sus aspectos geográficos, como temporales. Posteriormente, se desarrolló un modelo conceptual simplificado de los procesos de obtención del producto, y la integración de éste con un modelo de manejo de aguas en la DET. Se presenta, además, la recolección de datos necesarios para el cálculo de la WFP del producto, el cálculo de la WFP para los años 2008, 2009 y 2010, el análisis del resultado del indicador y por último, un análisis crítico del uso de la WFP en el producto definido.

4.1. Definición del producto a estudiar, alcance y límites de la WFP

4.1.1. Definición del producto a estudiar

Considerando los diversos productos de la DET, se debió definir si se calcularía la WFP de toda la DET o de un producto específico de ésta. Se optó por calcular la WFP de un producto específico, ya que por tratarse de un estudio pionero en su tema, resultaba más abordable limitar los alcances del trabajo.

Para muchas mineras del país, su producto final es el concentrado de cobre, y no productos de mayor refinación, por lo tanto, calcular la WFP del concentrado de cobre en la DET permitiría realizar posteriormente una comparación de su WFP con respecto a la de otras mineras, ya que el producto sería el mismo. Por otra parte, HOEKSTRA, et al., 2009 a, no precisa la forma de abordar eventuales productos intermedios en la producción, por lo que no es fácil resolver si a éstos se les debería designar un porcentaje de la WFP del producto final o, simplemente no se deberían considerar en la WFP del producto final. La forma de resolver esta dificultad, fue trabajar con el concentrado de cobre, que es el primer producto intermedio, como si fuera el producto final.

La contribución a la WFP de los subproductos que se generan en la obtención del concentrado de cobre (molibdeno), fue desestimada. Esta decisión se basa en que la mayoría de los procesos para obtener molibdeno, forman parte de los procesos necesarios para obtener concentrado de cobre, y proporcionalmente, la producción de concentrado de cobre es muy superior a la de molibdeno.

Es importante aclarar que la DET puede tener significativos consumos de agua que no contribuyen a la WFP del concentrado de cobre, tales como el agua consumida en la fundición, en el riego de árboles de planes de reforestación o de mitigación de impactos, en los espesadores de molibdeno, en el proceso de refino SX, etcétera. Todos estos aportes se deberían considerar en el caso de calcular la WFP de la DET como empresa, pero no se deben considerar en el caso del cálculo del producto escogido.

4.1.2. Definición de los alcances y límites de la WFP del concentrado de cobre en la DET

El cálculo de la WFP de un producto es el consumo de agua en la producción de éste, puesto en la puerta del lugar de producción, en este caso en Colón, y no considera los posibles posteriores consumos de agua.

Se decidió, sobre la base de lo propuesto por el manual de la WFP 2009, limitar la contabilidad a los consumos de agua cuya contribución a la WFP fuera superior al 5% (HOEKSTRA, et al., 2009 a). A partir de un análisis preliminar, se observó que los niveles de consumos directos de agua en la producción de concentrado de cobre son lo suficientemente altos como para no considerar necesario analizar el Ciclo de Vida de los insumos utilizados y calcular sus WFP, ya que estos aportes son considerablemente menores al 5% definido. Es por esto que el cálculo se realizó considerando sólo los consumos directos de agua en la producción del concentrado de cobre. Debido a esta consideración, fue posible eliminar del cálculo los consumos directos de agua potable para consumo humano, tanto en la mina como en las plantas procesadoras y en los campamentos.

Escala temporal:

Se debe precisar la dimensión temporal del estudio. Dado que la producción de concentrado de cobre es un proceso continuo, durante las 24 horas del día, los 365 días del año, puede resultar arbitrario definir los límites temporales a imponer en el proceso. Se optó por considerar ciclos anuales, porque los informes de sustentabilidad que reporta Codelco y la mayoría de las empresas de este y otros rubros corresponden a informes anuales y porque, tal como se indica más adelante, tanto la disponibilidad de agua desde las fuentes, como las descargas realizadas por el tranque Carén hacia el estero Carén, responden al comportamiento del ciclo hidrológico, de duración anual.

Con los datos disponibles, se calculó la WFP para cada mes del año, con el fin de observar la variación mensual de ésta, pero la contabilidad total corresponde al consumo promedio de agua por tonelada de concentrado de cobre para un año determinado.

Los años sometidos a estudio son 2008, 2009 y 2010, debido a la disponibilidad de datos de la DET.

Límites geográficos:

Uno de los mayores desafíos de la metodología fue la definición de los límites geográficos para la contabilidad de la WFP. Estos límites son particularmente importantes debido a que su variación produce cambios en los valores de la WFP. En particular, una ampliación de las fronteras de los límites geográficos puede provocar que una devolución de agua que en un principio se encontraba fuera de los límites del

sistema, lo que generaba un consumo de agua por trasvasije de cuencas, quede ahora dentro de los límites, motivo por el cual, no se contabilice dicho consumo.

Para el cálculo de la WFP del concentrado de cobre en la DET, en el caso que se aumenten los límites geográficos del sistema a estudiar, no se produce trasvasije de cuencas, razón por la cual, el agua que se dirige hacia el tranque Carén en los relaves no contribuye a la WFP Azul. Sin embargo, si se considera que el tranque Carén se encuentra dentro de los límites geográficos, se deben contabilizar los consumos por evaporación que se generen desde el tranque.

Independiente de los límites definidos, la descarga desde el tranque hacia el estero Carén siempre contribuirá a la WFP Gris, producto que la WFP Gris mide el consumo de agua atribuida a la alteración de la calidad de los cuerpos de agua que reciben las descargas generadas en la producción, independiente del lugar donde esta descarga se realice (ZARATE, 2011). Por este motivo, en el caso de considerar que existe un trasvasije de cuencas generado por el transporte de relaves hacia el tranque Carén, existirán límites geográficos discontinuos del sistema, ya que se deberá considerar además, la descarga de este tranque hacia el estero Carén (ver Figura 4.1). Para efectos de comparación, se pueden definir dos escenarios, en los que se consideren diferentes límites geográficos. En el primer escenario, los límites geográficos son menores (representados por una línea segmentada de color morado en la Figura 4.1), y en el segundo escenario, los límites geográficos son mayores (representados en la Figura 4.1 por la línea segmentada de color rojo).

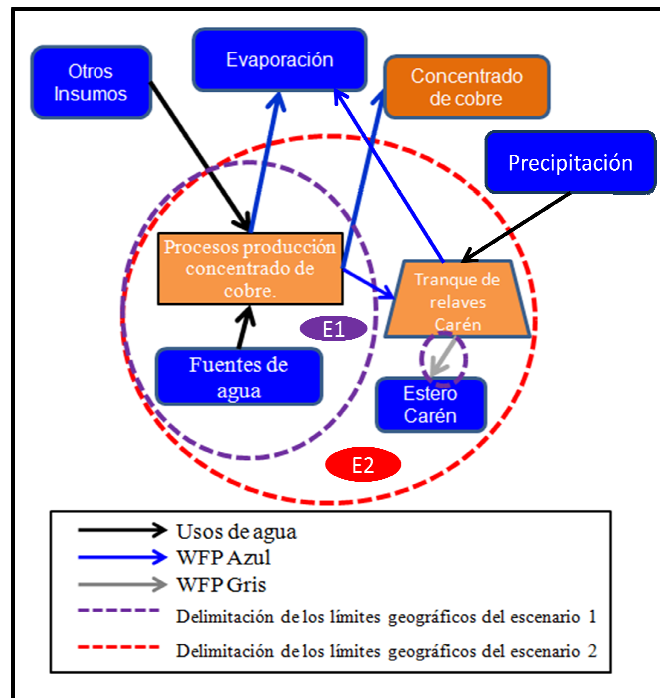


Figura 4.1 Variación en las componentes de la WFP del concentrado de cobre en la DET dependiendo de los límites geográficos del sistema.

Todos los procesos para la obtención de concentrado de cobre en la DET se ubican en el sector de Colón y Sewell, en la cordillera de la sexta región. En ese mismo sector se extrae el agua necesaria para los procesos de producción. Sin embargo, los relaves que se obtienen como desecho de la producción, son conducidos por una canaleta hasta el Tranque Carén, que se encuentra en la Región Metropolitana, a 80 Kilómetros del lugar donde se extrajo el agua de sus fuentes (ALVEAR, 2011). Esto se puede apreciar en la Figura 4.2, donde se delimitó la cuenca del embalse Rapel, en color verde claro, y en color café, tanto la cuenca del estero Carén a los pies del tranque Carén como la sub cuenca de la bocatoma Pangal en el sector de Colón, que corresponde al punto más bajo de extracción de agua para los procesos productivos en la DET. Tanto los procesos, como las fuentes de agua utilizadas, están ubicados dentro de esta última sub cuenca.

Para definir si el tranque Carén se encontraba dentro o fuera del sistema, fue necesario analizar si el agua que toma la DET desde sus bocatomas en el sector Colón, está disponible aguas abajo, para su utilización por otros usuarios, o como caudal ecológico (HOEKSTRA, 2010 b).

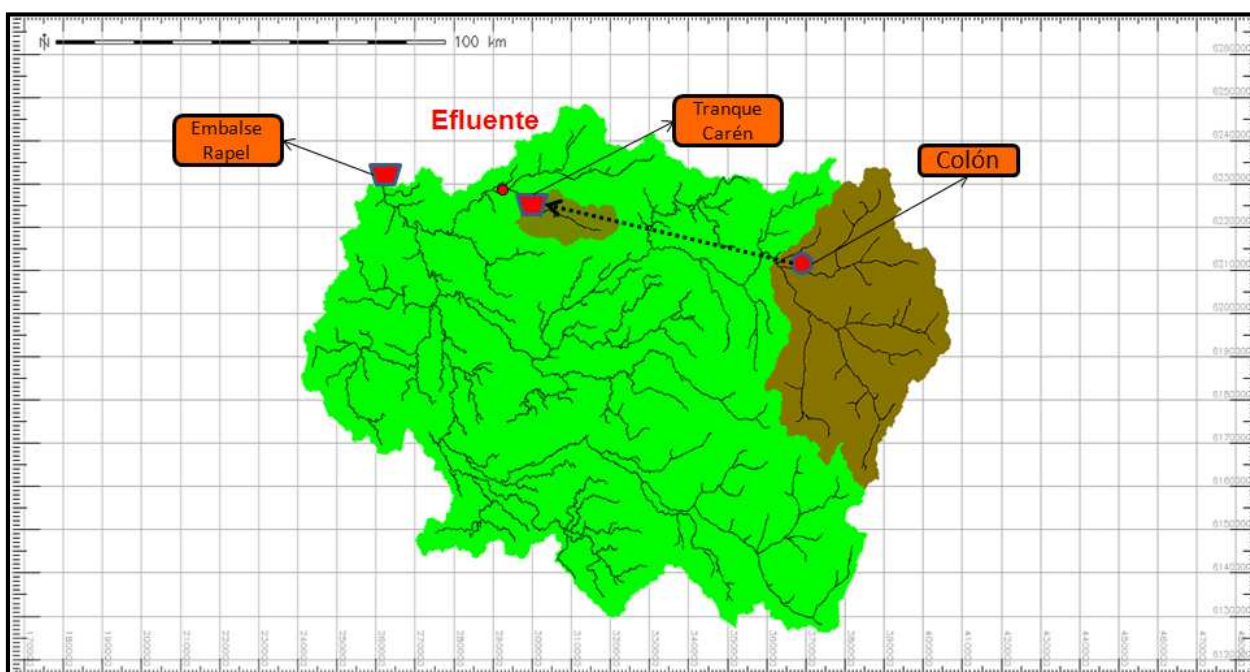


Figura 4.2: Cuenca del embalse Rapel, del tranque Carén y de la bocatoma Pangal.

Los argumentos para definir el escenario 1 fueron: la gran distancia que hay entre los puntos de extracción de agua y el punto donde el agua es devuelta al medio, y que entre ambos puntos existen importantes consumidores de agua, como por ejemplo, la planta de tratamiento de agua potable Los Nogales, que abastece del servicio a la ciudad de Rancagua (ESBBIO, 2010).

Los argumentos para definir el escenario 2 fueron: los ríos desde donde se extrae agua para la DET pertenecen a la cuenca del río Rapel (ver Figura 4.2, zona café “Colón”), y el estero Carén, donde se descargan las aguas del tranque Carén, pertenece a la misma cuenca. Además, el agua descargada al estero Carén, es utilizada por diversos agricultores y ganaderos aguas abajo del tranque Carén (QUIROZ, 2010). Finalmente, el agua que no usan dichos agricultores y ganaderos, se utiliza en el embalse Rapel para generación eléctrica. En caso que la DET no ocupara esa agua y no la tomara de los ríos nombrados anteriormente, esta agua también tendría como fin, la producción energética desde el embalse Rapel.

Considerando que ambos escenarios podían aportar al análisis desarrollado en este trabajo, que el manual WFP 2009 no proporciona antecedentes suficientes que permitan seleccionar uno de los escenarios, y que al efectuar las consultas (HOEKSTRA, 2010 b), no se logró zanjar el tema, se optó por calcular la WFP para ambos, dejando fuera del sistema en primer lugar el tranque Carén (escenario 1), y luego considerando que el tranque se encuentra dentro de los límites geográficos del sistema (escenario 2).

4.2. Desarrollo de un modelo conceptual simplificado de los procesos de obtención de concentrado de cobre e integración de éste con un modelo de manejo de aguas en la DET

En la Figura 4.3 se muestra el modelo del sistema simplificado que se utilizará para el cálculo de la WFP del concentrado de cobre en la DET para el escenario 1. En la Figura 4.4 se muestra el modelo que se utilizará para el cálculo de la WFP en el escenario 2, en que el tranque Carén y su descarga al estero Carén se encuentran dentro de los límites de sistema.

En ambos modelos, el rectángulo de bordes redondeados de color amarillo representa las fronteras del sistema. En el lado izquierdo de éste, en rectángulos azules se representan todos los ingresos de agua fresca al sistema. En el lado derecho, aparecen las salidas del sistema, que corresponde al producto obtenido, concentrado de cobre. Aparecen tres tipos de flujos importantes: los procesos mediante los cuales se obtiene el concentrado de cobre, representado a través de flechas de color rojo, los flujos de agua fresca que ingresa a los distintos procesos, representado por las flechas de color azul, y los flujos de agua contaminada o ya utilizada en los procesos, representado por flechas de color gris. Además de estos flujos, se observa flechas segmentadas de color celeste, que indican el agua reutilizada dentro de los procesos.

A continuación se explica con mayor detalle las características de los puntos que conforman este sistema, para ambos escenarios. En el Anexo C, aparecen fotografías que permiten apreciar detalles de parte de los procesos descritos.

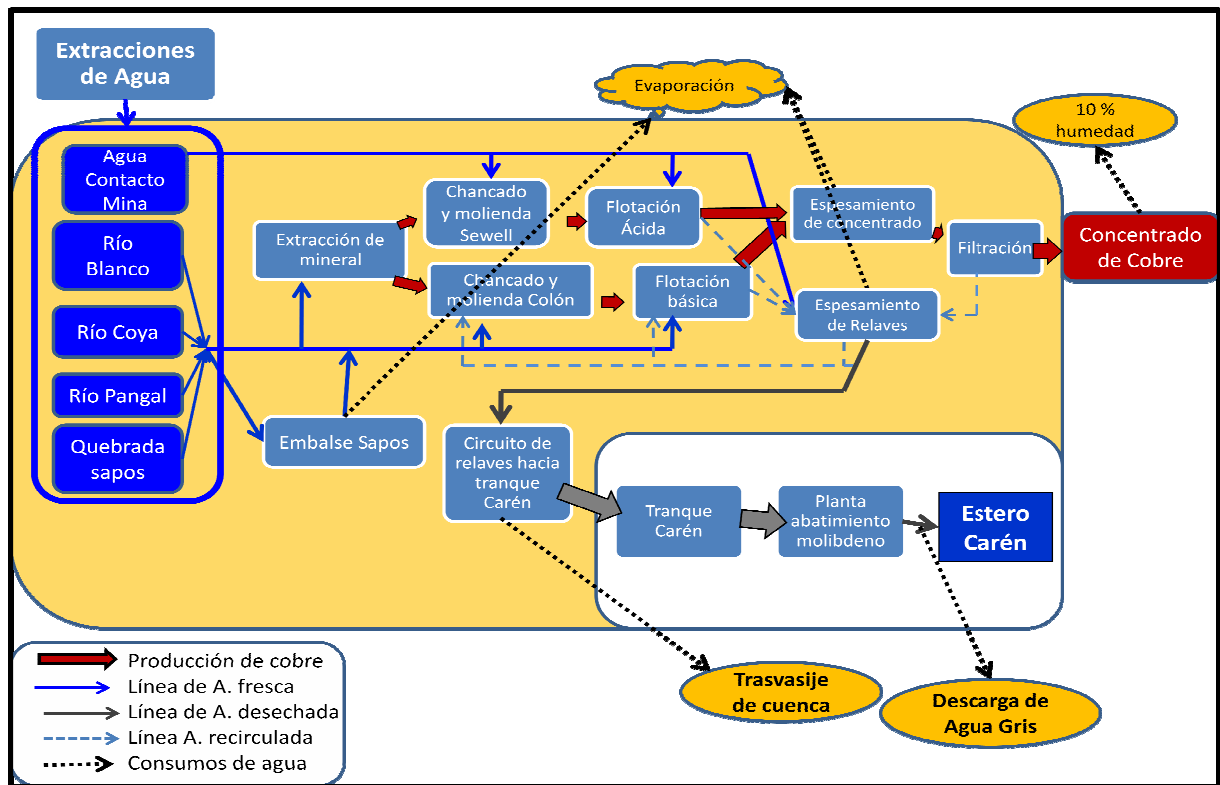


Figura 4.3: Modelo sistema de obtención de concentrado de cobre en la DET, escenario 1.

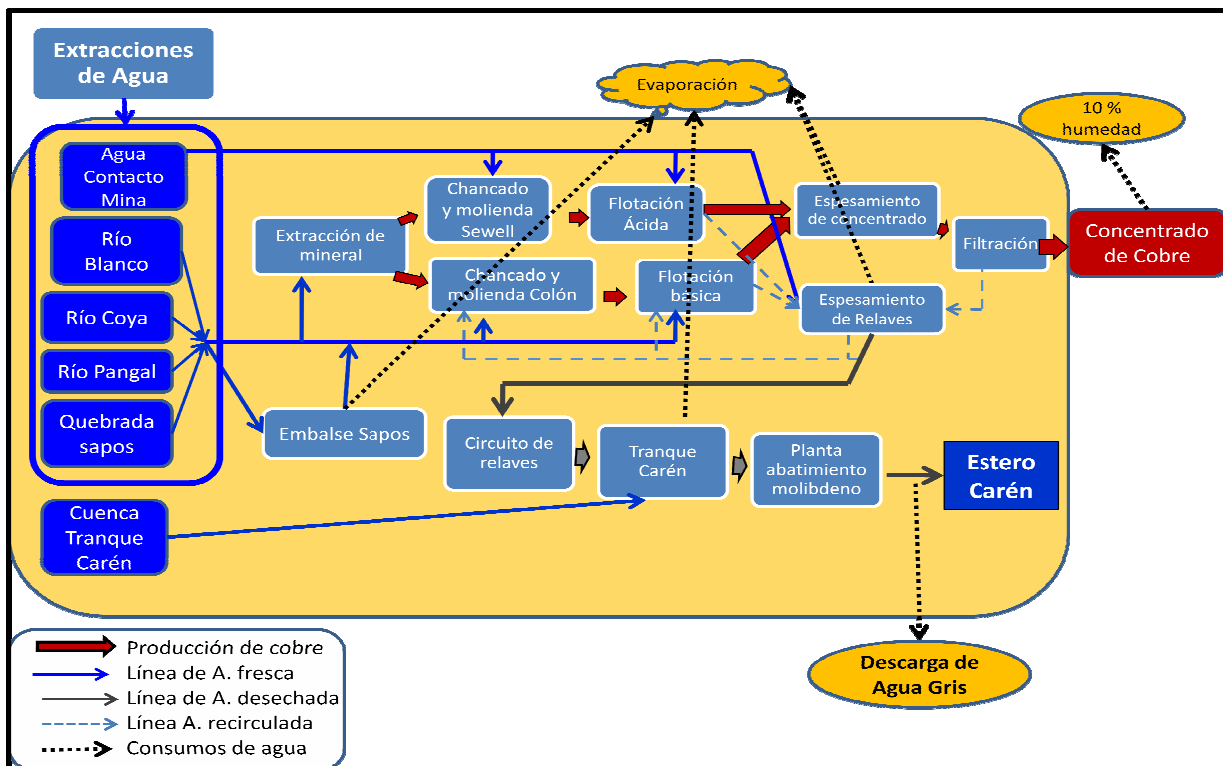


Figura 4.4: Modelo sistema de obtención de concentrado de cobre en la DET, escenario 2.

4.2.1. Extracción de agua utilizada en obtención de concentrado de cobre en la DET

El agua utilizada en los procesos de producción de la DET proviene de diversas fuentes, que tienen distintas prioridades de extracción.

En primer lugar, se utiliza el Agua de Contacto de Mina, que corresponde al agua que aflora desde el interior de la mina, y que producto su contacto con los minerales del interior de la mina, tiene un pH ácido. El Agua de Contacto de Mina es captada a la salida de las diferentes entradas a la mina (Adits). La capacidad instalada para el uso de esta fuente de agua es de 1.200 l/s (VERA, 2010 a). Los primeros 350 l/s obtenidos a partir de los Adits, son utilizados en los procesos de chancado y molienda ubicados en el sector de Sewell, sin necesidad de acondicionamiento previo. Lo anterior se debe a que el proceso de flotación que se realiza con el mineral procesado en Sewell requiere un pH ácido. El agua, luego de pasar por decantadores, es bombeada hacia el sector de Sewell, a través de un sistema de bombas, con capacidad máxima de 350 l/s. Cuando el caudal captado desde los Adits sobrepasa este límite, el agua que no es utilizada en Sewell, es dirigida por medio de 2 túneles al sector Colón. Los procesos de flotación del mineral procesado en Colón se realizan en condiciones básicas, por lo que es necesario acondicionar el pH del agua, para luego ser introducida en los espesadores de relaves, donde es recirculada a los otros procesos de Colón. En caso que el caudal extraído del interior de la mina sea mayor a 1.200 l/s, situación que hasta el momento no ha ocurrido, el caudal sobrante sería descargado directamente a los ríos Coya y El Teniente. El Agua de Contacto de Mina actualmente no se considerada un residuo líquido, razón por la cual esta descarga no debe someterse a fiscalización, ni debe cumplir con ningún decreto de descarga. Sin embargo, la DET realiza un tratamiento previo a la descarga, consistente en la sedimentación de sólidos suspendidos.

En segundo lugar se utiliza el agua captada desde las bocatomas existentes y que es conducida en forma gravitacional. La principal de estas bocatomas corresponde a la ubicada en el río Blanco, de donde se puede utilizar, en el caso que se encuentre disponible, un máximo de 1.200 l/s. Le sigue en importancia la bocatoma Coya Alta, ubicada en el río Coya, desde donde se puede captar un máximo de 510 l/s.

La tercera fuente de agua utilizada corresponde al río Pangal, la cual es bombeada una altura cercana a los 1.200 metros, con un caudal máximo de 300 l/s. Este caudal puede ser ingresado directamente a los procesos del sector Colón, o servir como recarga para el embalse Sapos. Este embalse se ubica a 3 kilómetros al norte del sector Colón, a una altura de 2.220 metros, y tiene una capacidad de seis millones de m³. El embalse Sapos corresponde a la última opción de fuente de agua a utilizar por parte de la DET.

Todas las fuentes de agua mencionadas corresponden a ambos escenarios, sin embargo, para el escenario 2 (Figura 4.4), se considera, además, los aportes desde la cuenca del estero Carén al tranque Carén. Lo anterior, ya que al considerar el tranque Carén como un proceso más dentro de la producción, el agua que llega a este tranque proveniente de los aportes de su cuenca, también se considera como un ingreso de agua al sistema.

Otro ingreso de agua, para ambos escenarios, es la incluida dentro del mineral que se procesa. El mineral contiene en promedio un 2% de humedad. Una extracción media de 150 mil toneladas diarias de mineral equivale a una extracción de 1,7 toneladas por segundo. Considerando el 2% de humedad previamente descrito, la extracción de mineral corresponde a un ingreso de agua cercana a 34 l/s. Este valor es menor al 1% de las extracciones de agua realizadas, por lo que se considera despreciable y no se contabiliza.

4.2.2. Descargas de agua de la DET

Actualmente la DET cuenta con dos descargas de agua. La primera, y más importante, es la descarga que se realiza al estero Carén, desde el tranque de relaves Carén. En el escenario 1, esta descarga se realiza fuera de los límites del sistema, pero en el escenario 2 se considera como una devolución al mismo sistema de agua con calidad diferente a la que fue extraída. Parte de las aguas claras del Tranque Carén que serán descargadas al estero Carén, son tratadas en una planta de abatimiento de molibdeno, de manera que la mezcla entre estas aguas tratadas y las aguas claras del tranque que se descargan directamente sin pasar por la planta de abatimiento, cumplan con las emisiones máximas impuestas por el DS 80 (VILLAGRA, 2010). La segunda es la descarga de la planta de tratamiento de aguas servidas Colón, que trata las aguas del campamento Colón y que vierte cerca de 10 l/s al río Coya. Tal como se explicó en la definición de alcances y límites del cálculo de la WFP de la producción de concentrado de cobre en la DET, esta agua que no se incluye en los modelos presentados en la Figura 4.3 y la Figura 4.4, fue considerada para la solicitud de datos, con el fin de corroborar que no es una descarga importante en el cálculo de la WFP.

4.2.3. Uso de agua en el sistema

Se utiliza agua en la producción de concentrado de cobre principalmente en los procesos de molienda, tanto en Sewell como en el sector de Colón y en la concentración por flotación; en segundo término, en el proceso de chancado para supresión de polvo suspendido y limpieza; y por último, en el interior de la mina para fines de consumo, higiene personal, limpieza de caminos y para el correcto uso de las máquinas perforadoras.

4.2.4. Recirculación de agua en el proceso

Alrededor del 70% del agua utilizada en el proceso productivo es recirculada para ser reutilizada (VERA, 2010 a). Luego que el mineral pasa por el proceso de concentración por flotación, los relaves producidos en este proceso, son llevados a los tanques espesadores de relaves, que tienen como objetivo disminuir la humedad del relave y recuperar la mayor cantidad de agua. A este lugar llega también, el denominado “Ril 30”, que corresponde a agua utilizada en el proceso de filtración del concentrado de cobre y que luego se reingresa al sistema, además de las aguas de contacto de mina que no han sido usadas en el sector de Sewell y son ingresadas al proceso de recirculación. El agua obtenida en los espesadores, la cual tiene pH básico, puede ser dirigida posteriormente a los procesos de chancado y molienda, o al proceso de concentración.

4.2.5. Consumo de agua en el sistema (WFP Azul)

En la Figura 4.3, los óvalos de color anaranjado, señalados con flechas negras segmentadas, muestran los consumos de agua que aportan a la WFP Azul, para el escenario 1. En este escenario, el agua que se pierde del sistema, o que es consumida en la producción del concentrado de cobre, está conformada por:

- Evaporación: se genera evaporación en el agua acumulada en el embalse Sapos, en los tanques espesadores de relaves y en los espesadores de concentrado de cobre.
- Trasvasije de cuenca: el agua utilizada para transportar los relaves desde Colón hasta el tranque Carén se considera como un consumo de agua, ya que se realiza un trasvasije de cuencas y se extrae el agua de los límites del sistema definido.
- Agua incorporada en el producto: el concentrado de cobre sale del sistema con un 10% de humedad. Ésta se considera como agua consumida, ya que no retorna al sistema.

En la Figura 4.4 los óvalos de color anaranjado, señalados con flechas negras segmentadas, muestran los consumos de agua que aportan a la WFP Azul en el escenario 2. En este escenario, el agua que se pierde del sistema, o que es consumida en la producción del concentrado de cobre, está conformada por:

- Evaporación: Se genera evaporación en el agua acumulada en el embalse Sapos, en los tanques espesadores de relaves y en los espesadores de concentrado de cobre, y, principalmente, en el tranque Carén.
- Agua extraída del sistema: Principalmente en la generación de lodos, tanto de la planta de tratamiento de aguas servidas del sector Colón, como en los generados en la planta de abatimiento de molibdeno. Este valor es despreciable con relación a los otros consumos.
- Agua incorporada en el producto: El concentrado de cobre sale del sistema con un 10% de humedad. Ésta se considera como agua consumida, ya que no retorna al sistema.

4.3. Identificación de requerimientos de información

4.3.1. Datos solicitados a la DET para el cálculo de la WFP del concentrado de cobre.

En la Tabla 4.1 se lista los datos que fueron considerados necesarios para el cálculo de la WFP del concentrado de cobre de la DET. Posteriormente se explica de manera detallada los datos solicitados.

Además, en la Figura 4.5 aparecen representados de manera esquemática, los datos solicitados a la DET para el cálculo de la WFP. Los óvalos amarillos con la letra “Q”, corresponden a datos de caudal, los círculos verdes con la letra “C”, corresponden a datos solicitados sobre concentración de molibdeno, sulfato y pH, y los óvalos de color rojo con la letra “P”, corresponden a datos de cantidad de concentrado de cobre producido para su venta y de concentrado llevado a fundición.

La numeración utilizada en la Tabla 4.1 es la misma que aparece en la en la explicación posterior y en la Figura 4.5.

Tabla 4.1: Datos solicitados a la DET para el cálculo de la WFP del concentrado de cobre.

Caudales		
(Q.1)	Q agua contacto mina	[l/s]
(Q.2)	Q fresca	[l/s]
(Q.3)	Q Sapos	[l/s]
(Q.4)	Q refino SX	[l/s]
(Q.5)	Q cuenca Carén	[l/s]
(Q.6)	Q relaves	[l/s]
(Q.7)	Q PTAS Colón	[l/s]
(Q.8)	Q descarga a Carén	[l/s]
(Q.9)	Q infiltraciones	[l/s]
Cantidades		
(P.1)	Venta concentrado	[ton/día]
(P.2)	Fundición	[ton/día]
Calidades de agua [sulfatos, molibdeno y pH]		
(C.1)	Agua contacto mina	[mg/l]
(C.2)	Fresca	[mg/l]
(C.3)	Sapos	[mg/l]
(C.4)	Refino SX	[mg/l]
(C.5)	Río Coya	[mg/l]
(C.6)	Descarga Carén	[mg/l]
(C.7)	Infiltraciones	[mg/l]

Explicación de los datos solicitados (Tabla 4.1):

- (Q.1) Total de agua que se extrae desde la mina el Teniente, a través de los diferentes Adits.
- (Q.2) Total de agua fresca, utilizada para los procesos al interior de la mina, en el proceso de chancado y molienda y en el proceso de concentración por flotación, que no provenga del embalse sapos.
- (Q.3) Total de agua fresca, utilizada para los procesos al interior de la mina, en el proceso de Chancado y molienda y en el proceso de concentración por flotación, proveniente del embalse sapos.
- (Q.4) Caudal proveniente de los procesos de refino SX que es descargado al circuito de relaves.
- (Q.5) Caudal de agua que aporta la cuenca del estero Carén al tranque Carén.
- (Q.6) Total de agua que se descarga desde los proceso de concentración al circuito de relaves.
- (Q.7) Caudal descargado al río Coya desde la planta de tratamiento de aguas servidas Colón.
- (Q.8) Caudal total descargado al estero Carén desde el tranque Carén. Incluye la descarga de manera directa y la descarga proveniente de la planta de abatimiento de molibdeno.
- (Q.9) Caudal que se infiltra en el muro del tranque Carén.
- (P.1) Producción diaria de concentrado de cobre [toneladas/día], que se vende directamente.
- (P.2) Producción diaria de concentrado de cobre [toneladas/día], que continúa a los procesos de fundición.
- (C.1) Concentraciones de molibdeno, sulfato y pH de las aguas de contacto mina que se utilizan en los procesos productivos.
- (C.2) Concentraciones de molibdeno, sulfato y pH del agua fresca utilizada en el proceso, que no provengan del embalse Sapos.
- (C.3) Concentraciones de molibdeno, sulfato y pH del agua fresca utilizada en el proceso, proveniente del embalse Sapos.
- (C.4) Concentraciones de molibdeno, sulfato y pH de las aguas provenientes del proceso de refino SX al circuito de relaves.
- (C.5) Concentraciones de molibdeno, sulfato y pH de las descargas realizadas al río Coya desde la planta de tratamiento de aguas servidas Colón al río Coya.
- (C.6) Concentraciones de molibdeno, sulfato y pH de las aguas que se descargan al estero Carén (mezcla de la descarga directa y la planta de abatimiento de molibdeno).
- (C.7) Concentraciones de molibdeno, sulfato y pH de las aguas que se infiltran en el muro del tranque Carén.

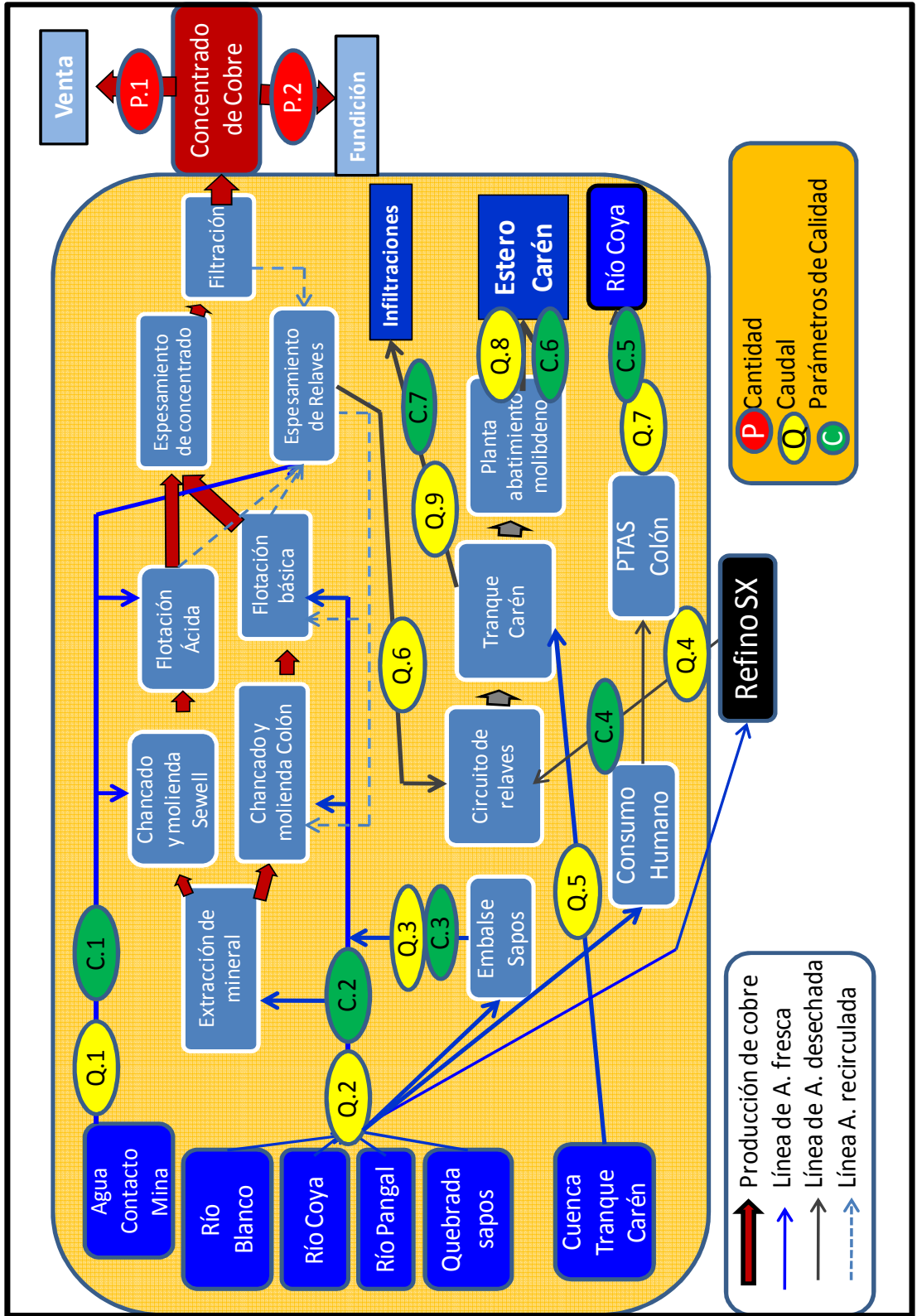


Figura 4. 5: Datos solicitados a la DET para el cálculo de la WFP.

4.3.1. Datos entregados por la DET

En la Figura 4.6 se muestra los datos entregados por la DET, a través de archivos digitales o reuniones de trabajo.

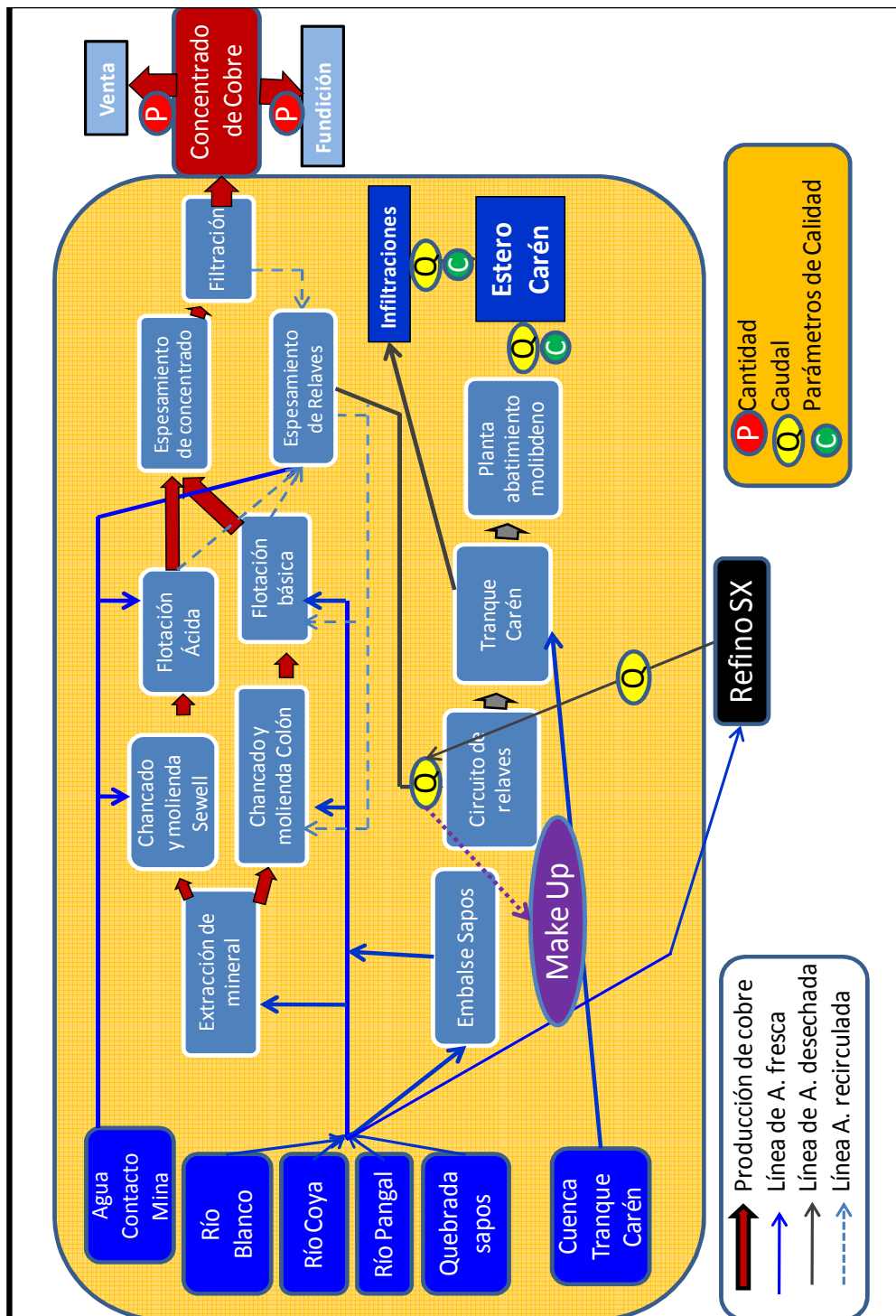


Figura 4.6: Datos entregados por la DET para el cálculo de la WFP.

Con respecto a los ingresos de agua al sistema, la DET no cuenta con mediciones de caudal ni de calidad de agua, tanto en sus bocatomas, como en el ingreso de sus procesos. La principal medición con que cuenta, corresponde al *make up*.

El *make up* es la principal medición con que trabaja la DET, respecto del agua que utiliza para procesar el mineral que extrae. Su valor representa los m³ de agua fresca utilizada por cada tonelada de mineral extraído de la mina, en el procesamiento de este mineral hasta la obtención de concentrado de cobre.

Para obtener el *make up* de la DET, primero se calcula los relaves que se generan en la producción (resta entre el mineral extraído y el concentrado de cobre producido). Luego, se mide el porcentaje de humedad que tienen los relaves al inicio de la canaleta que los dirige hacia el tranque Carén. Con el total de relaves producidos, y la humedad de éstos, se calcula el agua que va en la canaleta. Sin embargo, no toda esta agua fue utilizada para la producción del concentrado de cobre. Para obtener la fracción que fue utilizada, al total del agua calculada, se le deben restar los siguientes aportes: el agua que proviene de la humedad con que fue extraído el mineral, la descarga de agua que realiza en la canaleta el proceso de refinado SX (el cual no corresponde a un proceso dentro de la línea productiva del concentrado de cobre), y por último, el agua de contacto mina que no haya sido utilizada en los procesos de Sewell, y que fue descargada a los espesadores. Finalmente, el total de agua que fue utilizada en la producción del concentrado de cobre, es dividida por el total del mineral extraído desde la mina.

Es importante notar que al utilizar el *make up* como valor de agua ocupada en los procesos, se desprecia las pérdidas por evaporación originadas dentro de estos procesos (pérdidas que se observan en la Figura 4.3). También fue proporcionado por la DET el caudal aportado a la canaleta de relaves por el proceso de refinado SX; proceso que no forma parte de la producción de concentrado de cobre, pero su valor se utiliza en el cálculo del *make up*.

Fueron proporcionados además, valores de caudales sobre el uso de agua en los diversos procesos, pero estos valores son estimados a partir del valor del *make up* (VERA, 2010 a), razón por la cual no fueron contemplados en el cálculo final.

Se recibió asimismo, los datos diarios de las descargas del tranque Carén al estero Carén, en cuanto a caudal, pH, concentraciones de sulfato y molibdeno. También fueron proporcionados los datos que se refieren al caudal de las infiltraciones del muro del tranque al estero Carén, así como datos de precipitaciones sobre el embalse Carén para los años 2008, 2009 y 2010.

Por último, se entregó una estimación del porcentaje de concentrado de cobre que es producido para venta y aquél que es llevado a la fundición para continuar con su proceso de refinamiento.

Si bien los datos entregados por la DET fueron indispensables para un cálculo preliminar de la WFP del concentrado de cobre, no eran suficientes, por lo que fue necesario estimar, sobre la base de entrevistas a académicos y consultas a la bibliografía pertinente, algunos valores necesarios para el cálculo y que no estaban disponibles en la DET.

4.3.2. Evaluación de los datos disponibles

Originalmente la componente azul de la WFP del concentrado de cobre de la DET, se calcularía realizando un balance de masas, entre el agua que ingresaba al sistema y el agua que retornaba a éste. La diferencia entre estos dos valores correspondería al consumo de agua azul que contribuiría a la WFP Azul. Sin embargo, para realizar este cálculo se requería contar con la información de todos los caudales que se captaban desde las bocatomas a la entrada del sistema, y además, con todos los caudales de salida. Como se mencionó en el punto anterior, la DET no cuenta con mediciones de caudal en las bocatomas donde se capta el agua, ni con datos de uso de agua en los procesos de producción. Por lo tanto, sólo utiliza el valor obtenido en el *make up* para realizar el camino inverso y asignar valores de consumos de agua para cada proceso (VERA, 2010 a). Es por esto que la DET no considera en su cálculo de uso de agua, las pérdidas a lo largo de la cadena de producción, ya que se asume que el agua que llega a la canaleta de relaves es exactamente la misma que la que ingresa al sistema. Tampoco se dispone de información de los aportes de la cuenca del estero Carén al tranque Carén producto de precipitaciones, caudal que puede llegar a representar un alto porcentaje como afluente al tranque (ESPINOZA, 2010).

4.3.3. Datos estimados u obtenidos de bibliografía

Por lo antes señalado, fue necesario modificar la forma de calcular la WFP del concentrado de cobre de la DET. En particular, fue preciso estimar la evaporación, tanto de los espesadores, como del embalse Sapos y del tranque Carén, utilizando tasas características de evaporación de cada zona y no balances de masa como se planificó en un principio, con el fin de obtener el valor de la WFP Azul correspondiente a la evaporación. Para el cálculo de la evaporación del tranque Carén se utilizaron los datos de un evaporímetro clase A, ubicado en la estación meteorológica Quelentaro y para el cálculo de la evaporación del embalse Sapos y de los espesadores del sector Colón, los datos de un evaporímetro ubicado en Pangal (CODELCO, CIMM T&S S.A., 2007; DGA, Cade-Idepe, 2004; DGA, 1987). En la Figura 4.7, se muestra la ubicación de los evaporímetros utilizados. Además, en la Tabla 4.2, aparecen los valores mensuales de evaporación medidos en ambas estaciones meteorológicas.

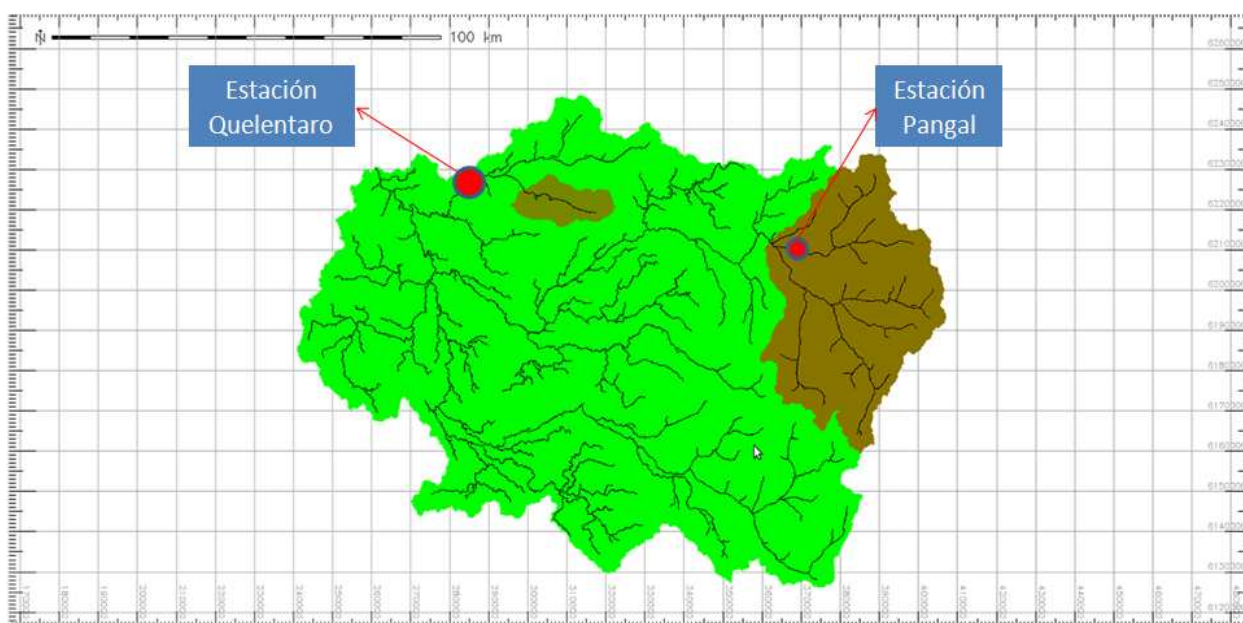


Figura 4.7: Ubicación de evaporímetros clase A utilizados.

Tabla 4.2: Datos de evaporación de estaciones Quelentaro y Pangal.

Datos evaporación de tanque promedio mensual y anual													
Estación	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
Quelentaro [mm]	220	167	139	88	43	25	27	39	61	94	137	176	1.215
Pangal [mm]	309	234	195	123	61	34	37	54	85	132	192	247	1.704

Fuente: (Cade-Idepe, 2004; DGA, 1987)

Para el cálculo de la evaporación desde el embalse Sapos y los espesadores, se utilizó un factor de relación entre los tanques de evaporación y los espejos de agua igual a 0,7 (TUCCI, 2000).

El tranque Carén, por ser un tranque de relaves, cuenta con una zona de aguas claras y transparentes, y otra zona de lodos grises y espesos, que es el lugar donde decantan los relaves, por lo tanto, esta zona tiene un alto porcentaje de arena y sólidos en suspensión. Esta división de aguas se observa en la Figura 4.8, mientras que detalles de la zona de aguas claras y la correspondiente a lodos se observa en las Figuras 4.9 y 4.10 respectivamente. Para el cálculo de la evaporación de la zona de aguas claras del tranque Carén, se utilizó un factor de relación entre el tanque de evaporación y el tranque de 0,7, mientras que para la zona de lodos, este factor fue multiplicado a su vez por 0,7, es decir, para la zona de lodos el factor de relación fue de 0,49, debido a las condiciones de esta zona. (FAO, 2006).



Figura 4.8: Tranque Carén. Vista aérea.

Fuente: www.codelco.cl



Figura 4.9: Zona de aguas claras del tranque Carén.



Figura 4.10: Zona de lodos del tranque Carén.

El área del embalse Sapos, de los espesadores y de la zona de aguas claras y la zona de lodos del tranque Carén, fue estimada a partir de Google Earth, y se presenta a continuación en la Tabla 4.3:

Tabla 4.3: Áreas de los espejos de agua de la DET.

	Unidad	Área
Embalse Sapos	m ²	450.000
1 espesador	m ²	7.854
7 espesadores	m ²	54.978
Tranque Carén	m ²	18.680.000
Aguas claras tranque Carén	m ²	3.840.000
Aguas grises tranque Carén	m ²	14.840.000

La DET no tiene registro de las concentraciones naturales de los parámetros de calidad solicitados en los cuerpos de agua desde donde se extrae el agua, ni del estero Carén, lugar donde se realiza las descargas desde el tranque Carén (VERA, 2010 a; VILLAGRA, 2010). Por ello se decidió considerar la concentración natural de los cuerpos de agua igual a cero para el caso de los sulfatos y el molibdeno, y un pH neutro. Esta consideración es el caso más desfavorable en el cálculo de la WFP Gris.

La información sobre el caudal y la calidad del agua de la descarga realizada desde la planta de tratamiento de aguas servidas Colón hacia el río Coya fue solicitada a la DET con el fin de corroborar la hipótesis que esta descarga no era relevante como aporte a la WFP Gris del concentrado de cobre. A pesar

que la DET no contaba con los datos solicitados con respecto a esta descarga, las visitas a terreno y asumir que esta descarga cumple con el DS90, es posible corroborar esta hipótesis y omitir este aporte a la contabilidad de la WFP.

Por último, la DET entregó los valores del caudal que aporta el proceso de refino SX a la canaleta de relaves hacia el tranque Carén, pero no la calidad de éstas. Para simplificar, se asumió que la calidad de esta agua era similar a la de los relaves descargados desde los espesadores de relaves, por lo tanto, al mezclarse ambas descargas, no se modificaba su calidad.

4.4. Cálculo de la WFP del concentrado de cobre en la DET y análisis de los datos obtenidos

De manera previa a la presentación de los valores obtenidos, se resume algunas consideraciones para el cálculo de los distintos colores de la WFP del concentrado de cobre de la DET de los años 2008, 2009 y 2010.

WFP Azul: En el escenario 1, la WFP Azul del concentrado de cobre, considera: el agua evaporada desde embalse Sapos y desde los espesadores de relaves, el agua incorporada en el producto (el concentrado de cobre sale del sistema con un 10% de humedad) y el trasvasije de cuenca, producto del agua que va en la canaleta de relaves hacia el tranque Carén, sin considerar en ésta, el aporte de agua a la canaleta proveniente del proceso de refino SX.

En el escenario 2, la WFP Azul del concentrado de cobre, considera: el agua evaporada desde el embalse Sapos, desde los espesadores de relaves y desde el tranque Carén (zona de aguas claras y zona de lodos) y el agua incorporada en el producto (el concentrado de cobre sale del sistema con un 10% de humedad).

WFP Gris: Para ambos escenarios el aporte a la WFP Gris corresponde a la descarga de agua desde el tranque Carén hacia el estero Carén. Se realizó el análisis para las concentraciones descargadas de molibdeno, sulfato y pH. Para fines del cálculo, se consideró una concentración natural igual a cero para molibdeno y sulfato, y un pH neutro. Una vez realizado el cálculo, se comprobó que el sulfato era el compuesto que generaba un mayor aporte a la WFP Gris, motivo por el cual se seleccionó este aporte para los cálculos de la WFP. (Anexo D).

WFP del año 2010: Los datos sobre producción y *make up* proporcionados por la DET, incluyen todo el año 2010. Sin embargo, sólo se cuenta con datos acerca de las descargas desde el tranque Carén hasta el mes de noviembre. Debido a esto, para calcular la WFP Gris se realizaron 2 supuestos: el primero, fue considerar una concentración de sulfato descargada desde el tranque hacia el estero Carén para el mes de diciembre igual al promedio de los 11 meses anteriores. El segundo, fue considerar el caudal descargado

el mes de diciembre, igual al de noviembre del mismo año. Se optó por esta alternativa, en vez de considerar el caudal de diciembre del año anterior, debido a que el año 2010 fue un año más seco.

A continuación se presenta los valores anuales calculados de la WFP del concentrado de cobre de la DET de los años 2008, 2009 y 2010 para ambos escenarios. El cálculo de la WFP se realizó de manera mensual, y el valor anual corresponde al promedio de los 12 meses. Se ha seleccionado el año 2009 para mostrar el valor mensual de la WFP. Ver Anexo E para acceder a los cálculos mensuales de los años 2008 y 2010.

4.4.1. Resultados preliminares de la WFP

i. Escenario 1:

En la Tabla 4.4, se muestra el resumen anual de la WFP del concentrado de cobre de la DET de los años 2008, 2009 y 2010, para el escenario 1. En el Anexo E, se muestra el detalle de los valores mensuales de la WFP del concentrado de cobre de la DET en el escenario 1 para los años 2008 y 2010.

Tabla 4.4: WFP concentrado de cobre de la DET de los años 2008, 2009 y 2010, para el escenario 1.

WFP Azul concentrado de cobre				
Año		2008	2009	2010
Concentrado Producido	[ton/año]	1.379.313	1.498.581	1.563.673
Ev. embalse Sapos	[m ³ _{agua} /año]	536.760	536.760	536.760
Ev. espesadores	[m ³ _{agua} /año]	65.578	65.578	65.578
Agua en el Concentrado	[m ³ _{agua} /año]	137.931	149.858	156.367
Agua en relaves a Carén	[m ³ _{agua} /año]	42.613.913	45.182.525	40.629.726
WFP Azul concentrado de cobre	[m ³ _{agua} /ton concentrado]	31,4	30,7	26,5
WFP Gris concentrado de cobre				
Descarga a estero Carén	[m ³ _{agua} /año]	68.426.389	54.942.758	38.701.066
Concentración sulfato descargado	[mg/l]	1537	1.828	1.843
Concentración máxima DS80	[mg/l]	2.000	2.000	2.000
Razón descarga/DS80		0,77	0,91	0,92
Caudal Aportante WFP Gris Sulfato	[m ³ _{agua} /año]	52.579.605	50.221.225	35.604.908
WFP Gris concentrado de cobre	[m ³ _{agua} /ton concentrado]	38,1	33,5	22,8
WFP concentrado de cobre de la DET	[m ³ _{agua} /ton concentrado]	69,5	64,2	49,3

ii. Escenario 2:

En la Tabla 4.5 se muestra el resumen anual de la WFP del concentrado de cobre de la DET de los años 2008, 2009 y 2010 para el escenario 2. En el Anexo E, se muestra el detalle de los valores mensuales de la WFP del concentrado de cobre de la DET en el escenario 2 para los años 2008 y 2010.

Tabla 4.5: WFP concentrado de cobre de la DET de los años 2008, 2009 y 2010 para el escenario 2.

WFP Azul concentrado de cobre				
Año		2008	2009	2010
Concentrado Producido	[ton/año]	1.379.313	1.498.581	1.563.673
Ev. Embalse Carén	[m ³ _{agua} /año]	12.100.914	12.100.914	12.100.914
Ev. embalse Sapos	[m ³ _{agua} /año]	536.760	536.760	536.760
Ev. espesadores	[m ³ _{agua} /año]	65.578	65.578	65.578
Agua en el Concentrado	[m ³ _{agua} /año]	137.931	149.858	156.367
WFP Azul concentrado de cobre	[m ³ _{agua} /ton concentrado]	9,3	8,6	8,2
WFP Gris concentrado de cobre				
Descarga a estero Carén	[m ³ _{agua} /año]	68.426.389	54.942.758	38.701.066
Concentración sulfato descargado	[mg/l]	1537	1.828	1.843
Concentración máxima DS80	[mg/l]	2.000	2.000	2.000
Razón descarga/DS80		0,77	0,91	0,92
Caudal Aportante WFP Gris Sulfato	[m ³ _{agua} /año]	52.579.605	50.221.225	35.604.908
WFP Gris concentrado de cobre	[m ³ _{agua} /ton concentrado]	38,1	33,5	22,8
WFP concentrado de cobre de la DET	[m ³ _{agua} /ton concentrado]	47,4	42,1	31,0

iii. WFP mensual del año 2009:

En las Tablas 4.6 y 4.7 se muestran los valores mensuales de la WFP Azul y Gris del concentrado de cobre de la DET del año 2009 para el escenario 1 y 2 respectivamente. En base al promedio de los valores mensuales que se observan en estas tablas, se obtuvo el valor anual de la WFP.

Tabla 4.6: WFP concentrado de cobre, valores mensuales del año 2009 para el escenario 1.

Més	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Anual
WFP Acid concentrado de cobre													
Concentración Evaporación [ton-mezes/mes]	110,297	106,561	121,456	114,954	131,075	127,690	117,071	127,535	129,256	140,126	136,119	124,161	1,499,551
Ev. entidades Sapos [m ³ -mes]	97,324	75,600	61,540	38,656	19,173	10,824	11,751	17,008	26,094	41,459	60,612	71,950	526,760
Ev. Esqueletos [m ³ -mes]	11,890	8,992	7,518	4,723	2,543	1,322	1,436	2,073	3,237	5,665	7,406	9,521	65,573
Agua incorporada en el producto [m ³ -mes]	12,029	10,856	12,144	11,495	13,108	12,360	11,707	12,754	13,206	14,004	13,612	12,466	149,333
Trasvase de cuestas [m ³ -mes]	3,395,236	3,444,612	3,979,540	3,844,769	4,077,545	3,333,488	3,343,264	4,021,645	3,343,444	3,857,770	3,716,164	3,886,206	45,132,525
WFP Acid concentrado de cobre meses año 2009 [m ³ -mes (ton concentrado)]	33,4	32,6	33,4	33,9	31,4	30,3	32,3	29,5	27,9	33,0	37,9	31,5	30,7
WFP Gas concentrado de cobre													
Descarga a estero Carén [m ³ -mes]	1,339,310	664,000	2,382,596	4,177,664	6,410,330	3,735,640	7,045,920	7,733,654	6,733,473	6,660,334	2,300,424	3,154,464	56,134,364
Canal de arribaciones nueva [m ³ -mes]	109,314	74,390	202,262	264,470	283,910	266,342	211,833	325,937	257,472	247,265	0	0	2,134,563
A asociada a producción concentración de cobre %	92	93	82	95	95	56	66	66	69	94	92	76	92
Descarga a estero Carén asociada a concentración [m ³ -mes]	1,332,821	670,671	2,176,983	4,107,037	6,190,487	3,758,250	6,839,171	7,900,659	6,942,695	6,800,666	2,110,234	2,995,290	54,942,758
Concentración buñedo descargas estero Carén [mg/l]	1,941	3,012	2,046	2,046	1,979	1,737	1,703	1,996	1,473	1,688	1,848	1,950	1,323
Basin Concentración descargas y norma DS 30 -	0,96	1,01	1,02	1,02	0,99	0,89	0,85	0,75	0,74	0,84	0,92	0,97	0,91
Canal epuradora WFP Gas Sulfato [m ³ -mes]	1,275,302	675,833	2,316,981	4,463,337	6,112,373	3,335,545	5,908,215	5,909,640	7,247,607	5,742,213	1,960,203	2,111,531	50,201,222
WFP Gas concentrado de cobre meses año 2009 [m ³ -mes (ton concentrado)]	10,6	8,1	19,2	36,3	46,2	26,1	30,5	43,0	32,0	41,0	14,5	16,3	33,5
WFP concentrado de cobre meses año 2009 [m ³ -mes (ton concentrado)]	44,0	40,7	52,6	70,2	79,6	56,6	62,7	72,5	60,0	73,9	52,4	50,3	64,3

Tabla 4.7: WFP concentrado de cobre, valores mensuales del año 2009 para el escenario 2.

Mes	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Anual
WFP Agua concentrado de cobre													
Concentrado Producido	[m ³ concn./mes] 120.237	106.351	121.459	114.854	131.075	127.600	111.071	157.535	139.256	140.116	136.119	124.061	1.495.331
Ev. Tanque Cera. Aguas clamas	[m ³ agua./mes] 92.166	44.661	37.433	29.200	16.659	65.856	71.301	102.438	163.659	33.114	368.394	474.165	3.265.919
Ev. Tanque Cera. lodos	[m ³ agua./mes] 1.601.953	1.201.449	1.012.934	659.265	315.387	173.154	193.425	279.957	442.840	682.076	997.664	1.282.710	8.854.955
Ev. entallas Sapos	[m ³ agua./mes] 97.324	73.600	61.540	33.658	19.173	10.824	11.751	17.083	33.904	41.439	67.613	77.950	516.767
Ev. Espesadores	[m ³ agua./mes] 11.899	8.992	7.518	4.703	2.342	1.322	1.436	2.078	3.287	5.063	7.465	9.321	65.578
Agua incorporada en el producto	[m ³ agua./mes] 12.029	10.556	12.144	11.495	13.108	11.700	11.707	13.754	13.206	14.014	13.613	12.406	149.636
WFP Agua concentrado de cobre mes año 2009	[m ³ agua./m ³ concn./mes]	19.2	16.1	12.1	8.1	3.6	2.1	3.0	4.7	7.1	10.6	15.0	8.6
WFP Ores concentrado de cobre													
Elv. Ev. Enfalce Carén	[m ³ agua./mes] 1.339.200	684.000	2.582.496	4.977.664	6.410.830	3.725.840	7.045.920	7.738.654	9.733.473	6.990.384	2.363.424	3.154.464	56.154.314
Canal de infiltraciones maro	[m ³ agua./mes] 109.814	74.290	202.262	264.470	283.910	266.840	211.633	225.997	337.472	347.268	0	0	2.184.333
% asociado a producción concentrado de cobre	%	92.0	93.5	81.8	94.8	95.6	95.6	97.7	98.5	94.4	92.5	75.9	92
Descarga a estero Carén asociado a concentrado	[m ³ agua./mes] 1.332.851	870.671	2.276.565	4.307.057	6.390.467	3.756.330	6.939.171	7.990.939	9.842.865	6.807.636	2.170.284	2.985.990	51.942.733
Concentración. Sulfato descarga estero Carén	[mg/l]	1.911	2.002	2.046	2.046	1.979	1.703	1.496	1.473	1.638	1.343	1.390	1.326
Razon Concentración. descarga y aonoma.D6 80	-	0.95	1.01	1.02	1.02	0.99	0.83	0.73	0.74	0.84	0.92	0.97	0.91
Canal de aporte WFP Ores Sulfato	[m ³ agua./mes] 1.273.302	875.838	2.529.381	4.463.337	6.322.473	3.555.443	5.908.213	5.999.942	7.247.607	5.742.215	1.963.205	2.333.331	30.221.235
WFP Ores concentrado de cobre meses año 2009	[m ³ agua./m ³ concn./mes]	10.6	9.1	19.2	35.2	46.2	30.5	49.0	32.0	41.0	14.7	15.8	33.5
WFP concentrado de cobre meses año 2009	[m ³ agua./m ³ concn./mes]	29.8	34.2	31.3	46.4	51.8	52.9	46.0	56.7	48.1	25.1	33.8	42.1

4.4.2. Análisis de valores obtenidos

i. Componentes de la WFP según el escenario escogido.

Los aportes porcentuales de los diversos consumos de agua en los procesos tienen variaciones relevantes dependiendo del escenario analizado. Tal como se observa en la Figura 4.11, para el escenario 1, el consumo producto de trasvasije de cuenca es del orden del 45% del consumo total de agua, tanto para el año 2008, como para el año 2009, y el aporte de la WFP Gris equivale a valores cercanos al 55%. Los aportes a la WFP por conceptos de evaporación (cerca del 1%) y por agua incorporada en el producto (alrededor del 0,05%), se consideran despreciables. En el escenario 1 se observa, además, que en el año 2010 el aporte de la WFP Azul fue prácticamente igual e incluso mayor que el aporte de la WFP Gris, debido a una disminución en las descargas desde el tranque Carén hacia el estero Carén.

En el caso del escenario 2, no existe un trasvasije de cuenca, razón por la cual el agua evaporada desde los diferentes espejos de agua, incluyendo el tranque Carén, constituyen un valor cercano al 20% de la WFP. En este escenario, el mayor aporte corresponde a la WFP Gris producida por los sulfatos presentes en la descarga desde el tranque Carén hacia el estero Carén.

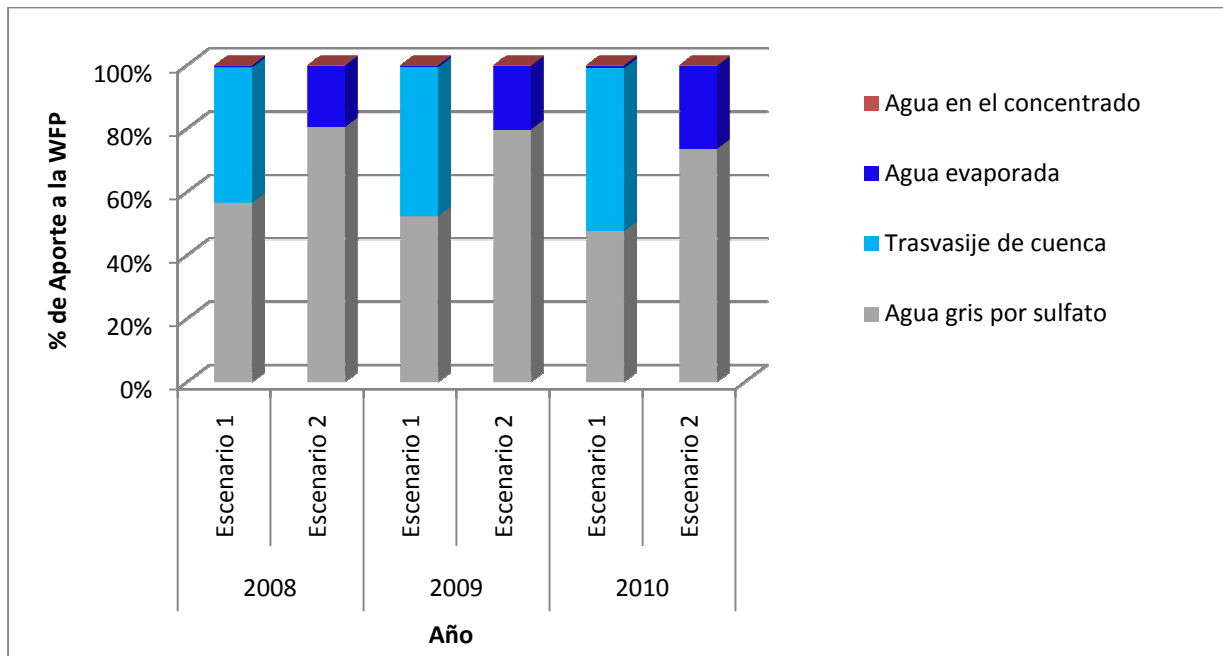


Figura 4.11: Aporte porcentual a la WFP del concentrado de cobre de los distintos consumos de agua.

ii. Variación de la WFP en función del escenario escogido:

Como se observó en la Figura 4.11, la componente gris de la WFP es siempre la misma para ambos escenarios, ya que para ambos, el aporte corresponde a la descarga del tranque Carén hacia el estero Carén. La gran variación entre ambos escenarios es producto de la WFP Azul (ver Figura 4.12), ya que en el primero, toda el agua que va hacia el embalse Carén se considera como consumida, mientras que en el segundo, se consume sólo la fracción evaporada desde el embalse.

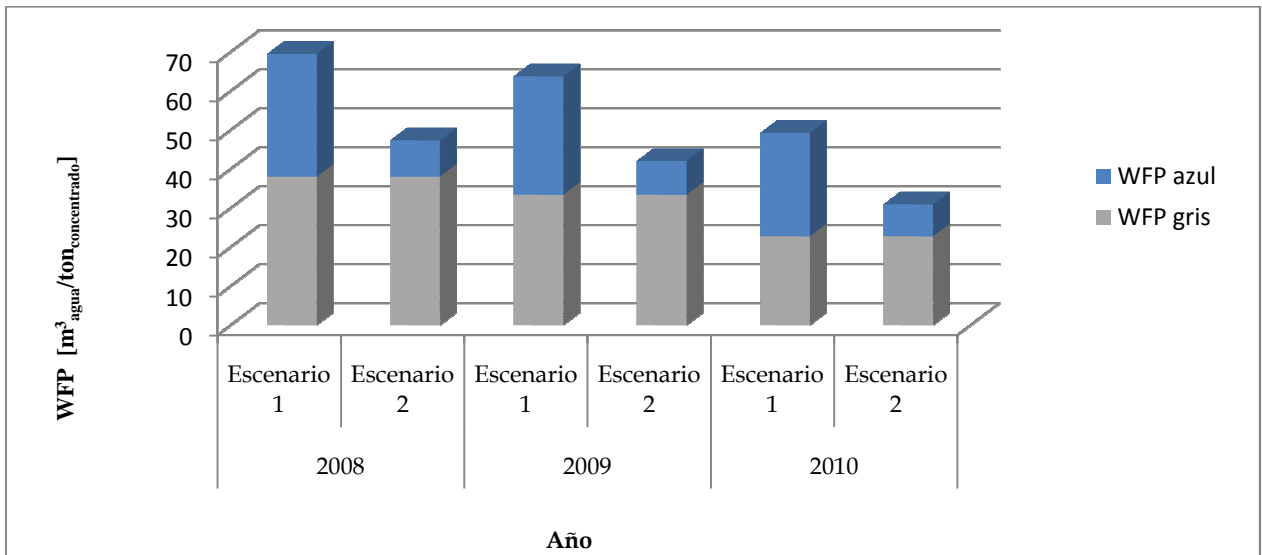


Figura 4.12: Valor de las componentes del WFP del concentrado de cobre, según escenarios.

iii. Variación mensual de la WFP del año 2009:

Escenario 1:

Como en este escenario la componente azul de la WFP está definida, casi en su totalidad, por el agua contenida en los relaves, que corresponde al agua que se dirige hacia el tranque Carén desde el sector Colón, las variaciones mensuales que pudiera presentar la WFP Azul están directamente relacionadas con el *make up* de la DET. Es por esta razón, que las variaciones mensuales de la componente azul de la WFP son bajas, tal como se observa en la Figura 4.13. Estas variaciones son resultado del manejo que haga la DET del agua que utilizan. En general, una mayor recirculación del agua en sus procesos por ejemplo, generará un menor *make up*, y por esta misma razón, una menor componente azul de su WFP. Sin embargo, el descenso del *make up* no puede continuar en forma permanente, debido a que el transporte de los relaves requiere una cantidad mínima de agua, de manera que su composición tenga a lo menos un 50% de humedad (SILVA, 2010). Dicho porcentaje se encuentra muy cercano al del año 2010, razón por la cual el agua incluida en los relaves, no podría continuar disminuyendo. En caso que se deseara disminuir la componente azul de la WFP para este escenario, sería necesario modificar la tecnología

utilizada para disponer los relaves, por ejemplo, utilizando relaves en pasta, más espesos y con un menor porcentaje de agua, de manera de poder seguir disminuyendo el *make up* de la DET.

Los valores de la WFP Gris, están determinados, fundamentalmente, por el caudal descargado hacia el estero Carén y no por la calidad de esta descarga (ver Figura 4.14). Debido a esto, los valores de la WFP Gris se rigen principalmente, por la hidrología, ya que sus valores máximos se presentan en los meses de invierno, donde los aportes de agua desde la cuenca del estero Carén hacia el tranque son mayores. Por lo tanto, independiente del agua proveniente de los relaves, en los meses de invierno las descargas hacia el estero serán mayores, generando un mayor valor de la WFP Gris, y en consecuencia, una mayor WFP total.

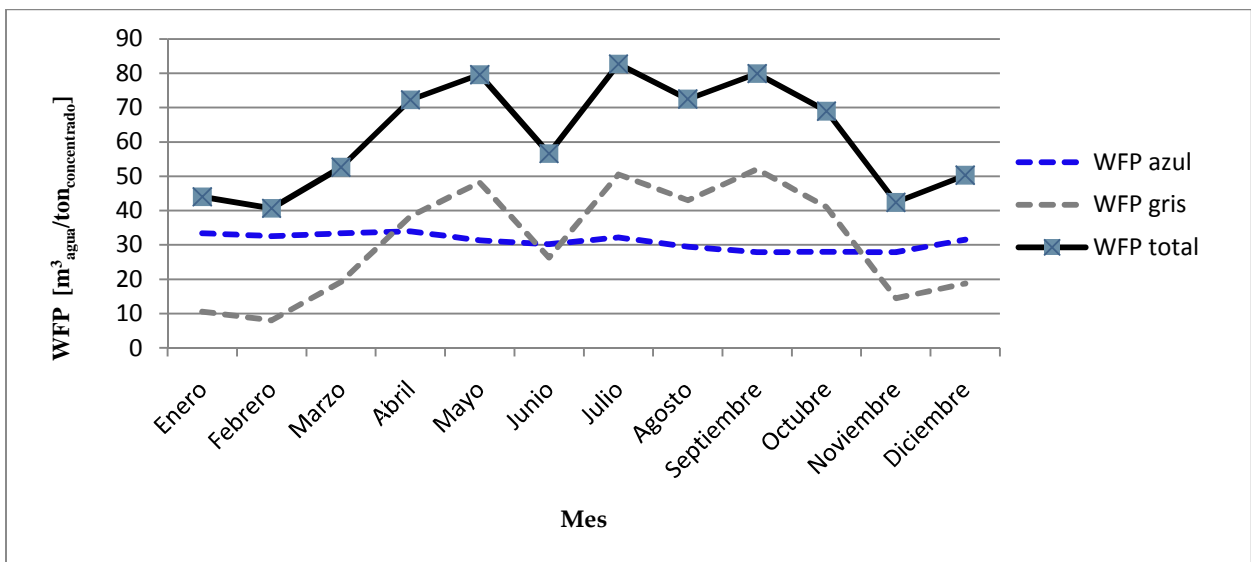


Figura 4.13: Detalle mensual de la WFP del concentrado de cobre, para el escenario 1 año 2009.

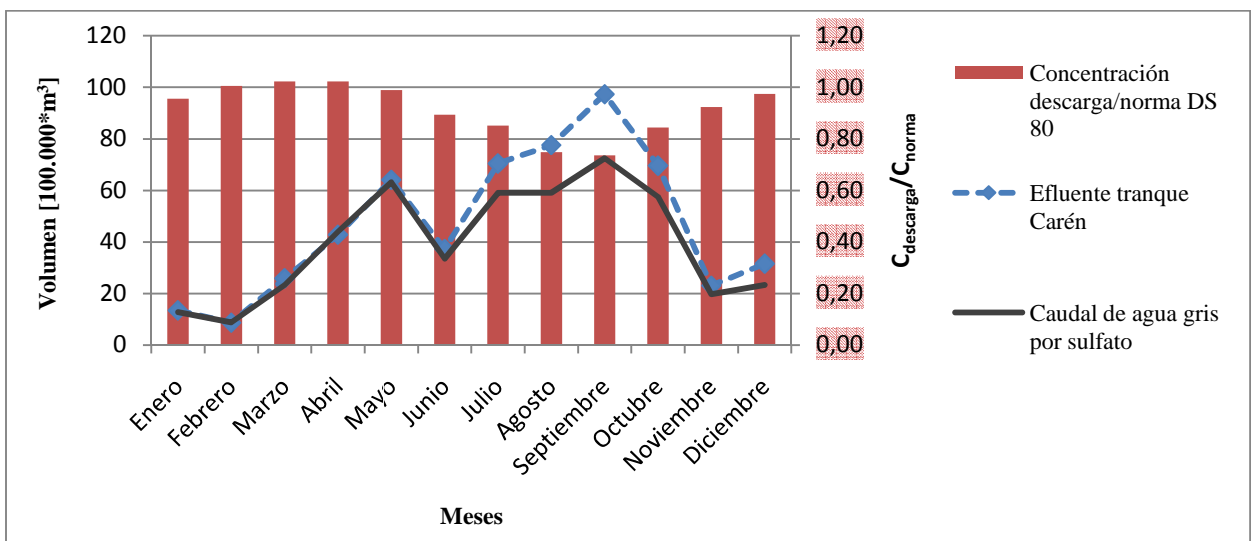


Figura 4.14: Variación mensual de caudal y calidad del efluente del tranque Carén, año 2009.

Escenario 2:

Como se aprecia en la Figura 4.15, en este escenario se observan variaciones mensuales, tanto en la WFP Azul, como en la WFP Gris. En el caso de la WFP Azul, estas variaciones corresponden principalmente a la evaporación del embalse Sapos y el tranque Carén, razón por la que su valor disminuye en los meses de invierno y logra sus valores máximos en verano. Con respecto a la WFP Gris, al igual que en el escenario 1, su valor está determinado por el caudal descargado hacia el estero Carén (ver Figura 4.14). Por esto, los valores de la WFP Gris también se regirán por el ciclo hidrológico, y sus valores máximos se presentarán en los meses de invierno, en los cuales la WFP Azul se hace mínima, pero es el valor de la WFP Gris el que predomina en el valor de la WFP total.

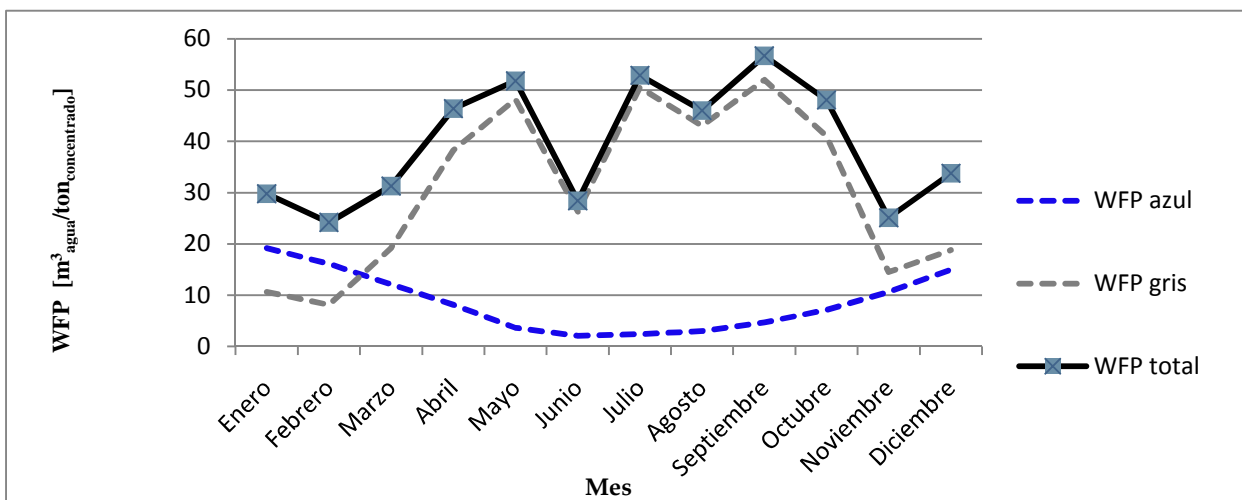


Figura 4.15: Detalle mensual de la WFP del concentrado de cobre, para el escenario 2 año 2009.

iv. Variación anual de la WFP:

Al observar el valor de la WFP para los años 2008, 2009 y 2010, se puede apreciar una disminución en el resultado del indicador para el año 2010 con respecto a los años anteriores, y para el año 2009 con respecto al 2008 (ver Figura 4.16). Se observa además, que a pesar que los escenarios presentan valores siempre distintos entre ellos, la variación interanual del valor de la WFP tiene el mismo comportamiento para ambos escenarios, y la magnitud de estas variaciones es muy similar.

La Figura 4.17, muestra la variación interanual de cada componente de la WFP. Se observa que en el escenario 1, la componente azul de la WFP presenta una disminución del 15% entre el año 2008 y el 2010, debido a que esta componente está muy relacionada con el *make up* de la planta, valor que fue disminuyendo año a año (desde 0,94 m³/tonelada de mineral procesado el año 2008, hasta 0,86 m³/tonelada de mineral procesado el año 2010). Como ya se mencionó, el descenso del *make up* de la DET no puede continuar en forma permanente. Con respecto a la componente azul de la WFP en el escenario 2,

se observa una disminución cercana al 10% entre los años 2008 y 2010, asociada al aumento de la producción de concentrado de cobre; cabe recordar que el consumo de agua azul se mantiene constante, debido a que la evaporación, principal componente de este consumo en este escenario, fue calculada a base de tasas de evaporación, que no varían anualmente.

La componente Gris de la WFP, que tiene el mismo valor en ambos escenarios, presenta una disminución del 40% entre los años 2008 y 2010 (ver Figura 4.17). Esta disminución se debe a una baja del caudal descargado desde el tranque Carén hacia el estero Carén, provocado principalmente por la cantidad de precipitación caída sobre el sistema en los años estudiados. Como se aprecia en la Figura 4.18, el año 2008 es el de mayor precipitación sobre el tranque Carén (611 mm), y el de mayor WFP Gris. El año 2010 es el que presenta menores precipitaciones sobre el tranque Carén (297 mm), por lo tanto, el de menor WFP Gris.

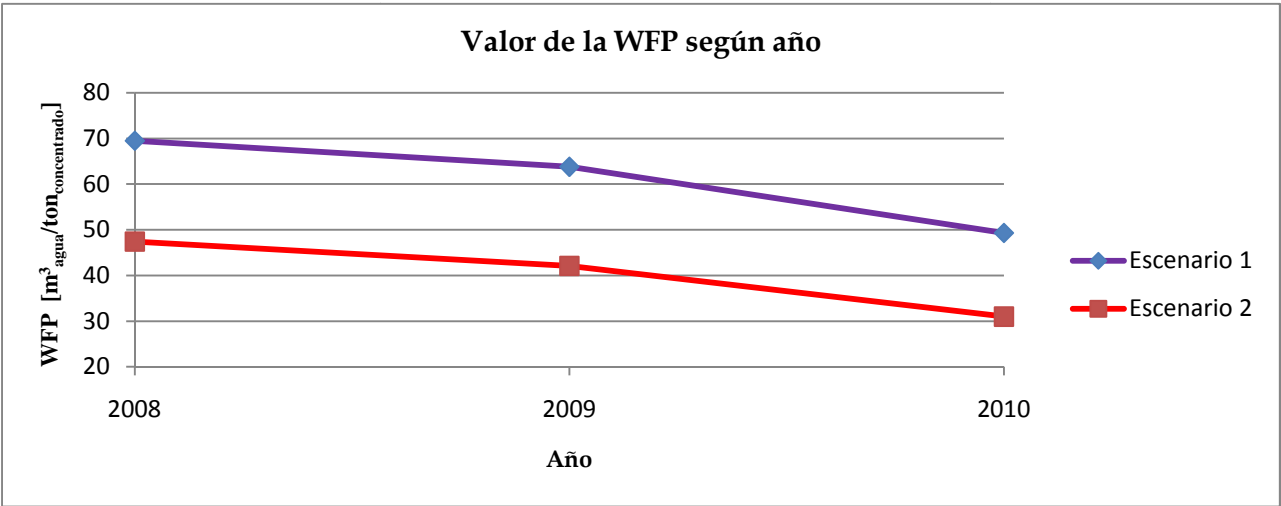


Figura 4.16: Valor de la WFP del concentrado de cobre, según año

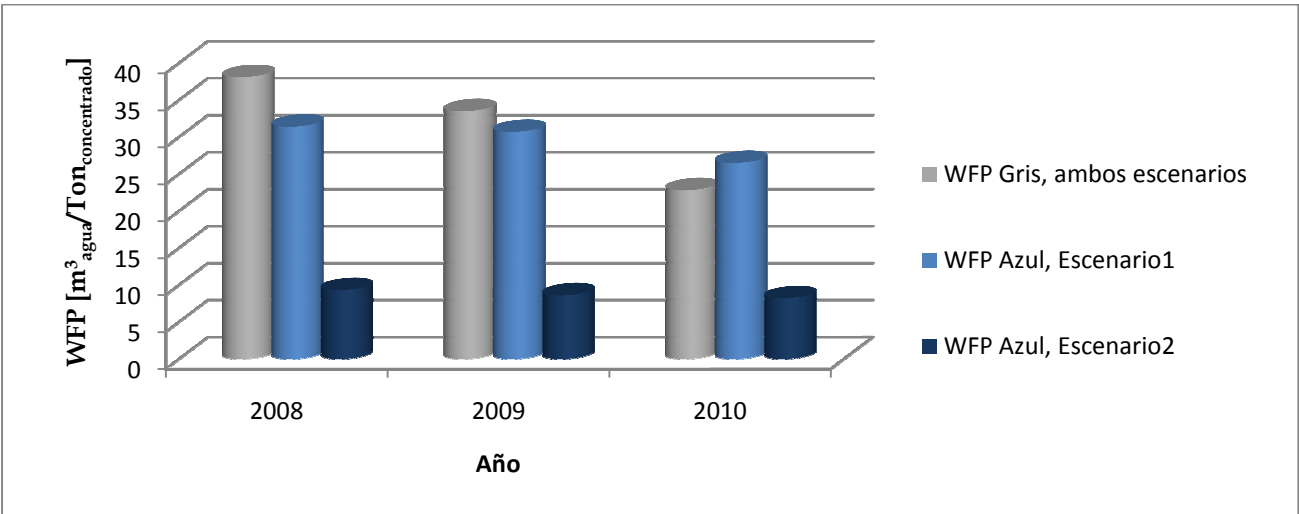


Figura 4.17: Valor de las componentes de la WFP del concentrado de cobre, según año.

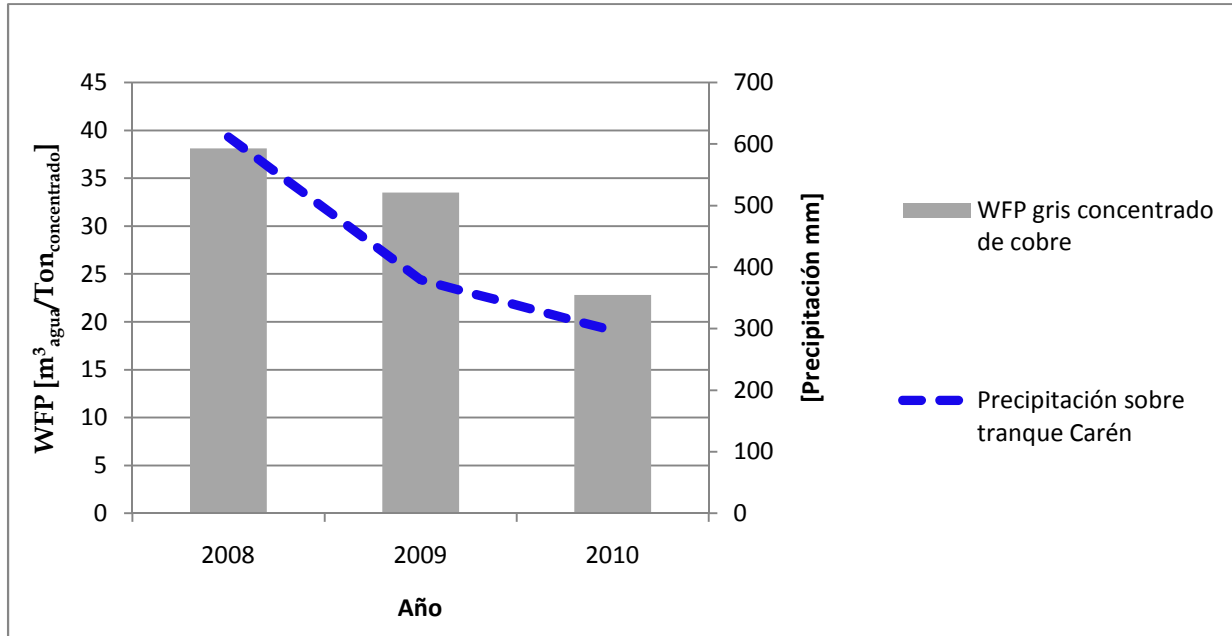


Figura 4.18: Relación entre la WFP del concentrado de cobre y la precipiación anual.

4.5. Análisis crítico respecto del uso del indicador WFP en la minería del cobre en Chile

La WFP fue concebida como un indicador de consumo de agua asociado principalmente al rubro de la agricultura. Posteriormente comenzó a ser aplicada a productos de mayor elaboración, de origen vegetal y animal, pero en que los principales consumos de agua continuaban teniendo directa relación con la evapotranspiración desde plantas y suelo.

Al aplicar la metodología propuesta para el cálculo de este indicador en la minería de cobre, se detectó algunas interrelaciones y limitaciones que no se observan en otros rubros, las que se detallan a continuación:

- i. La metodología para el cálculo de la WFP no es precisa en cuanto al criterio a utilizar para delimitar las fronteras geográficas del sistema a estudiar:

Tal como se vio en el desarrollo del trabajo, la discusión acerca de si se consideraba el tranque Carén dentro o fuera del sistema no fue concluyente y al realizar el ejercicio para ambos escenarios se observó grandes diferencias en cuanto al valor final de la WFP. Por lo tanto, se podría manipular arbitrariamente el tamaño del sistema, de manera de obtener el valor más conveniente. Sin embargo, a pesar de esta limitación, la variación interanual de los valores de la WFP para ambos escenarios tuvo el mismo comportamiento, y la magnitud de sus variaciones fue prácticamente la misma. Por lo tanto, si el objetivo de utilizar este indicador fuera observar la variación interanual de los consumos de agua, de manera de

identificar avances o retrocesos en el uso eficiente del recurso, a pesar que el escenario escogido provoque una variación en el valor inicial de la WFP del producto, cualquiera de los escenarios podría ser útil para lograr este fin.

Además, en el caso del escenario 1, se observó la existencia de un sistema con límites geográficos discontinuos, en los que, si bien es cierto, se genera un consumo de agua producto de un trasvase de cuencas, la descarga de esa agua trasvasada, genera aportes a la WFP Gris, por lo que la zona de la descarga está considerada dentro del sistema. Esto no es una limitación, pero puede volver más compleja la definición de estos límites.

A pesar que esta discusión no pudo ser concluida, y se brindaron argumentos que respaldan la selección de ambos escenarios, desde un punto de vista personal, se considera que el escenario 1 refleja de mejor manera los consumos de agua que se generan en la DET. Independiente que el agua que es captada en el sector de Sewell y Colón de la DET, sea devuelta al estero Carén, y pueda ser utilizada posteriormente por agricultores y para generación eléctrica, se priva de este recurso a todos los potenciales consumidores que existen inmediatamente aguas abajo de la DET, desde el consumo humano hasta la preservación del medioambiente del sector. La WFP busca, como fin último, medir los impactos que los consumos de agua de un proceso productivo generan en su entorno, y desde este punto de vista, el agua trasvasada a Carén si produce impactos, que deben ser considerados.

- ii. Las principales variaciones de la WFP del concentrado de cobre de la DET, están más relacionados con la cantidad de precipitación caída sobre el sistema, que con mejoras del manejo de agua de la División:

La variación del valor de la WFP del concentrado de cobre de la DET, definida principalmente por la variación de la componente gris de la WFP, tiene directa relación con la precipitación caída sobre la cuenca del estero Carén y no con una variación del manejo de agua en la División. En particular, a pesar que la WFP del concentrado de cobre de la DET ha disminuido los últimos 2 años, si el año 2011 fuera el más lluvioso de los últimos 4 años, es muy posible que también sea él con mayor WFP. Por lo tanto, la WFP aplicada en el concentrado de cobre de la DET, no refleja avances ni retrocesos en la eficiencia del uso del recurso hídrico. No obstante, esta limitante está relacionada directamente con el manejo que realiza la DET del tranque Carén. Por lo tanto ésta podría ser menos relevante al aplicar el indicador WFP en otras mineras del país, y además, en caso que la DET captara las aguas aportadas por la cuenca del estero Carén al tranque Carén, posiblemente disminuiría la WFP de su concentrado de cobre, junto con disminuir la relevancia de esta limitación.

iii. La componente gris de la WFP depende de las normas ambientales que rijan el sistema en estudio:

La WFP Gris se calcula utilizando normas ambientales de calidad de agua de los cuerpos receptores. Al considerar estas normas, la WFP Gris refleja los impactos ambientales provocados por las descargas de residuos líquidos a los cuerpos receptores, midiendo el agua del cuerpo receptor, que se consume en diluir los contaminantes descargados. En Chile, si bien existen anteproyectos de normas ambientales de calidad de agua para algunas cuencas del país, estas normas aún no entran en vigencia, y además no existe una que regule las aguas del estero Carén, por lo tanto, para el cálculo de la WFP Gris, se utilizaron las normas de emisión de residuos líquidos a cuerpos de agua. Como la norma de emisión es una sola para todo el territorio nacional, desde el punto de vista de la contabilidad de la WFP, es indiferente realizar la descarga de residuos en un caudaloso río del sur de Chile, que realizar la misma descarga en un pequeño estero en el desierto nortino, aunque los impactos que genere puedan ser completamente distintos. En particular, la descarga que realiza la DET desde el tranque Carén al estero Carén, se rige por un decreto especial, que permite descargar mayores concentraciones de molibdeno y sulfato a este estero, que lo que permite la norma que rige al resto del territorio nacional. Esto no quiere decir que los impactos generados por las descargas de estos compuestos sean menores allí, pero como la WFP del concentrado de cobre de la DET fue calculada sobre la base de las normas de emisión, producto de las descargas hacia el estero Carén, la WFP Gris será menor que una descarga de iguales características en otra zona del país. Se debe aclarar que esta limitación corresponde a un problema de la legislación chilena y no al indicador WFP, sin embargo, es una limitante para su uso adecuado.

Desde un punto de vista global, los países en vías de desarrollo tienen normas ambientales menos restrictivas, por lo tanto, la WFP Gris de una minera que genera descargas en estos países, podría ser menor que la WFP Gris de una minera de idénticas características, pero que opera en un país desarrollado, con normas más exigentes.

Sin embargo, esta limitación puede ser abordada al momento de realizar el siguiente paso en el análisis de la WFP, donde se asocian los valores de los consumos de agua calculados, con los impactos ambientales que estos consumos generan, incluyendo en este análisis, el lugar donde se realiza la descarga, y las consecuencias de ésta.

iv. El cálculo de la WFP no considera la calidad de agua de las fuentes:

Para efectos del indicador, el consumo de un m^3 proveniente de una fuente de agua potable, es equivalente al consumo de un m^3 de una fuente de agua contaminada. Esto puede ser relevante en el rubro de la minería, ya que las mineras, si bien es cierto, consumen grandes cantidades de agua, a veces esa agua tiene

una calidad tal que no podría ser utilizada para otro propósito. En la DET se utilizan volúmenes de alrededor de 1,2 m³/s de agua para producir concentrado de cobre (basado en valores del *make up* año 2008). Cerca del 25% de esa agua corresponde al agua de contacto mina, la cual no podría ser utilizada para otros propósitos, tales como, consumo humano, consumo animal, o regadío, debido a algunas características físico-químicas de dicha agua (pH ácido y altas concentraciones de algunos metales pesados). Sin embargo, como se explicó anteriormente, en una segunda etapa del desarrollo de este indicador, una vez realizada la contabilidad del consumo de agua, se realiza un análisis de los impactos ambientales que estos consumos generen. En esta etapa es donde la calidad del agua utilizada puede ser considerada, reflejando el mayor o menor impacto que su consumo provoca.

v. El valor de la WFP está influido por la ley del mineral:

Esta interrelación puede considerarse como una ventaja de la WFP con respecto a otras mediciones de uso de agua, tales como el *make up*. Como la WFP se calcula sobre la base del producto final, no considera la ley del mineral extraído. Del análisis realizado, se puede concluir, que a uso de agua constante en procesamiento de mineral, a mayor ley, menor valor de la WFP. Esto es coherente con la teoría económica y representa una característica positiva de este indicador (GARCÉS, 2011). Dado que el objetivo último de esta clase de indicadores es disminuir el consumo total de agua, resulta de mayor utilidad conocer el agua consumida en la producción del concentrado de cobre, que el agua consumida en el procesamiento del mineral extraído, sin consideración de la cantidad de mineral necesario para producir el concentrado.

vi. La definición de “consumo de agua” utilizada por el indicador WFP, presenta diferencias con algunos conceptos utilizados por los consumidores de agua, acerca del uso eficiente del recurso:

Supongamos que una minera transporta el agua que utiliza, a través de un canal de tierra, en que la mitad del agua transportada se infiltra al suelo, no utilizándose para el fin deseado. Desde el punto de vista de los consumidores del agua, el agua infiltrada se está perdiendo. Sin embargo, desde el punto de vista de la WFP, al igual que desde un punto de vista hidrológico en que el objeto de estudio es la cuenca, el agua infiltrada no se considera un consumo, debido a que ésta retorna al sistema y no contribuye al valor de la WFP. Por lo tanto, en términos de la WFP, un canal que pierde la mitad de su agua en el camino, “consume” la misma cantidad de agua que uno que transporta la mitad del agua que éste, pero que no tiene infiltración. Debido a esto, pueden generarse confusiones con respecto a las definiciones utilizadas, y los objetivos que se busca lograr con un estudio de WFP. Es por esta razón además, que la WFP no resulta útil como indicador operativo en minería, ya que no permite identificar lo que para la empresa minera podría ser considerado como pérdidas.

Capítulo 5: Conclusiones y recomendaciones

A continuación se detallan las principales conclusiones del trabajo realizado, enfatizando algunos aspectos que se consideran relevantes e indispensables, si se desea medir y controlar los impactos ambientales que los consumos de agua de las grandes empresas mineras pueden generar. El análisis técnico del potencial uso de la WFP como un indicador de sustentabilidad en el uso de agua en la minería de cobre en Chile, es un primer acercamiento en la búsqueda de herramientas adecuadas para medir estos impactos en el sector minero del país.

En primer lugar se resumen las limitaciones encontradas al indicador WFP al ser aplicado en la DET. Posteriormente, en segundo lugar, se comenta acerca de la importancia de contar con datos sobre consumo de agua, la disponibilidad de estos por parte de la DET, y los datos que fue necesario estimar. A continuación, se enuncian los valores obtenidos de la WFP del concentrado de cobre en la DET, y se analiza su composición. Finalmente, se concluye acerca de la importancia del perfeccionamiento y el desarrollo de nuevos indicadores de sustentabilidad, que contribuyan a lograr un desarrollo sustentable.

En relación con los aspectos metodológicos del cálculo de la WFP, éstos son muy generales y no son aplicables directamente a la minería. Por lo tanto, es necesario realizar ajustes en la metodología, para realizar futuras investigaciones. Dichos ajustes responden a limitaciones encontradas en la aplicación de este indicador en la producción de concentrado de cobre en la DET, y tienen relación con: criterios a utilizar para delimitar las fronteras geográficas del sistema a estudiar; la relación directa, en el caso de la DET, entre la WFP de su concentrado de cobre y la precipitación caída en ese año, lo que provoca que la variación de su WFP no sea un reflejo de variaciones en el manejo del agua en la División; también una normalización de las regulaciones ambientales que se utilizan para el cálculo de la componente gris de la WFP, de forma que las variaciones de la WFP no dependa de la existencia de normas ambientales de calidad del agua en el país donde se realice el estudio, ni del nivel de desarrollo del país. Sin embargo, muchas de estas limitaciones, al igual que la valoración de la calidad de las fuentes de agua consumida, deben verse reflejadas en el posterior estudio de los impactos ambientales que generen los consumos de agua realizados.

También es indispensable disponer de información sobre consumo de agua en los procesos. Los datos requeridos para el cálculo de la WFP en la DET tuvieron relación principalmente, con la cantidad y la calidad del agua captada desde las distintas bocatomas de donde obtiene agua la División, siendo mínima la cantidad de información obtenida, razón por la cual se debió utilizar el *make up* para cuantificar su consumo de agua. Sin embargo, este valor se mide al inicio de la canaleta de relaves que va hacia el

embalse Carén, no contando la DET con ninguna medida del agua que ingresa a sus procesos, a través de sus bocatomas. El agua utilizada en los diferentes procesos se estima en base al valor del *make up*, realizando un camino inverso y distribuyendo el agua incluida en los relaves, entre los diferentes procesos que la utilizaron. Por este motivo, no es posible identificar dónde se generan pérdidas de agua, o dónde se pueda mejorar el uso eficiente de ésta. Por lo tanto, es importante que la DET genere un sistema de administración de datos de consumo de agua con el fin de medir y mejorar el uso sustentable del uso de este recurso. Es particularmente crítico, la necesidad de contar con datos acerca de la cantidad de agua que ingresa a cada proceso, información indispensable si se desea controlar el uso del agua en la División, con fines tanto de realizar mejoras de eficiencia del uso de agua, como de evaluar la disponibilidad del recurso para futuros proyectos.

Dado los déficits en materia de datos, se estimó la evaporación desde los diferentes cuerpos de agua incluidos en los procesos de la DET, y producto de los déficits metodológicos, asociados principalmente a la definición de los límites geográficos del sistema, se definieron 2 escenarios, que permitieron obtener valores preliminares de la WFP del concentrado de cobre de la DET para los años 2008, 2009 y 2010. En el primero de los escenarios, se consideraron límites geográficos menores, donde el tranque Carén se encuentra fuera del sistema, razón por la cual, el agua que transporta los relaves desde el sector Colón hacia el tranque Carén, es trasvasijada de cuenca y se considera agua azul consumida. En el segundo escenario los límites geográficos incluyen el tranque Carén. La descarga de agua desde el tranque Carén hacia el estero Carén, debía ser considerada como un aporte a la WFP Gris independiente de los límites geográficos definidos.

La WFP del concentrado de cobre de la DET, tomando el promedio de los 3 años estudiados, fue de 61 m³ de agua, por tonelada de concentrado de cobre producida para el escenario 1. En el escenario 2, la WFP fue siempre menor a la obtenida en el primero, y se obtuvo como promedio 40 m³ de agua, por tonelada de concentrado producida. Del análisis de los valores obtenidos, se desprende que en el escenario 1, la componente azul de la WFP está estrechamente relacionada con el *make up* de la División, mientras que en el escenario 2, la componente azul no presenta mayores variaciones interanuales, y su valor se relaciona principalmente con la evaporación desde el tranque Carén. La componente gris de la WFP para ambos escenarios, corresponde a la descarga desde el tranque Carén hacia el estero Carén, debido a las concentraciones de sulfato de esta descarga. Las variaciones de la componente gris de la WFP fueron las que generaron mayores variaciones anuales de la WFP total, y estas variaciones no son atribuibles a cambios en el manejo de agua de la DET, si no que se atribuyen a la variabilidad de las precipitaciones anuales sobre la cuenca del estero Carén.

Estudiar la cantidad de agua que utilizan las empresas mineras, junto con la calidad del agua que extraen para su consumo, y el estado en que devuelven al medio ambiente este recurso, es sin duda indispensable si se desea conocer y controlar los impactos ambientales que estas grandes empresas pueden generar. También desde el punto de vista del uso eficiente de sus recursos, resulta difícil imaginar que el manejo del agua no sea un punto crítico a controlar.

Indicadores como la WFP son instrumentos pioneros en aplicar metodologías y estandarizaciones para medir consumos de agua y dar a conocer los impactos que los diferentes actores económicos provocan hacia el medio que los rodea.

La contabilidad de la WFP de una empresa, en este caso una minera, es sólo el primer paso de un estudio más completo acerca del impacto ambiental asociado al consumo de agua que genera la producción de un bien en su entorno. Luego de la contabilidad, se debe realizar un estudio que analice la ubicación geográfica y el entorno de donde se ubican los procesos productivos, para dimensionar los impactos, sociales, ambientales y económicos que generan. Esta segunda parte del estudio de la WFP, no está incluida en los alcances de este trabajo, pero permitiría una mayor comprensión de los valores obtenidos, y podría ayudar a comparar los impactos de la DET, con alguna minera ubicada en el norte del país.

No obstante las limitaciones que pueden tener los valores preliminares obtenidos, considerando que, el agua es un recurso natural cada vez más escaso, que la minería requiere grandes cantidades de agua para sus procesos, y que Chile es un país minero, se sugiere la importancia de realizar nuevos estudios, con el fin de mejorar la metodología de la WFP, o indagar en nuevos indicadores, y que además, la DET y la minería en general, desarrolle sistemas de información, que permitan contar con datos de consumo de agua en sus procesos, de manera de mejorar el uso de éste u otros indicadores de consumo de agua en la industria minera, permitiendo una contribución al desarrollo sustentable del país.

Referencias

1. ALVEAR, Jorge. Contacto personal: Coordinación del Embalse Carén. Chile. 2011.
2. BARLOW, Maude. El Convenio azul: La crisis global del agua y la batalla futura por el derecho al agua. Chile, Council of Canadians y Chile Sustentable. 2009.
3. COCHILCO. Buenas prácticas y uso eficiente del agua en la industria minera. Chile, Cochilco. 2008.
4. CODELCO. Sewell, Ciudad minera en el corazón de Los Andes. [en línea]. <http://www.sewell.cl/html/tecnologia/fr_tecnologia.html>. [Consulta: 6 de Septiembre de 2010].
5. CODELCO. Proceso productivos: Flotación. [en línea]. <<https://www.codelcoeduca.cl/proceso/flotacion/flotacion.asp> >. [Consulta: 07 de Septiembre de 2010].
6. CODELCO, CIMM T&S S.A. Estudio de Impacto Ambiental peraltamniento embalse Carén. Santiago. 2007.
7. CODELCO. Informe de sustentabilidad. Santiago, Codelco. 2008
8. CONAMA. Anteproyecto de normas secundarias de calidad ambiental para la protección de las aguas continentales superficiales de la cuenca del río Cachapoal. Santiago. 2006.
9. CÔTE, Claire. Water in mining 2010 (2ª, 2010, Santiago, Chile). Water Accounting in Mining Operation. Santiago, Chile. 2010.
10. DGA, Cade-Idepe. Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad: Cuenca del río Rapel. Santiago. 2004.
11. DGA, MOP. Balance Hidrico de Chile. Santiago, Chile. 1987.
12. DOMÉNECH, Juan Luis. Huella ecológica y desarrollo sostenible. 2ª edición. España, Aenor. 2009.
13. DECRETO SUPREMO 80. Establece la norma de emisión para molibdenos y sulfatos de efluentes descargados desde tranque de relaves al estero Carén. Ministerio secretaría general de la presidencia. Santiago, Chile. 2006.
14. DECRETO SUPREMO 90. Norma de emisión para la regulación de contaminantes asociados a las descargas de residuos líquidos a aguas marinas y continentales superficiales. CONAMA. Santiago, Chile. 2010.

15. Essbio. Essbio, somos parte de tu vida, planta los Nogales. [en línea]. <<http://www.essbio.cl/link.exe/Inmobiliarias/NuestraExperiencia/PlantasAguaPotable/>>. [Consulta: 15 de Octubre de 2010].
16. ESPINOZA, Carlos. Determinación de tasas características de uso del agua según sector y rubro. Universidad de Chile, Ingeniería Civil, Chile. 2005.
17. ESPINOZA, Carlos. Contacto personal: Reunión avances trabajo de título. 2010.
18. FAO. FAO 56: Evapotranspiración de cultivo. Roma, FAO. 2006.
19. GARCÉS, Juan Antonio. Contacto personal: sustentabilidad e indicadores. Chile. 2011.
20. HATCH. Informe Línea Base de Referencia Aguas-DET. Chile. 2010.
21. HOEKSTRA, Arjen. Y., Chapagain, A. K., Aldaya, M. M., & Mekonnen, M. M. Water Footprint Manual, State of the Art 2009. Holanda. Water Footprint Network. 2009 a.
22. HOEKSTRA, Arjen Y., Gervens-Leenes, W., & Van der Meer, T. H. Reply to Pfister and Hellweg Water footprint accounting, impact assessment, and life-cycle assessment. PNAS , 106 (40): 114. 2009 b.
23. HOEKSTRA, Arjen. . The water footprint: water in the supply chain, The environmentalist. 93: 12-13, Marzo 2010 a.
24. HOEKSTRA, Arjen. Question about WFP in copper mining. [en línea]. En: <mgarcés@ing.uchile.cl>. 29 de Octubre de 2010. <a.y.hoekstra@ctw.utwente.nl>. Consulta: 5 de Noviembre de 2010 b.
25. MUDD, Gavin. M.. Sustainability Reporting and Water Resources: a Preliminary Assessment of Embodied. Mine Water Environ (27):144-163. (2008).
26. OLIVARES, Marcelo; Garcés, Manuel. Water in mining 2010 (2ª, 2010, Santiago, Chile). Poster: Technical analysis on the potential use of Water Footprint as a sustainability indicator in copper mining in Chile. Chile. 2010.
27. QUIROZ, Ricardo. Contacto personal: Efluentes del tranque Carén. Chile. 2010.
28. SILVA, Gaspar. Contacto personal: Recirculación de aguas en la DET. Chile. 2010.
29. SINGH, R. K., Murty, H. R., Gupta, S. K., & Dikshit, A. K. . An overview of sustainability assessment methodologies. Ecological Indicators (9): 189-212. 2009.

30. TUCCI, Carlos. Hidrologia Ciência e aplicação. 2ª ed Brasil, Editora de Universidade. 2000.
31. VERA, Marcelo. Contacto personal: Usos de Agua en la DET. Chile. 2010 a.
32. VERA, Marcelo. Contacto personal: Reunión Avances Huella Hídrica. Chile. 2010 b.
33. VERGARA, María Antonieta. Efecto de la localización en el impacto ambiental de un proceso: Evaluación mediante el Análisis de Ciclo de Vida. Tesis (Ingeniera Civil en Biotecnología). Santiago, Chile. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería Química. 2002.
34. VILLAGRA, Jose. Contancto personal: Caudal descargado al estero Carén. 2010.
35. WACKERNAGEL, Mathis, & Rees, William. Nuestra Huella Ecológica, reduciendo el impacto humano sobre la tierra. Canada, New society Publishers. 1996.
36. ZARATE, Erica. question about WFP in copper mining. [en línea]. En: <manuelgarcesv@gmail.com>. 24 de Enero de 2011. < E.Zarate@ctw.utwente.nl >. Consulta: 3 de Marzo de 2011.

Anexo A: Cálculo de la evaporación desde espejos de agua y de relaves

En el presente anexo se detallan las fórmulas utilizadas en este trabajo para el cálculo de la evaporación de los espejos de agua.

Estos cálculos se llevaron a cabo utilizando (A.1) (TUCCI, 2000):

$$E_e = ET_0 * A_e / 1000 \quad (A.1)$$

Donde:

E_e : Evaporación total desde el espejo de agua [m^3/mes].

ET_0 : Evapotranspiración de referencia [mm/mes].

A_e : Área total del espejo de agua [m^2].

ET_0 corresponde a la evapotranspiración de referencia y se calculará utilizando (A.2): (FAO, 2006)

$$ET_0 = K_p * E_{pan} \quad (A.2)$$

Donde:

ET_0 : evapotranspiración de referencia [mm/mes].

K_p : coeficiente del tanque evaporímetro [-].

E_{pan} : evaporación del tanque evaporímetro [mm/mes].

El coeficiente del tanque evaporímetro (K_p) es un valor que puede variar entre 0,3 y 1,1. Este valor depende del tipo de tanque de evaporación (clase A o tipo Colorado) y de las condiciones del viento, humedad y los alrededores del tanque (FAO, 2006).

Para relacionar la evaporación de un espejo de agua y la de un tanque de evaporación tipo A (utilizado comúnmente en Chile), el factor oscila entre 0,6 y 0,8, siendo el valor más utilizado 0,7 (TUCCI, 2000).

Anexo B: Cálculo de la WFP Gris

En el presente anexo se explica la manera de obtener la fórmula de la WFP Gris utilizada en este trabajo.

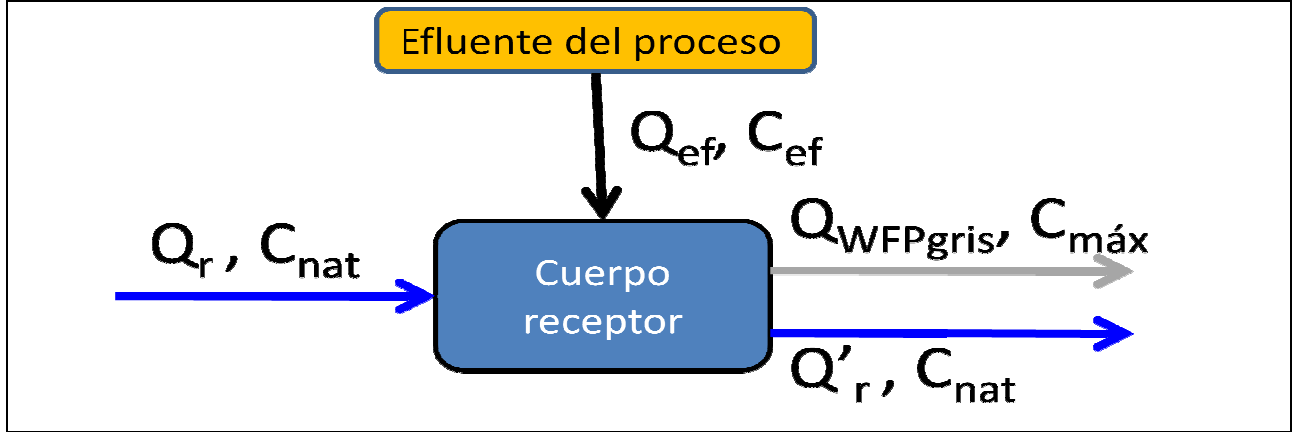


Figura B.1: Balance de caudal y de masa que se utiliza para el cálculo de la WFP Gris.

En primer lugar se realiza un balance de caudal:

$$Q_r + Q_{ef} = Q_{WFPgris} + Q'_r \quad (B.1)$$

$$Q'_r = Q_r + Q_{ef} - Q_{WFPgris} \quad (B.2)$$

A continuación, se realiza un balance de masa:

$$Q_r * C_{nat} + Q_{ef} * C_{ef} = Q_{WFPgris} * C_{máx} + Q'_r * C_{nat} \quad (B.3)$$

Luego, aplicando (B.2) en (B.3):

$$Q_r * C_{nat} + Q_{ef} * C_{ef} = Q_{WFPgris} * C_{máx} + (Q_r + Q_{ef} - Q_{WFPgris}) * C_{nat} \quad (B.4)$$

$$Q_r * C_{nat} + Q_{ef} * C_{ef} = Q_{WFPgris} * C_{máx} + Q_r * C_{nat} + Q_{ef} * C_{nat} - Q_{WFPgris} * C_{nat} \quad (B.5)$$

$$Q_{WFPgris} * (C_{máx} - C_{nat}) = Q_{ef} * (C_{ef} - C_{nat}) \quad (B.6)$$

Con lo que finalmente se obtiene:

$$Q_{WFPgris} = \frac{Q_{ef} * (C_{ef} - C_{nat})}{(C_{máx} - C_{nat})} \quad (B.7)$$

Anexo C: Fotografías de los procesos productivos de la DET



Figura C.1: Entrada al Adit 71. Principal captación del agua de contacto mina



Figura C.2: Entrada Molinos del sector de Sewell



Figura C.3: Bombas de impulsión de agua de contacto mina hacia el sector de Sewell



Figura C.4: Bocatoma Coya bajo, de la DET



Figura C.5: Embalse Sapos



Figura C.6: Muralla del tranque de relaves Carén



Figura C.7: Descarga desde el tranque de relaves al estero Carén.



Figura C.8: Planta de abatimiento de molibdeno a los pies del tranque Carén.

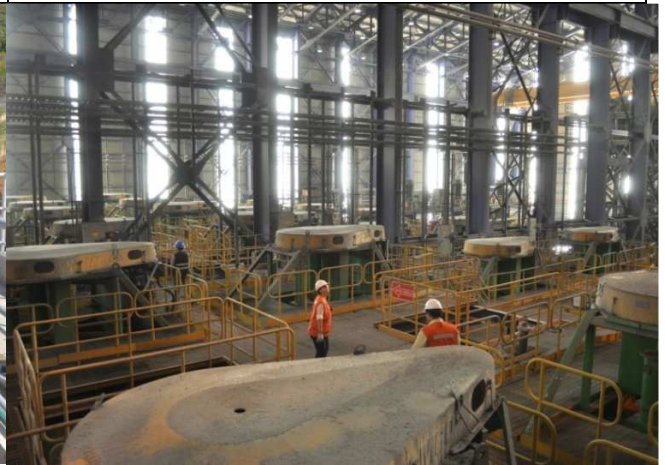


Figura C.9: Proceso de flotación colectiva de la planta SAG 1 del sector Colón.



Figura C.10: Espesadores de relaves del sector Colón.



Figura C.11: Descarga del Ril 30.

Anexo D: Cálculo de la WFP Gris del concentrado de cobre, producto de las descargas de sulfato, molibdeno y alteraciones al pH desde el tranque Carén hacia el estero Carén.

Tabla D.1: Cálculo mensual de la WFP Gris del año 2008

Mes	WFP agua gris descarga Estero Carén año 2008											
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Caudales												
Caudal completa de refino SX	m ³	4,044,084	2,941,097	3,212,845	2,996,188	2,402,213	3,382,285	3,518,107	3,352,939	3,679,040	3,549,876	3,386,752
Caudal refino SX - ADM/Coicén	m ³	216,032	220,199	233,811,32	221,674,48	134,562,6	216,622,08	224,221,6	218,859,6	220,711,44	264,750,08	324,190,08
Porcentaje refino SX vs total ingreso	%	5	7	7	10	5	6	6	6	6	7	8
Caudal descargado a estero Carén	m ³	1,231,718	1,413,677	1,414,109	1,336,326	1,929,226	8,948,189	9,485,865	24,123,917	9,942,566	7,216,819	6,264,322
Caudal descargado a estero Carén de concentrado	m ³	1,169,252	1,315,208	1,318,224	1,227,061	1,827,104	8,409,588	9,246,257	22,734,320	9,323,494	6,732,279	5,740,138
Cálculo de caudal descarga e estero Carén												
Molibdeno	mg/l	0,3	0,3	0,4	0,6	0,5	0,7	0,7	0,2	0,6	0,7	0,6
Sulfato	mg/l	2066,8	2196,3	2201,0	2252,2	2047,6	1584,5	1579,7	1345,3	1428,1	1614,3	1731,7
pH		6,7	7,0	7,3	7,2	7,1	7,4	7,8	8,3	8,6	8,0	7,2
DS80												
Molibdeno	mg/l	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6
Sulfato	mg/l	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000
pH mín		6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00
pH máx		8,50	8,50	8,50	8,50	8,50	8,50	8,50	8,50	8,50	8,50	8,50
Razón descarga/DS80												
Molibdeno		0,18	0,17	0,25	0,40	0,30	0,42	0,44	0,33	0,35	0,45	0,38
Sulfato		1,03	1,05	1,10	1,11	1,02	0,78	0,79	0,67	0,71	0,81	0,87
pH - pH(mín)/pH(máx)		0,12	0,17	0,21	0,20	0,18	0,23	0,30	0,38	0,43	0,34	0,19
(pH - pH(mín))/pH(máx)		0,21	0,17	0,14	0,15	0,17	0,13	0,08	0,02	-0,01	0,06	0,12
Caudal aportante WFP gris												
Molibdeno	m ³	206,968	228,944	327,768	487,915	546,950	3,490,704	4,079,467	7,516,532	3,218,732	3,056,174	2,153,748
Sulfato	m ³	1,208,297	1,385,108	1,451,065	1,366,211	1,870,577	6,278,328	7,275,385	13,292,519	6,661,027	5,434,072	4,970,003
pH mín	m ³	135,664	227,656	283,116	248,797	320,038	1,935,655	2,744,621	8,229,979	3,989,807	2,259,054	1,102,144
pH máx	m ³	247,429	226,127	187,954	182,279	311,450	1,107,063	782,979	524,227	-72,650	385,456	909,848
WFP Gris concentrado de cobre DET												
Concentración probado	ton concentrado/mes	115,972	107,054	124,979	83,743	79,937	113,982	126,611	120,512	120,118	122,808	130,122
WFP Gris Molibdeno	m ³ agua ton concentrado	1,8	2,1	2,6	5,8	6,8	30,6	32,4	62,4	26,8	24,9	16,6
WFP Gris Sulfato	m ³ agua ton concentrado	10,3	12,9	11,6	16,3	23,4	37,7	57,7	126,9	55,5	44,3	38,2
WFP Gris pH	m ³ agua ton concentrado	2,1	2,1	1,5	2,2	3,9	9,7	6,2	4,3	-0,6	3,1	7,0

Tabla D.2: Cálculo mensual de la WFP Gris del año 2009

Mes	WFP agua gris descarga Estero Carén año 2009											
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Caudales												
Caudal canalera de relave sin refino SX	m ³	3.895.356	3.444.612	3.979.540	3.844.769	4.077.545	3.838.488	3.743.264	4.021.845	3.843.444	3.857.770	3.716.164
Caudal refino SX + ADM Colón	m ³	348.949	245.022	249.407	206.582	192.923	175.236	166.864	157.975	121.216	229.746	297.717
Porcentaje refino SX vs total ingreso	%	8	7	6	5	5	4	4	4	3	6	7
Caudal descargado a estero Carén	m ³	1.449.014	924.672	2.784.758	4.542.134	6.190.662	3.930.582	7.257.773	8.084.621	9.990.950	7.207.747	2.303.424
Caudal descargado a estero Carén de concentrado	m ³	1.329.882	863.266	2.620.524	4.310.526	6.101.958	3.759.071	6.948.048	7.779.666	9.685.486	6.802.623	2.132.575
Calidad de caudal descarga a estero Carén												
Molibdeno	mg/l	0,7	0,7	0,7	0,7	0,8	0,7	0,7	0,6	0,7	0,8	1,7
Sulfato	mg/l	1910,6	2011,0	2039,8	2046,0	1581,3	1799,3	1703,2	1543,9	1479,0	1693,5	1884,0
pH		7,2	7,2	7,1	7,1	7,1	7,1	7,4	7,4	7,4	7,3	7,1
DS 80												
Molibdeno	mg/l	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,5	1,6	1,6	1,6	1,6
Sulfato	mg/l	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000
pH min		6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00
pHmax		8,50	8,50	8,50	8,50	8,50	8,50	8,50	8,50	8,50	8,50	8,50
Razón descarga DSSC												
Molibdeno		0,46	0,45	0,42	0,46	0,49	0,42	0,44	0,39	0,46	0,48	1,08
Sulfato		0,96	1,01	1,02	1,02	0,99	0,90	0,85	0,77	0,74	0,85	0,94
(pH - pHmin)/pHmin		0,19	0,21	0,18	0,19	0,19	0,19	0,23	0,23	0,24	0,22	0,18
(pH - pHmax)/pHmax		0,16	0,15	0,16	0,16	0,16	0,16	0,13	0,13	0,13	0,14	0,19
Caudal aptante WFP gris												
Molibdeno	m ³	61.1585	392.581	1.096.816	1.963.984	2.999.309	1.568.350	3.042.873	3.020.661	4.441.195	3.279.248	2.296.961
Sulfato	m ³	1.270.467	867.094	2.672.639	4.409.669	6.044.875	3.381.771	5.917.007	6.004.937	7.162.417	5.766.869	2.008.885
pH min	m ³	237.969	178.659	481.515	811.121	1.140.103	698.079	1.613.767	1.777.656	2.299.765	1.766.221	392.868
pH max	m ³	209.046	127.790	428.732	695.246	989.915	612.848	904.414	1.033.568	1.225.309	965.792	349.910
WFP Gris concentrado de cobre DET												
Concentrado producido	ton concentrado/mes	11:6972	107:054	124:979	83:743	79:937	113:982	126:051	120:513	120:118	122:803	130:122
WFP Gris Molibdeno	m ³ agua/ton concentrado	5,2	3,7	8,8	23,5	37,5	13,8	24,1	25,1	37,0	26,7	17,7
WFP Gris Sulfato	m ³ agua/ton concentrado	10,9	8,1	21,4	52,7	75,6	29,7	46,9	49,8	59,6	47,0	15,4
WFP Gris pH	m ³ agua/ton concentrado	1,8	1,2	3,4	8,3	12,4	5,4	7,2	8,6	10,2	7,9	2,7

Tabla D.3: Cálculo mensual de la WFP Gris del año 2010

WFP agua gris descarga Estero Carén año 2010												
Mes	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Caudales:												
Caudal canalera de relave sin refino SX	m ³	372.1537,51	325.5561,29	349.428,35	332.5094,98	340.6711,28	331.9157,58	3.038.276	3.502.483	3.464.201	3.337.696	3.529.860
Caudal refino SX + ADM Colón	m ³	562.725	359.484	605.817	579.571	373.836	264.937	232.615	207.376	213.148	236.487	199.231
Porcentaje refino SX vs total ingreso	%	13	10	15	15	10	7	6	6	6	6	5
Caudal descargado a estero Carén	m ³	2.315.088	1.503.584	1.833.408	3.533.760	4.076.240	4.872.960	6.995.088	5.018.371	3.882.557	3.320.093	2.514.521
Caudal descargado a estero Carén de concentrado	m ³	2.011.008	1.444.166	1.502.505	3.009.243	3.628.109	4.512.750	6.374.730	4.737.396	3.112.059	2.362.822	2.380.180
Cantidad de caudal descarga a estero Carén												
Molibdeno	mg/l	0,7	0,8	0,3	0,8	0,7	0,7	0,7	0,7	0,8	0,7	0,7
Sulfato	mg/l	1990,0	2081,2	2154,5	2190,3	2071,3	1761,0	1595,8	1667,4	1794,0	1818,7	1903,23
pH		6,6	6,0	5,8	6,6	6,4	6,7	6,7	7,0	6,9	6,9	7,0
DS 80												
Molibdeno	mg/l	1,6	1,6	1,5	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6
Sulfato	mg/l	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000
pH min		6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00
pHmax		8,50	8,50	8,50	8,50	8,50	8,50	8,50	8,50	8,50	8,50	8,50
Razón descarga /DS80												
Molibdeno		0,46	0,50	0,47	0,51	0,45	0,43	0,43	0,42	0,48	0,43	0,44
Sulfato		1,00	1,04	1,08	1,10	1,04	0,88	0,80	0,83	0,87	0,91	0,94
pH - pHmin)		0,10	0,00	-0,03	0,09	0,07	0,11	0,11	0,16	0,15	0,15	0,17
(pH - pHmax) /pHmáx		0,22	0,30	0,32	0,23	0,24	0,22	0,21	0,18	0,19	0,19	0,17
Caudal aportante WFP gris												
Molibdeno	m ³	928.875	715.140	734.782	1.521.548	1.616.020	1.948.004	2.841.980	1.971.451	1.742.653	1.447.095	1.033.715
Sulfato	m ³	2.000.933	1.502.766	1.683.195	3.295.672	3.757.512	3.973.476	5.245.998	3.949.779	3.171.065	2.829.966	2.210.715
pH min	m ³	198.830	-2.837	-51.832	283.705	259.429	497.656	750.085	767.949	532.575	471.494	402.864
pH máx	m ³	451.122	126.757	196.118	681.809	883.567	975.993	1.701.272	851.329	699.801	582.192	410.714
WFP Gris concentrado de cobre DEI												
Concentrado producido	ton concentrado/mes	116.972	107.054	124.979	83.743	79.937	113.982	126.051	120.513	120.118	122.803	130.122
WFP Gris Molibdeno	m ³ agua /ton concentrado	7,9	6,7	5,9	18,2	20,2	17,1	22,5	16,4	14,5	11,0	8,0
WFP Gris Sulfato	m ³ agua /ton concentrado	17,1	14,0	13,5	39,4	47,0	34,9	41,6	32,8	26,4	23,0	17,0
WFP Gris pH	m ³ agua /ton concentrado	3,9	4,0	4,0	8,2	11,1	8,6	11,1	7,1	5,8	4,7	3,2

Anexo E: Cálculo mensual de la WFP del concentrado de cobre de la DET, años 2008 y 2010.

Tabla E.1: WFP Concentrado de cobre de la DET, valores mensuales para el año 2008 escenario 1.

Mes	WFP Azul												
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	
Concentrado Producido	[Ton concentrado/mes]	116.972	107.054	124.979	83.743	79.937	113.582	126.031	120.513	120.118	122.806	130.122	133.039
Ev. embalse Sagos	[m ³ agua/mes]	97.134	73.600	61.340	38.636	19.173	10.834	11.751	17.003	25.904	41.439	60.612	77.930
Ev. Espesadores	[m ³ agua/mes]	11.830	8.992	7.513	4.723	2.342	1.322	1.436	2.078	3.287	5.063	7.403	9.321
Total evaporación	[m ³ agua/mes]	109.214	82.592	69.078	43.378	21.516	12.146	13.187	19.086	30.191	46.501	68.017	87.450
Agua incorporada en el producto	[m ³ agua/mes]	11.697	10.705	12.498	8.374	7.994	11.398	12.605	12.051	12.012	12.280	13.012	13.304
Trasvase de cuenca	[m ³ agua/mes]	4.044.034	2.941.037	3.232.845	2.096.188	2.402.213	3.380.283	3.515.707	3.571.239	3.352.939	3.679.040	3.549.876	3.886.733
WFP azul Concentrado de Cobre meses año 2008	[m ³ agua/Ton concentrado]	33.6	28.3	26.7	25.6	30.4	29.9	28.1	29.9	23.3	30.4	27.9	30.0
WFP Gris													
Efluente Embalse Carén	[m ³ agua/mes]	1.173.744	1.317.839	1.299.629	1.311.811	1.637.168	8.659.181	7.991.347	23.693.636	9.733.120	6.903.360	6.036.834	1.339.200
Cañal de infiltraciones anexo	[m ³ agua/mes]	37.974	95.818	67.927	45.014	72.053	292.350	290.477	423.261	349.446	313.459	201.139	111.974
% asociado a producción concentrado de cobre	%	93	93	94	91	96	94	94	92	94	93	92	91
Descarga a estero Carén asociada a concentrado	[m ³ agua/mes]	1.147.532	1.318.931	1.279.333	1.237.995	1.630.498	8.426.194	7.751.412	22.083.918	9.332.825	6.747.210	5.747.567	1.323.069
Concentración Sulfato descarga estero Carén	[mg/l]	2.066	2.028	2.200	2.224	1.934	1.560	1.576	1.320	1.372	1.623	1.763	1.784
Razon Concentración: descarga y norma DS 30	-	1.03	1.01	1.10	1.11	0.96	0.78	0.79	0.66	0.69	0.81	0.88	0.89
Caudal aporante WFP Gris Sulfato	[m ³ agua/mes]	1.183.421	1.337.273	1.407.333	1.376.799	1.730.207	6.381.331	6.107.299	14.576.395	6.166.412	3.474.652	3.063.877	1.180.032
WFP gris Concentrado de Cobre meses año 2008	[m ³ agua/Ton concentrado]	10.1	12.5	11.3	16.4	22.3	37.7	48.5	32.0	33.4	44.6	38.9	8.9
WFP Concentrado de Cobre meses año 2008	[m ³ agua/Ton concentrado]	43.7	40.8	37.9	42.1	52.7	87.6	76.6	62.8	56.7	75.0	66.8	38.8

Tabla E.2: WFP Concentrado de cobre de la DET, valores mensuales para el año 2008 escenario 2.

Mes	WFP Azul												
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	
Concentrado Producido	[Tot.concentrado,mes]	116.972	107.054	124.979	83.943	79.987	113.982	126.051	120.513	120.118	122.808	130.122	133.039
Ev. embalse Sapos	[m ³ agua/mes]	97.324	73.600	61.340	33.656	19.173	10.824	11.751	17.008	26.924	41.439	60.612	77.920
Ev. Espesadores	[m ³ agua/mes]	11.890	8.992	7.318	4.723	2.342	1.322	1.436	2.078	3.287	5.063	7.403	9.321
Total evaporación	[m ³ agua/mes]	109.214	82.592	69.058	43.378	21.516	12.146	13.187	19.086	30.191	46.501	68.017	87.450
Agua incorporada en el producto	[m ³ agua/mes]	11.697	10.705	12.495	8.374	7.994	11.398	12.605	12.051	12.012	12.280	13.012	13.304
Trasvase de cuenca	[m ³ agua/mes]	4.044.084	2.941.097	3.232.345	2.036.153	2.402.213	3.382.285	3.518.707	3.571.299	3.332.959	3.679.040	3.549.876	3.886.753
WFP azul Concentrado de Cobre meses año 2008	[m ³ agua/Tot.concentrado]	35.6	28.3	26.7	25.6	30.4	29.9	28.1	29.9	28.3	30.4	27.9	30.0
WFP Gris													
Efuentes Embalses Carén	[m ³ agua/mes]	1.173.744	1.317.859	1.229.629	1.311.811	1.857.168	8.659.181	7.931.347	23.698.656	9.573.120	6.903.360	6.056.854	1.339.200
Canal de infiltraciones muro	[m ³ agua/mes]	57.974	95.818	67.995	45.014	72.038	292.350	290.477	425.261	369.446	313.459	201.139	111.974
% asociado a producción concentrado de cobre	%	93	93	94	91	96	94	94	92	94	93	92	91
Descarga a estero Carén asociado a concentrado	[m ³ agua/mes]	1.147.552	1.318.921	1.179.333	1.237.995	1.850.498	8.426.194	7.751.412	22.085.918	9.152.625	6.747.210	5.747.567	1.323.069
Concentración Sulfato descarga estero Carén	[mg/l]	2.066	2.028	2.200	2.224	1.924	1.562	1.576	1.320	1.372	1.623	1.763	1.784
Razon Concentración descarga y norma DS 80	-	1.03	1.01	1.10	1.11	0.96	0.78	0.79	0.66	0.69	0.81	0.83	0.89
Caudal oportuno WFP Gris Sulfato	[m ³ agua/mes]	1.185.421	1.337.273	1.407.535	1.376.799	1.780.207	6.381.531	6.107.299	14.576.595	6.416.412	5.474.652	5.063.877	1.180.052
WFP gris Concentrado de Cobre meses año 2008	[m ³ agua/Tot.concentrado]	10.1	12.5	11.3	16.4	22.3	37.7	48.5	121.0	53.4	44.6	33.9	3.9
WFP Concentrado de Cobre meses año 2008	[m ³ agua/Tot.concentrado]	45.7	40.8	37.9	42.1	52.7	87.6	76.6	150.8	81.7	75.0	66.8	38.8

Tabla E.3: WFP Concentrado de cobre de la DET, valores mensuales para el año 2010 escenario 1.

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Agosto	Sep	Oct	Nov	Dic
WFP Anl												
Concentrado Producido	[Ton/mes] 19,802	120,044	121,425	124,273	129,771	127,083	130,302	130,044	121,425	124,273	129,771	127,083
Ev. embalse Segos	[m ³ agua/mes] 97,324	73,620	61,540	38,656	19,173	10,324	11,751	17,008	26,904	41,439	60,612	77,930
Ev. Espesadores	[m ³ agua/mes] 11,890	8,992	7,518	4,733	2,342	1,322	1,436	2,078	3,287	5,053	7,405	9,221
Total evaporación	[m ³ agua/mes] 109,214	82,612	69,058	43,373	21,516	12,146	13,187	19,086	30,191	46,501	68,017	87,150
Agua incorporada en el producto	[m ³ agua/mes] 13,080	12,024	12,143	12,427	12,977	12,708	13,031	12,904	12,143	12,427	12,977	12,708
Trasfase de cuenta	[m ³ agua/mes] 1,995,474	3,173,662	3,473,626	3,033,834	3,306,350	3,219,147	3,333,982	3,412,733	3,375,516	3,431,105	3,489,237	3,350,093
WFP anil Concentrado de Cobre meses año 2010	[m ³ agua/mes] 33.4	27.3	39.3	25.0	25.7	25.5	27.2	26.7	28.1	28.1	27.5	28.5
WFP Gns												
Ebiente Embales: Café	[m ³ agua/mes] 1,173,744	1,317,859	1,299,629	1,311,811	1,577,163	8,539,131	1,931,347	21,698,656	9,571,120	6,920,340	6,084,354	1,139,300
Canal de infiltraciones muro	[m ³ agua/mes] 57,974	95,818	67,997	45,014	72,058	292,536	290,477	423,261	369,446	313,459	201,139	111,974
% asociado a producción concentrado de cobre	94	93	94	91	95	94	94	93	94	93	92	91
Descarga a estero Carén asociado a concentrado	[m ³ agua/mes] 1,147,632	1,318,021	1,279,333	1,257,995	1,530,493	8,426,194	1,731,412	21,085,918	9,352,325	6,747,210	5,741,367	1,123,069
Concentración Sulfato descarga estero Carén	[mg/l] 3,366	2,023	3,200	2,234	1,924	1,592	1,376	1,120	1,372	1,623	1,761	1,734
Carén Concentración descarga y norma DS 80	-	1.01	1.10	1.11	0.96	0.73	0.79	0.66	0.69	0.91	0.88	0.89
Caudal aportante WFP Gns Sulfato	[m ³ agua/mes] 1,185,421	1,337,273	1,407,335	1,376,799	1,780,207	6,331,331	6,107,399	14,576,595	6,416,412	5,474,632	5,063,377	1,130,032
WFP gns Concentrado de Cobre meses año 2010	[m ³ agua/mes] 9.1	11.1	11.6	11.1	13.7	51.3	46.7	121.4	52.8	44.1	39.0	9.3
WFP Concentrado de Cobre meses año 2010	[m ³ agua/mes] 37.5	38.4	40.9	36.1	39.5	77.3	74.9	150.1	81.0	72.1	66.5	38.1

Tabla E.4: WFP Concentrado de cobre de la DET, valores mensuales para el año 2010 escenario 2.

Mes	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
WFP Agua												
Concentrado Producido	[m ³]	116.972	107.654	124.979	85.546	113.982	126.051	120.313	120.116	122.906	150.122	133.099
Ev. Tanque Carén Aguas claras	[m ³ / _{agua} (mes)]	592.166	447.821	374.435	233.200	116.669	71.501	103.483	163.699	252.134	368.794	474.163
Ev. Tanque Carén lodos	[m ³ / _{agua} (mes)]	1.601.933	1.211.449	1.012.934	686.265	315.387	193.425	279.957	442.840	882.076	997.664	1.232.710
Ev. Ambalás Sepos	[m ³ / _{agua} (mes)]	97.324	73.860	61.340	38.656	19.173	11.731	17.005	26.904	41.439	60.612	77.930
Ev. Espesadores	[m ³ / _{agua} (mes)]	11.830	3.992	7.518	4.725	2.342	1.456	2.078	3.287	5.063	7.405	9.521
Agua incorporada en el producto	[m ³ / _{agua} (mes)]	11.697	10.705	12.498	8.374	7.994	12.625	12.051	12.012	12.239	15.012	13.304
WFP azul Concentrado de Cobre mes/año 2009	[m ³ / _{agua} /Ton _{Cu}]	19.8	16.4	11.3	11.0	5.3	2.3	3.4	5.4	3.1	11.1	14.0
WFP Gas												
Efluente Embalse Carén	[m ³ / _{agua} (mes)]	1.112.744	1.317.329	1.299.629	1.311.811	1.857.168	7.991.347	33.695.656	9.573.120	6.903.360	6.066.534	1.239.200
Canal de infiltraciones muro	[m ³ / _{agua} (mes)]	57.974	55.818	67.997	45.014	72.038	290.477	435.261	369.446	313.439	201.092	1119.444
% asociado a producción concentrado de cobre	%	99.3	96.3	99.5	91.2	93.9	94.3	91.6	94.1	93.5	92.1	91.2
Descarga a estero Carén asociado a concentrado	[m ³ / _{agua} (mes)]	1.147.532	1.318.921	1.279.333	1.257.995	1.850.498	7.751.412	22.085.918	9.572.862	6.747.210	5.747.567	1.233.069
Concentración sulfato descarga estero Carén	[mg/l]	2.065	2.028	2.200	2.224	1.924	1.576	1.320	1.372	1.623	1.763	1.734
Ratios Concentración descarga y rooma DS 30	-	1.033	1.013915	1.10021	1.11212	0.962015	0.763895	0.659935	0.65804	0.811395	0.801355	0.691905
Cantidad aportante WFP Gas Salfiño	[m ³ / _{agua} (mes)]	1.185.421	1.337.273	1.407.333	1.335.799	1.780.207	6.107.299	14.576.395	6.416.412	5.474.652	5.063.577	1.130.052
WFP gas Concentrado de Cobre mes/año 2009	[m ³ / _{agua} /Ton _{Cu}]	10.1	12.5	11.3	16.4	22.3	48.5	121.0	53.4	44.6	33.9	8.9
WFP Concentrado de Cobre mes/año 2009	[m ³ / _{agua} /Ton	29.9	28.9	23.0	27.5	28.0	50.8	124.4	53.8	52.7	50.1	22.8

