



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

***DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA PARA EL ESTUDIO DE LA  
SUSTENTABILIDAD HÍDRICA DE LA INDUSTRIA MINERA MEDIANTE  
EL PRONÓSTICO Y EVALUACIÓN DE LA HUELLA HÍDRICA EN  
ESCENARIOS DE VARIABILIDAD CLIMÁTICA Y OPERACIONAL***

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

**IGNACIO ESTEBAN FARIAS GUTIÉRREZ**

PROFESOR GUÍA:  
JORGE GUARDA AGUIRRE

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
JAMES MC PHEE TORRES  
MARCELO OLIVARES ALVEAL

SANTIAGO DE CHILE  
2016

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL  
TITULO DE: Ingeniero Civil  
POR: Ignacio Farías Gutiérrez  
FECHA: Diciembre 2016  
PROFESOR GUÍA: Jorge Guarda Aguirre

**DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA PARA EL ESTUDIO DE LA  
SUSTENTABILIDAD HÍDRICA DE LA INDUSTRIA MINERA MEDIANTE EL  
PRONÓSTICO Y EVALUACIÓN DE LA HUELLA HÍDRICA EN ESCENARIOS DE  
VARIABILIDAD CLIMÁTICA Y OPERACIONAL**

El agua es un tema primordial para la minería chilena debido a la escasez hídrica en los sitios en los que se emplazan las faenas. También es vital la preocupación que existe de parte de las comunidades en cuanto a la disponibilidad y calidad del recurso. Por lo anterior se hace necesaria la implementación de iniciativas de sustentabilidad hídrica que contribuyan al uso responsable del recurso además de ser transversales para todas las faenas mineras y de fácil entendimiento para todos los actores involucrados.

El presente trabajo se centra en la iniciativa denominada Huella Hídrica y tiene como objetivo desarrollar una metodología de fácil aplicación que permita su cálculo en faenas mineras chilenas considerando la variabilidad climática y operacional utilizando el software GoldSim. Para este cometido primero se realiza un estudio de la Huella Hídrica y una comparación con otras iniciativas de sustentabilidad hídrica, para luego conceptualizar una faena minera tipo identificando las variables de entrada y parámetros necesarios para el cálculo de la Huella Hídrica azul del concentrado de cobre. Se considera además la incertidumbre ya sea operacional o exógena que rige cada proceso. Se destaca la inclusión de un modelo de recirculación de aguas para tranques de relave (WRM). Luego, al modelo resultante de esta conceptualización, se le realiza un análisis de sensibilidad y de dominancia estocástica con el fin de identificar las variables y/o parámetros críticos sobre los cuales se definen escenarios o esquemas de operación relevantes para la industria minera. Los datos para la modelación se obtienen en base a trabajos realizados por Garcés (2011) y Peña & Huijbregts (2014), mientras que la metodología se basa en el manual de WFN (Hoekstra, et al., 2011) y las recomendaciones de Younger (2006) para la minería.

Sobre los resultados generales, la incertidumbre a la cual está sujeta el sistema genera variaciones que van desde un 3% hasta un 12% de la media, en [m<sup>3</sup>/ton mineral], dependiendo del caso. Se obtiene además que los parámetros y variables referentes al circuito de relaves son las de mayor relevancia para la Huella Hídrica y que aquellas de origen climático, aunque importantes, en escenarios reales no generan impactos significativos en los resultados.

## AGRADECIMIENTOS

---

El camino que significó llegar al final de este trabajo no fue resultado solo mío. Más aun toda esa gente que me acompañó en toda esta gran etapa merece más de lo que se puede escribir en el papel. Si se siente aludido por estas palabras tómese la libertad de cobrarme una cerveza o equivalentes porque los buenos momentos hay que repetirlos.

Quiero comenzar agradeciendo a la Jesu, mi compañera en todo este proceso por su excelente disposición frente a todos mis caprichos y arrebatos. Por siempre apañar en todo y a todo, algo en que siempre le quedé al debe.

Familia, madre y padre porque al final del día siempre estuvieron ahí y aunque costó, lograron entenderme.

Amigos del colegio, que a punta de chelas y buena onda se ganaron un sin número de fines de semana los cuales tenía que dedicar full a temas académicos, pero lo valía.

Al grupo que partió como de estudio y termino convirtiéndose en amigos de la parte final de esta etapa. Abel, Enzo, Michelle y Pauli por todos esos momentos que nos sacaban de la rutina y a veces terminaban en arrepentimiento.

Amigos de sección y de civil, nunca faltaba con quien juntarse para distender los ánimos y descansar un rato del ritmo de la universidad.

A toda la gente en WSP que me recibió de forma inmejorable y me permitió desarrollar este trabajo de forma muy amena. Al Carlos ofrecerme esta oportunidad y a Jorge por la ayuda brindada. A la gente del "Call Center" por hacer más llevaderos los días y siempre ser la ayuda inmediata para todas esas preguntas que surgían.

Profesores, James Mc Phee y Marcelo Olivares por aceptar ayudarme durante este tiempo siempre con excelente disposición y guía a lo largo de este trabajo.

Finalmente no me queda más que reiterar las gracias a todos además de a toda la gente con la que compartí y de una u otra forma me ayudo a lograr este objetivo.

# TABLA DE CONTENIDO

<b>1</b>	<b><i>Introducción y objetivos</i></b>	<b>1</b>
1.1	Motivación	1
1.2	Objetivo General	2
1.3	Objetivos Específicos	2
<b>2</b>	<b><i>Estudio de la huella hídrica como indicador de sustentabilidad y revisión de antecedentes</i></b>	<b>3</b>
2.1	Preámbulo acerca de las iniciativas de sustentabilidad hídrica	3
2.2	Sobre la Huella Hídrica	4
2.3	Definición y componentes de la Huella Hídrica	4
2.3.1	Agua real y virtual, consumos directos e indirectos	5
2.3.2	Unidades de la Huella Hídrica	5
2.3.3	Consideraciones espaciales y temporales	6
2.3.4	Huella Hídrica Azul (HHA)	6
2.3.5	Huella Hídrica Verde (HHV)	7
2.3.6	Huella Hídrica Gris (HHG)	7
2.3.7	Normativas de descarga a cuerpos de agua en Chile	8
2.4	Comparación de iniciativas de sustentabilidad hídrica	8
2.4.1	CDP Water	8
2.4.2	Water Accounting Framework (WAF)	9
2.4.3	ISO Water Footprint Standard (14046)	9
2.4.4	WBCSD Global Water Tool	9
2.4.5	CEO Water Mandate	10
2.4.6	Alliance for Water Stewardship	10
2.5	Minería Chilena y la problemática del agua	10
2.6	Huella Hídrica en minería	13
2.7	Huella Hídrica de la minería del cobre en Chile	15
2.8	Water recovery model	16
2.9	Goldsim	18
<b>3</b>	<b><i>Conceptualización de la Huella Hídrica en la minería de cobre Chilena</i></b>	<b>21</b>
3.1	Definición del producto a estudiar	21
3.2	Límite temporal	22
3.3	Límite Espacial y Definición de la faena minera tipo	22
3.4	Conceptualización del plan minero tipo	23
3.5	Descripción de consumos de agua a considerar	23
3.5.1	Mina y Chancado/Molienda	23
3.5.1.1	Consumos Directos	24
3.5.1.2	Consumos Indirectos	24
3.5.2	Concentración	25
3.5.2.1	Consumos Directos	25
3.5.2.2	Adaptación y Parámetros Water Recovery Model (WRM)	28
3.5.2.3	Consumos Indirectos	30
3.6	Estructuración del modelo	31

<b>3.7</b>	<b>Fuentes de incertidumbre/Dispersión y generación de variables estocásticas</b>	<b>33</b>
3.7.1	Variabilidad Consumos Directos mina/chancado	33
3.7.2	Variabilidad Consumos Indirectos mina/chancado	33
3.7.3	Variabilidad Consumos Directos concentración	33
3.7.4	Variabilidad Consumos Indirectos concentración	34
<b>4</b>	<b>Metodología Análisis Riesgo Huella Hídrica</b>	<b>36</b>
<b>4.1</b>	<b>Análisis Sensibilidad Modelo Huella Hídrica</b>	<b>36</b>
<b>4.2</b>	<b>Evaluación de Impacto de Variables Sensibles</b>	<b>37</b>
4.2.1	Dominancia estocástica de primer orden (DEP)	38
4.2.2	Dominancia estocástica de segundo orden (DES)	39
<b>4.3</b>	<b>Escenarios y Esquemas de Operación</b>	<b>40</b>
4.3.1	Esquema de operación base	40
4.3.2	Esquema de operación 1: Relave en pasta	41
4.3.3	Esquema de operación 2: Incorporación de agua salada-desalinizada	42
4.3.4	Esquema de operación 3: Reserva (stockpile) de mineral	43
4.3.5	Escenario 1: Aumento evaporación y disminución de la precipitación	44
4.3.6	Escenario conjunto: Nueva fuente de agua salada en respuesta a un aumento de evaporación y disminución de la precipitación	44
<b>5</b>	<b>Resultados y Análisis</b>	<b>46</b>
<b>5.1</b>	<b>Análisis de sensibilidad</b>	<b>46</b>
<b>5.2</b>	<b>Evaluación de Impacto de Variables Sensibles</b>	<b>50</b>
<b>5.3</b>	<b>Escenarios y Esquemas de Operación</b>	<b>53</b>
5.3.1	Esquema de operación base	54
5.3.2	Esquema de operación 1: Relave en pasta	56
5.3.3	Esquema de operación 2: Incorporación de agua salada-desalinizada	59
5.3.4	Esquema de operación 3: Reserva (stockpile) de mineral	61
5.3.5	Escenario 1: Aumento evaporación y disminución de la precipitación	63
5.3.6	Escenario conjunto: Nueva fuente de agua salada en respuesta a un aumento de evaporación y disminución de la precipitación	65
<b>5.4</b>	<b>Comparación de resultados de escenarios/esquemas de operación y análisis crítico</b>	<b>68</b>
<b>6</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>73</b>
<b>7</b>	<b>Bibliografía</b>	<b>76</b>
<b>Anexo A: Datos Climáticos</b>		<b>79</b>
<b>Anexo B: Procesamiento de datos de evaporación</b>		<b>80</b>
<b>Anexo C: Gráficos análisis de sensibilidad para 8 variables/parámetros más sensibles</b>		<b>81</b>

## Índice de Figuras

Figura 1: Procesamiento de Minerales Sulfurados por Flotación (Cochilco, 2010)	11
Figura 2: Procesamiento Hidrometalúrgico de producción de cobre (Cochilco, 2010)	12
Figura 3: Conceptualización espacial de Huella Hídrica en una faena minera (Younger, 2006).	13
Figura 4: Modelo conceptual pérdidas water recovery model (Wels & Robertson, 2003).	17
Figura 5: Esquema de simulación de Monte Carlo	19
Figura 6: Esquema de procesos que generan Huella Hídrica	22
Figura 7: Limite espacial para el cálculo de la Huella Hídrica	25
Figura 8: Esquema de pérdidas proceso concentración.	26
Figura 9: Proceso de formación de una playa activa (gris) (Cifuentes & Pinto, 2014)	30
Figura 10: Esquema para la metodología del análisis de riesgo	36
Figura 11: Clasificación relaves según contenido de sólidos (Cacciuttolo, et al., 2015)	41

## Índice de Gráficos

Gráfico 1: Ejemplo dominancia estocástica de primer orden donde "j" domina a "i" en el sentido de DEP para una disminución de la HHA.	39
Gráfico 2: Ejemplo dominancia estocástica de segundo orden donde "j" domina a "i" en el sentido de DES para una disminución de la HHA.	40
Gráfico 3: Evolución Cp relave en Escenario Operación 1 previo al muestreo	41
Gráfico 4: Implementación de fuentes de agua alternativas para esquema de operación 2 previo al muestreo.	42
Gráfico 5: Valores de producción en esquema de operación 3 previo al muestreo.	43
Gráfico 6: Parámetros climáticos en escenario 1 previo al muestreo.	44
Gráfico 7: Fuentes de agua en escenario conjunto previo al muestreo	45
Gráfico 8: Parámetros climáticos en escenario conjunto previo al muestreo.	45
Gráfico 9: Resultados análisis de sensibilidad HHA concentrado de cobre (20 mayores)	46
Gráfico 10: Resultado análisis sensibilidad HHA concentrado de cobre (10 inferiores)	47
Gráfico 11: Valores normalizados de los 8 parámetros más sensibles de la HHA del concentrado de cobre.	48
Gráfico 12: Distribución probabilidad precipitación media anual truncada en 0 para valores negativos	50
Gráfico 13: Densidad probabilidad HHA 8 parámetros/variables sensibles + caso base	51
Gráfico 14: Distribución de probabilidad acumulada HHA 8 parámetros/variables sensibles + caso base	51
Gráfico 15: Plan minero tipo muestreado con 10000 realizaciones	53
Gráfico 16: Huella Hídrica total caso base	54
Gráfico 17: Huella Hídrica directa caso base	55
Gráfico 18: Huella Hídrica indirecta caso base	55
Gráfico 19: Comparación media HHA por proceso caso base	55
Gráfico 20: Pérdidas WRM caso base	56
Gráfico 21: Huella Hídrica total esquema de operación relave en pasta	57
Gráfico 22: Huella Hídrica directa esquema de operación relave en pasta	57
Gráfico 23: Huella Hídrica indirecta esquema de operación relave en pasta	57
Gráfico 24: Comparación media HHA por proceso relave en pasta	58
Gráfico 25: Pérdidas WRM relave en pasta	58
Gráfico 26: Huella Hídrica total esquema de operación con nuevas fuentes de agua	59
Gráfico 27: Huella Hídrica directa esquema de operación con nuevas fuentes de agua	59
Gráfico 28: Huella Hídrica indirecta esquema de operación con nuevas fuentes de agua	60
Gráfico 29: Comparación media HHA por proceso con nuevas fuentes de agua	60
Gráfico 30: Pérdidas WRM con nuevas fuentes de agua	61
Gráfico 31: Huella Hídrica total esquema de operación con reserva mineral	61
Gráfico 32: Huella Hídrica directa esquema de operación con reserva mineral	62
Gráfico 33: Huella Hídrica indirecta esquema de operación con reserva mineral	62
Gráfico 34: Comparación media HHA por proceso con reserva mineral	62

Gráfico 35: Perdidas WRM con reserva mineral	63
Gráfico 36: Huella Hídrica total escenario clima desfavorable	64
Gráfico 37: Huella Hídrica directa escenario clima desfavorable	64
Gráfico 38: Huella Hídrica indirecta escenario clima desfavorable	64
Gráfico 39: Comparación media HHA por proceso con clima desfavorable	65
Gráfico 40: Consumos WRM con clima desfavorable	65
Gráfico 41: Huella Hídrica total escenario conjunto	66
Gráfico 42: Huella Hídrica directa escenario conjunto	66
Gráfico 43: Huella Hídrica indirecta escenario conjunto	67
Gráfico 44: Comparación media HHA por proceso en escenario conjunto	67
Gráfico 45: Perdidas WRM en escenario conjunto	67
Gráfico 46: Comparación media HHA total para los escenarios/esquemas de operación	68
Gráfico 47: Comparación media HHA directa para los escenarios/esquemas de operación	69
Gráfico 48: Comparación media HHA indirecta para los escenarios/esquemas de operación	69
Gráfico 49: Comparación percentil 15% HHA total para los escenarios/esquemas de operación	70
Gráfico 50: Comparación percentil 85% HHA total para los escenarios/esquemas de operación	70

## **Índice de Tablas**

Tabla 1: Parámetros tranque Talabre para utilización del WRM	28
Tabla 2: Parámetros WRM referentes a dimensiones del tranque	29
Tabla 3: Parámetros climáticos WRM referentes a ubicación del tranque	30
Tabla 4: Ubicación geográfica estaciones meteorológicas utilizadas (WGS 84)	30
Tabla 5: Dispersiones parámetros del relave WRM	34
Tabla 6: Dispersión parámetros de área para tranque en WRM	34
Tabla 7: Dispersión parámetros climáticos WRM	34
Tabla 8: Tasas de variación de la HHA con respecto a un aumento de la variable/parámetro (signo negativo indica disminución).	49
Tabla 9: Tasas de variación de la HHA con respecto a una disminución de la variable/parámetro (signo negativo indica aumento).	49
Tabla 10: Resumen dominancia estocástica (estrictamente analítico) donde "PO" indica dominancia de primer orden y "SO" indica dominancia de segundo orden.	52
Tabla 11: Variaciones HHA total, directa e indirecta en los distintos percentiles c/r a la media	54
Tabla 12: Contribución por proceso a la HHA total con reserva mineral	63

## **Índice de Ecuaciones**

( 1 )	7
( 2 )	16
( 3 )	16
( 4 )	17
( 5 )	17
( 6 )	17
( 7 )	17
( 8 )	17
( 9 )	28
( 10 )	28
( 11 )	28
( 12 )	37
( 13 )	37

# 1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

---

## 1.1 MOTIVACIÓN

La gestión del agua es un tema primordial para la minería debido a la escasez hídrica de los sitios en los que se emplazan las faenas. También resulta vital la preocupación que existe de parte de las comunidades en cuanto a la disponibilidad y calidad del recurso. Ante este escenario las empresas mineras suelen adquirir compromisos que se centran principalmente en el uso sustentable de las fuentes y en la reutilización del recurso durante sus procesos. Con el fin de reportar estos compromisos y sus resultados, las compañías mineras han comenzado a adoptar ciertas iniciativas o marcos regulatorios que buscan acercar la información a la comunidad. Algunos ejemplos de éstas son el “CDP water disclosure”, y la “Global Reporting Initiative (GRI)”, entre otros (WBCSD water, 2012).

Otra de estas iniciativas que intenta aportar a la sustentabilidad y que en el último tiempo ha tomado fuerza es la de la huella hídrica (Water Footprint Network, 2009), concepto desarrollado por Hoekstra (2002) y cuyo mayor uso se ha dado a nivel de rubros como la agricultura o a escala de países (Hoekstra & Chapagain, 2007; Hoekstra, 2003).

En el ámbito de la minería existen estudios previos que intentan acercar el concepto de huella hídrica a esta industria. Younger (2006) realizó una primera aproximación a cómo se podría calcular la huella hídrica de una faena minera definiendo alcances y principales obstáculos para su cuantificación, pero ya destacaba en dicho estudio el potencial del indicador relacionado con temas de sustentabilidad. En Chile, Garcés (2011) logra calcular la huella hídrica del concentrado de cobre de El Teniente, pero sólo considerando los usos de aguas directos, teniendo como principal dificultad la definición de los límites geográficos en el cálculo. Peña (2013) aborda el cálculo de la huella hídrica de las faenas mineras chilenas (Óxidos o sulfuros) considerando consumos de agua directos, como también logra cuantificar consumos de agua indirectos en forma de insumos, aplicando esta metodología satisfactoriamente a la operación de Codelco Norte. Es valioso destacar que hasta el día de hoy los estudios mencionados utilizan escenarios determinísticos basados en datos históricos, lo cual deja un espacio para trabajar estocásticamente con las proyecciones del método y su afectación frente a distintas fuentes de variabilidad.

Por lo anterior, se busca analizar partes de la huella hídrica que contribuyan a los compromisos adquiridos enfocados en la sustentabilidad hídrica en el tiempo, con el fin de ampliar el alcance del uso sustentable y responsable del agua que se tiene en la industria. Se hace necesario entonces lograr un mejor entendimiento de los efectos que tienen las faenas mineras sobre el área donde se emplazan (en términos del recurso hídrico) y a su vez lograr transmitir esto no sólo a la empresa involucrada, sino también a las distintas partes interesadas de forma directa o indirecta por una operación minera (autoridades, comunidades, agricultores, entre otros). Este estudio abordará esta temática mediante la inclusión de variables estocásticas y simulaciones de MonteCarlo

de proyecciones a futuro que permitan estudiar y evaluar las variaciones de la huella hídrica en pos de la sustentabilidad.

## **1.2 OBJETIVO GENERAL**

Desarrollar una metodología para el estudio de la sustentabilidad hídrica de la industria minera chilena mediante la implementación de una herramienta genérica en el software GoldSim para pronóstico y evaluación de la huella hídrica en escenarios de variabilidad tanto climática como operacional.

## **1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Estudio de la iniciativa de sustentabilidad huella hídrica; determinar su potencial aplicación a la industria minera y resaltar principales ventajas frente a otras iniciativas.
- Conceptualización de variables y parámetros requeridos para el cálculo de la huella hídrica en faenas mineras.
- Desarrollo de una herramienta para el cálculo de la huella hídrica, considerando incertidumbre, utilizando el software de modelación GoldSim.
- Análisis de riesgos para la industria minera sobre la base de los resultados de la huella hídrica en un entorno estocástico.

## **2 ESTUDIO DE LA HUELLA HÍDRICA COMO INDICADOR DE SUSTENTABILIDAD Y REVISIÓN DE ANTECEDENTES**

---

El presente capítulo resume las distintas iniciativas de sustentabilidad hídrica y la relevancia que han tomado en el último tiempo. El énfasis se centra en la iniciativa Huella Hídrica (Water Footprint), sus objetivos, indicadores, componentes y diferencias con las demás. Se recaba también la información relevante sobre los estudios de huella hídrica en Chile, en particular aquellos relacionados con la industria minera. Finalmente, se realiza una descripción de la norma chilena que regula las descargas de residuos a cuerpos de agua superficiales debido a su influencia en el cálculo de una parte de la huella hídrica.

### **2.1 PREÁMBULO ACERCA DE LAS INICIATIVAS DE SUSTENTABILIDAD HÍDRICA**

El concepto de “huella” en distintos ámbitos se viene desarrollando desde la década de los 90 cuando se intentó medir la sustentabilidad mediante un único indicador. En aquella ocasión el objetivo era lograr cuantificar los impactos de una población, (expresado en equivalentes de hectáreas de ecosistemas que se demandan) además de la asimilación de desechos producidos. Esto se ideó como indicador para medir la sustentabilidad de países y/o regiones y es conocido como “Huella Ecológica”. Posteriormente esta metodología fue adaptada y aplicada por empresas y organizaciones, lo cual le significó reconocimiento a nivel mundial (Wackernagel & Rees, 1996; Domenech, 2009). Con el paso del tiempo comienzan a surgir nuevos indicadores que buscan cuantificar distintos aspectos de la sustentabilidad y de diferentes formas. Un ejemplo ampliamente conocido por su relación con temas de calentamiento global es la Huella de Carbono y de forma posterior la Huella Hídrica. La adopción por parte de las empresas de éste y otros indicadores se entiende bajo el concepto de “responsabilidad social corporativa”. Se reconoce además la utilidad de los indicadores como herramienta para formulación y comunicación de nuevas políticas afines con el rendimiento de países e industrias en variados ámbitos (Singh, et al., 2009).

La historia indica que en el último tiempo la gestión del agua, en cuanto a consumo y calidad, no ha tomado relevancia suficiente. Consecuencia de esto es la escasa información acerca de los verdaderos factores que influyen en los consumos de agua, junto con la contaminación, que se puede asociar a un producto a lo largo de su cadena de suministro (Hoekstra, et al., 2011). Lo interesante radica en que, en general, las empresas manejan una gran cantidad de información en cuanto a sus consumos de agua, pero no realizan un manejo adecuado de esta ni menos una correcta presentación de los datos hacia el exterior (Côte, 2010).

Una serie de iniciativas han surgido como respuesta a esta problemática cuyos objetivos y alcances son variados. Algunas de estas son por ejemplo la Global Reporting Initiative (GRI) como reporte, CDP Water Disclosure como un indicador o ISO Water Footprint como una certificación.

## **2.2 SOBRE LA HUELLA HÍDRICA**

La Huella Hídrica es un concepto acuñado por Arjen Hoekstra (actualmente académico de la Universidad de Twente, Holanda) que se remonta al año 2002. Hoekstra toma conceptos introducidos por el profesor Tony Allan en 1993 sobre “agua virtual” y “agua incorporada” para crear un único indicador numérico que sintetizara los consumos de agua de productos y servicios a lo largo de una cadena de suministro. Este indicador permite incorporar factores espaciales y temporales extendiendo el alcance que se tiene sobre “uso de agua”. El interés por el indicador crece de manera rápida, siendo incorporado por importantes compañías del rubro alimenticio tales como Unilever, Heineken, Coca-Cola y Nestle, entre otras. Mediante el uso del indicador, comprueban la alta dependencia que tienen del recurso y los riesgos que se desprenden de esto (WFN, 2016).

Finalmente el año 2008 Hoekstra junto a actores relevantes de las industrias, organizaciones gubernamentales, academia y civiles, fundan el Water Footprint Network con el objetivo de juntar a todo el capital humano posible en pos de demostrar que la Huella Hídrica es una alternativa viable para evaluar y posteriormente solucionar los desafíos que presenta el uso no sustentable del agua.

## **2.3 DEFINICIÓN Y COMPONENTES DE LA HUELLA HÍDRICA**

La Huella Hídrica se define como el volumen total de agua consumida por la producción de un bien a lo largo de la totalidad de la cadena de suministro. Estos consumos tienen consideraciones ligadas al espacio y el tiempo en el cual son realizados, además de tener diferencias sobre calidad. Debido a la utilización de la cadena de suministro este indicador se incorpora en el llamado análisis de ciclo de vida o Life Cycle Assessment (LCA) (Hoekstra, et al., 2011). Se debe destacar además que la aplicación de este indicador no sólo está supeditada a productos, sino también a organizaciones, empresas, países, regiones, entre otros ejemplos.

El análisis de ciclo de vida fue desarrollado en 1990 por la Sociedad Toxicológica Medioambiental y Química (SETAC por sus siglas en inglés). Está orientada a la determinación de los impactos ambientales y consumos de un producto a lo largo de toda la vida de este, incorporando los impactos de los insumos utilizados para su obtención (Vergara, 2002). Comúnmente se refiere a él como el análisis “de la cuna a la tumba”. Básicamente al querer calcular la Huella Hídrica se está realizando un LCA, pero enfocado en agua.

El manual que da las directrices para el cálculo de la Huella Hídrica, “The Water Footprint Assessment Manual: Setting the Global Standard” (Hoekstra, et al., 2011), no sólo da el marco sobre el cual realizar los cálculos, sino también plantea una metodología para trabajar y mejorar el resultado obtenido. En otras palabras, una primera etapa busca el cálculo formal y cuantitativo de la Huella, luego se busca la evaluación de los impactos

asociados debido a los consumos, ya sean directos o indirectos (explicados a continuación) para terminar con la evaluación de la sustentabilidad del uso que se le está dando al recurso. El objetivo final de este trabajo es entregar un alcance y metodología que permitan el cálculo formal de la huella, pero con la adición de nuevos elementos.

La Huella Hídrica se divide en tres componentes las cuales se identifican por color, estas son: Huella Hídrica Azul (Blue Water Footprint), Huella Hídrica Verde (Green Water Footprint) y finalmente Huella Hídrica Gris (Gray Water Footprint). De aquí en más se denominara a cada una según sus siglas en español (HHA, HHV y HHG). Sus respectivas descripciones se explican más adelante.

### **2.3.1 Agua real y virtual, consumos directos e indirectos**

Dentro de todas las particularidades de la huella hídrica está el hecho de que reconoce no solo el agua que se consume de forma efectiva por un proceso o producto, sino que también considera el agua que es consumida con otros mecanismos, en otro momento y/o en otro lugar. Para entender esto se debe pensar que un consumo es más que el agua que está directamente involucrada y que “desaparece”, por ejemplo, como evaporación. Se debe incorporar y contabilizar el agua que se añade al producto a través de la cadena de suministro (LCA). Es decir, que si para un producto “X” se requiere en su manufactura un insumo “Y”, el consumo de agua necesario para generar “Y” también representa un consumo para “X”. La separación del origen de estos consumos es lo que lleva al concepto de consumos indirectos, los que representan el agua que no está incorporada físicamente en “X”, pero que de una u otra forma se quiere contabilizar en términos del impacto para el producto final. En contrapartida se desprende que el agua que sí se incorpora al producto es denominada como consumos directos (Hoekstra, et al., 2011).

Ligado a esto están los conceptos de agua virtual (símil del consumo indirecto) y real (símil del consumo directo). Estos hacen referencia solamente al volumen de agua total sin considerar la fuente desde donde fue obtenida. En términos prácticos, para el presente trabajo se usarán ambos términos de forma indistinta, considerando la diferencia entre lo que es real-directo y virtual-indirecto.

### **2.3.2 Unidades de la Huella Hídrica**

El cálculo de la Huella Hídrica se puede abordar desde distintas perspectivas, dependiendo del alcance y objetivos que se buscan. El enfoque más utilizado es el cálculo de la Huella de un producto o materia prima. De lo anterior se abre un abanico de potenciales unidades, donde las más típicas son de la forma  $[m^3/\text{ton producto}]$ . Las modificaciones a esta unidad dependerán del objetivo, pudiendo ser relevante realizar el cálculo pensando en algún insumo que sea parte de la cadena de suministro o los precios de este. En los demás enfoques (Huella Hídrica de industrias, negocios, países, procesos) el cálculo siempre toma unidades de  $[m^3/\text{tiempo}]$ , pudiendo hacerse un

parangón con el precio [ $m^3/\$$ ] si se tiene información monetaria asociada (Hoekstra, et al., 2011).

### **2.3.3 Consideraciones espaciales y temporales**

Como se mencionó en el punto **2.2**, una de las particularidades de la Huella Hídrica es la inclusión de factores espaciales y temporales. En cuanto a los factores espaciales, la elección de la extensión del dominio sobre el cual se calculará la Huella puede generar distintos resultados, esto debido a que un factor involucrado puede variar su cálculo según la definición que se da al límite espacial (Garcés, 2011). Sobre la temporalidad, la relevancia en este aspecto viene de la escala elegida. Es necesario considerar la importancia que tiene el agua en distintas estaciones ya que la disponibilidad no es la misma en estaciones secas o húmedas (escala diaria o mensual) o bien entre años secos y húmedos (escala anual) y por lo tanto el agua no tendrá el mismo valor según cuando entra al sistema (Hoekstra, et al., 2011).

### **2.3.4 Huella Hídrica Azul (HHA)**

La Huella Hídrica azul corresponde al consumo de agua fresca proveniente de fuentes subterráneas y superficiales a lo largo de la cadena de suministro (para el caso de los productos). Estos consumos se refieren a las pérdidas de todo tipo que se producen en los cuerpos de agua existentes en la cuenca involucrada. De otra forma se puede entender como el uso consuntivo del escurrimiento de una cuenca que no vuelve a estar disponible. En general se reconocen cuatro factores como los contribuyentes a este indicador (Hoekstra, et al., 2011)

1. Agua evaporada: toda aquella agua perdida en forma de evaporación desde suelo, espejos de agua, procesos, etc.
2. Agua incorporada al producto: agua utilizada de forma directa en los procesos de un producto en estudio. Los análisis en cuanto al uso del recurso por parte de las empresas se centran en este tipo de indicadores de uso directo (Côte, 2010).
3. Agua que sale de los límites espaciales: agua que es captada dentro de los límites geográficos elegidos y, aunque no es utilizada en algún proceso, es devuelta fuera de los límites y por lo tanto constituye un trasvase de cuencas.
4. Agua que no es devuelta en el mismo periodo de tiempo: agua captada en un periodo de tiempo y aunque no es incorporada directamente al producto, es devuelta en otro periodo que no tiene la misma disponibilidad hídrica.

Notar que por definición se utiliza la palabra “consumo” para referirse a las partes de la HHA, pero esta agua solo deja de estar disponible dentro de los límites definidos. Eventualmente esta agua siempre estará disponible en algún otro momento y lugar para otros usos respondiendo al ciclo del agua.

### 2.3.5 Huella Hídrica Verde (HHV)

La Huella Hídrica Verde es un indicador del consumo de la llamada “agua verde” que corresponde a la precipitación sobre la tierra que no produce escorrentía o recarga en un acuífero, o sea, el agua que queda parcialmente retenida en el suelo disponible para evaporación o transpiración a través de plantas. Entonces la HHV resulta ser el volumen de precipitación (fracción que no escurre) consumido por las plantas y árboles involucradas en el proceso. Se adiciona a esto el “agua verde” incorporada a plantas y árboles cosechados (Hoekstra, et al., 2011).

Se considera que la HHV no es relevante en procesos industriales o comerciales, pero es de gran importancia para el rubro forestal, agrícola y ganadero, aún más en zonas donde no se requiere riego exógeno (Schubert, 2011).

### 2.3.6 Huella Hídrica Gris (HHG)

Este indicador muestra el grado de contaminación de agua fresca que puede ser asociado a un proceso. Se define como el volumen de agua fresca requerido para asimilar una descarga de contaminantes basado en las concentraciones naturales existentes, además de la normativa de agua vigente en aquel cuerpo. En otras palabras, es la dilución de agua requerida para lograr que un compuesto se vuelva inofensivo (Hoekstra, et al., 2011). La fórmula para realizar el cálculo es:

$$HHG = \frac{V_{ef} * (C_{ef} - C_{act})}{C_{max} - C_{nat}} \quad (1)$$

*HHG: Huella Hídrica Gris* [ $m^3$ ].

*V<sub>ef</sub>: Volumen efluente (descargado) al cuerpo de agua* [ $m^3$ ].

*C<sub>ef</sub>: Concentración del contaminante en el efluente (descargado) al cuerpo de agua* [ $\frac{mg}{l}$ ].

*C<sub>nat</sub>: Concentración natural del contaminante en el cuerpo de agua receptor* [ $\frac{mg}{l}$ ].

*C<sub>max</sub>: Concentración máxima permitida del contaminante en el cuerpo receptor* [ $\frac{mg}{l}$ ].

*C<sub>act</sub>: Concentración del contaminante en el agua entrante al proceso* [ $\frac{mg}{l}$ ].

En caso de que se descargue más de un contaminante a un cuerpo receptor se debe elegir aquel contaminante que tenga asociado el mayor valor de HHG.

### **2.3.7 Normativas de descarga a cuerpos de agua en Chile**

Las descargas a cuerpos tanto subterráneos como superficiales se encuentran normadas en Chile por decretos supremos. Para el caso superficial existe el DS-90 (Decreto Supremo 90, 2000) y para las descargas a cuerpos subterráneos existe el DS-46 (Decreto Supremo 46, 2002). Ambos regulan las concentraciones máximas permitidas de una serie de elementos que se pueden descargar a los distintos cuerpos de forma genérica para todo el territorio chileno. Cuál(es) serán los contaminantes que tengan mayor influencia sobre el cálculo de la HHG dependerá del tipo de descarga. Otra arista son las normas secundarias de calidad de agua, las cuales presentan límites para alguna cuenca considerando sus particularidades. A la fecha las normas secundarias se encuentran en fase de ante-proyecto para el territorio chileno.

Por otro lado, empresas y proyectos de todo tipo deben presentar estudios de impacto ambiental, los cuales pueden incluir, en algunos casos, compromisos por parte del ejecutor que aseguren la minimización o mitigación de impactos. Por lo anterior es necesario considerar la Resolución de Calificación Ambiental (RCA) obtenida por cuanto esta definirá si la descarga se regirá por los límites que indica la norma u otros más estrictos argumentados en los estudios.

## **2.4 COMPARACIÓN DE INICIATIVAS DE SUSTENTABILIDAD HÍDRICA**

Como ya fue mencionado existe una serie de iniciativas de sustentabilidad hídrica con potencial aplicación a la minería. La elección de la huella hídrica por sobre otras se fundamenta en su capacidad de unificar en un único valor una serie de factores de consumo de agua. Paralelamente contribuye que su metodología es aplicable a todo tipo de industria, producto o zona, permitiendo que el indicador sea comparable entre estas (Hoekstra, et al., 2011).

La comparación entre iniciativas no es directamente posible debido a las diferencias de objetivos, alcances y metodologías, por lo cual lo enunciado a continuación solo tiene como objetivo justificar la elección de la iniciativa.

### **2.4.1 CDP Water**

Carbon Disclosure Project (CDP) es una iniciativa que busca que las empresas reporten y declaren sus impactos y compromisos medio ambientales. Como su nombre lo indica, su inicio está atado al concepto de “huella de carbono” que se complementa con una variante para agua. Toda compañía que responda el formulario requerido obtiene un puntaje, posteriormente es “rankeada” y la información declarada es publicada. Además, la organización crea un cuestionario para temas de agua que permite a las empresas evaluar, bajo un estándar establecido, medidas que contribuyan a su sustentabilidad hídrica (WBCSD water, 2012).

El problema de CDP radica en que la asignación de puntaje solo se basa en si la empresa reporta o no cierto dato, no teniendo impacto alguno el valor declarado. De esto se desprende que este proyecto solo está enfocado en promover que las industrias divulguen información de su funcionamiento. En este sentido la huella hídrica es claramente superior debido a que no solo requiere que los valores sean reportados (por ser variables de entrada a los cálculos) sino que también permite utilizar el resultado como herramienta de evaluación, por ejemplo, para medidas de gestión. En cuanto a lo positivo, CDP y CDP Water se aplican con éxito en gran número de industrias de todo tipo incluyendo la minería, más aun, en la minería chilena. Por otro lado, para la huella hídrica en la minería chilena, solo se conocen 2 casos en Chile (Garcés, 2011; Peña & Huijbregts, 2014)

#### **2.4.2 Water Accounting Framework (WAF)**

WAF es una metodología desarrollada por la Universidad de Queensland (Australia) y el Minerals Council of Australia (MCA) que busca contabilizar, reportar y comparar el manejo de aguas que se tiene en faenas mineras con un marco consistente y sin ambigüedades. La gran ventaja de esta iniciativa radica en que ha sido creada en específico para la minería (Mineral Council of Australia, 2012). Como desventaja está que solo considera los consumos de agua directos de la faena. O sea, en comparación con la huella hídrica, su alcance es mucho más limitado y uno podría asimilar WAF a lo que la HHA representa. No se conocen casos de su aplicación a minería chilena lo cual se puede deber a que sus resultados se usan para evaluar medidas internas de gestión y no de reporte.

#### **2.4.3 ISO Water Footprint Standard (14046)**

La aplicación de la huella hídrica puede variar de autor en autor permitiendo llegar a valores distintos según las consideraciones que se toman. Este estándar quiere crear un marco que explicita cómo se debe calcular la HH considerando distintos cuerpos de aguas y periodos. Se basa en el concepto de Huella Hídrica y en el enfoque LCA y busca una integración aun mayor entre valores de HH con el fin de hacer comparativas válidas y consistentes (Fundación Chile, 2016). Como consecuencia del nivel de detalle que busca, su aplicación puede ser compleja, lo que lo aleja de unos de los objetivos primarios de la huella hídrica en cuanto a que debe ser un indicador de simple entendimiento y comparación. Su uso a futuro probablemente sea relevante, pero se requiere aun divulgación y reporte de una mayor cantidad de información para lograr su aplicación.

#### **2.4.4 WBCSD Global Water Tool**

Esta iniciativa se enfoca en cuantificar riesgo hídrico en lugar de su huella, pero se basa en la misma idea de cuantificar todos los consumos y fuentes asociando a estos la variabilidad en la disponibilidad de dichas fuentes. El objetivo de lo anterior es identificar y tomar medidas sobre aquellas partes que presenten mayor riesgo debido a la cantidad

de agua que extraen de una fuente que puede estar muy estresada o en condiciones de escases (WBCSD water, 2012). Su uso es exclusivamente sobre consumos directos y por lo tanto no tiene el mismo nivel de alcance que la HH, no obstante, destaca como ventaja el hecho de considerar la disponibilidad de la fuente, lo cual no es utilizado en el cálculo de la huella hídrica. Adicionalmente, no se conocen casos de su aplicación dentro de Chile en minería.

#### **2.4.5 CEO Water Mandate**

Esta organización busca alinear a las compañías más grandes del mundo representadas directamente por sus CEO bajo el compromiso de implementar un marco de seis puntos enfocados en el manejo de aguas. Además, deben reportar anual y públicamente su progreso. Esta organización no tiene un indicador propiamente tal, sino que se enfoca en reportar la participación y cumplimiento de los puntos definidos. La organización además busca coordinar sus esfuerzos con otras iniciativas en pos de lograr sus objetivos (The CEO Water Mandate, 2011). Concretamente, la comparación con Huella Hídrica es imposible debido a la falta de indicadores. Aun así, es destacable debido a que nace directamente del mundo empresarial. En Chile, y en particular en minería, no se conoce de empresas participantes.

#### **2.4.6 Alliance for Water Stewardship**

Esta organización es una alianza global dedicada a promover el uso responsable del agua fresca. El objetivo se logra a partir de un estándar (AWS Standard) que propone un marco de 6 pasos para usuarios de agua que les permita identificar y cuantificar sus usos e impactos además de promover la colaboración y transparencia del uso sustentable del recurso en un contexto de cuenca. La alianza ofrece servicios de entrenamiento, acreditación y una membresía (Alliance for Water Stewardship, 2014). Por sí mismo, el estándar no ofrece un indicador concreto que permita la comparación directa con el indicador Huella Hídrica, pero se destaca la integración a nivel de cuenca que propone esta iniciativa. No se conocen casos de estudio en Chile por parte de la organización.

### **2.5 MINERÍA CHILENA Y LA PROBLEMÁTICA DEL AGUA**

Los procesos mineros son altamente dependientes de un continuo acceso al agua para su desarrollo, por ende, el recurso hídrico se constituye como un recurso estratégico para la actividad. Sumado a lo anterior, hay que considerar que la minería en Chile se desarrolla principalmente en la zona norte del país, zona de extrema aridez en la que el agua, tanto superficial como subterránea, es un bien escaso. Se desprende entonces que tanto la disponibilidad como la gestión del agua resultan clave en la minería actual (COCHILCO, 2010). Esta situación genera la necesidad de buscar soluciones profundas a largo plazo en cuanto a la sustentabilidad del recurso hídrico, lo que se agrava aún más si se considera la demanda de los demás sectores productivos que compiten con la minería. Sin perjuicio de las acciones que actores individuales puedan tomar, ya sea

personas naturales o empresas, resulta necesario el desarrollo de medidas conjuntas de mutuo acuerdo por parte de todos los participantes, públicos o privados, y que estén orientadas hacia la sustentabilidad (COCHILCO, 2008).

A nivel país, el sector minero también resulta estratégico de entre todas las actividades productivas debido al soporte que entrega a la economía chilena de forma actual y a futuro (COCHILCO, 2008).

La industria minera chilena por si sola le da un peso importante a la disponibilidad del agua, por lo que se encuentra constantemente estudiando nuevas formas de manejar el recurso, u optimizar las existentes. Un complemento de esto, es la apertura de las empresas mineras a nuevas fuentes y formas de abastecimiento como respuesta a la constante presión por parte de la ciudadanía para mantener la sustentabilidad del sector en su ámbito social (COCHILCO, 2015).

Si se desglosa la minería del cobre de Chile, esta se puede separar según la forma en que se presenta la materia prima; en forma de sulfuro o de óxido de cobre. A grandes rasgos, los procesos utilizados para el procesamiento de minerales sulfurados se enuncian a continuación a partir de la Figura 1:

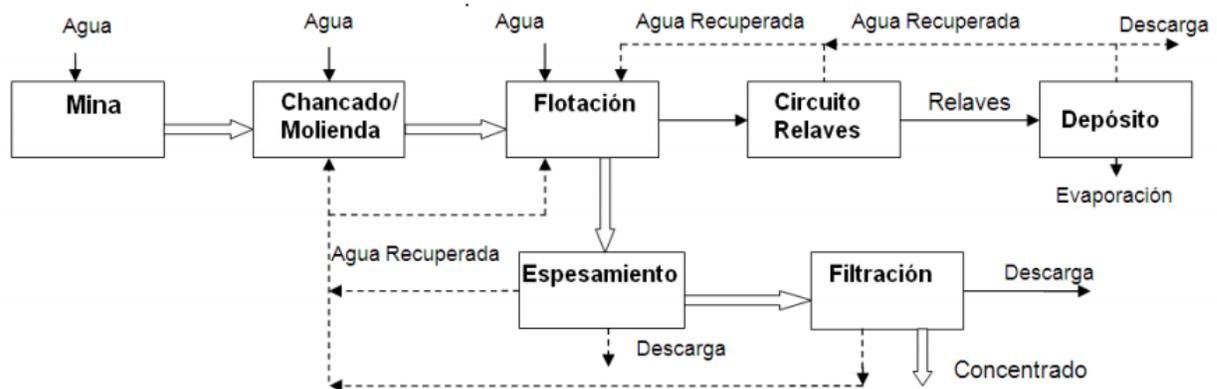


Figura 1: Procesamiento de Minerales Sulfurados por Flotación (Cochilco, 2010)

A continuación, se presenta una breve descripción de los procesos, en particular aquellos que implican un uso de agua (COCHILCO, 2015):

- Chancado: Es el proceso de reducción de tamaño del mineral; extraído de la mina hasta un tamaño apropiado para su posterior tratamiento en el circuito de pre concentración o molienda. El mineral triturado pasa a la etapa de molienda para reducirlo aún más. El equipo puede requerir agua para un procesamiento más eficiente.
- Molienda: El mineral chancado pasa luego a través de un circuito de molienda para reducir aún más el tamaño de las partículas con el fin de obtener una mayor liberación del mineral en procesos posteriores. Los equipos de molienda pueden requerir agua para su funcionamiento.

- Flotación: el agua se emplea en solución con reactivos de flotación que sobre la base de las propiedades hidrofóbicas del mineral adherido al reactivo permiten la recuperación de este. Durante este proceso, el mineral molido se adhiere superficialmente a burbujas de aire previamente insufladas, lo que determina la separación del mineral de interés. Al ingresar la pulpa, se hace burbujear aire desde el interior y se agita con un aspa rotatoria para mantenerla en constante movimiento, lo que facilita y mejora el contacto de las partículas de mineral dispersas en la pulpa con los reactivos, el agua y el aire, haciendo que este proceso se lleve a cabo en forma eficiente. (CODELCO, 2016)
- Filtración: Los concentrados finales del proceso de flotación se acumulan y se les disminuye el porcentaje de agua, logrando una recirculación de aguas.
- Recirculación en esperadores: La pasta corresponde a una mezcla de agua con sólidos de alta densidad que contienen abundantes partículas finas. Cuando ha sido depositada puede exudar agua.
- Recirculación en relaves: El tranque de relave está destinado a confinar grandes volúmenes de finos sedimentos y agua provenientes de las operaciones de extracción de mineral, parte de este almacenamiento se puede recuperar y recircular.
- Uso de agua en transporte de relaves: Considera el agua utilizada para el transporte de los relaves al depósito o tranque.

Por otra parte, los minerales oxidados y algunos sulfuros secundarios involucran procesos químicos más complejos como lixiviación (LX), extracción por solventes (SX) y la Electro-obtención (EW) como se presenta en la Figura 2:

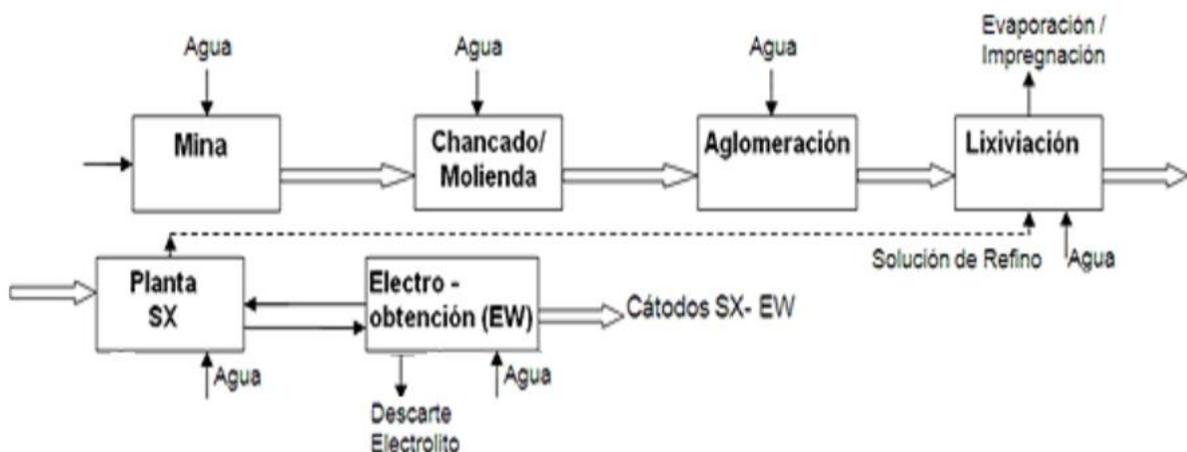


Figura 2: Procesamiento Hidrometalúrgico de producción de cobre (Cochilco, 2010)

A los procesos descritos anteriormente se agregan los siguientes (COCHILCO, 2015):

- Aglomeración: Consiste en recibir el mineral de la planta de chancado. Se agrega una solución ácida (agua y ácido sulfúrico) para almacenarlo en las pilas de lixiviación.

- Lixiviación (LX): El consumo de agua en este proceso corresponde principalmente al utilizado en la solución de riego de las pilas o bateas de lixiviación. Este proceso considera las etapas de lixiviación en pilas, botaderos de ripios y acopio en piscinas.
- Extracción por solventes (SX): Este proceso considera las etapas de extracción, descarga y lavado. El agua se recupera como refino (agua ligeramente acida con cierta cantidad de cobre contenido que vuelve al proceso).
- Electro obtención (EW): La planta de electro obtención considera las etapas de electro obtención y el despegue de cátodos. El suministro de agua se utiliza principalmente en las celdas de lavado de cátodos.

## 2.6 HUELLA HÍDRICA EN MINERÍA

A causa de que el concepto de Huella Hídrica es tan general, uno de los mayores problemas es definir un correcto alcance y marco que delimite los cálculos. Younger (2006) reconoce el potencial de la huella hídrica para la minería como indicador para mejorar la sustentabilidad del manejo de aguas y en torno a eso define un marco conceptual potencialmente aplicable a faenas mineras con alcances definidos en cuanto a tiempo y espacio (Figura 3).

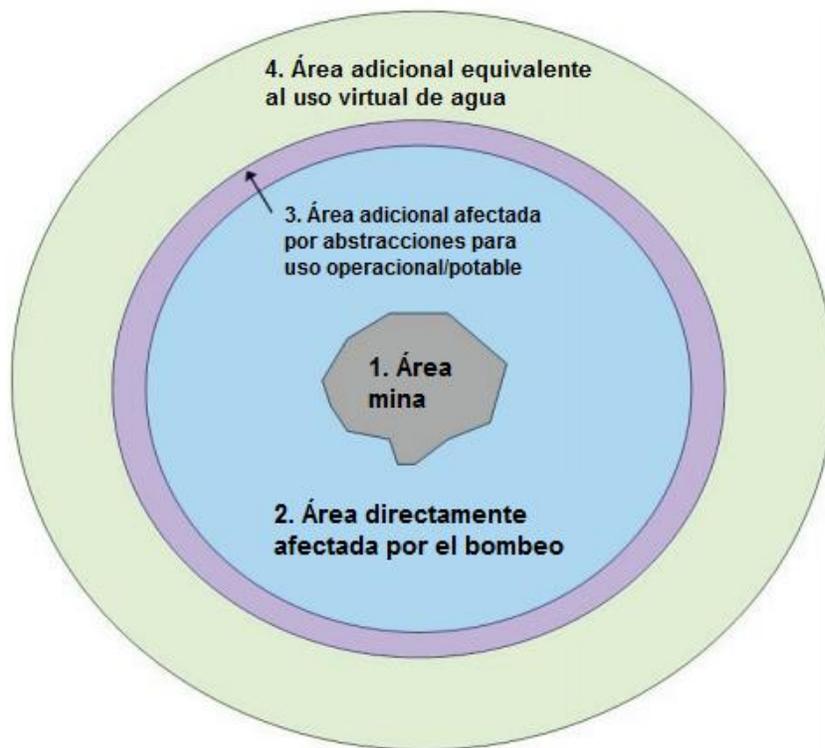


Figura 3: Conceptualización espacial de Huella Hídrica en una faena minera (Younger, 2006).

Siguiendo en la misma línea, Younger explicita los factores a considerar como consumos de agua dentro de una faena minera:

- Agua natural bombeada o captada para facilitar las operaciones mineras (bombeos desde el rajo y/o intercepciones de agua que podrían llegar al rajo).
- Caudales de agua utilizadas en las operaciones mineras, incluyendo extracciones (enfriamiento de equipos, movimiento del material extraído), operaciones auxiliares (supresión de polvo, prevención de incendios) y operaciones de procesamiento del mineral.
- Cantidades de agua utilizadas por el personal en o alrededor de la mina (agua potable, alcantarillado).
- Pérdidas de agua en el sitio producto de:
  - Exportaciones de agua producto de la humedad en el concentrado/producto final que salen del espacio delimitado (trasvasije de cuencas).
  - Descarga de agua con calidad de agua natural a cuerpos de agua cercanos (superficiales o subterráneos).
  - Descarga de agua con calidad de agua alterada a cuerpos de agua cercanos (superficiales o subterráneos).
  - Agua liberada a la atmosfera en forma de evaporación desde estanques, acopios, pilas, lagunas de rajo, instalaciones, tranques, botaderos, sumideros, etc.
  - Agua liberada a la atmosfera en forma de evapotranspiración desde zonas (re)vegetadas (basándose en la comparación con la zona pre-operación minera).

En cuanto a los usos de agua virtual explicita lo siguiente:

- Agua utilizada en la producción de energía, maquinaria, insumos de operación y de tareas administrativas.
- Agua utilizada para producir los comestibles que se importan al sitio de operación.
- Agua implícita usada por el personal minero en viajes desde, hacia y dentro de la mina incluyendo viajes internacionales directamente asociados a la operación minera.
- Uso de agua implícita en los insumos y/o energía utilizada para el re-acondicionamiento de zonas donde se ve modificada la calidad como consecuencia de la faena minera.

Otro aspecto relevante que se destaca tiene que ver con el espacio temporal a considerar. Debido a que la faena minera funciona por un espacio definido de tiempo, es esperable que el cálculo de la Huella Hídrica sea posible al menos en el periodo en el que esta se encuentre en operación. Existe eso sí una fuerte componente remanente en el tiempo (post cierre) como consecuencia del bombeo de desagüe a nivel de rajo y la consiguiente disminución del nivel freático. Se asocia a esto el llamado “uso de agua remanente” en la forma de:

- Perdidas por evaporación desde el lago que se forma en el rajo producto de la recuperación del nivel freático.
- Modificaciones permanentes en los flujos de agua superficial lo que conlleva potenciales flujos que pasaran por las operaciones mineras post-cierre.
- Degradación sostenida de la calidad del agua natural debido al escurrimiento pasante por la faena minera post-cierre, tranques y botaderos.

## 2.7 HUELLA HÍDRICA DE LA MINERÍA DEL COBRE EN CHILE

En Chile solo se conoce de dos casos reportados que abordan el cálculo de la Huella Hídrica en la minería chilena. Garcés (2011) realiza el cálculo de la HH del concentrado de cobre producido por la División El Teniente de Codelco, donde además evalúa las limitaciones del indicador en la minería. El cálculo es realizado basándose en el “Water Footprint Manual” (Hoekstra, et al., 2009) para los años 2008, 2009 y 2010 sobre la base de datos reales proporcionados por la compañía minera. Dentro de las limitaciones que describe el autor, se encuentra la generalidad que ocupa el manual para definir una metodología, por lo cual recomienda definir criterios para delimitar las fronteras geográficas y consideraciones con la precipitación ocurrida durante el año. Debido a que la HH no refleja directamente el manejo de aguas que se tiene, además de establecer una normalización en cuanto a la normativa ambiental a considerar para el caso de la HHG.

En cuanto a resultados numéricos, la Huella Hídrica calculada resulta ser en promedio 40 m<sup>3</sup> por tonelada de cobre o 60 m<sup>3</sup> por tonelada de cobre, dependiendo del escenario considerado (escenarios que consideran distintos límites espaciales). Se debe destacar que el autor no considera ningún tipo de uso de agua virtual y sólo contabiliza usos de agua directos (consuntivos).

El segundo caso que se conoce corresponde a Peña & Huijbregts (2014), que calcula la Huella Hídrica Azul de la división Codelco Norte considerando los dos tipos de mineral, óxidos y sulfuros, cuyo refinamiento requiere procesos distintos. La particularidad del estudio radica en que logra cuantificar consumos de agua virtual en forma de combustibles, electricidad e insumos propios de los procesos. Sus resultados finales indican que la HHA es de 30.4 m<sup>3</sup> por tonelada de cátodo de cobre para el caso de los óxidos y de 64.7 m<sup>3</sup> por tonelada de cobre fino considerando solo los procesos de la mina hasta la planta concentradora. De las conclusiones más importantes, se destaca las consideraciones encontradas con el agua virtual. En general, para la faena minera considerada, la contribución es del orden del 27% para óxidos y del 19% para sulfuros, pero los valores podrían aumentar hasta 64% y 38%, respectivamente, si se consideran las operaciones mineras en Chile central, donde la matriz energética considera hidroelectricidad y termoelectricidad que utiliza agua como refrigerante.

A modo de recomendaciones, para mejorar el manejo de agua por parte de Peña & Huijbregts (2014), se recomienda evaluar medidas como incluir mayores porcentajes de

agua de mar en los procesos, reducir la superficie de evaporación en tranques y maximizar los procesos de recirculación entre esperadores y tranques de relave.

## 2.8 WATER RECOVERY MODEL

En la minería, el circuito de relaves es uno de los sistemas que más flujo de agua mueve. Este transporta el relave mezclado con abundante agua hacia su lugar de depósito (tranque), además de recircular una cantidad considerable de agua hacia los procesos de las plantas. La decisión de cuánto recircular, aunque es una variable operacional, depende en gran medida de la cantidad de agua disponible en el tranque. Existen modelos que buscan estimar dichas cantidades a modo de poder representar los procesos. Uno de ellos es el “Water Recovery Model” o WRM (Wels & Robertson, 2003), el cual fue aplicado al tranque Talabre de Chuquicamata, Codelco. Este modelo tiene la particularidad de ser simple ya que depende en su mayoría de parámetros del relave (Gunson, et al., 2012).

Los cálculos del modelo se basan en estimar la cantidad de agua que se descarga al tranque y cuánta de esta deja de estar disponible en forma de pérdidas. El remanente se considera como disponible para la recirculación:

$$\text{Water Recovery} = Q_d - L_{total} \quad (2)$$

$Q_d$ : Total de agua descargada  $\left[ \frac{m^3}{\text{año}} \right]$ .

$L_{total}$ : Perdidas totales  $\left[ \frac{m^3}{\text{año}} \right]$ .

Para estimar la cantidad de agua descargada se utiliza la variable operacional “Cp” que corresponde a la densidad en porcentaje de sólidos por peso del relave.

$$Q_d \left[ \frac{m^3}{\text{año}} \right] = \text{Masa relaves} \left[ \frac{kg}{\text{año}} \right] * \left( \frac{1}{C_{p_{relave}}} - 1 \right) \quad (3)$$

Los tranques de relaves (en ambientes áridos) en general funcionan intentando minimizar pérdidas y maximizando el agua disponible para recircular. Lo anterior se logra variando el esquema de depósito. Los puntos de descarga (llamados spigots) entran en funcionamiento “activando” una zona, esta zona recibirá relaves y por lo tanto agua. La zona activa lleva el nombre de “playa activa”. Desde esta playa ocurren los primeros procesos de pérdidas en forma de infiltración y evaporación, mientras que el exceso de agua se transforma en escorrentía que se dirige a una zona llamada “laguna de aguas claras”, zona donde se acumula el agua para ser posteriormente recirculada a la planta de procesos. Esta laguna está sujeta también a pérdidas por evaporación e infiltración. Una vez que el relave cubre toda la superficie deseada se desactiva el spigot y se procede a activar el siguiente, generando un ciclo de activación-inactivación que lleva al llenado de la laguna de aguas claras (Binvignat & de la Sotta, 2014).

Las pérdidas consideradas se explican a partir del siguiente modelo conceptual:

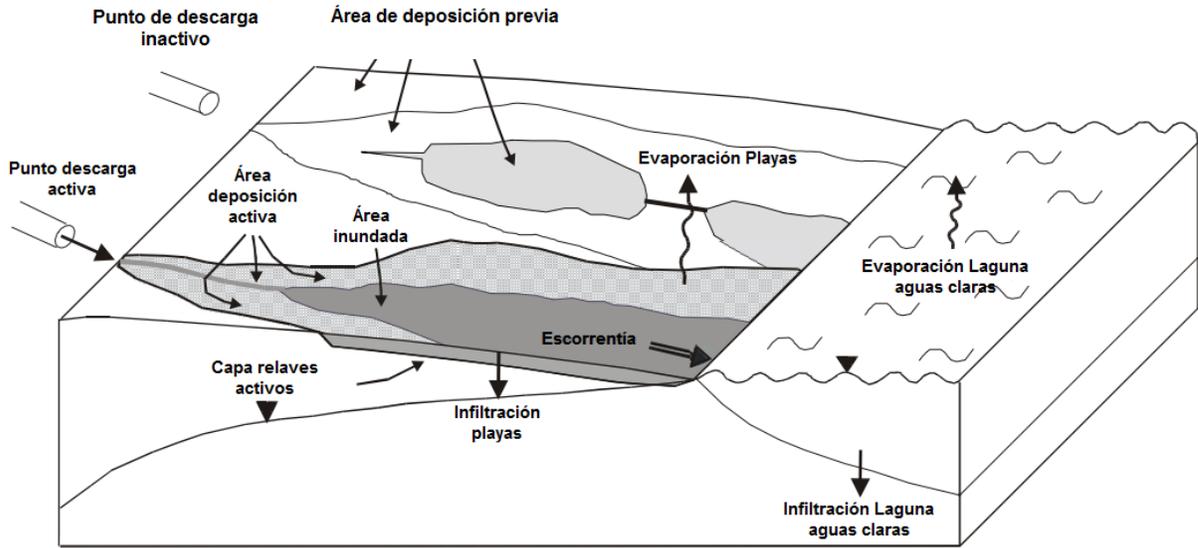


Figura 4: Modelo conceptual perdidas water recovery model (Wels & Robertson, 2003).

Formalmente hablando, la pérdida total se puede descomponer en 4 componentes:

$$L_{total} = L_{ent} + L_{evap} + L_{wet} + L_{pond} \quad (4)$$

$L_{ent}$ : Pérdidas por el llenado de los poros vacíos durante el asentamiento inicial.

$L_{evap}$ : Pérdidas por evaporación desde las áreas inundadas de las playas activas.

$L_{wet}$ : Pérdidas por remojamiento de las playas activas.

$L_{pond}$ : Pérdidas por evaporación e infiltración desde la laguna de aguas claras.

$$L_{ent} = e_0 * \frac{\text{toneladas de relave}}{G_s} \quad (5)$$

$$L_{evap} = f_{bandeja} * E_0 * \text{Area inundada} \quad (6)$$

$$L_{wet} = DRW * (1 - S_{dry}) * \frac{e_f}{1 + e_f} * \text{Area playas activas} + RWL \quad (7)$$

$$L_{pond} = f_{bandeja} * E_0 * \text{Area laguna} + K_{laguna} * i * \text{Area laguna} \quad (8)$$

$e_0$ : Índice de vacíos después de etapa inicial de consolidación.

$G_s$ : Gravedad específica de los sólidos del relave.

$f_{bandeja}$ : Factor de corrección de la evaporación de bandeja.

$E_0$ : Evaporación de bandeja.

$DRW$ : profundidad efectiva de remojamiento (promedio).

$S_{dry}$ : Grado de saturación media de playas inactivas previo al remojamiento.

$e_f$ : Índice de vacíos final.

$RWL$ : Perdidas sucesivas por remojamiento.

$i$ : gradiente hidráulico en la laguna de aguas claras.

$K_{laguna}$ : Conductividad Hidráulica laguna (vertical).

## 2.9 GOLDSIM

El software GoldSim es un programa computacional altamente gráfico, orientado a objetos que permite realizar simulaciones probabilísticas y dinámicas. Se puede asimilar a lo que sería una hoja de cálculo visual que permite crear y manipular datos y ecuaciones. Como software de modelación permite la creación, edición y operación de estos agregando una serie de herramientas para por ejemplo evaluar escenarios o hacer predicciones futuras (GoldSim, 2014a).

Entre las características que hacen a GoldSim único, destacan su capacidad de representar la incertidumbre inherente a las variables del sistema que se quiere modelar, la capacidad de trabajar con eventos discretos y continuos de forma individual y superpuesta. Se desprende de esto último que el software entiende el concepto de tiempo y las implicancias sobre eventos. Otras particularidades radican en que permite trabajar con unidades de medida haciendo el ingreso de datos y manejo de estos más permisivo y minimizando errores. Finalmente, se destaca la capacidad de extensión que tiene el programa con softwares externos pudiendo integrar el uso de planillas de cálculo externas o bases de datos. Esto además aplica a los distintos módulos que se crean que se pueden integrar y adaptar fácilmente a nuevos modelos (GoldSim, 2014a).

Hablando en particular de las simulaciones probabilísticas, estas se llevan a cabo representando la incertidumbre asignándole distribuciones de probabilidad a los valores de las variables del problema en vez de adoptar valores fijos. Estas distribuciones (según parámetros estadísticos) buscan representar los rangos de valores posibles de variables y parámetros en torno a una media con una cierta desviación. Los valores específicos de dichas variables o parámetros se generan de manera aleatoria (muestreo) cada vez que se ejecuta el modelo o según el criterio que mejor defina al proceso involucrado, esto puede ser en cada realización o en cada intervalo de tiempo.

Goldsim permite trabajar con simulaciones de tipo Monte Carlo. Este esquema plantea simular el modelo un gran número de veces (realizaciones) de manera de propagar la incertidumbre de cada una de las variables involucradas a los resultados (GoldSim, 2014b). Un esquema del mecanismo se presenta a continuación (Figura 5):

Resultados obtenidos considerando incertidumbre permiten luego evaluar escenarios teniendo consideraciones que representan de buena manera la realidad y por lo tanto mejor y mayor cantidad de información a la hora de tomar decisiones.

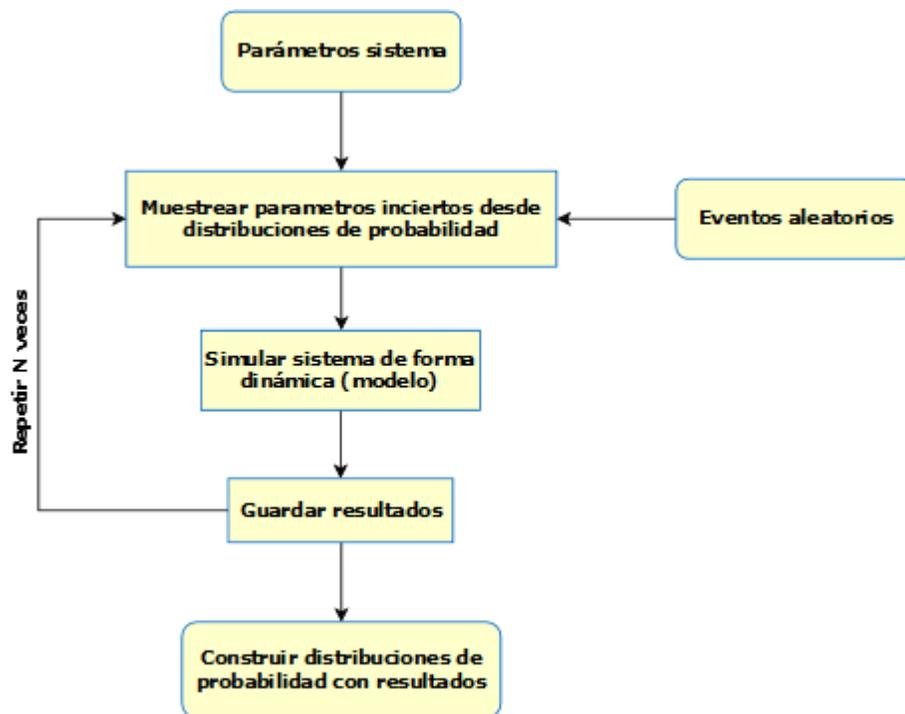


Figura 5: Esquema de simulación de Monte Carlo

Goldsim tiene además herramientas incorporadas por defecto para realizar entre otras cosas:

- Análisis de sensibilidad.
- Optimización de parámetros.
- Análisis multi-variable.
- Generación de interfaz gráfica para el usuario.
- Muestreo con métodos de reducción de varianza.
- Análisis de escenarios

Es clave para la correcta aplicación de la metodología la buena construcción del modelo, el cual debe tener identificadas (Olivares, 2015):

- Parámetros: valores que no varían en el tiempo (fijos en el tiempo de simulación).
- Variables de entrada (inputs): datos necesarios para el funcionamiento del modelo.
- Variables de salida (outputs): resultados del modelo.
- Fuentes de incertidumbre: puede ser intrínseca al sistema (endógena) o asociada a factores externos (exógena).

La elección del software GoldSim se sustenta en la facilidad y rapidez con la que permite desarrollar todas las tareas antes expuestas a la vez de documentar todo lo realizado, si se compara con otro software basado en planillas como, por ejemplo, Microsoft Excel.

### **3 CONCEPTUALIZACIÓN DE LA HUELLA HÍDRICA EN LA MINERÍA DE COBRE CHILENA**

---

La manera de evaluar la Huella Hídrica en faenas mineras chilenas será explicada en el presente capítulo basándose en los casos de estudio mencionados de forma anterior. A modo de incorporar nuevas variables y formas de análisis se calculará la Huella Hídrica Azul de una faena minera tipo, la cual será estandarizada considerando la realidad chilena. Sobre esta idealización se agregan componentes de variabilidad estocástica y simulación de Monte Carlo con el fin de lograr los objetivos antes descritos. Todo lo anterior será realizado mediante la construcción de un modelo en el software GoldSim®.

#### **3.1 DEFINICIÓN DEL PRODUCTO A ESTUDIAR**

Como se mencionó en el primer capítulo, la HH se puede enfocar de variadas formas según lo que se quiere estudiar. En el caso de la minería se puede enfocar en la faena completa o en algunos de los tantos productos. Ya que el método de obtención de cobre varía dependiendo de la forma en que se encuentra el mineral in-situ, se considerará la generalidad asociada al mayor porcentaje de producción de cobre a nivel nacional. Esto último corresponde a concentrado de cobre obtenido a partir del mineral sulfurado (COCHILCO, 2016a), producto que será el considerado para el cálculo de la huella hídrica. La decisión se complementa con la información disponible debido al acceso a antecedentes donde los consumos ya están cuantificados. El hecho de no considerar los procesos posteriores a la concentración se debe a que parte de la industria minera chilena exporta como producto el concentrado de cobre sin refinar. Por otro lado, de considerarse la faena completa el estudio se complejiza debido al nivel de detalle y la gran variedad de actividades y procesos (no solo productivos) que se desarrollan en los distintos sitios.

De forma anexa, la producción de cobre tiene asociada otros subproductos minerales como por ejemplo el molibdeno, pero debido a que los procesos de este y otros subproductos son similares se decide desprestigiar la contribución de estos a la HH (Garcés, 2011).

En cuanto a las partes de la HH, se decide solo considerar la HHA del concentrado de cobre, lo anterior basado en las complejidades que tiene asociado el cálculo de la HHG y la inexistencia de HHV en el proceso minero del concentrado de cobre. Ahondando un poco en lo anterior, la HHG resulta compleja de cuantificar debido a lo difícil de cuantificar las variables necesarias para su cálculo, en especial concentraciones límites (por no existir normas específicas para los cuerpos de agua receptores) y naturales (en Chile la normativa vigente se centra en que las descargas puntuales no superen cierto valor). Además, pueden existir discrepancias dependiendo de la forma en que se definen los límites espaciales generando HHG con distintos resultados dependiendo de la elección (Garcés, 2011).

Finalmente, sobre la base de lo expuesto anteriormente, las unidades con las que se trabaja la HHA del concentrado serán [ $\text{m}^3$  agua fresca/tonelada mineral], esto último debido a que la industria minera chilena presenta de forma general sus consumos en función de la producción de mineral bruto.

### 3.2 LÍMITE TEMPORAL

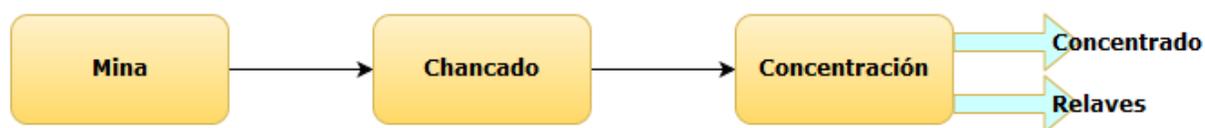
El proceso de producción de cobre en Chile se lleva a cabo de forma ininterrumpida a lo largo de todo el año por lo cual considerar la HHA a escala diaria, mensual o anual considerará todas las variaciones que pudieran ocurrir. Por temas de complejidad a nivel de procesos y también ejercicios anteriores de cálculo de huella se decide considerar el cálculo a nivel medio anual. Esto se ve respaldado por los informes de sustentabilidad que presentan las mineras todos los años donde los resultados se presentan con aquella escala de tiempo. Más adelante se comprueba que los mayores efectos sobre la HHA corresponden a variables operacionales cuyo efecto tiene sentido al ser evaluado a esta escala temporal.

En cuanto al periodo, se consideran realizaciones de 30 años de duración que representan una proyección de la producción minera desde el año presente hacia el futuro obviando las etapas de cierre por falta de información al respecto. Esto supone una serie de fuentes de incertidumbre cuyo impacto será evaluado en capítulos posteriores.

### 3.3 LÍMITE ESPACIAL Y DEFINICIÓN DE LA FAENA MINERA TIPO

Espacialmente hablando, la HHA se calcula principalmente basándose en los consumos, ya sea directos o indirectos. Por lo tanto, serán estos consumos los que definirán los límites geográficos que serán considerados. De la mano de esto entonces viene también la definición de la faena estandarizada a considerar para la realidad chilena.

Teniendo en cuenta lo estudiado anteriormente, los procesos involucrados se esquematizan a continuación:



*Figura 6: Esquema de procesos que generan Huella Hídrica*

Luego, basándose en los procesos de la Figura 6 se definen espacialmente las obras o componentes que los conforman (Figura 7). La particularidad de este esquema radica en el producto final (concentrado de cobre), el cual puede atravesar una serie de procesos

adicionales para continuar su refinación, pero para el presente estudio se considera que este se exporta y por lo tanto transporta en el estado antes descrito. Debido a que los procesos involucrados resultan genéricos para la gran mayoría de las mineras chilenas (COCHILCO, 2008), el hecho de considerar la faena minera tipo sobre la base de estos facilita la adaptación de la metodología a faenas particulares.

### **3.4 CONCEPTUALIZACIÓN DEL PLAN MINERO TIPO**

La producción de una minera es un proceso sujeto a una serie de factores que escapan al alcance de este trabajo, por lo tanto, resulta complejo estandarizar a todas las mineras bajo un mismo sistema de producción. Factores económicos, ambientales, operacionales, geográficos, climáticos son sólo algunas de las variables que inciden sobre esta planeación. En vista de lo anterior se decide una simplificación que no refleja la realidad de ninguna minera en particular, que consiste en un plan minero tipo con media de 172.5 ktpd (kilotoneladas por día) sobre la base de estadísticas existentes (COCHILCO, 2016b). Luego, sobre este valor se permite la opción de aplicar un factor de crecimiento anual en caso de querer representar una expansión de la faena. Para el caso particular en estudio se asume que la producción media se mantiene estable en el tiempo y solo presenta variaciones que responden a temas operacionales y económicos, los que se traducen en una dispersión equivalente al 10% del valor medio. A modo de presentar alternativas para datos reales se da la opción de que el usuario que opere el modelo ingrese un plan minero personalizado. Se asume que siempre existirá agua disponible de alguna fuente para poder procesar el mineral extraído, de manera de permitir un cálculo de HH que de forma inicial no dependa de las fuentes pero que eventualmente, dadas las modificaciones a la metodología, pueda integrar este factor.

### **3.5 DESCRIPCIÓN DE CONSUMOS DE AGUA A CONSIDERAR**

Cada uno de los procesos involucrados representa una serie de consumos distintos tanto directos como indirectos. La forma y supuestos adoptados para los cálculos tienen como base mantener la estructura que utilizaron Garcés (2011) y Peña & Huijbregts (2014) de manera de poder aplicar sus resultados. A no ser que se indique lo contrario, los valores de consumos explicitados en el presente apartado corresponden a los reportados por Peña & Huijbregts (2014).

Sólo se consideran consumos que contribuyan con más de 1% del total a la huella hídrica total (Hoekstra, et al., 2011).

#### **3.5.1 Mina y Chancado/Molienda**

Se toma la decisión de agrupar estos 2 procesos debido a la forma en que se encuentra la información disponible. En el caso aplicado a Codelco Norte (Peña & Huijbregts, 2014) se cuantifican los consumos teniendo como dificultad no poder hacer la

distinción sobre si los procesos de chancado y molienda son parte de este u otro proceso. Se considera el mismo supuesto de la autora para utilizar los mismos datos. De forma anexa, los valores declarados requieren una transformación de unidades basada en la concentración de cobre. Se considera una concentración de cobre para cátodos de 99.99%, 36% para concentrado y 0.8% para el mineral que entra a los procesos (Peña & Huijbregts, 2014).

### **3.5.1.1 Consumos Directos**

- Evaporación debido al agua utilizado en control de polvo (**5.4 m3 agua/tonelada de cátodo de cobre**): representa el agua que se rocía sobre el mineral para control de polvo que luego en el transporte se evapora y por lo tanto ya no vuelve a estar disponible generando HHA.
- Agua incorporada al Chancado/molienda (**3.0 m3 agua/tonelada de cátodo de cobre**): Para la correcta operación de la maquinaria además del control del polvo se incorpora agua al mineral la cual quedara finalmente incorporada en el concentrado de cobre final.

### **3.5.1.2 Consumos Indirectos**

- Consumo explosivos en mina (**0.34 m3 agua/tonelada de cátodo de cobre**): Corresponde al consumo de agua directo por la producción de explosivos que son utilizados en los procesos de extracción del mineral.
- Consumo neumáticos mina (**0.3 m3 agua/tonelada de cátodo de cobre**): Corresponde al consumo de agua directo por la producción de neumáticos que son utilizados en la maquinaria que realiza los procesos de extracción del mineral y transporte.
- Electricidad mina (**0.16 m3 agua/tonelada de cátodo de cobre**): Cantidad de agua necesaria para la producción de energía eléctrica que se utiliza en la mina y chancado/molienda. Notar que este valor está basado en la matriz energética del Sistema interconectado del norte grande (SING).
- Combustible diésel mina (**0.45 m3 agua/tonelada de cátodo de cobre**): Cantidad de agua necesaria para la producción del combustible diésel que se utiliza en la mina y chancado/molienda.
- Consumo bolones de acero (**1.2 m3 agua/tonelada de cátodo de cobre**): Uno de los insumos más relevantes del proceso de chancado corresponde a los bolones de acero los cuales se deben renovar además de consumir una cantidad de agua considerable en su confección.

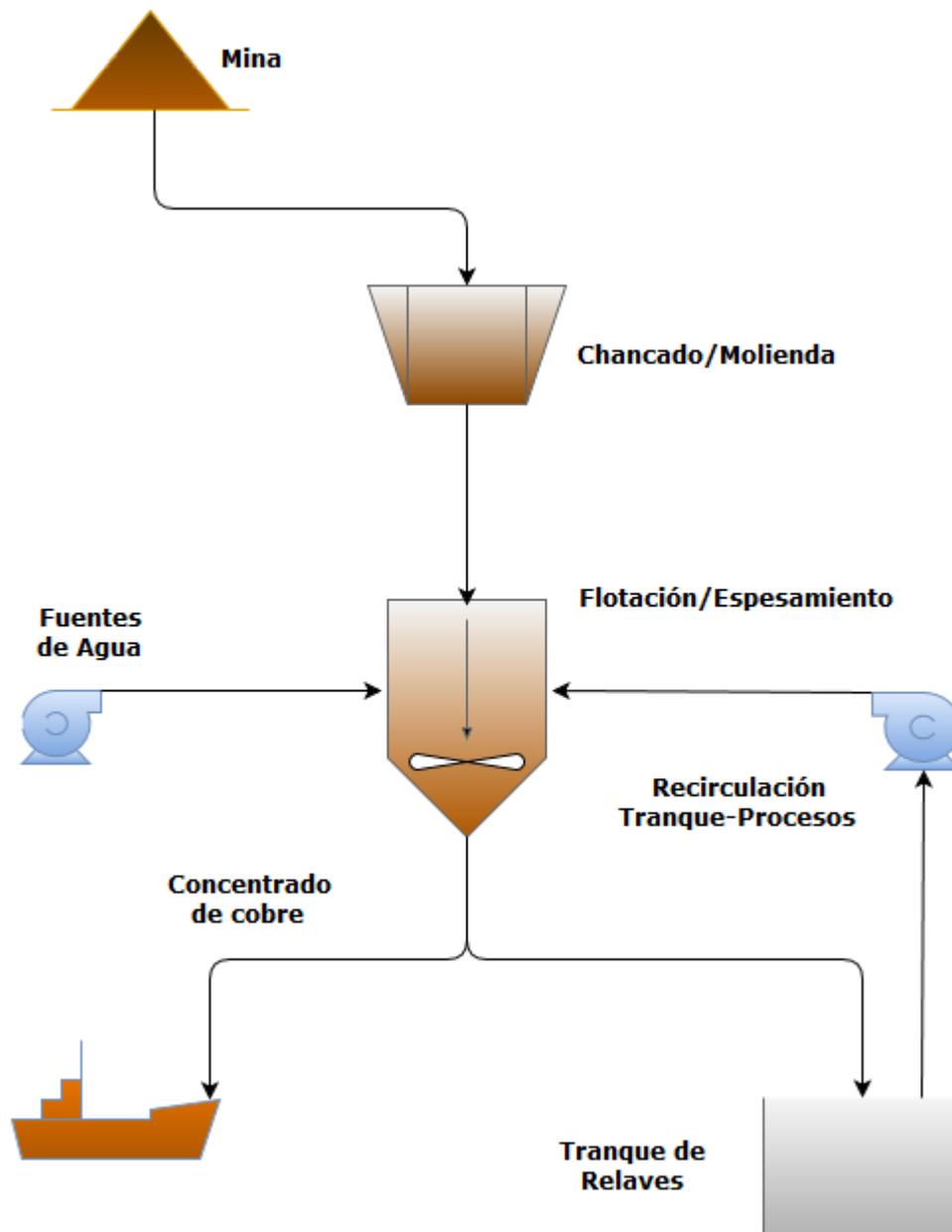


Figura 7: Limite espacial para el cálculo de la Huella Hídrica

### 3.5.2 Concentración

#### 3.5.2.1 Consumos Directos

La minería chilena en general presenta una dificultad para la correcta aplicación de la metodología de la huella hídrica. Este problema radica en la inexistencia de mediciones de los procesos. En vez de intentar cuantificar los consumos la minería toma un camino alternativo que corresponde al llamado *make up*.

El *make up* es la principal medición con que se trabaja respecto del agua que se utiliza para procesar el mineral que se extrae. Su valor representa los m<sup>3</sup> de agua fresca

necesaria por cada tonelada de mineral extraído hasta la obtención del concentrado de cobre. En el caso particular que se intenta cuantificar no se tiene información del proceso de concentración en cuanto a consumos y debido a esto se decide la utilización del *make up* como símil de los consumos directos para este caso particular (Garcés, 2011; Peña & Huijbregts, 2014). Este cambio de enfoque significa pasar de pensar en consumos a pensar en las pérdidas que se originan en las distintas etapas.

Para lograr cuantificar las pérdidas corresponde identificar las entradas y salidas de este proceso. Como se esbozó anteriormente, del proceso de concentración se obtiene el concentrado de cobre además del relave, ambos representan pérdidas debido a la cantidad de agua fresca que se debe incorporar para la correcta circulación por los sistemas de ductos. Otras pérdidas vienen dadas por la evaporación que se produce desde las celdas de flotación y estanques (en el caso de estar abiertos) y finalmente se tienen las pérdidas debido al agua requerida en la supresión de polvo (Younger, 2006).

Existe una salvedad con respecto a la salida del agua con el relave que corresponde a la porción de esta que se recupera y recircula de vuelta al proceso. Esto último supone un ahorro de agua fresca y por lo tanto una disminución de la HHA.

Un aspecto de la HHA en el caso de la concentración corresponde a la proveniencia del agua fresca. Por definición la extracción desde cuerpos de agua como lagos o captaciones desde ríos supone de inmediato un aumento de la huella, pero también existe la posibilidad de utilizar agua de mar dentro los procesos. Ante esto se debe destacar que, por definición, se considera que la incorporación del agua salada no genera HHA directa (Hoekstra, et al., 2011) y al reemplazar una fuente de agua fresca convencional supone un ahorro de huella hídrica azul. Otra fuente a considerar en la misma línea corresponde al agua desalinizada que se incorpora ya que esta también se conceptualiza como un ahorro de HHA (Hoekstra, et al., 2011). El ahorro que se produce no es gratis ya que ambos procesos incurren en altos costos energéticos por bombeos y la desalinización misma lo cual se traduce en un aumento de consumos indirectos.



Figura 8: Esquema de pérdidas proceso concentración.

Finalmente se adoptan valores referenciales para la faena tipo para aquellas variables operacionales involucradas en los procesos. Para el caso del Cp del relave en faenas tradicionales este fluctúa entre valores desde el 40 al 65% para relaves espesados (Cacciuttolo, et al., 2015), por datos de la empresa se decide adoptar el valor de 57% como representativo para el caso en estudio. El Cp del concentrado por otro lado presenta valores tipo distintos debido a la distinta reología involucrada. Se tiene información de valores de entre 60 y 65% para el caso de concentrados (Aceituno & Navia, 2010) por lo cual se decide adoptar un valor intermedio de 63%. Otro dato necesario corresponde a la proporción del mineral entrante (en masa) que se transforma en concentrado y en relave, este valor se calcula sobre la base de la ley del mineral y la concentración de cobre en el concentrado.

$$Masa\ concentrado[\%] = \frac{ley\ mineral[\%] * Fracción\ Recuperación[\%]}{ley\ concentrado\ cobre\ [\%]}$$

Sobre la base de esto, asumiendo que el proceso de concentración ocurre sin pérdidas de masa, se calcula la masa de relave:

$$Masa\ relave[\%] = 100 - Masa\ concentrado[\%]$$

Finalmente considerando una ley de mineral del 0.8%, ley de concentrado del 36% y una fracción de recuperación del proceso del 85% (Peña & Huijbregts, 2014), se obtiene que la fracción de mineral que se transforma en concentrado es de un 1.9% y la de relave es un 98.1%.

El caso de los consumos propiamente tal que existen en esta etapa (Figura 8), estos se caracterizan con los siguientes valores:

- Evaporación debido al agua utilizada en control de polvo (**5.1 m3 agua/tonelada de cátodo de cobre**): representa el agua que se rocía sobre el mineral para control de polvo tanto a nivel de concentradoras como de tranque de relave, como consecuencia deja de estar disponible generando HHA. El valor nominal de este consumo es de 6.8 [m3/ tonelada de cátodo de cobre] (Peña & Huijbregts, 2014; Côte, 2010) pero a raíz de lo alto del valor se decide rebajarlo en un 25% fundado principalmente en que el control de polvo puede variar de gran forma entre mineras considerando en algunos casos tareas de humedecimiento en muros de tranque hasta faenas donde el control no es relevante (Guarda, 2016).
- Evaporación directa desde instalaciones (**0.046 m3 agua/tonelada de cátodo de cobre**): representa el agua que pérdida debido a evaporación directa partes del proceso como estanques y piscinas de agua, celdas de flotación y esperadores (Gunson, et al., 2012).

### 3.5.2.2 Adaptación y Parámetros Water Recovery Model (WRM)

La aplicación del WRM a la faena minera idealizada requiere de ciertas adaptaciones para permitir el uso más genérico, esto debido a que el modelo está pensado para su aplicación en faenas del norte de Chile donde la precipitación es despreciable (Wels & Robertson, 2003). Para incorporar esta variable se decide considerar la precipitación sobre el tranque como una entrada sujeta a pérdida por re-humedecimiento de playas (IRL):

$$IRL_{playas\ inactivas} = DRW * (1 - S_{dry}) * \frac{e_f}{1 + e_f} * Area\ playas\ inactivas \quad (9)$$

En el caso de las playas activas, debido a que estas se saturan rápidamente por la descarga del relave además de la precipitación, se decide aplicar un factor de escorrentía de 0.95 para reflejar que gran parte del agua que precipita escurre hacia la laguna de aguas claras y solo una pequeña parte podrá infiltrar y por lo tanto perderse.

$$IRL_{playas\ activas} = 0.05 * PP * Area\ inundada\ playas\ activas \quad (10)$$

Resumiendo, entonces la nueva agua disponible para recirculación producto de la precipitación que se adiciona a la calculada en la ecuación ( 2 ) será:

$$WR_{PP} = PP * Area\ tranque - IRL_{playas\ inactivas} - IRL_{playas\ activas} \quad (11)$$

Otra variable sobre la cual se hace un supuesto son las pérdidas por re-humedecimiento sucesivo de playas (RWL) incidentes sobre la ecuación ( 7 ), esto debido a la complejidad que reviste su cálculo ya que dependen de la variable Déficit de humedad (Moisture Deficit) la cual es variable en el tiempo y requiere un modelo por si sola para su cálculo. Se decide por lo tanto que el valor promedio de esta variable en el tranque Talabre será representativa para la faena minera tipo lo que implica que las RWL totalizan un 11% del caudal entrante (Wels & Robertson, 2003).

Para efectos de la aplicación del WRM se consideran los parámetros del relave del tranque Talabre como representativos de la faena tipo con la cual se trabaja:

Tabla 1: Parámetros tranque Talabre para utilización del WRM

Parámetro	Valor	Unidad
<b>Gs</b>	2.65	-
<b>DRW</b>	0.15	m
<b>S<sub>dry</sub></b>	50	%
<b>Factor evaporación playas</b>	0.49*	-
<b>Factor evaporación lagunas</b>	0.7	-
<b>E<sub>0</sub></b>	1.12	-

Parámetro	Valor	Unidad
<b>E<sub>f</sub></b>	0.79	-
<b>K<sub>laguna</sub></b>	10 <sup>-9</sup>	m/s

*\*Nominalmente el valor de este factor era 0.7 pero se supone una mejor representación de la realidad considerando que las playas tienden a evaporar a una tasa menor por lo cual se pondera nuevamente por 0.7 para lograr el valor de 0.49 (Garcés, 2011).*

Los parámetros dependen de las dimensiones son considerados sobre la base de la producción minera ya que mayor producción implica otros tamaños de tranque. En otras palabras, si se ocupasen las dimensiones del tranque Talabre, necesariamente se requiere utilizar la producción de la mina Chuquicamata para mantener la consistencia. Se decide entonces utilizar las siguientes dimensiones de tranque concordantes con la producción elegida.

*Tabla 2: Parámetros WRM referentes a dimensiones del tranque*

Parámetro	Valor	Unidad
<b>Área inundada playas activas</b>	250	Ha
<b>Área playas inactivas</b>	95	Ha
<b>Área inundada laguna</b>	235	Ha

Estas áreas se estiman sobre la base del mecanismo de depósito que siguen los relaves en cuanto al proceso de activación-inactivación de puntos de descarga y la posterior formación de la playa (Figura 9). Se considera que al desactivar un punto de descarga y activar el siguiente la playa activa anterior permanecerá en ese estado por un tiempo tal que se solapará con la formación de las siguientes playas activas. Es por eso que el área activa en estas estimaciones supera al área inactiva.

El último set de parámetros refiere a variables climáticas los cuales dependerán de donde supondremos se ubica la faena tipo. En general las faenas mineras en Chile se ubican en el Norte Grande donde la escasez de agua es un tema esencial y no existe mayor precipitación, Norte Chico donde el recurso hídrico también es crítico pero la precipitación es un factor a considerar y finalmente el Centro-Sur del país donde abunda el agua y por lo tanto la precipitación y el tema crítico pasa a ser la disposición final de esta (Guarda, 2016). En base a la clasificación anterior y teniendo siempre como foco que el modelo sea lo más representativo posible se considera una ubicación en el Norte Chico (Tercera y cuarta región aproximadamente) para que la precipitación sea un factor en el análisis. Finalmente, entonces se adoptan los valores de la Tabla 3.

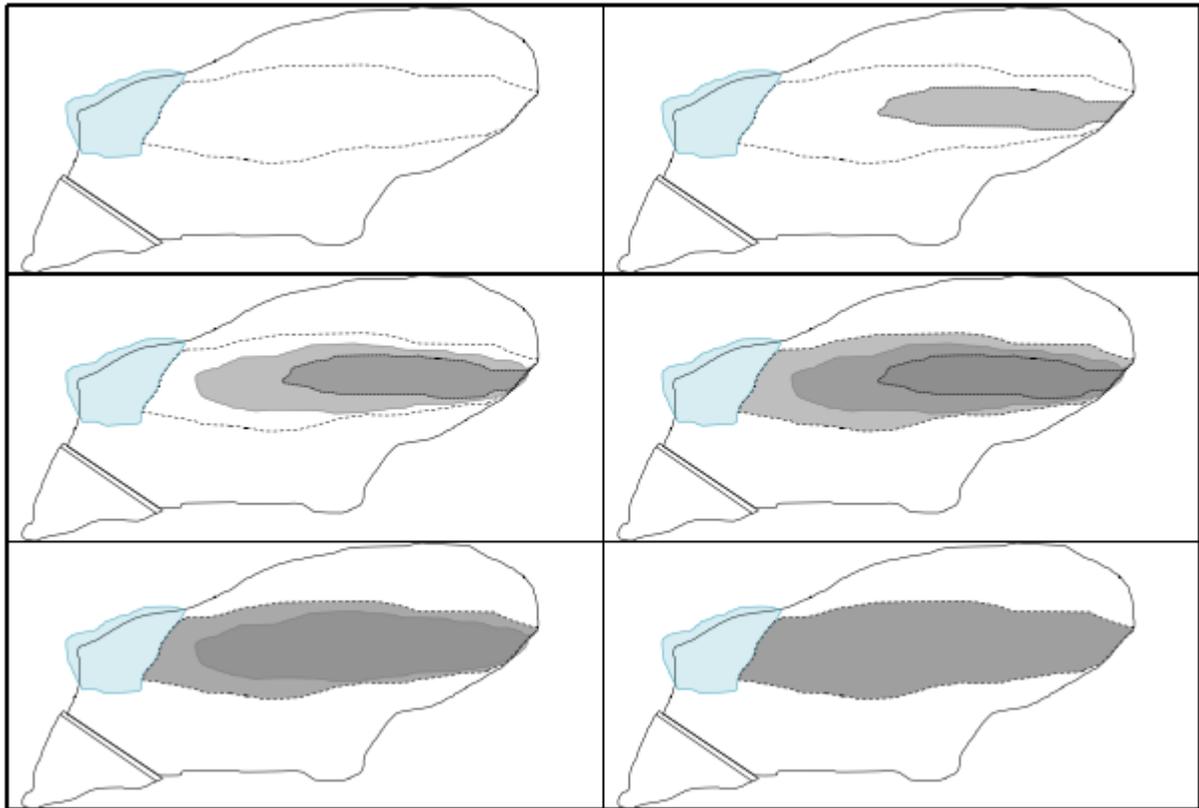


Figura 9: Proceso de formación de una playa activa (gris) (Cifuentes & Pinto, 2014)

Tabla 3: Parámetros climáticos WRM referentes a ubicación del tranque

Parámetro	Valor	Unidad
Evaporación de bandeja	4.28	mm/día
Precipitación media anual	251.8	mm/año

Los valores de la Tabla 3 se obtienen de las estaciones meteorológicas La Tranquila (DGA) y Chillepín (CEAZA) cuyas ubicaciones se resumen en la Tabla 4. La elección se fundamenta en su cercanía y tener registros completos.

Tabla 4: Ubicación geográfica estaciones meteorológicas utilizadas (WGS 84)

Estación	Latitud S	Longitud W
La Tranquila	31° 54' 00"	70° 40' 14"
Chillepín	31° 53' 8.27"	70° 42' 50.22"

El detalle de los datos se puede encontrar en el Anexo A: Datos Climáticos.

### 3.5.2.3 Consumos Indirectos

- Electricidad concentración (**4.83 m3 agua/tonelada de cátodo de cobre**): Cantidad de agua necesaria para la producción de energía eléctrica que se utiliza

en los procesos de concentración. Notar que este valor está basado en la matriz energética del Sistema interconectado del norte grande (SING).

- Agentes de flotación orgánicos (**0.71 m3 agua/tonelada de cátodo de cobre**): Reactivo necesario para lograr la correcta floculación y correspondiente recolección y concentración del mineral.
- Agentes de flotación inorgánicos (**2.19 m3 agua/tonelada de cátodo de cobre**): Reactivo necesario para lograr la correcta floculación y correspondiente recolección y concentración del mineral.
- Combustible diésel concentración (**0.0009 m3 agua/tonelada de cátodo de cobre**): Cantidad de agua necesaria para la producción del combustible diésel que se utiliza en los procesos de concentración.
- Electricidad bombes/desalinización (**0.0028 m3/kWh**): En función de si se desea incorporar fuentes de agua que no generan HHA se considera la energía utilizada en este aspecto. Fuentes de agua fresca que requieren bombes y por lo tanto electricidad, como por ejemplo pozos se consideran como parte de este consumo.

### 3.6 ESTRUCTURACIÓN DEL MODELO

Las distintas partes del modelo Goldsim que calcula la HHA del concentrado de cobre se agrupan como se describe a continuación, entre paréntesis se indica la denominación de las variables/parámetros dentro del modelo:

#### Parámetros:

- Evaporación debido al agua utilizada en control de polvo mina (Consumo\_mina).
- Agua incorporada al Chancado/molienda (Consumo\_chancado).
- Consumo explosivos en mina (Explosivos\_mina).
- Consumo neumáticos mina (Neumaticos\_mina).
- Electricidad mina (Electricidad\_mina).
- Combustible diésel mina (Combustible\_mina).
- Electricidad concentración (Electricidad\_Concentracion).
- Agentes de flotación orgánicos (Flotacion\_organica).
- Agentes de flotación inorgánicos (Flotacion\_inorganica).
- Combustible diésel concentración (Combustible\_concentracion).
- Evaporación desde celdas flotación y estanques (Evap\_Estanques\_CeldasFlot).
- Evaporación debido al agua utilizada en control de polvo concentración (Control\_polvo).

En caso de considerar el WRM se agregan:

- Área inundada laguna aguas claras (Area\_inundada\_laguna).
- Área inundada playas activas (Area\_inundada\_playas\_activas).
- Área playas inactivas (Area\_Playas\_inactivas).
- Índice de vacíos inicial ( $e_0$ ).
- Índice de vacíos final ( $e_f$ ).
- Evaporación de bandeja (PE).

- Peso específico del relave (Gs).
- Factor evaporación para playas (Fpan\_playas).
- Factor evaporación para lagunas (Fpan\_laguna).
- Precipitación (Precipitación).
- DRW, profundidad media mojada (DRW).
- S<sub>dry</sub>, grado de saturación medio de playas inactivas (S<sub>dry</sub>)

#### Variables de entrada (operacionales):

- C<sub>p</sub> relave (CP2).
- C<sub>p</sub> concentrado cobre (CP1).
- Porcentaje de recirculación desde el tranque de relaves como valor fijo o serie de tiempo en caso de no utilizar WRM (Recirculación\_Relave).
- Porcentaje agua desalinizada (Agua\_desalinizada\_1).
- Porcentaje Agua salada (Agua\_salada\_1).
- Porcentaje agua bombeada desde pozos (Agua\_pozos\_1).
- Porcentaje agua bombeada de fuente superficial (Agua\_bombeada\_1).
- Porcentaje en masa del mineral entrante que se transforma en concentrado (Porcentaje\_concentrado\_1).
- Porcentaje en masa del mineral entrante que se transforma en relave (Porcentaje\_Relave\_1).

#### Variables de salida:

- Huella Hídrica azul total [m3 agua/tonelada concentrado cobre].
- Huella Hídrica azul mina/chancado [m3 agua/tonelada concentrado cobre].
- Huella Hídrica azul concentración [m3 agua/tonelada concentrado cobre].
- Huella Hídrica azul total [m3 agua/año].
- Huella Hídrica azul mina/chancado [m3 agua/año].
- Huella Hídrica azul concentración [m3 agua/año].
- Valores Cp (relave).
- Valores Cp (concentrado).
- Caudales y perdidas WRM.
- Plan minero.
- Huella Hídrica azul directa total [m3 agua/tonelada concentrado cobre].
- Huella Hídrica azul directa mina/chancado [m3 agua/tonelada concentrado cobre].
- Huella Hídrica azul directa concentración [m3 agua/tonelada concentrado cobre].
- Huella Hídrica azul directa total [m3 agua/año].
- Huella Hídrica azul directa mina/chancado [m3 agua/año].
- Huella Hídrica azul directa concentración [m3 agua/año].
- Huella Hídrica azul indirecta total [m3 agua/tonelada concentrado cobre].
- Huella Hídrica azul indirecta concentración [m3 agua/tonelada concentrado cobre].
- Huella Hídrica azul indirecta total [m3 agua/año].
- Huella Hídrica azul indirecta mina/chancado [m3 agua/año].
- Huella Hídrica azul indirecta concentración [m3 agua/año].
- Huella Hídrica azul indirecta mina/chancado [m3 agua/tonelada concentrado cobre].

### **3.7 FUENTES DE INCERTIDUMBRE/DISPERSIÓN Y GENERACIÓN DE VARIABLES ESTOCÁSTICAS**

Todos los valores antes expuestos vienen de cálculos o supuestos que pueden hacer que el valor se aleje de la realidad, para poder incluir esta incertidumbre en los cálculos se introducen variables obtenidas desde distribuciones de probabilidad. A modo de representar la dispersión de los valores, siendo los más probables aquellos cercanos a la media y los extremos menos probables, es que se elige la distribución normal como representativa de la aleatoriedad que gobierna a los procesos involucrados. Por otro lado, está la incertidumbre inherente a parámetros y procesos los cuales se representan de la misma forma por una distribución normal de probabilidad. Esta decisión se fundamenta en el carácter demostrativo de este trabajo, además, por el alcance definido y la información disponible, no es posible lograr otra definición. Debido que la distribución normal en ciertas realizaciones puede muestrear un valor demasiado extremo que carezca de sentido físico se decide truncar la generación de las variables estocásticas a tres desviaciones estándar por sobre y bajo la media ( $\mu \pm 3\sigma$ ), además se agrega que la distribución se trunca para valores menores a cero y en el caso de variables porcentuales para variables mayores a cien.

A continuación, se describen los parámetros (media y desviación estándar) con los cuales se realiza el muestreo de las distintas variables además de la fuente de la variabilidad.

#### **3.7.1 Variabilidad Consumos Directos mina/chancado**

Se agrupan cada uno de estos consumos considerando como media de la distribución normal el valor declarado en el punto 3.5.1.1 y desviación estándar igual al 5% de la media. La variabilidad asociada a estos parámetros se atribuye a errores de estimación y/u operación por lo cual esta es de carácter endógena (dispersión operacional). El muestreo se realiza en cada simulación una vez por periodo (anual).

#### **3.7.2 Variabilidad Consumos Indirectos mina/chancado**

Se agrupan cada uno de estos consumos considerando como media de la distribución normal el valor declarado en el punto 3.5.1.2 y desviación estándar igual al 5% de la media. La variabilidad asociada a estos parámetros se atribuye a errores de estimación y/u operación por lo cual esta es de carácter endógena (dispersión operacional). El muestreo se realiza en cada simulación una vez por periodo (anual).

#### **3.7.3 Variabilidad Consumos Directos concentración**

Las variables de operación referentes al proceso de concentración se individualizan por su relevancia para los cálculos. Para el Cp del relave y el concentrado se utiliza como media el valor descrito en el punto 3.5.2.1 y desviación estándar igual al

3% de la media. La variabilidad de lo anterior se explica por dispersión operacional, o sea, no poder llegar al objetivo operacional deseado. De la misma manera se asigna una desviación estándar igual al 5% de la media para la evaporación desde celdas de flotación y estanques, mientras que para el control de polvo se decide aumentar este valor hasta un 10% de la media con el fin de que el valor referenciado originalmente de 6.8 [m<sup>3</sup>/tonelada de cátodo de cobre] sea posible, pero con una baja frecuencia de ocurrencia (Guarda, 2016).

Para los procesos de recirculación la variabilidad existente está asociada a los parámetros considerados por el WRM los cuales presentan variabilidad operacional además de incertidumbre inherente a la variable. El muestreo de estos parámetros se realiza considerando que la media siempre será el valor seleccionado en el punto 3.5.2.2

Tabla 5: Dispersiones parámetros del relave WRM

Parámetro	Desviación estándar
<b>G<sub>s</sub></b>	1% de la media
<b>DRW</b>	2% de la media
<b>S<sub>dry</sub></b>	3% de la media
<b>E<sub>0</sub></b>	1% de la media
<b>E<sub>f</sub></b>	1% de la media
<b>K<sub>laguna</sub></b>	1% de la media
<b>F<sub>bandeja laguna</sub></b>	5% de la media
<b>F<sub>bandeja playas</sub></b>	5% de la media

Tabla 6: Dispersión parámetros de área para tranque en WRM

Parámetro	Desviación estándar
<b>Área inundada playas activas</b>	5% de la media
<b>Área playas inactivas</b>	5% de la media
<b>Área inundada laguna</b>	5% de la media

La dispersión de los parámetros climáticos se calcula directamente de las series de datos utilizados. En el caso de la precipitación es la desviación estándar de las medias anuales mientras que para el caso de las evaporaciones la desviación corresponde a la serie de datos diarios, pero sin considerar las variaciones estacionales (Anexo B: Procesamiento de evaporación).

Tabla 7: Dispersión parámetros climáticos WRM

Parámetro	Desviación estándar	Unidad
<b>Evaporación de bandeja</b>	0.99	mm/día
<b>Precipitación media anual</b>	165.37	mm/año

### 3.7.4 Variabilidad Consumos Indirectos concentración

Se agrupan cada uno de estos consumos considerando como media de la distribución normal el valor declarado en el punto 3.5.2.3 y desviación estándar igual al 5% de la media. La incertidumbre asociada a estos parámetros se atribuye a errores de estimación y/u operación por lo cual esta es de carácter endógena (dispersión operacional). Se excluye de esta generación estocástica las variables asociadas a bombeos (Caudal Agua desalinizada, Caudal Agua salada, Caudal agua bombeada (pozos), Caudal agua bombeada (superficial)) cuyo objetivo se explica en secciones posteriores. El muestreo se realiza en cada realización una vez por periodo (anual).

## 4 METODOLOGÍA ANÁLISIS RIESGO HUELLA HÍDRICA

La etapa siguiente corresponde a analizar las capacidades del modelo para su utilización como herramienta de evaluación. Para lograr lo anterior se plantea la siguiente metodología que busca identificar las variables críticas del modelo y su posterior análisis finalizando con una evaluación formal de condiciones posibles en la minera chilena y cómo afectan estas a la HHA y potenciales riesgos para la industria (Figura 10).

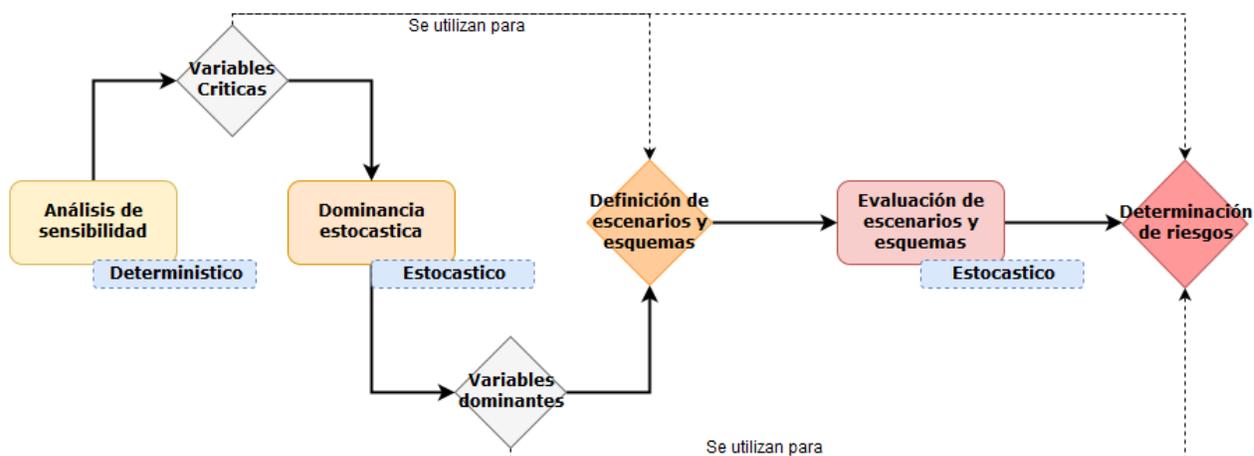


Figura 10: Esquema para la metodología del análisis de riesgo

### 4.1 ANÁLISIS SENSIBILIDAD MODELO HUELLA HÍDRICA

Para entender cómo reacciona el modelo a perturbaciones se procederá primero a realizar un análisis de sensibilidad utilizando la herramienta integrada del software GoldSim. El procedimiento que realiza dicha herramienta, considera el modelo en forma determinística (sin muestreo aleatorio), y luego perturba el modelo con un cambio en una variable o parámetro y al mismo tiempo monitorea una variable de salida con el fin de cuantificar la respuesta del sistema ante estímulos. La variable de salida que se selecciona para el análisis corresponde a la Huella Hídrica total del concentrado de cobre [m<sup>3</sup> de agua fresca/ tonelada mineral].

La herramienta se aplica sobre las 30 variables de entrada/parámetros para las cuales se debe asignar un valor central y límites superiores e inferiores en los cuales se evalúa el resultado. Como valor central se considera siempre el valor estipulado en la sección 3.5 (Descripción de consumos de agua a considerar) que coincide con el percentil 50% por ser una distribución simétrica, esto de forma previa a algún truncado en las distribuciones. Para los límites superior e inferior se consideran “cuantiles” que varían en función de la siguiente fórmula:

$$\text{Limite inferior} = \frac{100\%}{\# \text{ Puntos} * 2} \quad (12)$$

$$\text{Limite superior} = 100\% - \text{Limite inferior} \quad (13)$$

La variable relevante para estos cálculos corresponde al número de puntos, que representa la cantidad de valores entre el límite inferior y el superior que se evaluarán. La separación entre dichos valores es equiespaciada entre el valor máximo y el central y entre el valor mínimo y el central, de esta forma se puede ampliar un lado de ser necesario. Las implicancias de la fórmula (12) se traduce en que una mayor cantidad de puntos amplía los límites a “cuantiles” más extremos. Por un lado, tener una mayor cantidad de puntos mejora el detalle que tendrá el resultado, pero por otro lado valores extremos pueden distorsionar los resultados. Como punto medio de lo anterior se seleccionan 51 puntos lo que se traduce en un límite inferior en el “cuantil” 1% y límite superior en el “cuantil” 99%, además los límites inferiores se truncan a 0 en caso de ser negativos y para el caso de los porcentajes se acotan a 100% por el lado superior.

El primer resultado que se extraerá (llamado gráfico tornado) consiste en evaluar todas las variables y parámetros en su valor central, límite superior e inferior para comparar el valor de la variable de salida en cada uno de los límites. GoldSim por defecto ordena las variables/parámetros desde la que genera una variación mayor a una menor. En base a este resultado se seleccionan las variables/parámetros que generan un mayor cambio, estas serán llamadas sensibles.

El segundo resultado busca afinar lo obtenido anteriormente calculando cómo varía el output dentro de los límites utilizando las mismas distribuciones de probabilidad. Para esto GoldSim considera valores intermedios entre el límite superior y el límite inferior. Siempre se evalúan al menos 3 puntos, pudiendo aumentarse hasta 99 donde se interpola de forma lineal entre el límite superior y el punto central con la mitad de los puntos y entre el límite inferior y el valor central con la siguiente mitad de puntos (GoldSim, 2014a). Por lo anterior la cantidad de puntos siempre es un valor impar entre 3 y 99. La utilización de 51 puntos se repite para esta sección debido a que permite ver de forma clara la evolución del resultado además de tiempos de procesamiento razonables. Se grafican los pares x-y para generar la curva que representa la tasa de cambio ante distintas alteraciones sobre aquellas que se catalogan como sensibles.

## 4.2 EVALUACIÓN DE IMPACTO DE VARIABLES SENSIBLES

Una vez identificadas las variables/parámetros sensibles se analiza el impacto que tienen las perturbaciones en comparación con la incertidumbre insertada al sistema. Se realiza esto para discriminar si las fuentes de aleatoriedad/incertidumbre introducidas en el modelo permiten ver o no diferencias en las variables de salida. El enfoque para esto entonces pasa a considerar toda la aleatoriedad e incertidumbre generada mediante el muestreo y realizaciones. Para cada una de las variables/parámetros sensibles se construye la distribución de probabilidad del output considerando los límites inferior y superior que provocan una disminución de la HHA. Con el fin de que los resultados

obtenidos en todos los casos sean comparables, la incertidumbre de los cálculos solo estará dada por las variables/parámetros restantes (no sensibles), además cuando se calcula la HHA en los límites de una variable/parámetro sensible, aquellos que no se estén evaluando se fijan en el valor central.

Por la forma de operación del software este obtiene una distribución de probabilidad del output para el último año de cada realización, o sea, bajo este esquema solo se estarían utilizando 1/30 de los datos. Con el fin de no ignorar la historia de los otros 29 años y aprovechando la cualidad del modelo de que todas las variables y parámetros son independientes y no existen variaciones temporales, se decide realizar la simulación con una duración de 1 año, pero con 100,000 realizaciones con el fin de tener un output que considere mayor cantidad de datos. El resultado que se busca analizar es la misma variable de salida del punto anterior (HHA total) donde se quiere estudiar la distribución de probabilidad que se forma y como se desplaza/cambia esta. En el caso que la variable/parámetro genere una modificación en la forma de la distribución de probabilidad se supone que los cambios entonces son capaces de gobernar a la incertidumbre/aleatoriedad introducida. En el caso contrario, donde no se observen cambios apreciables sobre la distribución de probabilidad más allá de un desplazamiento, es posible decir que resultados generados a partir de modificaciones de la variable/parámetro no reflejan una gobernanza de la incertidumbre planteada.

Otro resultado a considerar corresponde a la dominancia estocástica, este criterio se utiliza para discriminar si una alternativa resulta (en el sentido de la dominancia estocástica), mejor que otra. Para esto se utilizan también las distribuciones de probabilidad del output, pero en su forma acumulada. En particular se utiliza este criterio para discriminar que alternativa es preferible con el fin de disminuir la HHA. Se debe destacar un supuesto fuerte para la aplicación, este es considerar que el usuario es averso al riesgo (ReVelle, et al., 2003).

#### **4.2.1 Dominancia estocástica de primer orden (DEP)**

Corresponde a la forma más fuerte de este criterio que indica que para todos los niveles de probabilidad una alternativa presenta mejor retorno que otra (en este caso el retorno se asocia a una disminución de la huella hídrica azul).

$$F_i(y) \geq F_j(y)$$

*F<sub>i</sub>(y): Probabilidad acumulada de la alternativa i*

*F<sub>j</sub>(y): Probabilidad acumulada de la alternativa j*

Gráficamente esto se traduce en que una alternativa “j” domina a otra “i” si la curva de distribución de probabilidad acumulada se encuentra siempre a la izquierda (para toda probabilidad), ósea no permite las intersecciones.

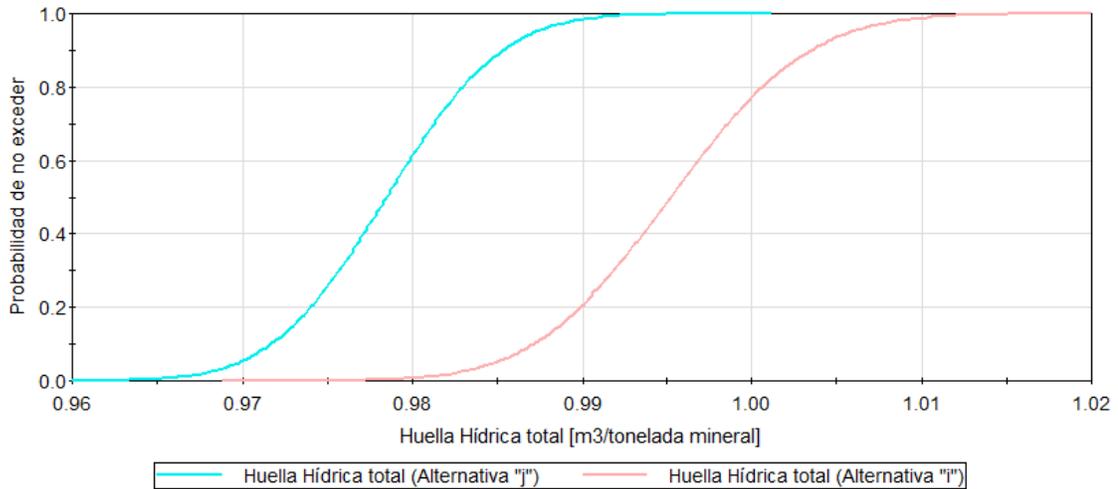


Gráfico 1: Ejemplo dominancia estocástica de primer orden donde "j" domina a "i" en el sentido de DEP para una disminución de la HHA.

Conceptualmente se puede entender este criterio como que, para todas las posibles combinaciones de muestreo disponibles, un cambio sobre una alternativa generará para toda probabilidad una disminución de HHA mayor que otras, en otras palabras, la alternativa "j" siempre tendrá un mayor impacto en cuanto a disminución de HHA que la alternativa "i".

#### 4.2.2 Dominancia estocástica de segundo orden (DES)

La segunda forma de dominancia estocástica es más débil como criterio y por lo tanto nunca será preferible sobre la DEP. Esta permite que las curvas a evaluar se intersecten ya que evalúa el área contenida entre ellas. Si consideramos la notación del punto anterior es posible formalizar el criterio de la siguiente forma:

$$\int_{-\infty}^z [F_j(y) - F_i(y)] dy \geq 0$$

Lo cual debe cumplirse para todo  $z \in y$ .

Este criterio lo que busca evaluar es que alternativa genera una mayor disminución de huella neta sin discriminar con que probabilidad de ocurrencia puedan ocurrir estas diferencias. En otras palabras, este criterio está fuertemente influenciado por la aversión al riesgo. Por ejemplo, puede darse el caso que una alternativa produzca las mayores disminuciones de huella para probabilidades extremas, lo cual a un tomador de decisiones le puede implicar mayores riesgos, es por esto que este criterio resulta más débil y debe tener una evaluación más cuidadosa para discriminar si la mejoría ocurre para un rango de probabilidades con riesgos tolerables.

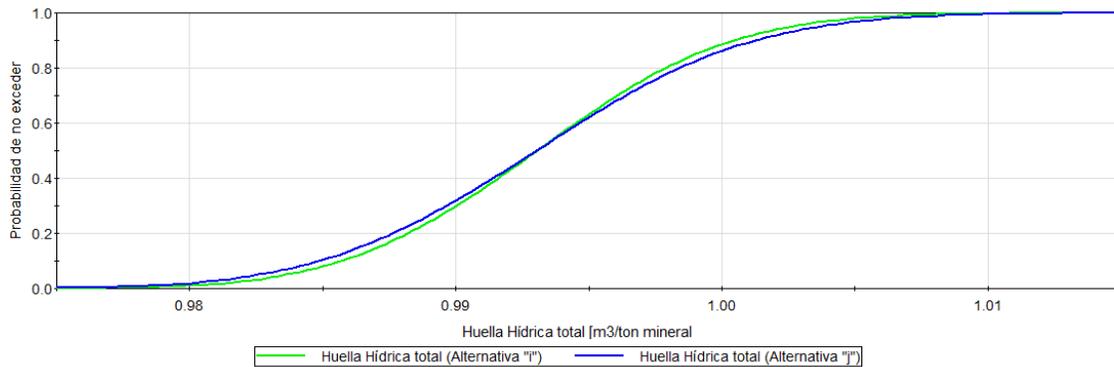


Gráfico 2: Ejemplo dominancia estocástica de segundo orden donde "j" domina a "i" en el sentido de DES para una disminución de la HHA.

### 4.3 ESCENARIOS Y ESQUEMAS DE OPERACIÓN

Para evaluar el impacto de condiciones reales a las cuales puede estar sometida la faena minera se decide la implementación de escenarios y esquemas de operación elegidos sobre la base de la realidad de la minería chilena. Como la tónica de esta realidad son las condiciones desfavorables de disponibilidad de agua, resulta natural estudiar el efecto de medidas orientadas a la reducción en el uso del recurso hídrico. La primera distinción necesaria para la correcta evaluación viene de diferenciar aquello que es netamente operacional (esquemas de operación) de lo que no es parte del control de la mina, o sea, exógeno (escenarios).

En particular para el modelo propuesto se tiene que los únicos factores no operacionales que incorpora son climáticos relacionados con precipitación y evaporación. Todo cambio que afecte parámetros y/o variables sobre los cuales se toman decisiones (variables de decisión) será un esquema de operación (Olivares, 2016) exceptuando aquellas de origen climático los cuales se llaman escenarios. En esta etapa cada simulación cuenta con 10,000 realizaciones lo cual permite obtener variables de salida homogéneas y tiempos de procesamiento del orden de 1 minuto por simulación.

#### 4.3.1 Esquema de operación base

Los resultados serán contrastados con un caso base el cual consiste en fijar todos los parámetros y variables en los mismos valores definidos en el capítulo 3, como única consideración especial se utilizan fuentes de agua que no incurren en un gasto energético y por lo tanto una menor HHA indirecta, en otras palabras, las fuentes de agua fresca se consideran gravitacionales para así dejar el manejo de fuentes a otro esquema de operación.

### 4.3.2 Esquema de operación 1: Relave en pasta

El caso base utilizado supone un  $C_p$  de 60% (punto 3.5.2.1) lo cual se considera cercano al límite superior de los relaves espesados (Figura 11) y por ende próximo a la máxima eficiencia de la tecnología. Operacionalmente hablando, manejar el valor del  $C_p$  del relave es en extremo complejo debido a las distintas tecnologías involucradas con costos de inversión y operación significativos. No obstante, debido a las ventajas relacionadas con ahorro del recurso hídrico tiene sentido estudiar esta componente de innovación considerando además que existen ejemplos exitosos de utilización de relave en pasta en Chile (Cacciuttolo, et al., 2015).

Este esquema de operación considera un aumento del  $C_p$  del relave hasta un 75% manteniendo todas las demás variables y parámetros fijos. Se destaca que no se consideran modificaciones sobre la reología del relave y sus implicancias sobre el WRM además del aumento por la energía requerida, lo anterior debido a la incapacidad de aislar cuanto de la energía que se utiliza a concentración efectivamente es producto del bombeo del relave.

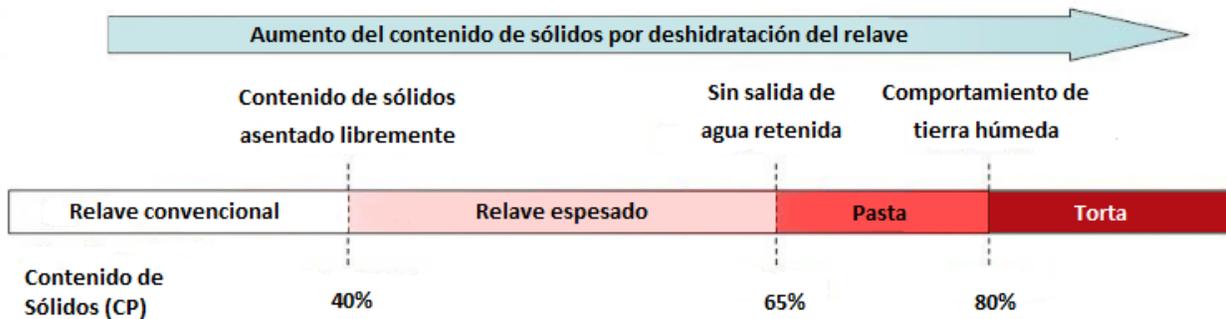


Figura 11: Clasificación relaves según contenido de sólidos (Cacciuttolo, et al., 2015)

Para la implementación de este  $C_p$  se considera un aumento paulatino desde el valor original hasta el 75% en un periodo de 5 años para así simular la puesta en marcha de esta medida. Se debe notar que este aumento-diminución solo representa la media de la distribución normal por lo cual al hacer el muestreo en la distribución normal el aumento-diminución será diferente.

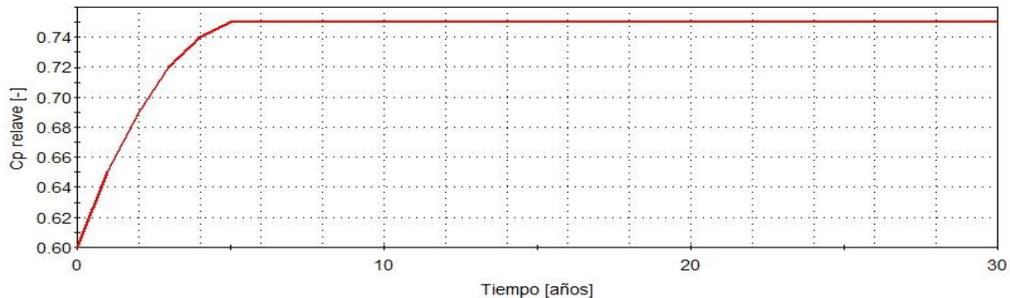


Gráfico 3: Evolución  $C_p$  relave en Escenario Operación 1 previo al muestreo

### 4.3.3 Esquema de operación 2: Incorporación de agua salada-desalinizada

Por definición la HHA se basa en el uso de fuentes de agua fresca por lo cual evaluar alternativas que impliquen el no uso de estas fuentes resalta como opción. En este ámbito existen dos posibles fuentes que no implican HHA, pero si son fuentes viables para la minería, estas son el agua desalinizada y el agua salada. Actualmente esta tecnología está en uso y sus proyecciones a futuro son eventualmente pasar a una operación lo más cercano a 100% agua de mar (COCHILCO, 2008). En particular se evalúa esta medida en los procesos de concentración donde ya existen casos exitosos que consideran agua desalinizada (por una planta desalinizadora) o bien el uso directo del agua salada. Cabe resaltar que esta operación tiene un trade-off con la cantidad de energía requerida para la desalinización misma o la impulsión desde el nivel del mar a faenas que fácilmente pueden estar sobre los 3000 [m.s.n.m.].

Para la evaluación propiamente tal de estas medidas se centra el análisis en el consumo energético incurrido por estas fuentes. No se considera el uso de otros insumos debido a la inexistencia de información al respecto de los consumos en que se incurren para su manufactura. Se toma este supuesto debido a los consumos indirectos relativamente bajos que implican los insumos no energéticos considerados en el caso base (3.5.2.3) y la imposibilidad de cuantificar el consumo de agua de los reactivos que consideran estas alternativas.

El esquema de operación que se plantea considera pasar de una operación sin fuentes a base de agua de mar a una que considere un 90% de aporte de estas fuentes en un periodo de 10 años. Se debe notar que este aumento-diminución solo representa la media de la distribución normal por lo cual al hacer el muestreo en la distribución normal el aumento-disminución será diferente. La elección de una operación con estas 2 nuevas fuentes de agua con las proporciones elegidas es un ejercicio para demostrar las capacidades del modelo. En la realidad, es más probable una operación con solo una de estas fuentes ya que para el caso del agua desalada se incurre en el costo de construcción de la planta mientras que en el caso del agua salada se incurre en el gasto de adaptar la maquinaria para trabajar con ella.

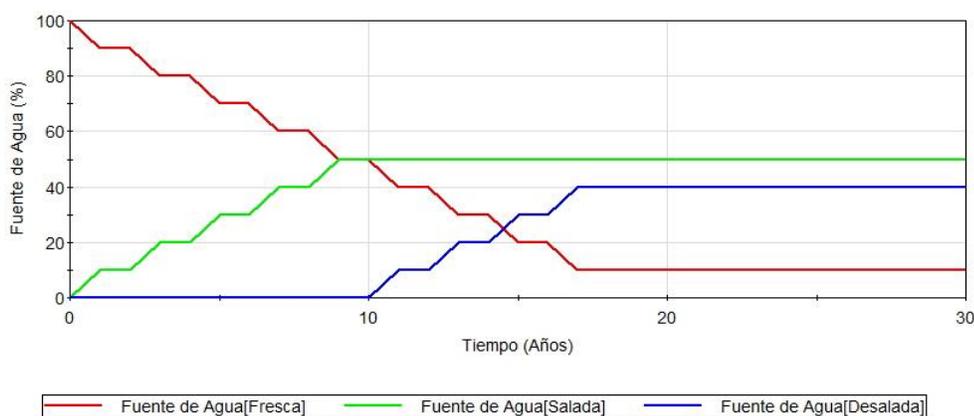


Gráfico 4: Implementación de fuentes de agua alternativas para esquema de operación 2 previo al muestreo.

La consecuencia de este esquema es sobre la HHA directa, pero se considera además el impacto sobre la HHA indirecta debido al gasto energético que implican estas medidas. Se considera el caso de la planta desalinizadora “Escondida Water Supply (EWS)” (Arcadis Geotecnia, 2008) donde se proyecta una planta desalinizadora con un caudal de 3.2 [m<sup>3</sup>/s] con un consumo estimado de 50 [MW]. Para la impulsión desde el nivel del mar hasta los 3300 [m.s.n.m.] se considera un sistema de impulsión con un consumo estimado de 80 [MW]. En base a esta información se estima un consumo de energía de 6.94 [kWh/m<sup>3</sup>] para el bombeo del agua salada y de 11.28 [kWh/m<sup>3</sup>] para la desalinización del agua más su bombeo.

#### 4.3.4 Esquema de operación 3: Reserva (stockpile) de mineral

El actual escenario de producción de cobre denota una clara tendencia a la baja a nivel nacional debido a la baja en el precio en el cobre a nivel mundial. Esto plantea proyecciones de producción inciertas a futuro donde priman tendencias bajistas. Ante esta realidad se plantea evaluar el efecto de una disminución en algunos procesos relacionados con la producción de cobre, sin detener el plan minero de extracción del mineral. Lo anterior se traduce en generar un depósito de mineral chancado el cual, en cualquier momento, en reacción a un aumento del precio del cobre, puede pasar a rápida producción.

Para reflejar el esquema de operación planteado se modifican las variables que representan el porcentaje del mineral entrante que se transforma en concentrado y relave. La proporción entre concentrado de cobre y relave se mantiene constante, pero disminuyendo en un 30% la cantidad de mineral procesado. La consecuencia directa entonces será que un 30% del mineral será apilado (stockpiles) para tiempos futuros. Se supondrá que se almacena material los primeros 15 años para luego procesarlo los siguientes 15. Se sigue el supuesto de que siempre existirá capacidad de planta para procesar el mineral. Se debe notar que este aumento-diminución solo representa la media de la distribución normal por lo cual al hacer el muestreo en la distribución normal el aumento-diminución será diferente.



Gráfico 5: Valores de producción en esquema de operación 3 previo al muestreo.

### 4.3.5 Escenario 1: Aumento evaporación y disminución de la precipitación

El modelo planteado tiene una dependencia climática la cual merece ser considerada en un contexto de notorio cambio climático. En particular se intenta cuantificar el efecto que tiene una disminución del agua disponible debido a parámetros climáticos. Se traduce lo anterior en un aumento lineal de la evaporación de bandeja hasta un 15% y una disminución lineal de hasta un 15% en la precipitación media anual sobre la zona en treinta años plazo. Este valor se encuentra en línea con proyecciones para cuencas del norte chico de Chile (Centro de Cambio Global UC, 2012) Se debe notar que este aumento-diminución solo representa la media de la distribución normal por lo cual al hacer el muestreo en la distribución normal el aumento-diminución será diferente. Para referirse a este escenario en los resultados se utiliza la etiqueta “clima desfavorable”.

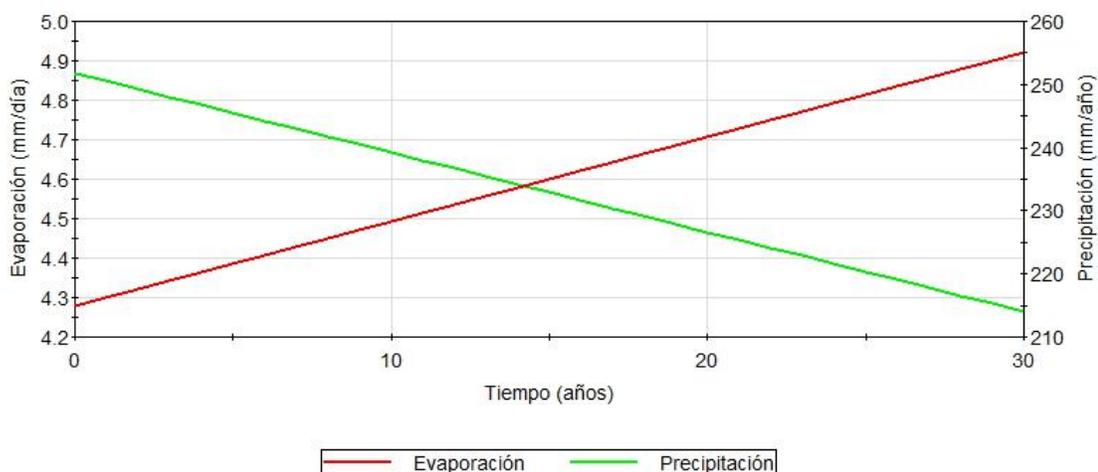


Gráfico 6: Parámetros climáticos en escenario 1 previo al muestreo.

### 4.3.6 Escenario conjunto: Nueva fuente de agua salada en respuesta a un aumento de evaporación y disminución de la precipitación

En vista que en todo momento se trabaja con el supuesto de que siempre existirán fuentes de agua disponibles para procesar la cantidad de mineral que se produce se puede estar entrando en una incongruencia puesto que el Escenario 1: Aumento evaporación y disminución de la precipitación supone una disminución de la disponibilidad del agua fresca. Con el fin de evaluar la reacción que puede tener una minera ante un escenario adverso se plantea un escenario conjunto donde al cabo de 4 años de condiciones desfavorables se decide la operación con agua salada a partir del año 5 siguiendo la misma entrada en marcha del esquema de operación 2 para el agua salada pero desfasada.

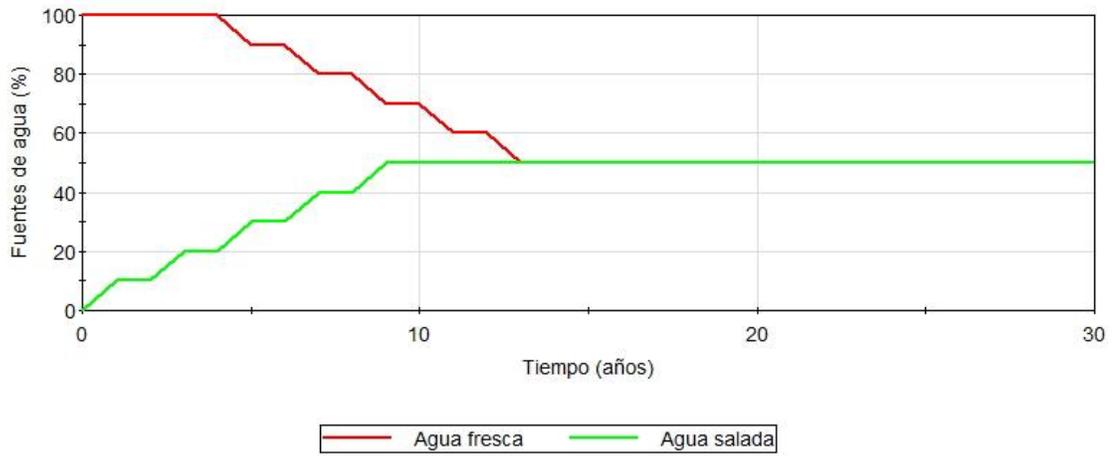


Gráfico 7: Fuentes de agua en escenario conjunto previo al muestreo

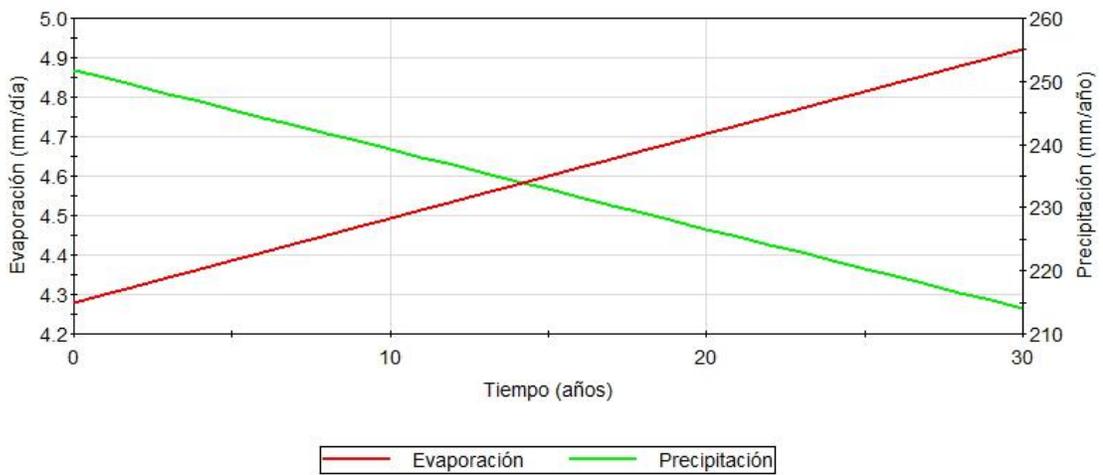


Gráfico 8: Parámetros climáticos en escenario conjunto previo al muestreo.

## 5 RESULTADOS Y ANÁLISIS

A continuación, se presentan los resultados más relevantes de la aplicación de la metodología del punto 4, en particular del modelo GoldSim. Se presenta además el análisis de los resultados obtenidos siempre teniendo como foco la sustentabilidad del recurso hídrico en la argumentación.

### 5.1 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

Se realiza el análisis de sensibilidad para las 30 variables/parámetros involucrados en el modelo de HHA considerando el WRM. El primer resultado a obtener corresponde al “grafico tornado” el cual se divide en 2. Primero en el Gráfico 9 se presentan aquellas 20 variables o parámetros que resultan más sensibles (ordenadas de mayor a menor) y por lo tanto más relevantes (criticas) para el análisis. Posterior a este se muestra el Gráfico 10 el cual muestra las 10 variables/parámetros menos sensibles del modelo donde se contrastan con la evaporación desde la laguna de aguas claras para mantener consistencia con la escala visual, estas también se ordenan de mayor a menor sensibilidad). Ambos gráficos se leen de la misma forma donde el color azul indica que un aumento hasta el límite superior de la variable (cuantil 99%) produce el cambio indicado por la barra horizontal en la HHA total. Por el contrario, el color celeste indica que una disminución de la variable hasta el cuantil 1% hará variar la HHA en el sentido opuesto.

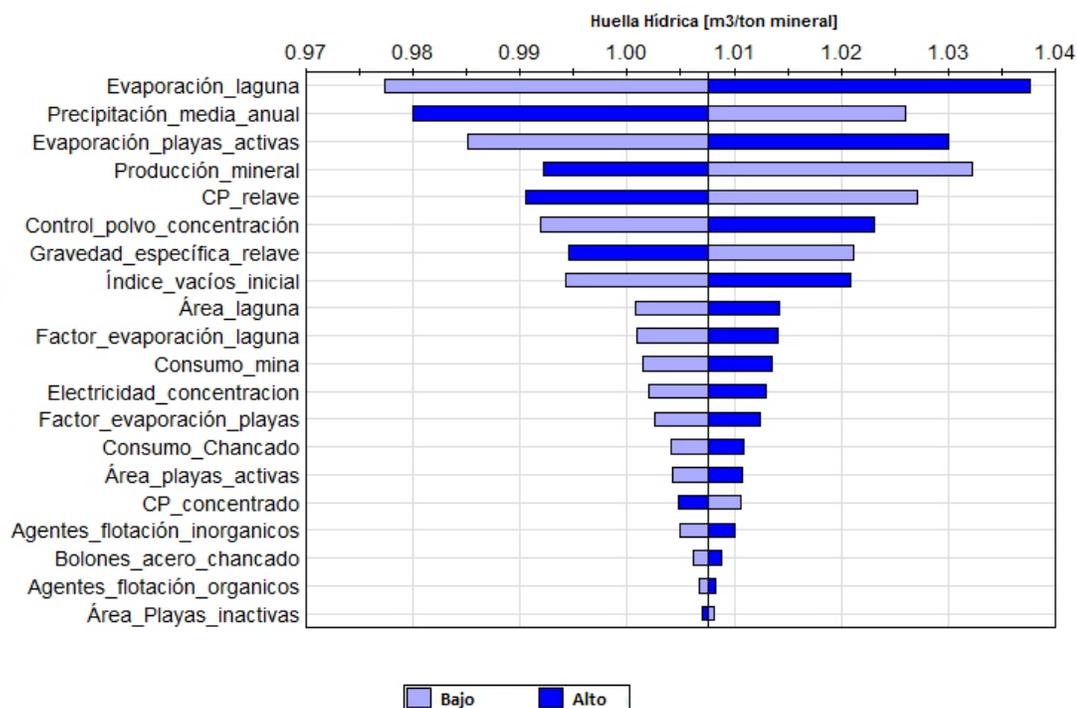


Gráfico 9: Resultados análisis de sensibilidad HHA concentrado de cobre (20 mayores)

Por inspección visual del Gráfico 9 notamos que a partir de la variable “Índice de vacíos inicial” se produce un salto en la sensibilidad por lo tanto se seleccionan estas 8 primeras para las siguientes etapas de procesamiento.

VARIABLES/PARÁMETROS SELECCIONADOS POR SU ALTA SENSIBILIDAD EN ORDEN DE MAYOR A MENOR:

1. Tasa de evaporación desde laguna de aguas claras (WRM).
2. Precipitación media anual (WRM).
3. Tasa de evaporación desde las playas activas (WRM).
4. Producción media anual de mineral que entra a la concentradora.
5. Concentración de sólidos en el relave ( $C_p$  del relave).
6. Consumo por control de polvo en concentración.
7. Gravedad específica del relave (WRM).
8. Índice de vacíos inicial del relave (WRM).

Se debe recordar que el análisis se hace en un entorno determinístico por lo tanto todos los resultados del análisis de sensibilidad tienen un resultado implícito que corresponde al valor de la HHA cuando las 30 variables/parámetros se encuentran en su valor central. Este valor, que corresponde a la línea vertical desde donde comienzan todas las barras horizontales, es de 1.008 [m<sup>3</sup>/tonelada mineral] para la HHA azul total de la faena minera tipo.

Es claro de este análisis inicial que lo relacionado con el tranque de relave y por lo tanto con la recirculación de agua entre el tranque de relaves y el proceso de concentración es crítico para temas de huella hídrica. Además, destacan las variables climáticas además de aquellas variables que impactan sobre las pérdidas por retención de agua en el relave.

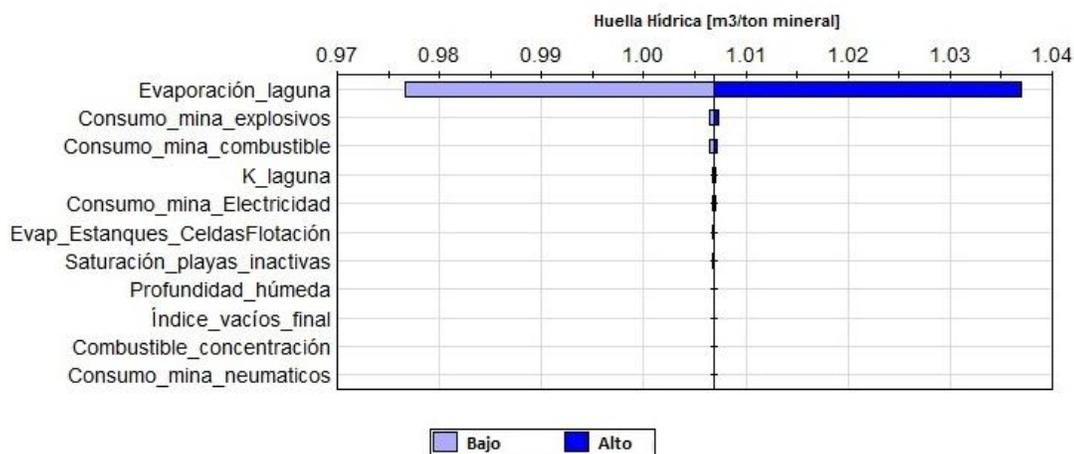


Gráfico 10: Resultado análisis sensibilidad HHA concentrado de cobre (10 inferiores)

En cuanto al Gráfico 10 es posible ver que existe una serie de variables cuya variación implica cambios menores al 1% del valor central de la HHA, en particular aquellas que se asocian a consumos indirectos de la mina. Para consumos indirectos de la concentradora

por otro lado la sensibilidad de las variables impacta en un mayor grado a la huella siendo destacable la sensibilidad de la electricidad de los procesos de concentración.

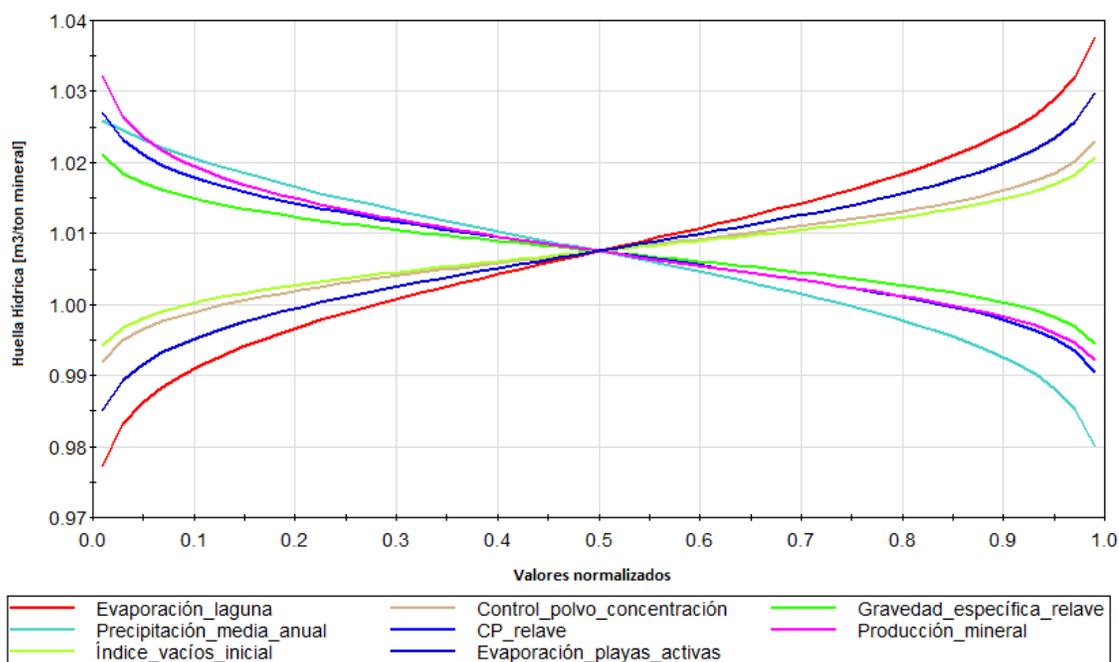


Gráfico 11: Valores normalizados de los 8 parámetros más sensibles de la HHA del concentrado de cobre.

A modo de comparación, se presenta el Gráfico 11 donde las 8 variables/parámetros sensibles se presentan en un mismo eje normalizadas por todo el rango de probabilidad de la distribución que las define (en otras palabras, para cada distribución, se representa el rango de valores presentes entre el “cuantil” 1% y el 99%). En general se sigue la tendencia teórica donde la evolución de la huella hídrica es lineal debido a que todos los cálculos involucrados son lineales. En los extremos es posible notar cierta curvatura la cual se asocia a que los parámetros varían a una mayor tasa en los extremos de la distribución. En el Anexo C se presenta cada variable/parámetro de forma independiente y como varía la HHA en función de los cambios.

Las variaciones en la HHA debido a cambios en las variables/parámetros de las Tabla 8 y Tabla 9 indican una concordancia en relación a la forma como se muestrearon las variables estocásticas. Esto quiere decir que variables/parámetros que se muestrean con una desviación estándar alta (como por ejemplo precipitación), generan los mayores cambios sobre la HHA. Ahora se debe reconocer que aun cuando las variables climáticas generan los mayores cambios sobre la HHA (para los límites considerados), si se considera la tasa de cambio, estas variables no resultan ser las de mayor relevancia. Bajo este último criterio, parámetros del relave (Gravedad específica e índice de vacíos inicial) presentan el mayor impacto en la HHA debido a la pequeña variación de estos parámetros necesario para modificar en 1% el valor de la huella hídrica azul. Siguiendo

con este criterio, las siguientes variables más relevantes corresponden a aquellas netamente operacionales como lo son el Cp del relave, la producción y finalmente aquellas de índole climática.

Tabla 8: Tasas de variación de la HHA con respecto a un aumento de la variable/parámetro (signo negativo indica disminución).

Variable/parámetro	Aumento variable/parámetro [%]	Variación HHA [%]	Variación [%] para cambio 1% en HHA
Evaporación_laguna	53.67	3.08	17.45
Control_polvo_concentración	31.12	1.59	19.60
Gravedad_específica_relave	2.34	-1.29	-1.81
Precipitación_media_anual	95.69	-1.79	-53.59
CP_relave	7.00	-1.88	-3.71
Producción_mineral	23.34	-2.38	-9.80
Índice_vacíos_inicial	2.32	1.39	1.67
Evaporación_playas_activas	53.67	2.28	23.52

Tabla 9: Tasas de variación de la HHA con respecto a una disminución de la variable/parámetro (signo negativo indica aumento).

Variable/parámetro	Disminución variable/parámetro [%]	Variación HHA [%]	Variación [%] para cambio 1% en HHA
Evaporación_laguna	53.67	2.98	18.03
Control_polvo_concentración	31.12	1.49	20.91
Gravedad_específica_relave	2.34	-1.39	-1.68
Precipitación_media_anual	142.64	-2.78	-51.35
CP_relave	7.00	-1.79	-3.92
Producción_mineral	23.34	-1.59	-14.70
Índice_vacíos_inicial	2.32	1.29	1.80
Evaporación_playas_activas	53.67	2.18	24.59

Cabe destacar una particularidad que ocurre con la variable “precipitación\_media\_anual” debido a que aun cuando el muestreo para la variable es simétrico, la HHA no presenta simetría con respecto al valor central. Al corroborar la distribución muestreada para el caso de la precipitación notamos que este problema se origina en el truncamiento sobre la variable para valores menores a 0. Conceptualmente, considerar la precipitación como una variable normal es un error ya que es un proceso difícilmente modelable por esta distribución, pero dado el truncamiento que ocurre el muestreo que se genera es más asociable a una distribución log-normal, pero con la particularidad de tener mayor ocurrencia de valores cercanos a 0. En otras palabras, se puede considerar como una evaluación de un escenario conservador debido a la mayor cantidad de eventos de baja precipitación versus lo que sería considerar formalmente una distribución log-normal. Se

traduce lo anterior en una sobre estimación de la huella hídrica en el rango de las bajas precipitaciones (asociado a percentiles altos).

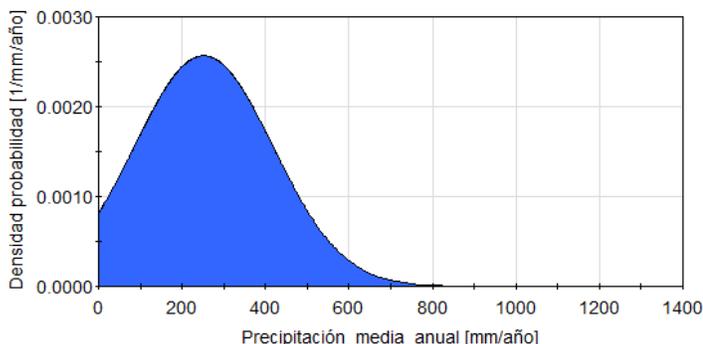


Gráfico 12: Distribución probabilidad precipitación media anual truncada en 0 para valores negativos

Se tienen 2 consideraciones entonces para aquellas variables/parámetros más sensibles, la primera corresponde a la tasa de cambio que se logra entre variaciones de las entradas con respecto a las salidas, esto debido a que cierto parámetro puede ser muy sensible para un resultado (lograr alta variación de una variable de salida dada una pequeña variación de una variable de entrada/parámetro), pero en la realidad dichas variaciones pueden no representar la realidad, este sería el caso si por ejemplo en el modelo de HHA el muestreo de la gravedad específica se realiza con una desviación estándar más alta. La segunda consideración corresponde a los límites sobre los cuales se evalúa la sensibilidad, en este caso se utiliza la desviación estándar como un porcentaje de la media asociado a una distribución normal. Esto asume que las variables/parámetros presentan simetría con respecto a la media lo cual puede no representar la realidad necesariamente. Se reconoce esto último como una limitación del modelo al estandarizar todos los procesos bajo una misma distribución. Esto claramente representa un error por ejemplo para las variables de índole climática como la precipitación donde es posible refinar el análisis mediante un análisis de frecuencia para saber con certeza que distribución de probabilidad modela de mejor forma el fenómeno.

## 5.2 EVALUACIÓN DE IMPACTO DE VARIABLES SENSIBLES

La construcción de las distribuciones de probabilidad en su forma acumulada y de densidad de probabilidad se realiza considerando para cada una de las variables/parámetros sensibles el límite asociado a disminuciones de la HHA según el Gráfico 9 (límite inferior con “bajo” y límite superior con “alto”)

En primer lugar, del Gráfico 13 es posible observar el cambio que generan las distintas alternativas sobre la variable de salida, visualmente es posible ver que en todos los casos se producen cambios con respecto al caso base en el sentido de disminuciones de la HHA ya que las distribuciones de probabilidad se desplazan hacia la izquierda. El

resultado principal del análisis de este grafico corresponde al efecto que tiene la incertidumbre planteada en conjunto con las variaciones de parámetros/variables. Es posible ver que además del desplazamiento lateral de la distribución existen cambios en la densidad de probabilidad. Por ejemplo, el parámetro evaporación laguna presenta mayor densidad en valores centrales lo cual a su vez tiene como consecuencia menor densidad (ocurrencia) de valores extremos que se observa debido al menor rango de valores de HHA que abarca. En otras palabras, como consecuencia de estas variaciones se logra distinta propagación de la incertidumbre. En este análisis las variables climáticas nuevamente resaltan como aquellas que desplazan más los resultados hacia disminuciones de la huella hídrica. Siguiendo con el criterio planteado, la evaporación desde playas activas y la producción presentan mayores densidades para valores centrales lo cual se supone mejor debido a que el área bajo la distribución debe permanecer constante lo que implica menor ocurrencia de valores extremos. Finalmente, entonces se dice que estas variables/parámetros logran “vencer” o “dominar” a la incertidumbre planteada en el sistema mediante cambios en la forma de las distribuciones de las variables de salida que van más allá de desplazamientos laterales.

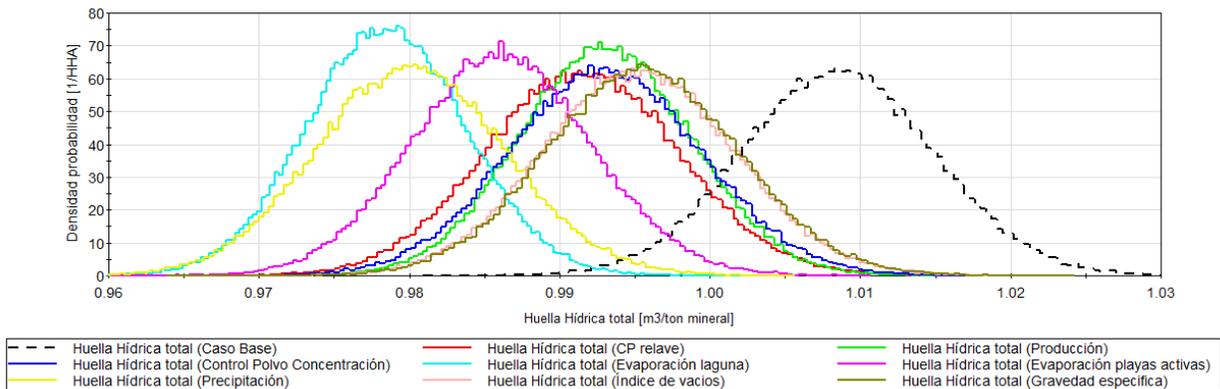


Gráfico 13: Densidad probabilidad HHA 8 parámetros/variables sensibles + caso base

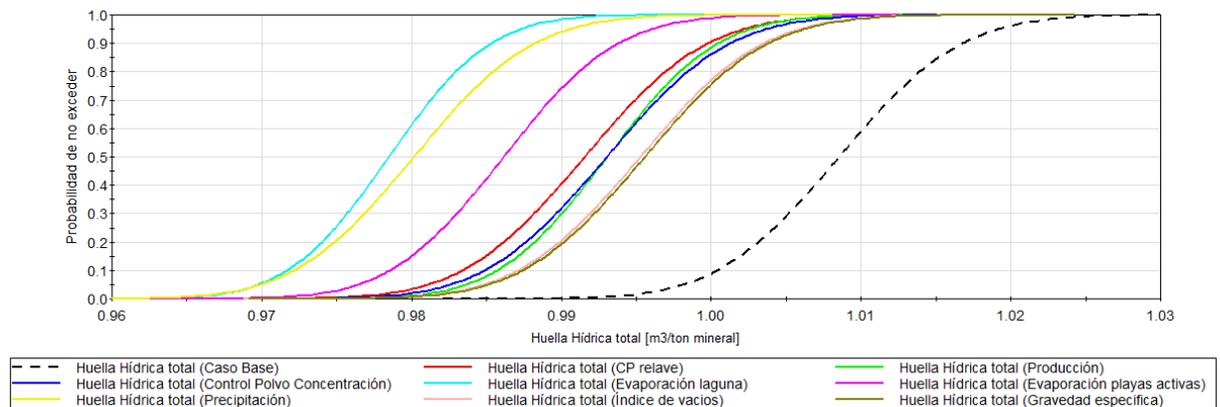


Gráfico 14: Distribución de probabilidad acumulada HHA 8 parámetros/variables sensibles + caso base

Como resultado del análisis de dominancia estocástica se tiene en primer lugar una mejoría en todos los casos por sobre el caso base según el criterio de la dominancia

estocástica ya sea en su forma de primer orden o de segundo orden. Si se hace una comparación visual entre los resultados del Gráfico 13 y la Tabla 10 es posible notar que los resultados visuales distan de lo analítico ya que existe una clara DEP de todas las alternativas sobre el caso base. La diferencia entonces entre el cálculo analítico y lo visual lleva a estudiar con más detenimiento los extremos donde se comprueba que existe intersección entre algunas alternativas y el caso base. Debido a estas intersecciones y lo estricto del planteamiento del criterio de DEP es que se produce esta discordancia. Si se continúa el análisis es posible observar que se genera esta discordancia al comparar otras alternativas. Por ejemplo, el control de polvo visualmente presenta DEP sobre el e0 y Gs, pero según el cálculo analítico solo se cumple DES. De nuevo en este caso este problema es generado por los extremos donde existe intersección. Si se busca una causa para estas intersecciones se debe recordar que estos resultados fueron obtenidos mediante muestreo de distribuciones de probabilidad y aun cuando se hizo un gran número de realizaciones existe la posibilidad de que en alguna simulación se tenga un mayor número de muestreos en valores extremos. El resultado entonces, en este caso, tiene una componente de azar que genera pequeñas discordancias, por esto es que se comprueba la importancia de la inspección visual en la aplicación de la metodología.

Tabla 10: Resumen dominancia estocástica (estrictamente analítico) donde "PO" indica dominancia de primer orden y "SO" indica dominancia de segundo orden.

Dominancia resumen									
Domina a \ es dominada por	CB	CP relave	Producción	Control Polvo	Evap laguna	Evap playas	Pp	e0	Gs
CB	X	-	-	-	-	-	-	-	-
CP relave	PO	X	SO	PO	-	-	-	PO	PO
Producción	SO	-	X	-	-	-	-	SO	SO
Control Polvo	SO	-	SO	X	-	-	-	SO	SO
Evap laguna	PO	SO	PO	PO	X	SO	SO	PO	PO
Evap playas	PO	PO	PO	PO	-	X	-	PO	PO
Pp	PO	SO	PO	PO	-	SO	X	PO	PO
e0	SO	-	-	-	-	-	-	X	SO
Gs	SO	-	-	-	-	-	-	-	X

En cuanto a las distintas alternativas, nuevamente resultan ser las variables climáticas las que presentan mejores resultados al dominar ya sea por DEP o DES a todas aquellas que no lo son. En el otro extremo los parámetros del relave resultan ser las alternativas más débiles al solo lograr un grado de dominancia sobre el caso base.

A modo de clasificar y comparar los resultados se ordenan las variables/parámetros por dominancia de mayor a menor cantidad de variables dominadas:

1. Tasa de evaporación desde laguna de aguas claras (WRM).
2. Precipitación media anual (WRM).
3. Tasa de evaporación desde las playas activas (WRM).
4. Concentración de sólidos en el relave ( $C_p$  del relave).
5. Consumo por control de polvo en concentración.

6. Producción media anual de mineral que entra a la concentradora.
7. Índice de vacíos inicial del relave (WRM).
8. Gravedad específica del relave (WRM).

Finalmente, dada toda la metodología anterior y los resultados obtenidos se decide considerar a la tasa de evaporación desde lagunas de aguas claras y desde playas activas como aquellos parámetros que generan un mayor impacto en el modelo, esto debido a que:

- Presentan alta sensibilidad en el modelo de la forma en que se plantean,
- Muestran alta capacidad para “vencer” a la incertidumbre planteada según los criterios de dominancia estocástica,
- Dominan a la gran mayoría de las demás variables/parámetros.

Se debe considerar que esto es producto de la forma en que se plantean las variables climáticas dentro del modelo donde estas en particular se presumen con una alta desviación estándar y distribución normal.

### 5.3 ESCENARIOS Y ESQUEMAS DE OPERACIÓN

Para cada caso se presentan los resultados de la HHA para las 10,000 realizaciones asociada a consumos directos e indirectos, huella asociada a consumos de mina y concentración y las perdidas asociadas al WRM. Estos resultados se pueden presentar de 2 formas, una como bandas que representan los percentiles de todas las realizaciones (bandas 5-95%,15-85%,25-75% y la media) o bien percentiles específicos para poder comparar más de un resultado, en el caso de percentiles específicos se escoge presentar el 15%,85% y/o la media. Se presenta además el plan minero muestreado el cual no presenta variaciones en las distintas situaciones (Gráfico 15).

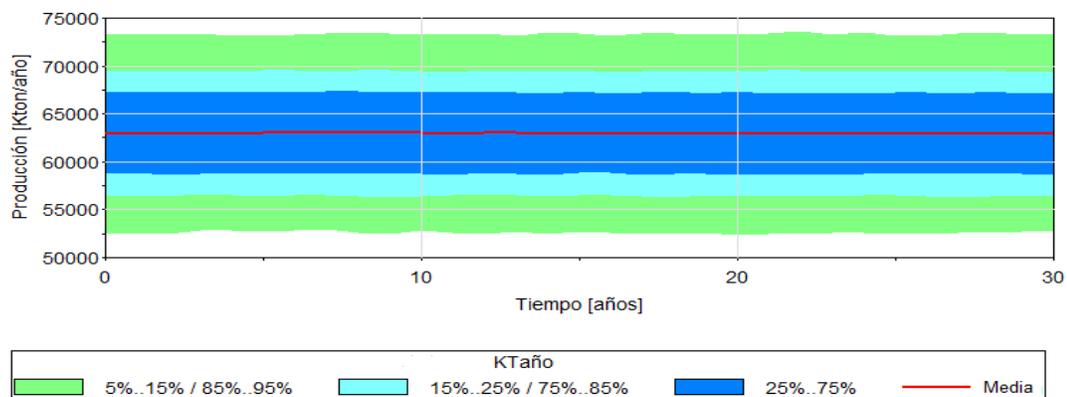


Gráfico 15: Plan minero tipo muestreado con 10000 realizaciones

### 5.3.1 Esquema de operación base

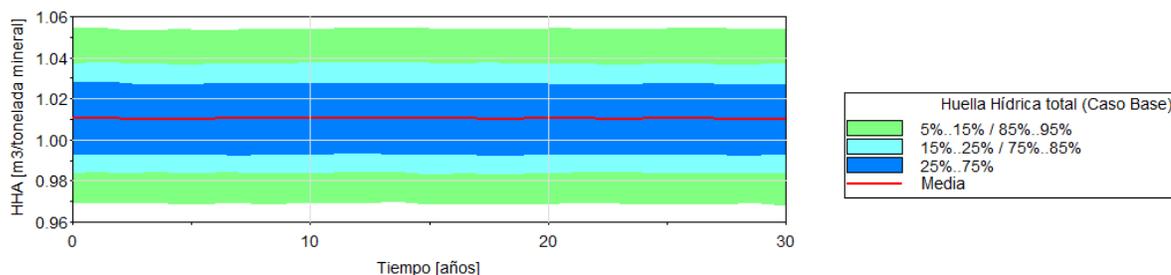


Gráfico 16: Huella Hídrica total caso base

En primer lugar, se comprueba la independencia del tiempo para el caso base ya que el resultado de todos los años es homogéneo (Gráfico 16). En cuanto a los valores obtenidos, como valor promedio se tiene una HHA total de 1.01 [m<sup>3</sup>/tonelada mineral]. Los resultados de los percentiles para la HHA total, directa e indirecta se resumen en la Tabla 11 considerando la media de los 30 años de información. Es posible notar que existe un grado de simetría entre percentiles con respecto a la media, pero siempre los percentiles mayores (75, 85, 95%) presentan una variación ligeramente más grande que su par en los percentiles menores (25, 15, 5% respectivamente). Para la misma tabla, al sumar la HHA directa e indirecta es posible ver cierta discordancia ya que estos valores suman más del valor expuesto como total, esta anomalía se explica por la forma en que se construyen los percentiles ya que el valor obtenido para cierto percentil puede no estar calculado siempre con las mismas realizaciones, en otras palabras el percentil 95% de la HHA Directa puede estar compuesto por las realizaciones 55,458,789 etc., mientras la HHA Total para su percentil 95% puede estar considerando otras realizaciones totalmente distintas. Se debe destacar que estas discrepancias sólo son visibles en la centésima del resultado por lo cual en la práctica no resultan relevantes considerando la naturaleza estocástica del sistema planteado y la gran cantidad de fuentes de incertidumbre. En general se mantiene una contribución al total de 90% por parte de la HHA como consumos directos y un 10% como consumos indirectos.

Tabla 11: Variaciones HHA total, directa e indirecta en los distintos percentiles c/r a la media

Percentil	Total		Directa		Indirecta	
	HHA [m <sup>3</sup> /ton mineral]	Variación c/r a la media [%]	HHA [m <sup>3</sup> /ton mineral]	Variación c/r a la media [%]	HHA [m <sup>3</sup> /ton mineral]	Variación c/r a la media [%]
Media	1.01	-	0.91	-	0.10	-
5%	0.97	-4.10	0.87	-4.52	0.09	-4.66
15%	0.98	-2.62	0.89	-2.89	0.09	-2.93
25%	0.99	-1.74	0.90	-1.93	0.09	-1.91
75%	1.03	1.69	0.93	1.85	0.10	1.91
85%	1.04	2.65	0.94	2.91	0.10	2.95
95%	1.05	4.34	0.96	4.75	0.10	4.65

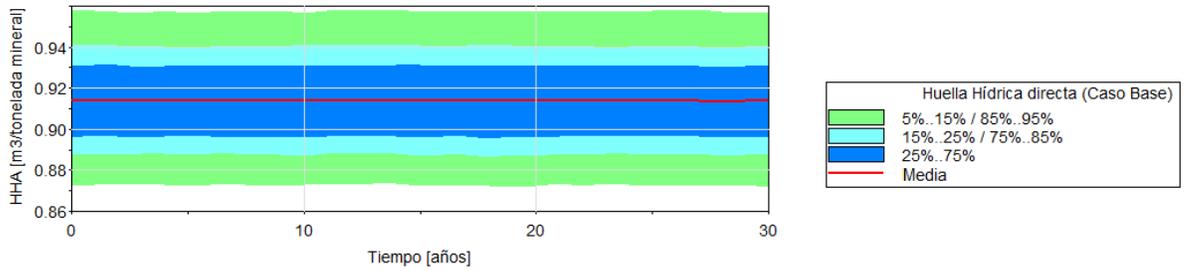


Gráfico 17: Huella Hídrica directa caso base

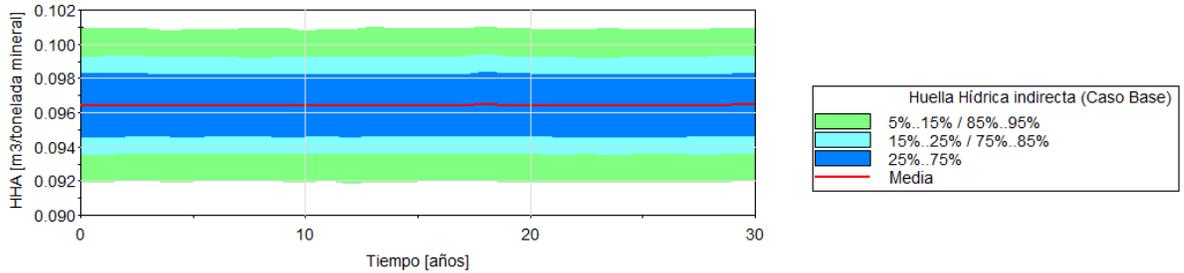


Gráfico 18: Huella Hídrica indirecta caso base

En línea con lo expuesto anteriormente del Gráfico 17 y Gráfico 18 se observa la misma tendencia homogénea sin dependencia del tiempo donde las irregularidades presentes se asocian directamente a la aleatoriedad del muestreo. En cuanto a los valores de los percentiles, resulta interesante que porcentualmente tanto los consumos directos e indirectos presentan mayor variación porcentual con respecto a la media que los valores obtenidos para la HHA total lo que se traduce en una reducción efectiva de la amplitud de los resultados al sumar ambas componentes.

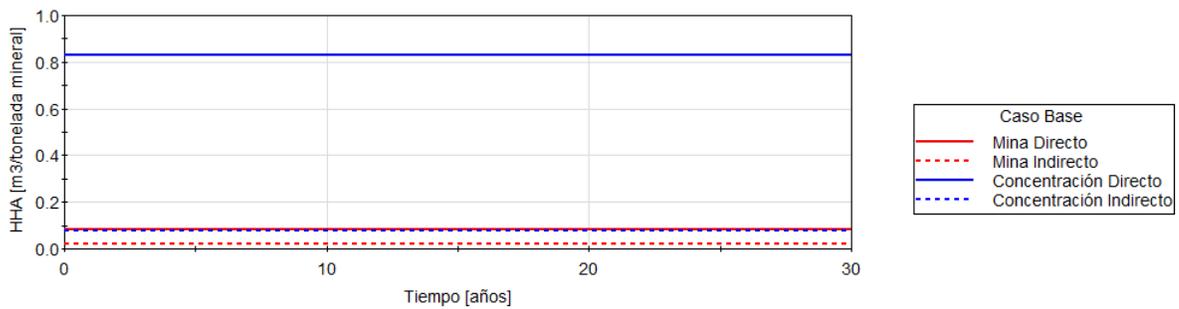


Gráfico 19: Comparación media HHA por proceso caso base

Al profundizar el análisis a los procesos involucrados notamos que la principal fuente de Huella Hídrica son los procesos que conforman la concentración, más aún la parte directa de estos. En promedio la suma de todos los procesos involucrados en la concentración (directa), lo que incluye el sistema de recirculación desde el tranque de relaves, constituyen un 82.2% de la HHA total seguidos por los consumos directos de mina con

un 8.2%. Concentración indirecta representa un 7.5% y finalmente mina indirecta tiene un 1.96% de cuota (Gráfico 19).

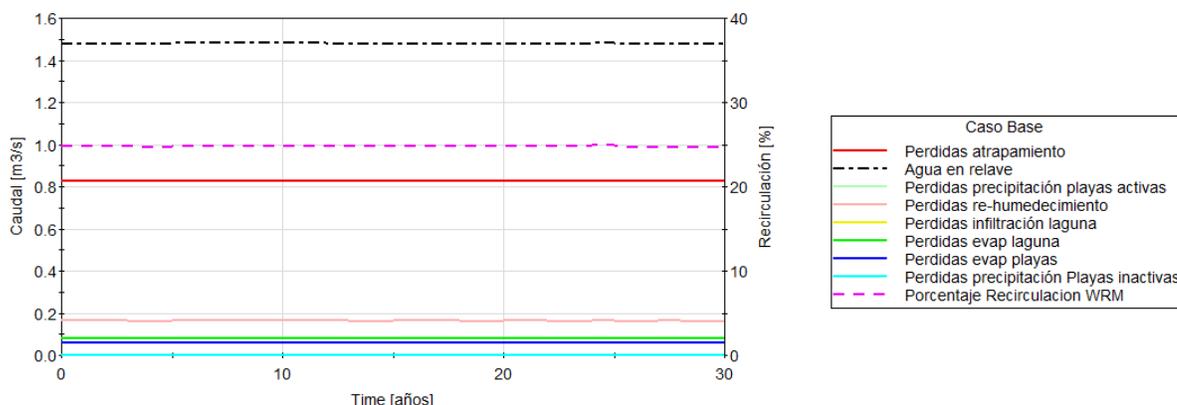


Gráfico 20: Perdidas WRM caso base

El siguiente nivel de análisis corresponde a estudiar que ocurre con el WRM y sus influencias en la HHA, se debe recordar que la huella hídrica de la concentración se estima con el “make up” por lo cual se busca estimar las pérdidas de agua y el impacto de estas. Del Gráfico 20 se comprueba primero la no dependencia del tiempo para el caso base planteado, sobre los valores obtenidos se tiene una recuperación promedio del 24.8% desde el tranque de relave hacia el proceso de concentración. La recirculación estimada está basada en los 1.48 [m<sup>3</sup>/s] promedio entrantes como agua en el relave lo que se traduce en 0.37 [m<sup>3</sup>/s] de agua recirculada. En cuanto a las pérdidas que llevan a estos valores, en primer lugar, la más relevante corresponde a las pérdidas por atrapamiento o por retención ( $L_{ent}$ ) que constituyen en promedio un 55.9% del agua entrante, valor en línea con la bibliografía (Wels & Robertson, 2003). El siguiente valor en importancia corresponde a las pérdidas por re-humedecimiento que se fijaron en 11% de forma previa. Le siguen las pérdidas por evaporación desde la laguna de aguas claras y desde playas activas con un 5.5% y 4.1% respectivamente. Finalmente, las pérdidas introducidas al modelo como consecuencia de la precipitación suman menos del 1% del total por lo cual su efecto, aunque considerado, es despreciable.

### 5.3.2 Esquema de operación 1: Relave en pasta

La operación considerando relave en pasta supone una disminución de HHA total hasta 0.7 [m<sup>3</sup>/ton mineral], este valor corresponde el promedio desde el año 6 al 30 donde la implementación del esquema de operación ya está terminada. En cuanto a los percentiles, la amplitud de estos llega hasta +13.3% y -12.55% de la media para los percentiles 95% y 5%, respectivamente, lo cual supone un aumento de 3 veces más de lo que se tiene originalmente en el caso base (Gráfico 21). La tendencia anterior se sigue para los demás percentiles lo que implica que la disminución en HHA tiene un lado negativo debido al aumento de la incertidumbre que se tiene con los resultados. En oposición a lo anterior si se estudian los 5 años de implementación es posible notar,

además de la obvia disminución de huella, un estrechamiento de las bandas que representan los percentiles las cuales llegan a un aumento de 2 veces más de lo que se tenía originalmente en el caso base. Es lógico pensar que al hablar de porcentaje con respecto a la media estos aumentarían ya que se tienen prácticamente las mismas fuentes de incertidumbre, pero debido al nuevo esquema de operación la media de la HHA disminuye. Al analizar directamente la diferencia en HHA entre los percentiles y la media es posible ver un aumento de la amplitud de la banda al doble. Este efecto se puede explicar como un efecto del aumento del  $C_p$  del relave, al aumentar su valor central, su desviación estándar también se ve aumentada (por la definición que se dio de la desviación estándar como un porcentaje de la media). El resultado entonces es una mayor propagación de la incertidumbre que se traduce en el aumento de amplitud explicado.

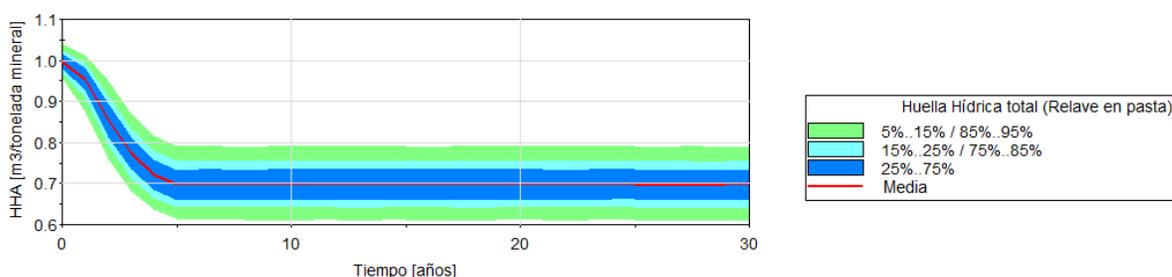


Gráfico 21: Huella Hídrica total esquema de operación relave en pasta

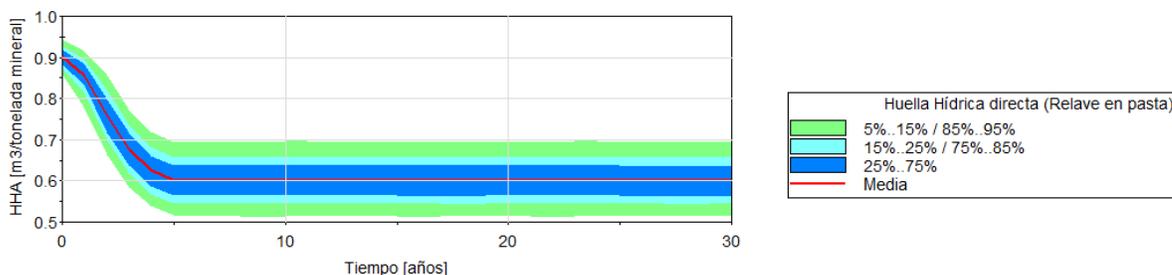


Gráfico 22: Huella Hídrica directa esquema de operación relave en pasta

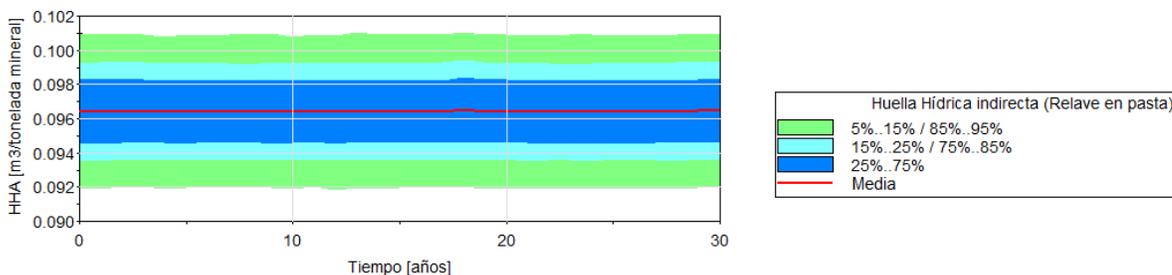


Gráfico 23: Huella Hídrica indirecta esquema de operación relave en pasta

La HHA directa (Gráfico 22) refleja el mismo efecto descrito anteriormente debido a que el planteamiento del relave en pasta actúa directamente sobre los consumos directos con una media después del quinto año de 0.6 [m<sup>3</sup>/ton mineral]. El caso de la HHA indirecta

(Gráfico 23) no presenta variaciones con respecto al caso base ya que se tomó como supuesto no considerar los potenciales aumentos de insumos producto de la nueva forma de operación. La subestimación de HHA indirecta que se deriva se plantea como interrogante para futuros estudios, pero se supone despreciable por el momento debido a la poca claridad en la información considerada al intentar disgregar los consumos a un mayor nivel de detalle. Los valores medios separados por proceso (Gráfico 24) solo reflejan un cambio sobre los consumos de concentración directos que disminuyen hasta un valor de 0.52 [m<sup>3</sup>/ton mineral].

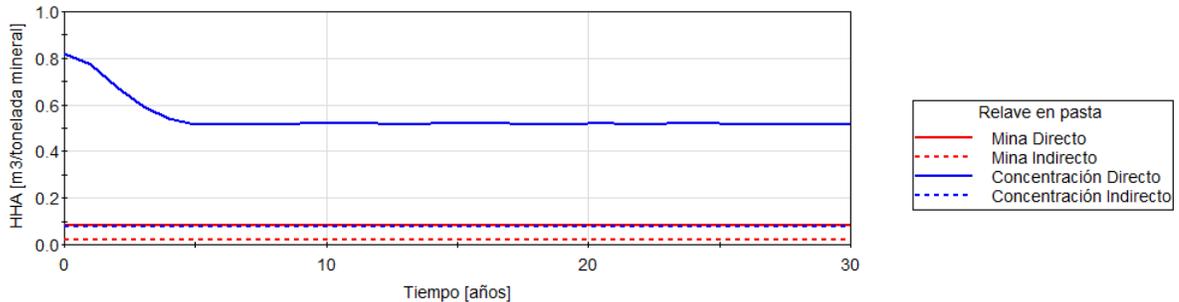


Gráfico 24: Comparación media HHA por proceso relave en pasta

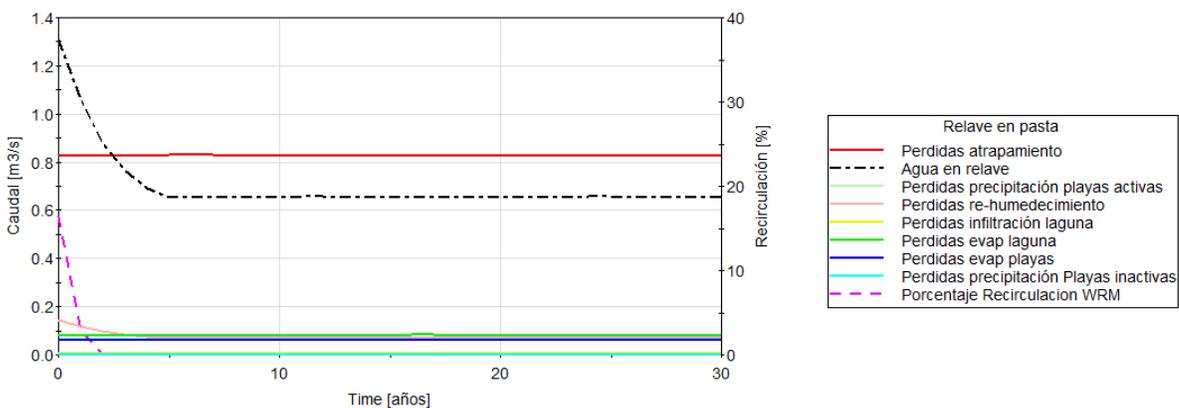


Gráfico 25: Perdidas WRM relave en pasta

Como el mayor efecto se logra en los consumos de concentración directos, en particular el relave, el WRM ve fuertemente alterada la entrada de agua que originalmente tiene debido al mayor valor de  $C_p$  (Gráfico 25). La entrada de agua por relave se reduce hasta 0.7 [m<sup>3</sup>/ton mineral] lo cual, debido a que las fuentes de pérdidas son las mismas y no presentan variaciones debido al  $C_p$ , se traduce a una nula recirculación de agua desde el tranque. Por la forma en que opera el WRM las pérdidas en este caso son mayores que las entradas, esto supone un error ya que no se puede perder más agua de la que se tiene si el sistema se supone en régimen permanente. Esto último causa que los valores de las pérdidas no sean fidedignos y la única conclusión relevante para este caso resulta ser la incapacidad del tranque para retener y posteriormente recircular el recurso hídrico.

### 5.3.3 Esquema de operación 2: Incorporación de agua salada-desalinizada

La inclusión de nuevas fuentes de agua logra una disminución directa sobre la huella hídrica que es función netamente de la cantidad de agua que se agrega al proceso de concentración. Este esquema se teorizó considerando hasta 90% más de agua fresca de nuevas fuentes lo que ocurre posterior al año 17, para ese momento la HHA total en promedio tiene un valor de 0.281 [m<sup>3</sup>/ton mineral] lo que representa una disminución del 72% con respecto al caso base (Gráfico 26). Los percentiles para este caso ven reducida su amplitud llegando a  $\pm 3\%$  para los percentiles 95% y 5% respectivamente o en términos de huella  $\pm 0.008$  [m<sup>3</sup>/ton mineral]. En otras palabras, se logra un efecto de reducción de incertidumbre para la huella hídrica proporcional al porcentaje de nuevas fuentes de agua consideradas, que parte desde la misma amplitud en todos los percentiles desde el caso base en el año 0 hasta los valores ya mencionados. El efecto antes descrito se refleja directamente en la componente directa de la HHA (Gráfico 27) que logra una disminución promedio del 82% llegando a 0.16 [m<sup>3</sup>/ton mineral], en este caso los percentiles presentan amplitudes porcentuales mayores con respecto a la media (-3.87% y 3.95% para los percentiles 5% y 95% respectivamente) pero menores cuando se ve la diferencia directa (-0.006 y +0.007 [m<sup>3</sup>/ton mineral] para percentiles 5% y 95%)

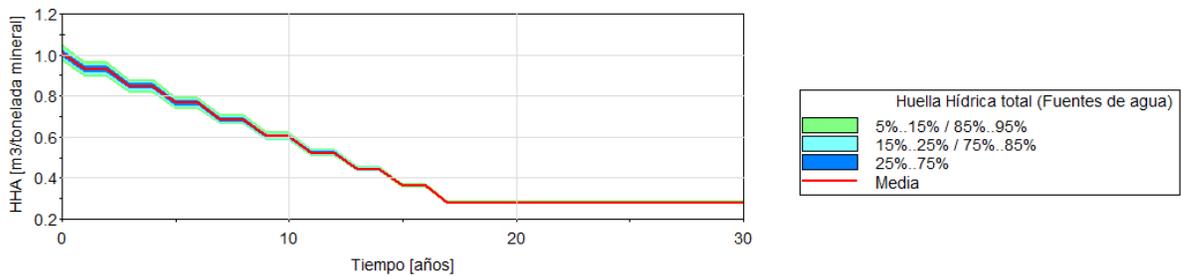


Gráfico 26: Huella Hídrica total esquema de operación con nuevas fuentes de agua

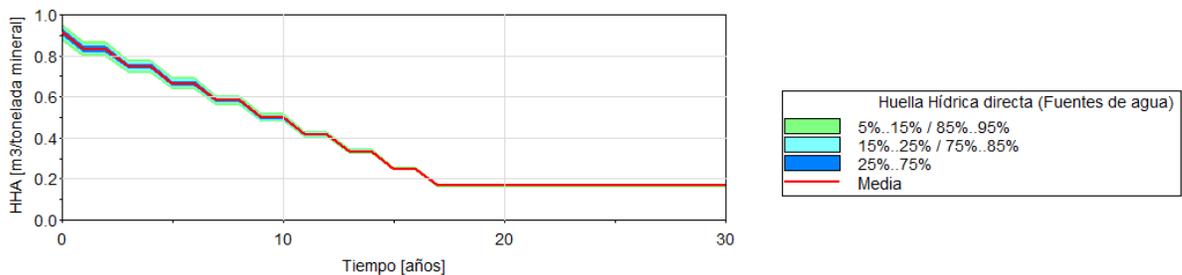


Gráfico 27: Huella Hídrica directa esquema de operación con nuevas fuentes de agua

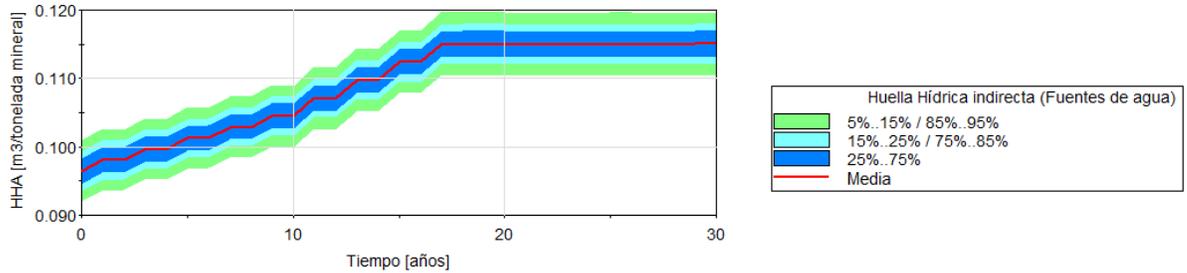


Gráfico 28: Huella Hídrica indirecta esquema de operación con nuevas fuentes de agua

La contraparte de todas las disminuciones antes expuestas es un aumento de la HHA indirecta (Gráfico 28) que aumenta también de forma proporcional al porcentaje de agua fresca adicionada por efecto del costo energético de los bombeos/desalinización. Se debe destacar que solo se considera la energía lo cual supone una subestimación de HHA para este caso debido a la no inclusión de los insumos necesarios en particular en el proceso de desalinización. Para esta variable el aumento llega al 19.3% quedando en 0.115 [m<sup>3</sup>/ton mineral]. Por el lado de los percentiles se tiene una mayor amplitud de la huella hídrica total llegando a  $\pm 4\%$  para los percentiles 5% y 95% respectivamente por lo cual al adicionar la componente directa e indirecta se tiene una disminución de amplitud o incertidumbre del resultado.

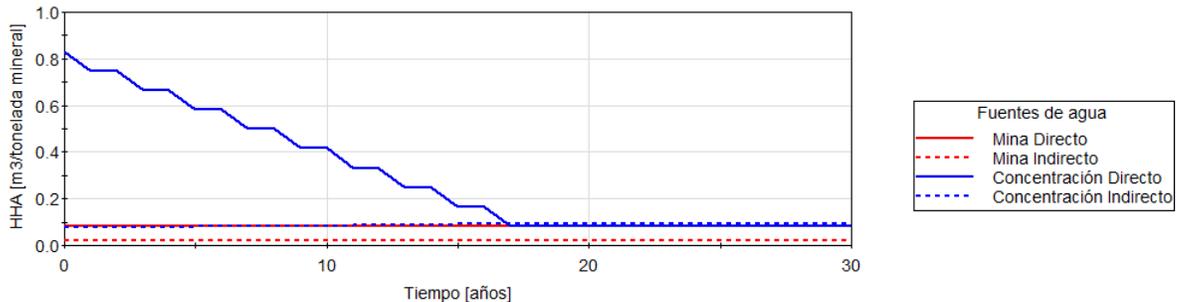


Gráfico 29: Comparación media HHA por proceso con nuevas fuentes de agua

Del Gráfico 29 es posible ver el efecto de disminución sobre la parte directa de la concentración con la consecuencia del leve (en magnitud) aumento en la HHA indirecta. Los procesos de mina no se ven afectados por la operación planteada. El esquema como tal no afecta las pérdidas en las que incurren los procesos y es por esto que los resultados del WRM son iguales al caso base ya que solo se están compensando las mismas pérdidas con agua fresca que no produce HHA (Gráfico 30).

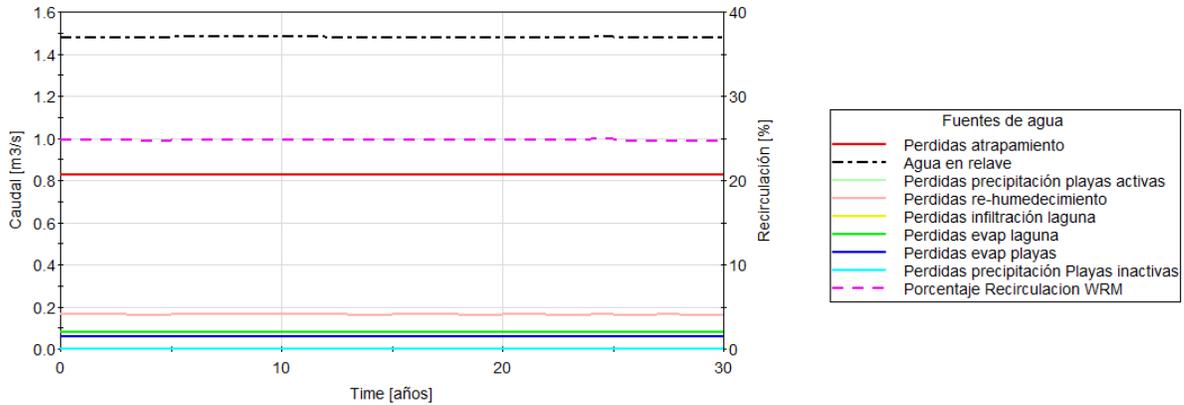


Gráfico 30: Perdidas WRM con nuevas fuentes de agua

### 5.3.4 Esquema de operación 3: Reserva (stockpile) de mineral

La operación considerando una reserva de mineral chancado logra un efecto tanto positivo como negativo sobre la huella hídrica (Gráfico 31), en primer lugar en los primeros 15 años donde se genera el acopio de mineral se observa un aumento de la HHA total (media) del 7.8% por sobre el caso base mientras en los 15 años finales se observa una disminución de 4.2% de donde se desprende que se logra un efecto de intercambio de huella actual v/s futura que lleva la discusión a otro plano donde los factores a considerar deben incluir el análisis de disponibilidad de las fuentes para sopesar el beneficio/gasto que se incurre; esta temática no se aborda debido al supuesto inicial de que siempre existirá agua disponible para procesar el mineral. Por el lado de los percentiles se observa para el periodo inicial un aumento de las amplitudes hasta -- 5.01% para el percentil 5% y de +5.32% para el percentil 95%, porcentajes con respecto a la media. Este aumento de amplitud ocurre para todos los percentiles si se compara con el caso base. Para el periodo final si se compara con el caso base ocurre una disminución de la amplitud de las bandas que representan los percentiles llegando a - 3.6% y +3.8% para los percentiles 5% y 95% respectivamente situación que se repite para los pares 15-85% y 25-75%.

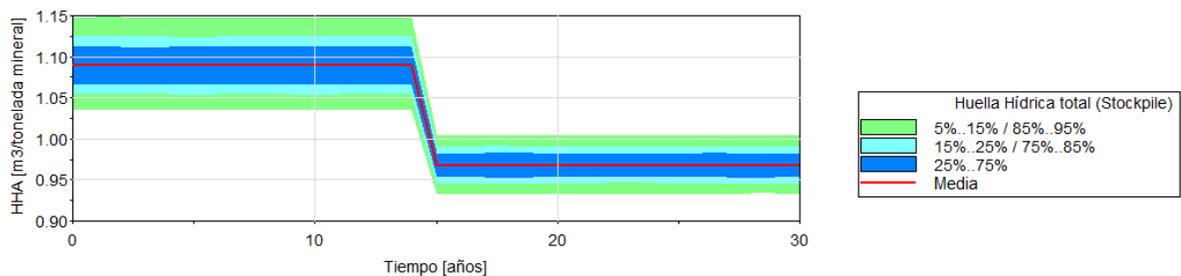


Gráfico 31: Huella Hídrica total esquema de operación con reserva mineral

Al estudiar los resultados de la HHA directa (Gráfico 32) es posible observar exactamente las mismas tendencias planteadas de forma anterior lo que se traduce en un aumento inicial de 7.7% y una disminución para el tramo de procesamiento de la reserva de 4.2%, siempre comparado con la media del caso base. Por el contrario, la HHA indirecta (Gráfico 33) presenta un aumento de amplitud para ambos tramos con respecto al caso base, estos aumentos en términos de porcentajes son como máximo 1% más con respecto a la media para todos los percentiles. Con respecto a los valores medios estos alcanzan un aumento de 8.8% hasta 0.105 [m<sup>3</sup>/ton mineral] y una disminución en el tramo final de 4.7% hasta 0.092 [m<sup>3</sup>/ton mineral].

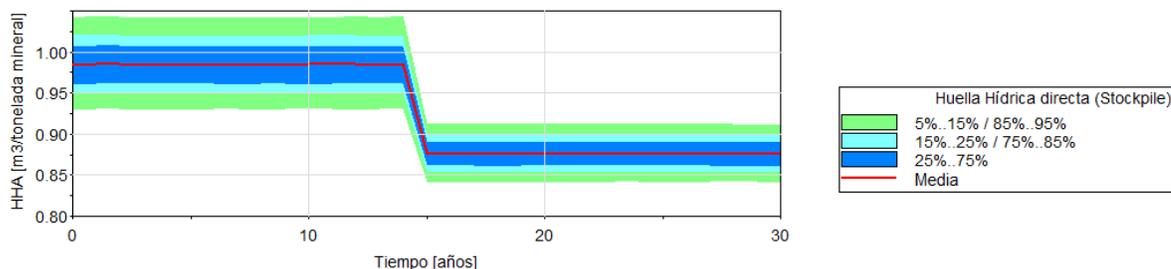


Gráfico 32: Huella Hídrica directa esquema de operación con reserva mineral

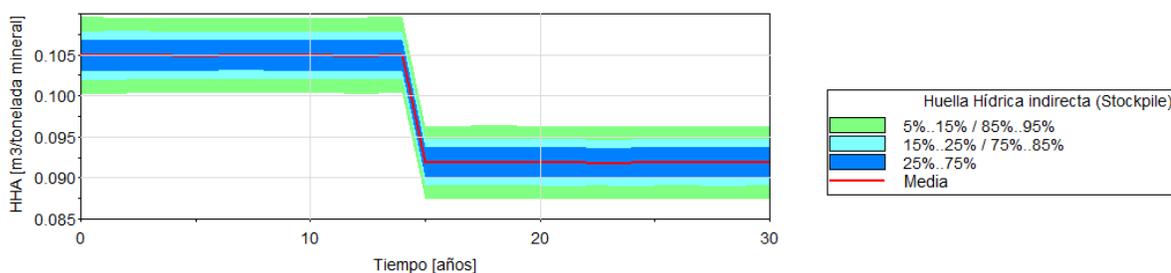


Gráfico 33: Huella Hídrica indirecta esquema de operación con reserva mineral

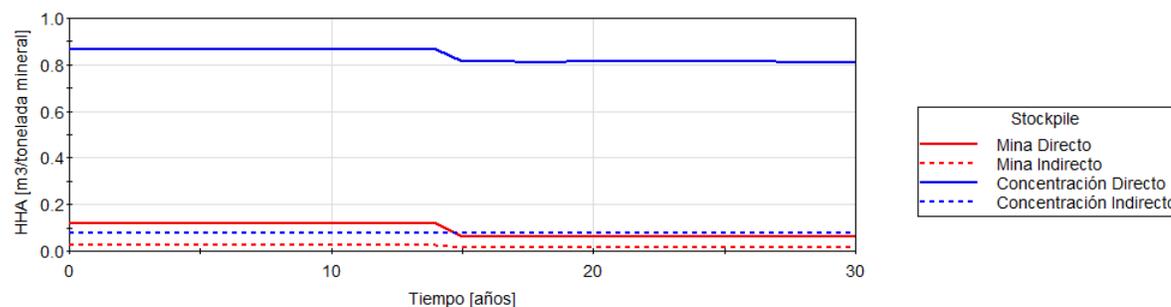


Gráfico 34: Comparación media HHA por proceso con reserva mineral

En el caso de los procesos específicos para el tramo de acopio de mineral se observan aumentos con respecto al caso base para Mina Directo e Indirecto y la Concentración directa. Para el tramo de consumo del acopio el efecto es el opuesto teniendo disminuciones para todos los procesos enunciados anteriormente. En ambos casos por lo tanto los consumos asociados a concentración indirecta se ven inalterados. Las medias

de HHA para cada tramo además de su porcentaje de contribución se pueden encontrar en la Tabla 12 donde se observa para le etapa inicial un aumento en la HHA de los procesos de mina que en la fase final se revierte generando una mayor contribución para los procesos de concentrado (si se compara con el caso base)

Tabla 12: Contribución por proceso a la HHA total con reserva mineral

	Acopio (15 años iniciales)		Consumo (15 años finales)	
	HHA [m3/ton mineral]	Contribución a HHA total [%]	HHA [m3/ton mineral]	Contribución a HHA total [%]
<b>Mina Directo</b>	0.1189	10.9	0.0640	6.6
<b>Mina Indirecto</b>	0.0283	2.6	0.0152	1.6
<b>Concentración Directo</b>	0.8657	79.5	0.8119	83.9
<b>Concentración Indirecto</b>	0.0766	7.0	0.0766	7.9

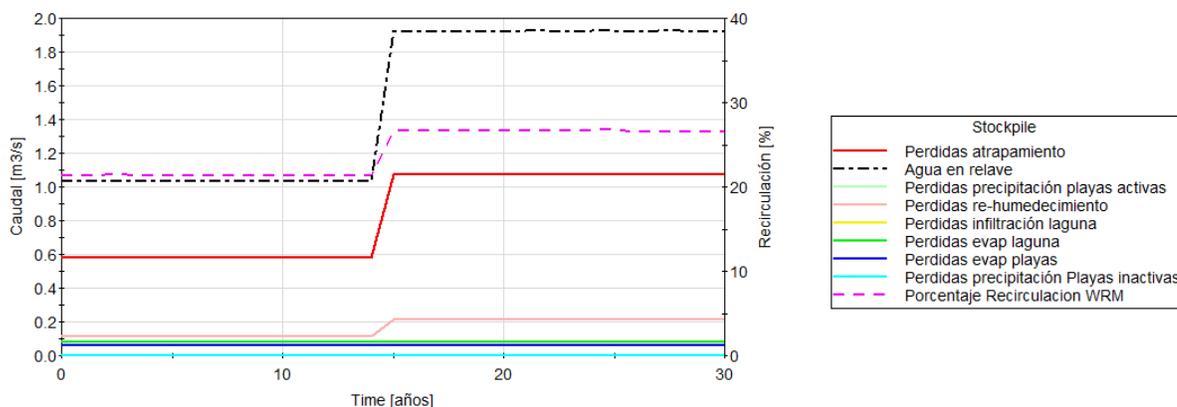


Gráfico 35: Perdas WRM con reserva mineral

El WRM (Gráfico 37) responde de forma directa a la mayor/menor cantidad de agua entrante como causa del acopio, en la fase inicial se observa una disminución de la recirculación que se revierte para los 15 años finales con un aumento en la recirculación debido a la mayor cantidad de agua entrante por el aumento en la cantidad de mineral procesado. Las pérdidas asociadas muestran la misma tendencia, en otras palabras, un comportamiento proporcional a la cantidad de agua entrante.

### 5.3.5 Escenario 1: Aumento evaporación y disminución de la precipitación

El estudio de las variables climáticas se hace necesario debido a los resultados de las secciones anteriores (sección 5.2) pero esta vez en condiciones reales. En cuanto a HHA total (Gráfico 36), debido a las condiciones planteadas se observa un aumento del 1.7% en la media hasta el valor de 1.028 [m3/ton mineral] de huella al cabo de los 30 años de operación. Los percentiles en este caso presenten un leve aumento en su amplitud, por

ejemplo, para el par 5-95% los porcentajes con respecto a la media aumentan en promedio hasta -4.2% y +4.4%, equivalentes en huella a -0.043 y +0.045 [m<sup>3</sup>/ton mineral]. La componente directa de la huella (Gráfico 37) presenta la misma tendencia con un aumento porcentual al año 30 de 1.9% hasta 0.93 [m<sup>3</sup>/ton mineral], en este caso el aumento en los percentiles es mayor llegando a -4.6% y +4.88% de la media para la misma banda descrita de forma anterior. Este aumento en huella se traduce a -0.042 y +0.045 [m<sup>3</sup>/ton mineral], valores prácticamente idénticos al caso directo. Por el lado de la HHA indirecta (Gráfico 38) debido a que el escenario no tiene influencia sobre ninguna variable/parámetro el resultado es equivalente al caso base.

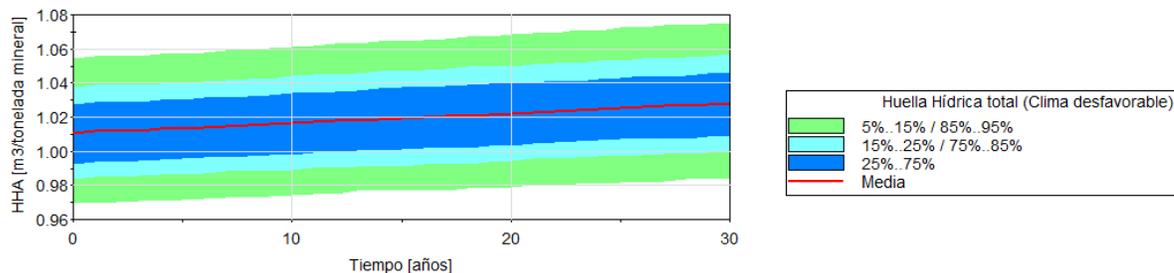


Gráfico 36: Huella Hídrica total escenario clima desfavorable

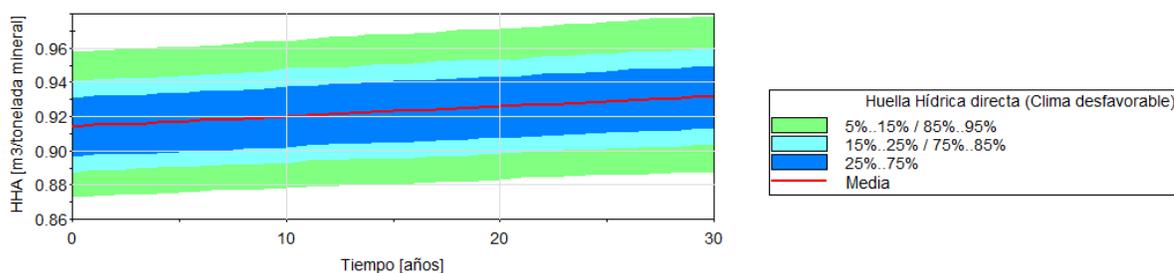


Gráfico 37: Huella Hídrica directa escenario clima desfavorable

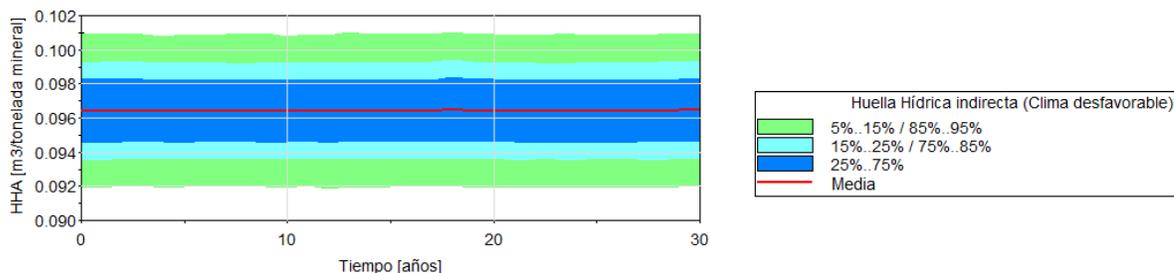


Gráfico 38: Huella Hídrica indirecta escenario clima desfavorable

Al observar los procesos involucrados (Gráfico 39) notamos un aumento sobre los consumos directos de la concentración en línea con el aumento de evaporación/disminución de precipitación. Esto se explica en que las variables climáticas dependen directamente del WRM y este último solo afecta al proceso de concentración vía la recirculación desde el tranque de relaves. Para el año 30 el proceso de concentración directo pasa a contribuir con el 85.52% de la HHA total lo que representa

un aumento del 3.3% si se compara con el caso base. Los demás procesos bajan sus porcentajes en concordancia para completar el 100%.

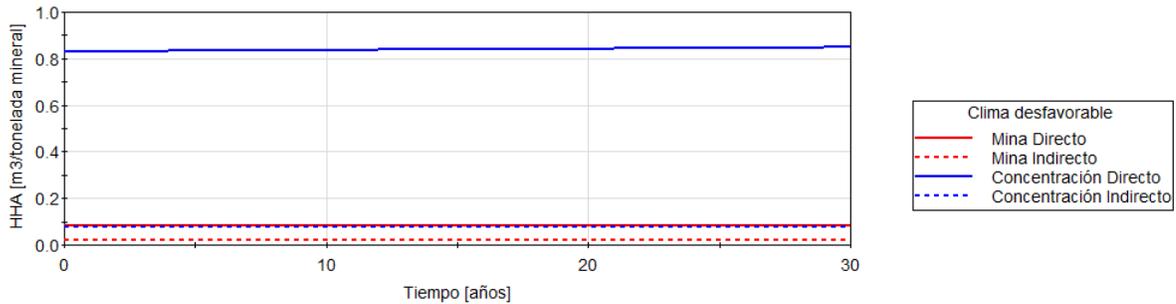


Gráfico 39: Comparación media HHA por proceso con clima desfavorable

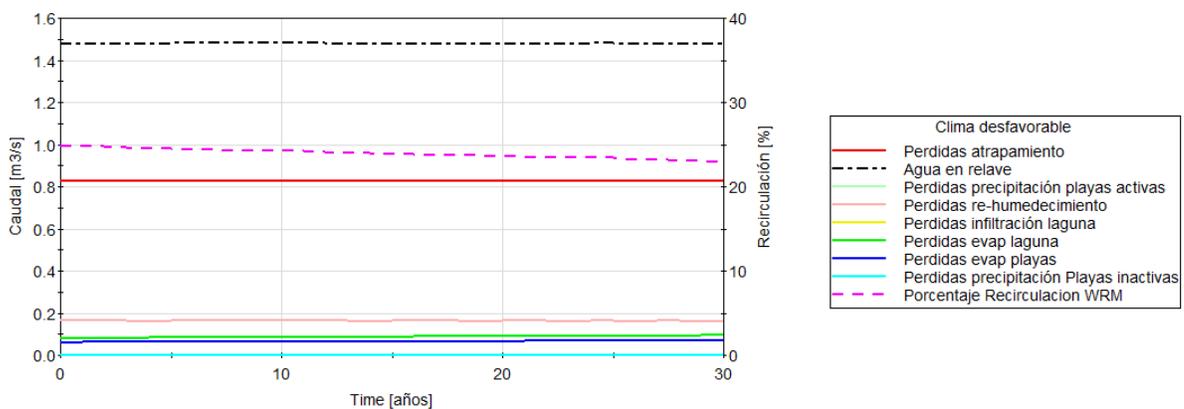


Gráfico 40: Consumos WRM con clima desfavorable

Los efectos sobre el WRM y la recirculación potencial de agua (Gráfico 40) indican un aumento progresivo de las pérdidas por evaporación en playas activas y laguna de aguas claras que crecen hasta totalizar un 4.73% y 6.36% respectivamente lo que eleva las pérdidas por evaporación hasta 11.09%, un 1.48% más que el caso base. Por el lado de la precipitación las pérdidas que afectan netamente a esta siguen siendo menores al 1% lo que implica que la disminución neta de 15% en la media de la precipitación se traduce directamente en 15% menor cantidad de agua entrante por este factor.

### 5.3.6 Escenario conjunto: Nueva fuente de agua salada en respuesta a un aumento de evaporación y disminución de la precipitación

Pensando en la ocurrencia de los eventos del escenario 1, la evaluación de medidas de reducción de huella hídrica resulta lógico pensando desde el punto de vista de la minera con el fin de asegurar su producción. En términos de la HHA total, la adición de agua salada a la operación tiene un efecto de reducción mayor al aumento de HHA por las pérdidas que se generan por efecto del aumento de la evaporación y la disminución de la precipitación. En general lo que se observa es una superposición del esquema de operación 2 y el escenario 1 sobre todas las componentes de la huella

hídrica en estudio. Para la HHA total (Gráfico 41) se observa al año 30 una huella media de 0.0604 [m<sup>3</sup>/ton mineral] con percentil 5% con diferencia de la media de -0.024 [m<sup>3</sup>/ton mineral] equivalente a -3.89% de la media del año final. Para el percentil 95% se observa una diferencia de +0.024 [m<sup>3</sup>/ton mineral] que en porcentaje representa +3.99%. Se observa entonces una disminución de la amplitud con respecto al escenario 1 pero un aumento si se compara con el esquema de operación 2, el efecto neto, en cuanto a amplitud, es también mayor al caso base.

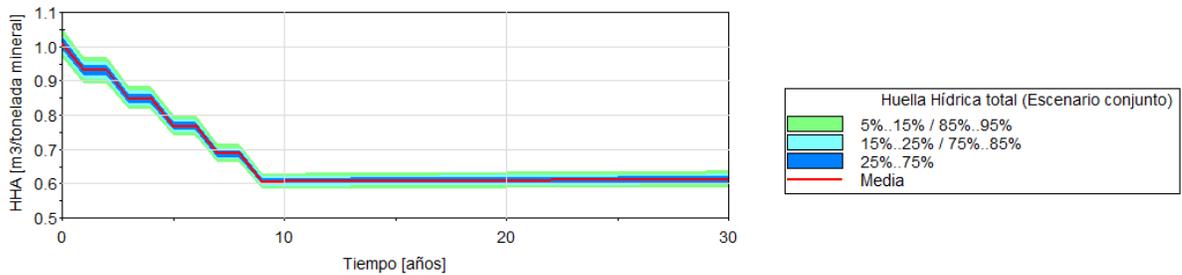


Gráfico 41: Huella Hídrica total escenario conjunto

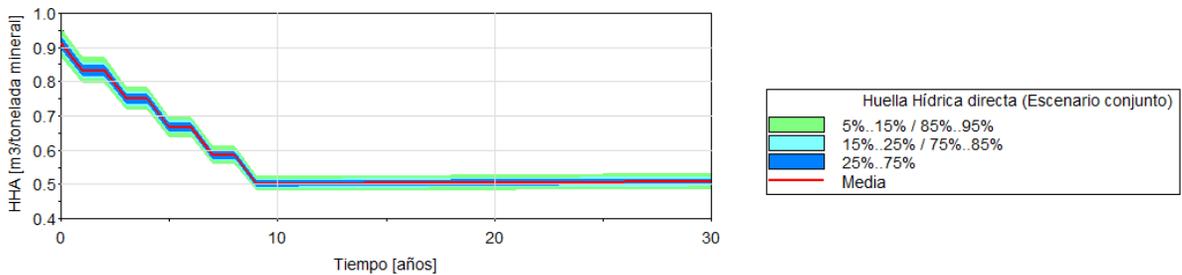


Gráfico 42: Huella Hídrica directa escenario conjunto

La HHA directa (Gráfico 42) al cabo del año 30 tiene un valor de 0.508 [m<sup>3</sup>/ton mineral], lo que representa una disminución del 44.48% con respecto al caso base. Para lo percentiles se tiene para el par 5-95% una variación de -4.43% y +4.69% respectivamente si se toma como referencia la media. La diferencia de huella entre los percentiles y la media en magnitud es -0.023 y +0.024 [m<sup>3</sup>/ton mineral] para los mismos percentiles. Si se repite el análisis para la HHA indirecta (Gráfico 43) la media del último año tiene un valor de 0.105 [m<sup>3</sup>/ton mineral] que representa un aumento de 8.58% con respecto al caso base. En términos de percentiles se observa un aumento de amplitud para todas las bandas comparado con el caso base. Como ejemplo el par 5-95% presenta variaciones de -4.3% y +4.39% lo cual resulta levemente mayor a lo encontrado en el esquema de operación 2 de características similares.

Si se descompone el análisis por proceso (Gráfico 44) para el último año se tiene que como media, la concentración directa tiene un 70.24% de contribución seguido por los consumos de mina directos con un 13.78% luego concentración indirecta con un 12.69% y finalmente mina indirecto con un 3.28%. Estos porcentajes se explican por la fuerte baja que tiene el proceso de concentración directa, que al bajar la HHA total hace parecer que existe un aumento en las otras componentes que en realidad se mantienen prácticamente igual al caso base.

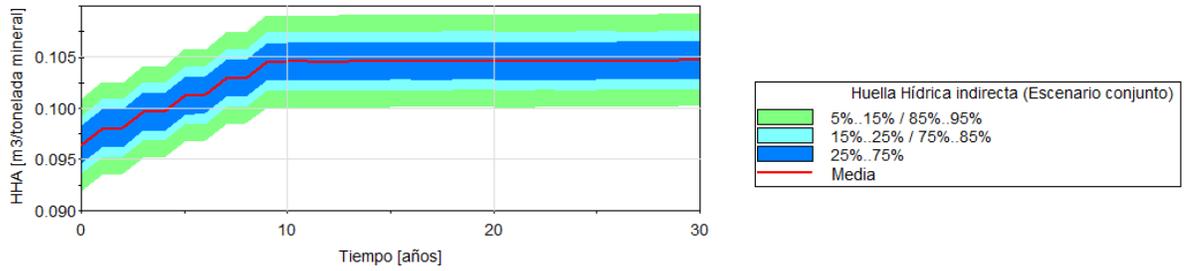


Gráfico 43: Huella Hídrica indirecta escenario conjunto

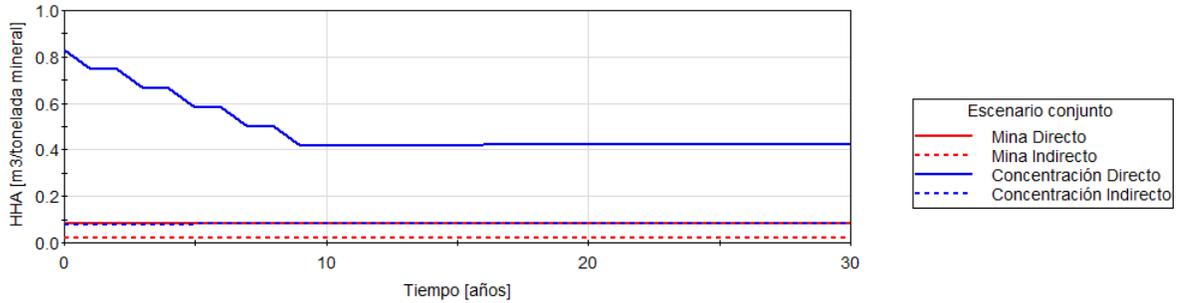


Gráfico 44: Comparación media HHA por proceso en escenario conjunto

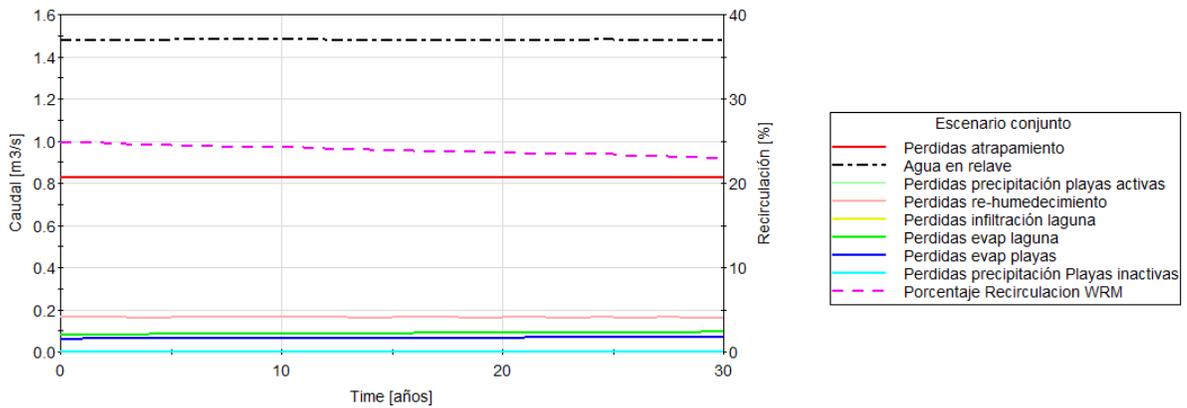


Gráfico 45: Perdidas WRM en escenario conjunto

En el caso del WRM (Gráfico 45) se observa una situación idéntica a la del escenario 1 donde se observa un aumento de las pérdidas asociadas a evaporación. En cuanto a las fuentes no se observa afectación sobre el WRM ya que, al igual que en el esquema de operación 2, las fuentes de pérdidas no varían y solo se está adicionando agua fresca que no genera huella hídrica.

## 5.4 COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE ESCENARIOS/ESQUEMAS DE OPERACIÓN Y ANÁLISIS CRÍTICO

Todas las alternativas evaluadas buscan ver la reacción de la faena minera tipo a distintos estímulos con el fin de discriminar si los factores definidos como críticos de manera previa efectivamente se traducen en cambios al momento de considerar esquemas/escenarios reales. Si comparamos los resultados de las 6 opciones consideradas en primer lugar con respecto a la media anual de la HHA (Gráfico 46), es posible observar el bajo impacto comparativo que tiene el escenario 1 (clima desfavorable) en cuanto al aumento de la HHA al contrastarse con todos los esquemas de operación que buscan la reducción de la huella. Un caso concreto corresponde a la operación con nuevas fuentes de agua, la cual logra una disminución notable de la HHA que permite sopesar con creces el aumento por causas climáticas. Esto último ocurre aun cuando pueda existir algún nivel de sobreestimación en cuanto al aporte de agua salada y/o desalinizada. Se debe destacar que la componente climática en la forma de precipitación y evaporación se evalúa solo mediante una variación de 15% sobre su valor central previo al muestreo. Nominalmente este valor puede parecer alto, pero si se compara con las desviaciones estándar de estos parámetros (65% para la precipitación y 23% para la evaporación), estas son aún mayores, efecto de la inherente variabilidad del clima. En otras palabras, el que la variable clima figure como “crítica” para el modelo en las primeras etapas de análisis no quiere decir que sea bajo condiciones replicables fácilmente en la realidad. Eventos extremos sobre los cuales se realiza el análisis de sensibilidad o de dominancia estocástica en la realidad pueden tener asociados periodos de retornos de cientos de años lo cual, para una operación real, donde se evalúan resultados más probables o en torno a la media, por ejemplo, puede no ocurrir.

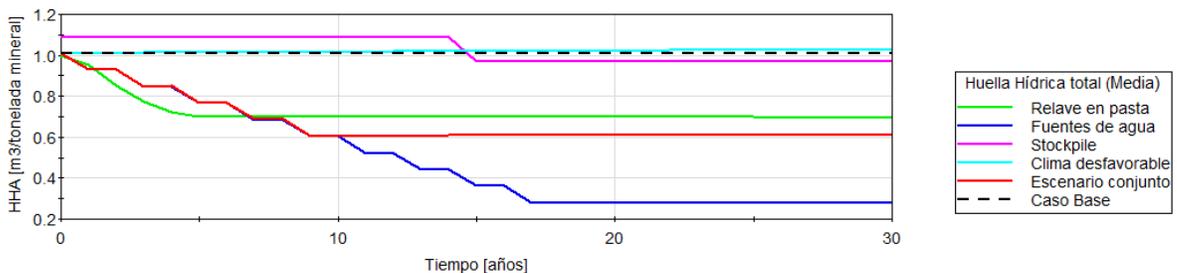


Gráfico 46: Comparación media HHA total para los escenarios/esquemas de operación

Si se descompone la variable de salida al siguiente nivel, al hablar de HHA directa (Gráfico 47) y HHA indirecta (Gráfico 48), es posible notar que la componente directa no presenta diferencias apreciables con respecto a la HHA total (Gráfico 46). La única diferencia apreciable corresponde a un desplazamiento vertical en aproximadamente 0.1 [m<sup>3</sup>/ton mineral], que corresponde a la media aproximada de la HHA indirecta del caso base. Aun cuando la huella hídrica indirecta presenta variaciones basadas en los distintos esquemas considerados estos son del orden de 0.01 [m<sup>3</sup>/ton mineral], lo cual es 2 órdenes de magnitud más bajo que la HHA directa, ergo la poca relevancia. Una particularidad que se debe destacar es la no consideración de potenciales consumos indirectos que se deriven de la operación con relave en pasta, existe la posibilidad de que

la implementación de esta tecnología signifique un alto costo energético o de reactivos. Esto último adiciona una fuente de error, pero si se compara esta operación con la entrada de nuevas fuentes de agua (la cual tiene un uso intensivo de energía), es posible comprobar que la contribución de esta componente indirecta no alcanza a disminuir apreciablemente todo el ahorro de HHA que se genera.

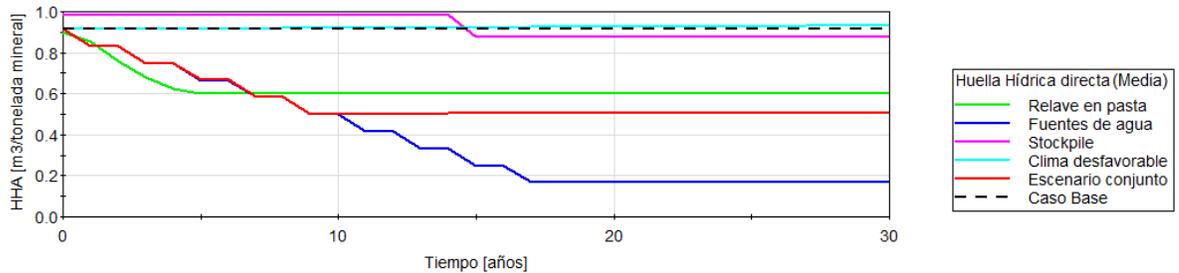


Gráfico 47: Comparación media HHA directa para los escenarios/esquemas de operación

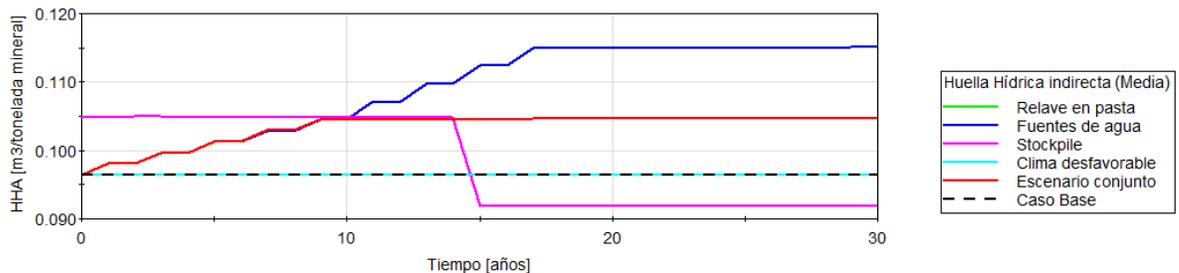


Gráfico 48: Comparación media HHA indirecta para los escenarios/esquemas de operación

Aun cuando la operación puede estar basada en la ocurrencia de los eventos más probables, en torno a la media para este caso, resulta relevante estudiar qué ocurre con las alternativas cercano a los valores extremos, sobre todo pensando que es esperable cierto nivel de simetría con respecto a la media debido a tener un muestreo que consiste solo de variables representadas por una distribución normal. Para lo anterior se compara la HHA total considerando el percentil 15% (Gráfico 49) y el percentil 85% (Gráfico 50) de donde es posible ver simetría (solo se aprecia un desplazamiento vertical pero las diferencias se mantienen constantes) para todos los escenarios/esquemas salvo por la operación con relave en pasta, la cual presenta un apreciable desplazamiento que no está en línea con lo descrito en el punto 5.3.2. Siguiendo con el esquema de operación con relave en pasta, se observa que en el percentil 15% la curva presenta un descenso más pronunciado en su tramo inicial de implementación comparado al percentil 85%, además, al cabo de 5 años termina con una disminución neta mayor (diferencia entre el valor inicial del caso base y el valor del año 5), esto último es posible de ver si se toma como referencia la operación con nuevas fuentes de agua/escenario conjunto donde para el percentil 15% esta se intersecta con la curva del relave en pasta entre el cuarto y quinto escalón mientras que para el percentil 85% esta intersección ocurre entre el escalón 3 y 4 (esto si se cuenta cada escalón desde el año 0 considerando la parte plana de la “escalera” como un escalón).

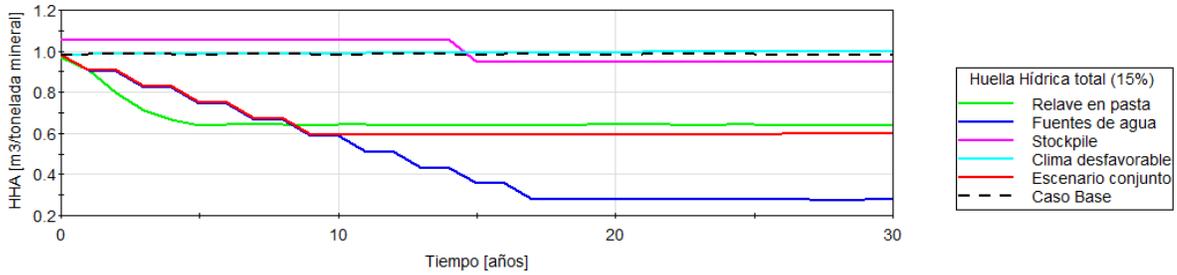


Gráfico 49: Comparación percentil 15% HHA total para los escenarios/esquemas de operación

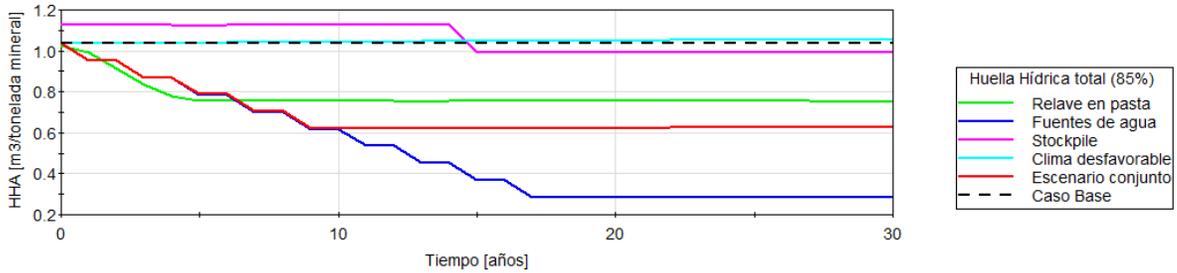


Gráfico 50: Comparación percentil 85% HHA total para los escenarios/esquemas de operación

En términos generales resulta claro que la inclusión directa de agua en forma de nuevas fuentes, que no generan HHA, es la forma más efectiva para la reducción de esta entre todas las planteadas. Esto además porque actúa directamente sobre la componente que más consumos genera que es el proceso de concentración directo (transversal a todos los escenarios/esquemas). En segundo lugar, la operación considerando relave en pasta presenta reducciones apreciables por las mismas razones anteriores. La contraparte negativa de estas medidas corresponde a las barreras de entradas que implican. Esto debido al alto coste económico en que se incurre para su implementación por lo cual, aunque efectivas, su análisis requiere considerar la arista económica con el fin de discriminar correctamente.

Por el lado de la operación con stock pile, esta medida no tiene una efectividad muy relevante ya que logra hacer un desfase de la huella aumentando consumos presentes para disminuirlos a futuro, esto levanta 2 interrogantes y también limitaciones del modelo. Primero está la representatividad de asumir que siempre existirá agua suficiente para la producción, esto producto de la forma en que se plantea la faena minera tipo, esta no da espacio para darle peso a las distintas fuentes de agua ya que se asume que, si se extrae mineral, este se puede procesar. Sobre esto, GoldSim presenta la capacidad y las herramientas para dar más definición con respecto a lo anterior, en particular en cuanto a la disponibilidad de las fuentes lo cual puede estar fuertemente integrado con modelos hidrológicos e hidrogeológicos ya existentes (por limitaciones de tiempo e información escapa al alcance considerado). En la misma línea de las fuentes surge la siguiente interrogante que tiene que ver con la arista temporal, ya que en todo momento se supone que el agua de hoy tiene el mismo valor que el agua de mañana (se desprende de suponer que siempre existirá agua para producción). Naturalmente esto reviste una fuente de error en cuanto a la diferencia que puede suponer el agotamiento a futuro de

una fuente, y por lo tanto la adición de nuevas fuentes o bien optimización en el uso del recurso (ejemplo: operación con relave en pasta). Este y otros factores pueden jugar a favor a modo de compensar el alto costo de entrada de alguna de estas medidas. El factor temporal también es abordable mediante GoldSim ya que la incertidumbre que se supone homogénea en el tiempo para el modelo, se puede suponer creciente debido al riesgo asociado a no saber que pasara con una fuente a futuro y por lo tanto los costes que devengan de esto. Aunque esto es de fácil implementación en el modelo, la serie de supuestos e información requerida es en extremo compleja de estimar ya que implica un minucioso estudio que considere los costos económicos, sociales, ambientales, entre otros que derivan de cada decisión y también de todos los posibles estados que se desprenden de esta creciente incertidumbre.

Por el lado general, la consideración de muestrear todas las variables como distribuciones normales supone otra fuente de error que requiere de mayor estudio. Además, se debe reconsiderar la utilización de la desviación estándar como un porcentaje de la media lo que lleva a sobre-estimar los valores más altos (por tener mayor media) y por el contrario subestimar valores más bajos (de nuevo, por tener menor media). La elección de los porcentajes de las desviaciones estándar considera en su mayoría experiencia por parte de los profesionales involucrados lo cual es perfectible sobre la base de mayor y mejor información. Otra precisión corresponde al producto de estudio, el cual se considera que es el concentrado de cobre a nivel de concentrado, es posible incluir la etapa de filtrado que ocurre en el puerto de embarque para exportación como otra etapa de recuperación de agua lo cual en este caso se prefirió omitir por falta de información.

La incorporación de un modelo que permite estimar recirculación de agua desde el tranque de relave (WRM) también merece atención debido al carácter estacionario de este en un entorno claramente no estacionario. Aun cuando es posible la modificación del modelo con el fin de transformarlo en transiente, esto requiere la incorporación de nuevas fuentes de información como lo es la demanda de agua además de otras componentes no consideradas como la influencia del cicloneo de arenas y el almacenamiento del tranque. Donde esta decisión tiene un mayor impacto es en la no consideración del crecimiento del tranque, lo que debería implicar un aumento en las pérdidas conforme crece el tranque debido a la mayor superficie abarcada.

De forma general es probable que todos los consumos considerados presenten algún grado de sobre-estimación debido a la data de la información. Los valores considerados tienen como origen estudios que van desde los años 2005 hasta el año 2011, lo cual, debido al alto progreso que han tenido las faenas chilenas en temas de sustentabilidad en los últimos años, puede significar diferencias considerables en algunos casos. Se recomienda por lo tanto una actualización o bien el estudio de factores de ponderación sobre la base de la evolución histórica de los consumos.

Finalmente en cuanto a la estructuración del modelo, se debe notar que este se construyó teniendo en mente la operación por parte de usuarios genéricos además de reportar una mayor cantidad de información que la analizada en este texto, por esto y debido a la limitante de tiempo existente hay aristas que no se consideran para análisis pero cuyos

resultados están contruidos y reportados en los paneles de control del modelo, un ejemplo de estos es presentar todo lo analizado con la unidad [m<sup>3</sup>/año] con el fin de potencialmente estudiar la afectación sobre la producción que se tiene, lo cual no aplica en este caso debido a suposición de una producción constante. Esto es fácilmente reemplazable por un plan minero real por el usuario debido a la inclusión en el panel de control de los modificadores que lo permiten.

## 6 CONCLUSIONES

---

La aplicación de indicadores de sustentabilidad en la minería chilena, en particular para temas que involucran al recurso hídrico, es solo una arista de un problema que busca la integración de un sinnúmero de factores bajo criterios que no siempre logran recabar toda la información disponible. La Huella Hídrica como tal es uno más de tantos que buscan perseguir este mismo objetivo. Con el fin de dotar a esta metodología y herramienta de un carácter más robusto e integrador es que el resultado del presente trabajo cobra importancia.

En primer lugar, sobre aquellas alternativas a la HH, existen una serie de iniciativas en forma de estándares, asociaciones o indicadores numéricos de distinta índole que en esencia persiguen lo mismo que la huella, pero de distinta forma. El por qué se elige la Huella Hídrica sobre otras iniciativas responde al potencial como herramienta de pronóstico además de la adaptabilidad y cierto grado de avance que se tiene en la materia para el caso de la industria minera chilena. La futura integración de este indicador como herramienta de pronóstico/gestión con otras iniciativas es lo que tiene el potencial de convertirse en un estándar a nivel mundial que abarque más de una sola arista de los problemas de sustentabilidad. Sobre problemas puntuales de formulación que presenta la HH, el hecho de no considerar el origen de la fuente y las cualidades de esta abre un nicho claro para mejora mediante, por ejemplo, la integración con el Water Stress Index (WSI) que justamente califica todo el mundo sobre la base de un número que indica el stress hídrico al que está sometida una zona. Aproximaciones a esta integración con el fin de contribuir a la gestión de cuencas ya se conocen en Chile donde además se hace uso del estándar ISO 14046 para la gestión integrada de un recurso a nivel de cuenca (Fundación Chile, 2016).

La metodología para el cálculo de la huella hídrica escogida se sustenta en supuestos que en el futuro perfectamente pueden dejar de ser válidos como por ejemplo la elección del producto de estudio en el concentrado de cobre que se exporta de manera directa. Además, considerar una faena minera tipo que opera sin considerar salidas de agua desde sus operaciones constituyendo un sistema cerrado puede no ser representativo. Por lo anterior es que la sucesiva actualización y revisión de los supuestos es necesario de forma previa a la aplicación de la metodología de este trabajo con el fin de adaptarla de la mejor posible aprovechando las capacidades de escalamiento y operación por módulos que ofrece el software GoldSim. Como una fortaleza del modelo se toma la decisión de incorporar la incertidumbre a modo de darle robustez y mayor realidad a los resultados proyectados lo cual supone a su vez una fuente de mejora respecto del trabajo realizado, esto debido a la consideración de modelar la incertidumbre como distribuciones normales con desviaciones estándares que son un porcentaje de la media. Mayor nivel de detalle en cuanto a la elección del muestreo de cada variable/parámetro utilizado permitirá mejorar la veracidad de los resultados obtenidos. De lo anterior también se desprende la necesidad de un correcto planteamiento de los objetivos que se quieren lograr mediante la aplicación de la metodología y posterior modelo ya que resultados obtenidos de manera determinística pueden satisfacer las necesidades requiriendo menos inputs para el modelo. Esto último se recomienda solo para cálculo de HH de años

anteriores o bien en condiciones actuales ya que proyecciones que no consideran incertidumbre tienen el potencial de no estar representando todo el espectro de resultados posibles.

Sobre la información utilizada, la rápida evolución de la minería chilena supone que buena parte de la información utilizada en la realización del trabajo requiere actualización con el fin de permitir una evaluación más exacta del uso del recurso hídrico. Esto último también actúa como limitación al nivel de detalle posible que se podría tener con el software GoldSim. De tenerse información con el detalle suficiente podría permitir realizar el cálculo y evaluación a nivel diario lo cual en el presente trabajo resulta imposible dado el carácter anual de los valores utilizados para los consumos.

Otra parte del modelo que permite el correcto entendimiento del sistema planteado corresponde al tranque de relaves el cual se conceptualiza según el WRM. De este se desprende la mayor fuente de pérdida para el proceso de concentración, la cual es la retención de agua propia del relave. La implementación de este modelo permite estimar una recirculación aproximada del 25% del agua entrante al tranque. Se debe destacar también que la incorporación de este modelo es consecuencia de la nula información respecto a consumos a nivel de concentración lo que hace necesaria la utilización del concepto de “make-up” y hablar de pérdidas en vez de consumos que es lo correcto cuando se trabaja con huella hídrica. Un estudio detallado del proceso de concentración que permita la estimación certera de los consumos involucrados es necesario para toda posible estimación de HH que se plantee a futuro.

Las metodologías y criterios utilizados para identificar las partes críticas del modelo (aquellas que al ser manipuladas muestran mayor impacto sobre la HHA) demuestran gran relevancia ya que de 30 factores a considerar se logra concentrar el análisis en primera instancia sobre 8 mediante el análisis de sensibilidad. Sobre estos se aplican los indicadores de dominancia estocástica para finalmente definir el análisis sobre 5 para la etapa de esquemas de operación y escenarios. Se destaca en esta etapa la relevancia que logran las variables climáticas consideradas las cuales actúan de forma directa sobre el WRM y el agua recirculada.

Los resultados obtenidos apuntan de manera general hacia lo mismo, donde la mayor cantidad de huella que se tiene es resultado de los consumos directos de concentración, esto debido a la gran cantidad de agua que se descarga al tranque de relaves como desecho del proceso de flotación. Se explica en base a lo anterior el gran impacto positivo que tiene la operación planteada considerando relave en pasta o bien la inclusión al proceso de concentración de nuevas fuentes de agua que no suman a la HH directa (agua salada y desalinizada). Variables climáticas que en teoría presentan un alto grado de impacto (negativo) sobre la HHA en la realidad ven un efecto a mucho menor escala que el relave mismo, esto se asocia al alto grado de incertidumbre que se les asigna a estas variables climáticas (evaporación y precipitación). Nace la interrogante y recomendación de asociar algún indicador de carácter económico que permita incorporar el costo económico de la entrada en operación de los escenarios planteados además de considerar el costo del recurso hídrico en el tiempo para evaluar con más nivel de detalle

el real impacto de medidas como operación con un acopio de mineral que se comprueba permite generar un desfase sobre la HHA.

Una parte relevante de la metodología de la HH utilizada corresponde a la consideración de los consumos indirectos los cuales dotan al resultado de cierta “memoria” al favorecer (con menor huella) aquellos reactivos o procesos que incurran en menor consumo de agua. La particularidad viene de que para la faena minera tipo planteada todos estos consumos indirectos considerados de forma general sólo constituyen aproximadamente un 10% de la HHA total calculada, por lo cual, los riesgos asociados para la minería chilena se encuentran in-situ en la mina, y no como resultado directo de los insumos utilizados. Surge la interrogante de si en conjunto los consumos despreciados debido a contribuir menos del 1% del total como total lograran cambiar de manera apreciable la proporción obtenida.

En cuanto a la incertidumbre analizada, esta da como resultado general variaciones con respecto a la media que no superan el 5% siendo la operación con relave en pasta una excepción a esto, lo anterior considerando los percentiles 5% para valores menores y 95% para los mayores. De esto se concluye que la variabilidad de los resultados posibles se mantiene relativamente acotada si se considera que se trabaja con 30 variables/parámetros muestreados de manera aleatoria. Notar que a nivel porcentual puede no parecer mucha la diferencia, pero si se transforma la HHA de una faena minera trabajada como [m<sup>3</sup>/ton mineral] a [m<sup>3</sup>/tiempo], variaciones como las obtenidas a lo largo de un año pueden significar millones de metros cúbicos de agua utilizados. Sobre las diferencias obtenidas a nivel de percentiles para los distintos esquemas de operación/escenarios, la tendencia general indica que cualquier disminución de huella hídrica viene acompañada de una disminución en la amplitud de las bandas de los percentiles representados, o sea una disminución a su vez en la incertidumbre o bien en la propagación del resultado. Esto se observa a nivel de HHA directa e indirecta destacando el caso de la operación con relave en pasta como la gran excepción a todo lo anterior. Esta operación con relave en pasta, aunque genera resultados satisfactorios como medida de reducción de HH, tiene una contraparte negativa que viene del claro aumento en la variabilidad de los resultados. Se asocia esta diferencia a que el Cp del relave no presenta un comportamiento lineal conforme cambia su valor sino más bien hiperbólico según se desprende de la formula ( 3 ). Como consecuencia final de este comportamiento es que resulta preferible la operación con nuevas fuentes de agua, aun a pequeños porcentajes ya que además de generar disminuciones apreciables a nivel de HHA también brinda mayor certeza sobre todos los resultados posibles mediante la disminución de la incertidumbre que la acompaña.

## 7 BIBLIOGRAFÍA

---

Aceituno, M. & Navia, C., 2010. *Proceso de Mantención Mayor Sistema de Transporte de Concentrado MLP, 8vo Congreso de concentraductos, mineroductos y relaveductos*. Viña del mar, Fluimin.

A. G., 2008. *Suministro Complementario de Agua Desalinizada para Minera Escondida*, Santiago: MINERA ESCONDIDA LIMITADA.

Alliance for Water Stewardship, 2014. *The AWS International Water Stewardship Standard V1.0*, Edinburgh, Scotland: Edinburgh Centre for Carbon Innovation (ECCI).

Binvignat, C. & de la Sotta, J., 2014. *Diagnosing and forecasting the behavior of water management variables in conventional tailings impoundments. 2nd International Seminar on Tailings Management..* Antofagasta, Chile, Gecamin.

Cacciuttolo, C., Barrera, S., Caldwell, J. & Vargas, W., 2015. *Filtered dry stacked tailings: Development and new trends, 2nd International Seminar on Tailings Management*, Antofagasta, Chile: Gecamin.

Centro de Cambio Global UC, 2012. *Análisis vulnerabilidad futura Cuenca del Rio Choapa y Estero Pupío*, Santiago: s.n.

Cifuentes, H. & Pinto, M., 2014. *Management and analysis of the opportunities to reduce water loss by resaturation: Minera Escondida case. 2nd International Seminar on Tailings Management..* Antofagasta, Gecamin.

COCHILCO, 2008. *Best Practices and Efficient Use of Water in the Mining Industry*, Santiago, Chile: COCHILCO.

COCHILCO, 2010. *Consumo de agua en la minería del Cobre 2010*, Santiago, Chile: COCHILCO: Dirección de Estudios y Políticas Públicas.

COCHILCO, 2015. *Consumo del agua en la minería del cobre al año 2014*, Santiago, Chile: COCHILCO: Dirección de Estudios y Políticas Públicas.

COCHILCO, 2016a. *Producción chilena de cobre por producto*, Santiago, Chile: COCHILCO.

COCHILCO, 2016b. *Producción cobre de mina por empresa*, Santiago: COCHILCO.

CODELCO, 2016. *Codelco Educa*. [En línea] Available at: [https://www.codelcoeduca.cl/procesos\\_productivos/tecnicos\\_flotacion.asp](https://www.codelcoeduca.cl/procesos_productivos/tecnicos_flotacion.asp) [Último acceso: 12 Julio 2016].

Côte, C., 2010. *Water Accounting in Mining*. Santiago, Chile, Water in mining 2010.

Decreto Supremo 46, 2002. *Norma de Emisión de Residuos Líquidos a Aguas Subterráneas*, Santiago, Chile: Ministerio Secretaria General de la Presidencia.

Decreto Supremo 90, 2000. *Norma de emisión para la regulación de contaminantes asociados a las*, Santiago, Chile: Ministerio Secretaria General de la Presidencia.

Domenech, J. L., 2009. *Huella ecológica y desarrollo sostenible*. 2da ed. España: Aenor.

Fundación Chile, 2016. *Manual de Aplicación para la Evaluación de Huella Hídrica Acorde a la Norma ISO 14046*, Santiago, Chile: Fundación Chile.

Garcés, M., 2011. *Análisis Técnico de la Huella Hídrica como Indicador de Sustentabilidad del Uso del Agua en la Producción del Concentrado de Cobre en División El Teniente de Codelco*, Santiago, Chile: Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.

GoldSim, 2014a. *GoldSim User's Guide Volume 1*, Issaquah, Washington: GoldSim Technology Group.

GoldSim, 2014b. *Goldsim User's Guide Volume 2*, Issaquah, Washington: GoldSim Technology Group.

Guarda, J., 2016. *Contacto personal: Reunión de Avance* [Entrevista] (18 Agosto 2016).

Gunson, A., Klein, B., Veiga, M. & Dunbar, S., 2012. Reducing mine water requirements. *Journal of Cleaner Production*, Issue 21, pp. 71-82.

Hoekstra, a., 2003. *Virtual water trade. Proceedings of the International Expert Meeting on virtual water trade*. The Netherlands, IHE Delft.

Hoekstra, a. & Chapagain, a., 2007. Water footprints of nations: Water use by people as a function of their consumption pattern. *Water Resources Management*, 21(1), pp. 35-48.

Hoekstra, A. Y., Chapagain, A. K., Aldaya, M. M. & Mekonnen, M. M., 2009. *Water Footprint Manual, State of the Art 2009*, Holanda: Water Footprint Network.

Hoekstra, A. Y., Chapagain, A. K., Aldaya, M. M. & Mekonnen, M. M., 2011. *Water Footprint Assesment Manual, setting the global standard*, Holanda: Water Footprint Network.

Mineral Council of Australia, 2012. *Water Accounting Framework for the Minerals Industry V1.2*, s.l.: s.n.

Olivares, M., 2015. *Catedras Análisis de sistemas ambientales (CI5103)*, Santiago, Chile: Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.

Olivares, M., 2016. *Contacto personal: Reunión de Avance* [Entrevista] (19 Agosto 2016).

Peña, C. A. & Huijbregts, M. A. J., 2014. The Blue Water Footprint of Primary Copper Production in Northern Chile.. *Journal of Industrial Ecology*, Issue 18, pp. 49-58.

ReVelle, C., Whitlatch, E. & Wright, J., 2003. *Civil and Enviromental Systems Engineering*. Second edition ed. New York: Pearson Prentice Hall.

Schubert, H., 2011. *The Virtual Water and the Water Footprint Concepts*, München: acatech Materialien Nr. 14.

Singh, R. K., Murty, H. R., Gupta, S. K. & Dikshit, A. K., 2009. An overview of sustainability. *Ecological Indicators*, Issue 9, pp. 189-212.

The CEO Water Mandate, 2011. *The CEO Water Mandate: An initiative by business leaders in partnership with the international community*, New York: United Nations.

Vergara, M. A., 2002. *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.

WFN., 2016. *Aims & history*. [En línea] Available at: <http://waterfootprint.org/en/about-us/aims-history/> [Último acceso: 27 11 2016].

Wackernagel, M. & Rees, W., 1996. *Nuestra Huella Ecológica, reduciendo el impacto*. Canada: New society Publishers.

WBCSD water, 2012. *Water for Business: Initiatives guiding sustainable water management, Version 3*, s.l.: s.n.

Wels, C. & Robertson, A., 2003. Conceptual model for estimating water recovery in tailings impoundments. *Proc. 10th Int. Conf. Tailings Mine Waste*, pp. 87-94.

Younger, P., 2006. *The Water Footprint of Mining Operations in Space and Time - A New Paradigm for Sustainability Assessments?*. Brisbane, Australia, Water in Mining Conference.

## ANEXO A: DATOS CLIMÁTICOS

Tabla A.1: Datos precipitación en [mm] de La Tranquila-DGA, fecha de consulta 11/08/2016

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Anual
1978	0	0	0	0	0	14	230.5	0	27	0	34	0	305.5
1979	0	0	0	7	8	0	55.5	15	0	0	2.5	1	89
1980	9	0	0	156.5	0	51	67	5	40	6	0	0	334.5
1981	0	0	0	0	88	21		38.5	6	0	0	0	153.5
1982	0	0	17	0	63.5	205	119.5	51	12	4	0	0	472
1983	9.5	0	0	30.5	16.5	43	123	27.6	9.5	0.5	0	0	260.1
1984	0	0	8	0	17.5	18	240	9.8	20.2	3	6	0	322.5
1985	0	0	7.5	0	6.2	1.6	55.8	1.2	1	10.1	0	0	83.4
1986	0	0.5	0	0.3	97	77.4	1.9	41.5	2.5	18.7	0.2	0	240
1987	0	7	6.5	11.9	18.9	50	398.5	238	7	19.3	0	0	757.1
1988	0	0	0	0	14.5	9.6	24	14.5	4.7	0	7.7	1.7	76.7
1989	0	0	0	6	30	0.5	74.5	81	6.5	0	0	0	198.5
1990	0	0	1	0	2	11.5	31.5	21.5	26.5	0	0	0	94
1991	0	0	0	2.5	54	161.6	57	3.5	51	0	0	5	334.6
1992	1.5	0	15	52	62.5	181.5	8	83	18	0	10	0	431.5
1993	0	0	0	62	168	10.5	41	20	11	0	0	0	312.5
1994	0	0	0	4.5	16.5	13.5	56	6	1	0	0	0	97.5
1995	51	0	0	10	1	26	32	13	13.5	0	0	0	146.5
1996	0	0	0	31	1.5	30.5	54.5	36	0	0	0	0	153.5
1997	0	0	0	0	23	429	18	218	7	40.5	0	3	738.5
1998	0	4.5	2	21	2	14	0	0	2	0	0	0	45.5
1999	0	0	8	8	9	30.5	1.6	54	95	6	0	0	212.1
2000	0	0	0	13	23.5	168.5	58.5	0	119	0	0	0	382.5
2001	0	0	8	9	39	0	181.9	39	6.5	13	0	0	296.4
2002	0	0	1	15.5	126.2	148	159.8	64	11.4	0	0	0	525.9
2003	0	0	0	0	82.5	36.5	42.2	6	0	0	1.9	0	169.1
2004	0	0	11	42	0	20.5	48.1	70	11.5	1	11	0	215.1
2005	0	0	29	11.5	41	65.9	4	87.9	28	12	7.4	0	286.7
2006	0	1.5	0	0	0	52	124.5	5	0	22	0	0	205
2007	0	0	0	0	2.5	86	23	28	0	0	0	0	139.5
2008	2.5	0	0	0.5	38	66	35.9	126.5	0.2	0	0	0	269.6
2009	0	1	0	0	1.5	100.5	30.5	76.5	1.5	0	0	0	211.5
2010	2	0	0	0	28.5	50	29.7	12	16.5	7.5	28	0	174.2
2011	0	0	0	0	0	121.3	46.5	28.5	0	0	0	0.5	196.8
2012	0	0	0	19	6.1	19.5	0	36.5	0	4	0	0	85.1
2013	1	0	0	0	61.5	20.1	12	12	2	0	4.8	0	113.4
2014	0	0	0	1	6.5	77.1	3.5	12	11.5	0	0	0	111.6
2015	0	0	23.5	0	3	0	61	170	13	56.5	0.5	0	327.5

Tabla A.2: Datos evaporación Chillepín-Ceaza en [mm], fecha de consulta 11/08/2016

Año	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
2013							53.66	96.1	121.57	165.6	188.89	210.44
2014	202.65	168.11	156.52	111.56	80.68	61.96	68.53	101.39	100.91	172.99	185.77	208.97
2015	210.22	165.98	150.7	119.37	88.17	86.86	74.81	83.02	108.96	119.59	166.47	203.51
2016	186.77	174.52	147.94	71.68	59.45	61.43	61.95	49.3				

## ANEXO B: PROCESAMIENTO DE DATOS DE EVAPORACIÓN

Los datos de evaporación que se tienen se procesan a nivel diario con el fin de estimar de mejor forma el estadístico desviación estándar el cual si se calcula de forma directa sobre todos los datos arroja un valor de 1.9 [mm/día], lo que si se compara con la media de 4.28 [mm/día] resulta excesivo considerando las características de la zona. Por lo anterior si se grafican los datos a nivel diario es claro notar una marcada tendencia estacional que oscila con máximos en verano y mínimos en invierno. Con el fin de eliminar esta componente estacional se decide realizar un ajuste sinusoidal de los datos según la forma:

$$e(x) = A * \sin\left(\frac{\text{dia}}{365} + B\right) + C$$

Radianes

Luego se realiza un ajuste por mínimos de los parámetros A, B y C que minimicen el error cuadrático entre el dato real y el calculado llegando a los siguientes valores con un coeficiente de ajuste  $R^2 = 0.78$

$$A = 2.265$$

$$B = 1.643$$

$$C = 4.342$$

Finalmente con estos valores se calcula la diferencia entre el dato real y el valor calculado dados los parámetros antes descritos y se obtiene la desviación estándar de las diferencias la cual se considera representativa de la evaporación sin considerar variaciones estacionales ( $\sigma = 0.99 \left[\frac{mm}{dia}\right]$ ). Esto supone una reducción de la desviación estándar hasta un valor que representa una variación del 28% con respecto a la media versus el 44% original.

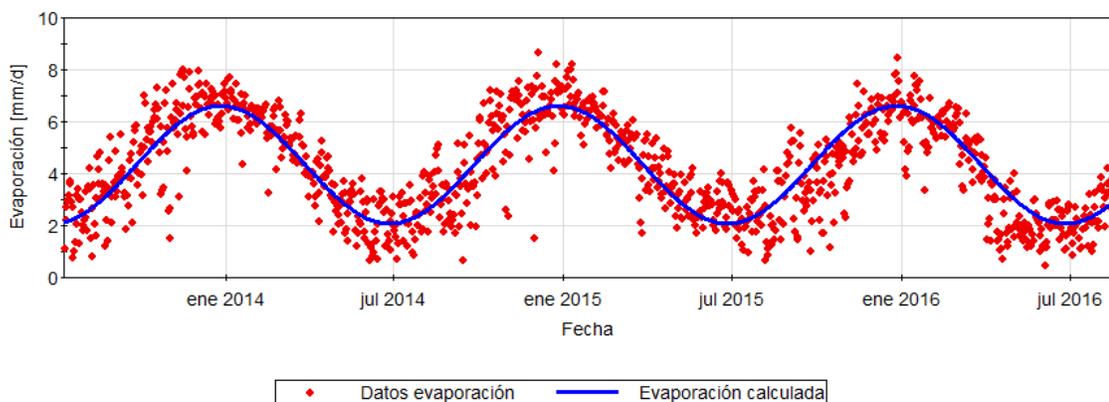


Gráfico C.1: Comparación datos evaporación con ajuste sinusoidal.

# ANEXO C: GRÁFICOS ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD PARA 8 VARIABLES/PARÁMETROS MÁS SENSIBLES

