



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ

**FACULTAD DE INGENIERÍA
CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y ESTUDIOS DE POSGRADO
INSTITUTO DE METALURGIA**

**Metodología para la evaluación de la Huella Hídrica
de concentrados de sulfuros de cobre y su
aplicación a nivel industrial**

Tesis

Que para el obtener el grado de
Doctor en Ingeniería de Minerales.

Presenta

M.T.G.A. Jorge Eduardo Rodríguez García

Asesor de Tesis

Dra. María Isabel Lázaro Báez

Co-Asesor de Tesis

Dr. Israel Razo Soto

San Luis Potosí, S.L.P

Agosto 2024



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ

FACULTAD DE INGENIERÍA
CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y ESTUDIOS DE POSGRADO
INSTITUTO DE METALURGIA

Metodología para la evaluación de la Huella Hídrica de concentrados de sulfuros de cobre y su aplicación a nivel industrial

Tesis

Que para el obtener el grado de
Doctor en Ingeniería de Minerales.

Presenta

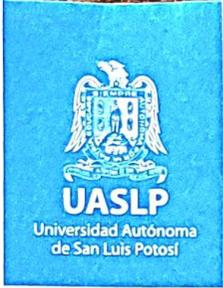
M.T.G.A. Jorge Eduardo Rodríguez García

Comité tutelar

Asesor de Tesis:	Dra. María Isabel Lázaro Báez	_____
Co-Asesor de Tesis:	Dr. Israel Razo Soto	_____
Sinodal:	Dr. Israel Rodríguez Torres	_____
Sinodal:	Dr. Cristóbal Alberto Pérez Alonso	_____
Sinodal:	Dr. Antonio Cardona Benavides	_____
Sinodal:	Dr. Aldo Amir Sánchez	_____
Sinodal:	Dr. Javier Aguilar Carrillo de Albornoz	_____

San Luis Potosí, S.L.P.

Agosto 2024



14 de diciembre de 2023

**M.T.G.A. JORGE EDUARDO RODRÍGUEZ GARCÍA
P R E S E N T E.**

En atención a su solicitud de Temario, presentada por los **Dres. María Isabel Lázaro Báez e Israel Razo Soto**, Asesora y Coasesor de la Tesis que desarrollará Usted, con el objeto de obtener el Grado de **Doctor en Ingeniería de Minerales**. Me es grato comunicarle que en la sesión del H. Consejo Técnico Consultivo celebrada el día 14 de diciembre del presente, fue aprobado el Temario propuesto:

TEMARIO:

“Metodología para la evaluación de la Huella Hídrica de concentrados de sulfuros de cobre y su aplicación a nivel industrial”

Resumen.

- I. Introducción
 - II. Antecedentes sobre la Huella Hídrica y su aplicación en el sector minero metalúrgico
 - III. Desarrollo metodológico para la evaluación de la Huella Hídrica de los procesos de concentración de sulfuros de cobre
 - IV. La evaporación y su importancia en los procesos minero metalúrgicos
 - V. Estudio de factores hidrológicos en una presa de jales
 - VI. Técnicas de percepción remota aplicadas a la determinación del balance hídrico en una presa de jales
 - VII. Modelo numérico para inventario de Huella Hídrica en el proceso de concentración de sulfuros de cobre
 - VIII. Aplicación Industrial de la herramienta para cálculo de inventario de Huella Hídrica.
 - IX. Discusión y análisis crítico de los resultados de la aplicación de la metodología desarrollada
 - X. Conclusiones y recomendaciones
- Referencias bibliográficas
Anexos

“MODOS ET CUNCTARUM RERUM MENSURAS AUDEBO”

A T E N T A M E N T E

**DR. EMILIO JORGÉ GONZÁLEZ GALVÁN
DIRECTOR.**



www.uaslp.mx

Av. Manuel Nava 8
Zona Universitaria • CP 78290
San Luis Potosí, S.L.P.
tel. (444) 826 2330 al 39
fax (444) 826 2336

Copia. Archivo.
*etn.

“UASLP, más de un siglo educando con autonomía”



UASLP
Universidad Autónoma
de San Luis Potosí



FACULTAD DE
INGENIERÍA



CENTRO DE
INVESTIGACIÓN
Y ESTUDIOS
DE POSGRADO

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ

FACULTAD DE INGENIERÍA

Área de Investigación y Estudios de Posgrado

Aclaración

El presente trabajo que lleva por título:

“Metodología para la evaluación de la Huella Hídrica de concentrados de sulfuros de cobre y su aplicación a nivel industrial”

se realizó en el periodo de agosto de 2016 a agosto de 2024 bajo la dirección de la Dra. María Isabel Lázaro Báez y la co-dirección del Dr. Israel Razo Soto

Originalidad

Por este medio aseguro que he realizado este documento de tesis para fines académicos sin ayuda indebida de terceros y sin utilizar otros medios más que los indicados.

Las referencias e información tomadas directa o indirectamente de otras fuentes se han definido en el texto como tales y se ha dado el debido crédito a las mismas.

El autor exime a la UASLP de las opiniones vertidas en este documento y asume la responsabilidad total del mismo.

Este documento no ha sido sometido como tesis a ninguna otra institución nacional o internacional en forma parcial o total.

Se autoriza a la UASLP para que divulgue este documento de Tesis para fines académicos.

Nombre y Firma del autor

Jorge Eduardo Rodríguez García



RECONOCIMIENTOS INSTITUCIONALES

Se hace extensivo el agradecimiento al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo recibido a través de la beca CONACYT 554365, para la realización de los estudios de Doctorado en el Centro de Investigación y Estudios de Posgrado (CIEP) de la Facultad de Ingeniería, así como el Instituto de Metalurgia de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

Asimismo, se agradece a la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, al Centro de Investigación y Estudios de Posgrado (CIEP) de la Facultad de Ingeniería y sobre todo al Instituto de Metalurgia por los diversos apoyos recibidos durante los estudios de posgrado.

De igual manera, se agradece ampliamente a la empresa Negociación Minera Santa María de la Paz y Anexas S.A. de C.V. por brindarme todo el apoyo y abrirme las puertas para realizar parte del desarrollo experimental de este trabajo de investigación.





AGRADECIMIENTOS

A Roberto y Gabriela porque me han enseñado a buscar y alcanzar grandes metas.

A mi familia porque siempre ha estado ahí para mí.

A Marce por siempre ayudarme a seguir adelante.

A mi asesora y co-asesor por enseñarme, guiarme y por todo el apoyo brindado durante toda mi formación académica.

A todo el personal docente, administrativo y académico del Instituto de Metalurgia que me brindó su apoyo durante todo el tiempo de mis estudios de posgrado.





TEMARIO

RESUMEN	1
I. Introducción	7
II. Antecedentes sobre la Huella Hídrica y su aplicación en el sector minero metalúrgico.	13
III. Desarrollo metodológico para la evaluación de la Huella Hídrica de los procesos de concentración de sulfuros de cobre.	32
IV. La evaporación y su importancia en los procesos minero metalúrgicos.....	60
V. Estudio de factores hidrológicos en una presa de jales.....	75
VI. Técnicas de percepción remota aplicadas a la determinación del balance hídrico en una presa de jales.....	88
VII. Modelo numérico para inventario de Huella Hídrica en el proceso de concentración de sulfuros de cobre.	98
VIII. Aplicación Industrial de la herramienta para cálculo de inventario de Huella Hídrica.....	162
IX. Discusión y análisis crítico de los resultados de la aplicación de la metodología desarrollada	170
X. Conclusiones y recomendaciones.....	177
Referencias Bibliográficas	181
Anexos.....	189





LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Criterios de caracterización del agua verde, azul y gris para el PCSC y los elementos del sistema involucrados en el manejo de agua	42
Tabla 2. Criterio de clasificación para los flujos.	48
Tabla 3. Lista de flujos del Modelo Conceptual.	50
Tabla 4. Tasas de evaporación en celda de laboratorio	67
Tabla 5. Mediciones y prueba diferencia significativa de Tukey de tanques evaporímetros.	74
Tabla 6. Parámetros de tormenta de diseño para pruebas de infiltración.....	81
Tabla 7 . Distribución granulometría de los taludes.....	86
Tabla 8. Cuantificación de las zonas en la presa de jales.....	95
Tabla 9. Resultados de la cuantificación de cada componente de la HH por módulo.....	165
Tabla 10. Resultado de la cuantificación de la HH expresado en toneladas de material, toneladas de concentrado y toneladas de contenido de cobre.....	168
Tabla 11. Datos calculados del volumen empleado en los módulos de molienda y flotación VS consumo de agua medido en la empresa.	169





LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Número de publicaciones que incluyen el nombre del indicador de huella en el título de la publicación, en idioma inglés.	14
Figura 2. Número de publicaciones que incluyen el nombre del indicador de huella en el tema de la publicación, en idioma inglés	15
Figura 3. Número de publicaciones por categoría	15
Figura 4. Producción histórica de cobre (modificado al español de Hong et al., 1996).....	23
Figura 5. Diagrama que muestra el funcionamiento de una celda de flotación.	28
Figura 6. Bandas espectrales de las misiones Landsat (obtenido de www.landsat.gsfc.nasa.com).....	30
Figura 7. Etapas de la metodología propuesta.....	35
Figura 8. Diagrama simplificado del proceso general de concentración de sulfuros.....	36
Figura 9. Consideración para la cuantificación para el balance diario entre evaporación y precipitación.....	40
Figura 10. Modelo conceptual del proceso.	47
Figura 11. Ubicación del caso de estudio respecto al estado de San Luis Potosí.	53
Figura 12. Diagrama general del proceso de Negociación Santa María de la Paz y Anexas S.A. de C.V.	53
Figura 13. Climograma de la zona de estudio.....	54
Figura 14. Puntos de muestreo de infiltración en caminos de acarreo.....	63
Figura 15. Especificaciones de celda de flotación Denver D-12	65
Figura 16. Temperatura de la celda en agitación y la celda empleada como referencia (sin agitación).....	66
Figura 17. Tasa de evaporación en celdas con agitación y sin agitación (izq), rangos de los datos de evaporación (der).	67



Figura 18. Tanque evaporímetro Clase A.	72
Figura 19. Diagrama esquemático del depósito de jales y los componentes asociados	75
Figura 20. Zonificación en la presa de jales, (imagen multiespectral acomodo de banda: IRC, Rojo y Verde).....	79
Figura 21. Esquema de funcionamiento del infiltrómetro Cornell Sprinkle.	80
Figura 22. Ejemplo de los mapas de isoyetas de intensidad de lluvia de la SCT para el estado de San Luis Potosí.	81
Figura 23. Puntos de muestreo de infiltración en la presa de jales	82
Figura 24. Porcentaje de escurrimiento de los puntos fuera de la presa de jales	83
Figura 25. Perfil de infiltración en horizonte A de suelo aguas arriba de la presa de jales (izq) y perfil sin definición en jales mineros (der)	84
Figura 26. Porcentaje de escurrimiento en la zona de la playa de la presa de jales.....	85
Figura 27. Distribución granulométrica de la muestra aguas arriba (arriba) y de muestra de los taludes (abajo).	86
Figura 28. Comparación de las curvas granulométricas de los taludes y la playa de la presa de jales.....	87
Figura 29. Ejemplo de superposición de imágenes con vuelo de RPAS.....	89
Figura 30. Modelo digital de elevación generado a partir de imágenes multiespectrales.....	90
Figura 31. Imagen multiespectral de la presa de jales (bandas: NIR,rojo, verde)	91
Figura 32. Polígonos de definición para las ROI en Sistema de Información geográfica	93
Figura 33. Firmas espectrales de las superficies de la presa de jales.	93
Figura 34. Zonificación de la identificación con ROIs, (sin ajuste, sin recorte) .	95
Figura 35. Zonificación acotada de la presa de jales.	96



Figura 36. Superposición de imagen zonificada de la presa de jales sobre imagen satelital.....	97
Figura 37. Modelo Conceptual representado gráficamente.	99
Figura 38. Descripción de los elementos gráficos en la representación de los flujos de entrada y de salida de cada módulo	100
Figura 39. Diagrama de flujos del módulo Mina.....	101
Figura 40. Flujos del módulo acarreo	112
Figura 41. Flujos del módulo Acumulamiento	126
Figura 42. Flujos del módulo reducción de tamaño.....	132
Figura 43. Flujos del módulo Molienda.....	135
Figura 44. Flujos del módulo Flotación.....	139
Figura 45. Flujos del módulo Filtración (separación sólido líquido).	144
Figura 46. Flujos del módulo Presa de Jales.	148
Figura 47. Flujos del módulo Manejo de Agua.	156
Figura 48. Huella Hídrica del caso de estudio por módulo para le PCSC.....	166
Figura 49. Huella hídrica diaria y acumulada para el módulo Presa de Jales PCSC	166
Figura 50. Porcentaje de aportación a la HHV por módulo.....	167
Figura 51. Porcentaje de aportación a la HHA por módulo.....	167





LISTA DE SIGLAS Y ABREVIATURAS

- **AASHTO** – La Asociación Americana de Funcionarios Estatales de Carreteras y Transportes (American Association of State Highway and Transportation Officials)
- **ACV** - Análisis de Ciclo de Vida.
- **FAO** – Organización de Agricultura y alimentos de las naciones unidas (*Food and Agriculture Organization of the United Nations*).
- **GRI** – Iniciativa Global de Reporte (*Global Reporting Initiative*)
- **HH** - Huella Hídrica.
- **HHA** - Huella Hídrica Azul.
- **HHG** - Huella Hídrica Gris.
- **HHV** - Huella Hídrica Verde.
- **ICMM** – Consejo Internacional de Minería y Metales (International Council of Mining and Metal).
- **MC** – Modelo Conceptual.
- **MEHH** – Manual de Evaluación de la Huella Hídrica.
- **MIBC** – Metil isobutil carbinol
- **MN** – Modelo Numérico.
- **NIR** – Término en inglés para Infrarrojo cercano (Near Infra Red).
- **PCSC** – Procesos de Concentración de Sulfuros de Cobre.
- **RPAS** – Aeronave pilotada a distancia (Remotely Piloted Aircraft System)
- **SAG** – Semiautógeno (referente al tipo de molino).
- **SCT**- Secretaria de Comunicaciones y Transportes
- **WFAM** – Término para Manual de evaluación de la Huella Hídrica (water footprint assessment manual)
- **WFN** – Término para Red de la Huella Hídrica (Water Footprint Network)





RESUMEN

Este documento presenta una propuesta innovadora en el sector minero-metalúrgico, centrada en la aplicación de la Huella Hídrica en el proceso de extracción y beneficio de sulfuros de cobre.

La Huella Hídrica es un indicador del uso directo e indirecto del agua que puede aplicarse a procesos industriales. A través de sus componentes - Huella Hídrica Verde, Huella Hídrica Azul y Huella Hídrica Gris - se puede identificar el origen, uso y destino del agua en el proceso evaluado. Esto se logra mediante la identificación y caracterización de los flujos de entrada y salida del proceso en tres categorías de agua distintas (verde, azul y gris), cada una análoga a un componente de la Huella Hídrica. Aunque este indicador ha cobrado mayor relevancia en los últimos años, su aplicación en sectores como el minero-metalúrgico ha sido limitada.

El propósito de este documento es contribuir a este sector, utilizando como base los conceptos generales del Manual de la Huella Hídrica (WFAM) y adaptándolos a las particularidades operativas del proceso de extracción y beneficio de sulfuros de cobre, específicamente en las etapas de identificación y cuantificación.

La adaptación de dichos conceptos al proceso se encuentra enfocada principalmente en la interacción de la infraestructura con el medio en donde se desarrolla la actividad, la forma en la que los recursos hídricos son usados en los procesos minero-metalúrgicos y cómo las características del proceso de concentración de sulfuros de cobre determinan que factores son relevantes para los componentes de la Huella Hídrica (Azul, Verde y Gris).

A través de un análisis de la infraestructura típicamente utilizada en el proceso, la diversidad de condiciones operativas y los subprocesos comúnmente empleados, se logró desglosar el proceso en actividades principales. Este enfoque sirvió como base para el desarrollo de un modelo conceptual, el cual se estructura en nueve módulos representativos de las actividades principales del proceso: 1) Mina, 2) Acarreo, 3) Acumulamiento, 4) Trituración, 5) Molienda, 6) Flotación, 7) Separación sólido Líquido, 8) Presa de Jales y 9) Manejo de Agua. Cada uno de estos módulos se enfoca en una de las principales actividades del proceso, permitiendo así un análisis más detallado y específico de cada etapa.

En estos módulos se han identificado las entradas, salidas y transferencias del sistema, clasificándolas por su asociación con los distintos componentes



de la Huella Hídrica según su origen, destino y la interacción con el medio ambiente.

La implementación de esta metodología se llevó a cabo en un caso de estudio a nivel industrial en etapa operativa, el cual emplea minado subterráneo, trituración primaria dentro de la mina, acarreo por camiones, molienda en molinos de bolas, flotación, espesamiento y filtración del concentrado y presa de jales; el cual se ubica en una zona semiárida del estado de San Luis Potosí.

La aplicación de técnicas de percepción remota permitió la determinación de zonas en la presa de jales que ayudaron en la estimación de la evaporación.

El análisis de los resultados de la implementación de la metodología en el caso de estudio reveló que la Huella Hídrica del proceso fue de $0.265 \text{ m}^3/\text{t}$, distribuyéndose $0.1375 \text{ m}^3/\text{t}$ en la Huella Hídrica Verde y $0.1275 \text{ m}^3/\text{t}$ en la Huella Hídrica Azul. Se observó que los módulos de Acarreo y Presa de Jales fueron los principales contribuyentes a este indicador. Además, se identificó que el 66.75% de la Huella Hídrica Azul está asociado a pérdidas por evaporación, siendo el riego de caminos en el módulo de acarreo y la exposición a las condiciones ambientales en la presa de jales las principales causas. El 24.75% restante corresponde al volumen de agua que se pierde en forma de evaporación en los caminos. El cálculo de la Huella Hídrica Gris dentro del proceso de caso de estudio resultó ser de $0 \text{ m}^3/\text{t}$, ya que fue diseñado como un proceso de cero descargas en donde el agua del proceso principalmente es recuperada a través de la presa de jales, sin embargo, la metodología propuesta se diseñó para poder estimar dicho volumen en caso de que existiera flujos potenciales generadores de Huella Gris.

La magnitud de la Huella Hídrica Verde está principalmente relacionada con la captación de agua de lluvia en la infraestructura del proceso, como los caminos de acarreo y la presa de jales. Por lo tanto, la presa de jales y su interacción con las condiciones climáticas son las etapas más relevantes del proceso, tanto para la evaluación de la Huella Hídrica como para la pérdida y la ganancia de agua en el proceso.



ABSTRACT

This document presents an innovative proposal for the mining and metallurgical sector, focused on the application of the Water Footprint assessment in the extraction and processing of copper sulfides.

The Water Footprint is an indicator of both direct and indirect water use that can be applied to industrial processes. Through its components the Green Water Footprint, the Blue Water Footprint, and the Grey Water Footprint it is possible to identify the origin, use, and destination of water in the evaluated process. This is achieved by identifying and characterizing the input and output flows of the process into three distinct water categories (green, blue, and grey), each one related to a component of the Water Footprint. The application of this indicator in sectors such as mining and metallurgy has been limited, although this indicator has gained relevance in recent years.

The purpose of this document is to contribute to this sector by using the general concepts of the Water Footprint Assessment Manual (WFAM) fundamentals and adapting them to the operational features of the copper sulfides extraction and processing, specifically in the stages of identification and quantification

The adaptation of these concepts to the process is primarily focused on the interaction between the infrastructure and the environment where the activity takes place, the way in which water resources are used in mining and metallurgical processes, and how the features of the copper sulfide concentration process determine which factors are relevant to the Water Footprint components (Blue, Green, and Grey).

In the case of copper sulfides, the process starts when mineral rocks are reduced in size by crushing and then transferred to a semiautogenous (SAG) mill or a ball mill for further size reduction, where a significant volume of water is used to obtain a slurry that usually contains approximately 20–40% solids (Singh, 2010). The slurry is transferred to a froth flotation cell circuit where copper sulfides are concentrated, and the product slurry contains >20% copper. By using thickeners and filters (drum or press), the moisture content of the copper concentrate can be reduced to 10%– 12%, (Haldar, 2018), and the residual material is deposited in a TSF. The process is discussed in greater detail by Bleiwas (2012b) and Haldar (2018)

Through an analysis of the infrastructure typically used in the process, the diversity of operating conditions, and the commonly employed subprocesses, the process was separate into main activities. This approach allows the



development of a conceptual model, structured into nine modules representing the main activities of the process: 1) Mine, 2) Haulage, 3) Stockpiling, 4) crushing, 5) Milling, 6) Froth Flotation, 7) Solid-Liquid Separation, 8) Tailing Storage Facility, and 9) Water Management. Each of these modules focuses on one of the main activities of the process, enabling a more detailed and specific analysis of each stage.

The Mine module considers mining operations such as open pits and/or underground mining processes and a potential underground primary trituration, but under the criteria that all activities carried out underground, such as internal water runoff, underground evaporation, gain or loss of humidity of the ore, are considered recirculation in the module.

Only external inputs or direct outputs from the module are considered in the water inventory. Other inputs are included, such as water used in perforation and exploration activities, groundwater, and road irrigation.

The Haulage module Includes the service roads used and conveyor belts and/or haulage trucks as the most common ways of ore and waste rock transportation. Road irrigation is a common practice for dust control used in mine sites; thus, it is considered that at some point, the total volume of water applied for this activity will infiltrate or evaporate because the high level of compaction.

The Stockpiling module was designed to harbor waste rock dumps or piles. The deposits can be constructed outdoors, assuming a variable increase in their surface over time. The module also considers water loss due to evaporation.

Additionally, they can be constructed underground as a means of recycling the waste rock using it to backfill the mined-out area, significantly reducing the disposed of material and decreasing the land-use and environmental impacts (Lu and Cai, 2012). A larger volume of waste disposal material is expected in places where open-pit mining is used or where waste rock cannot be backfilled (Younger et al., 2002).

Crushing module which involves a reduction in the size of the ore by crushing to a specific particle size preparing the ore for the milling phase. Water is used in this module as dust control.

The Milling module represents the reduction of particle size process. Milling stage involve the greatest demand of energy of the process (Jeswiet and Szekeres, 2016) and the highest level of water consumption along with the froth



flotation stage due to the solid/liquid ratio needed (Bleiwas, 2012b; Muzenda, 2010). This module includes the use of cyclones, and measures all the water added to the milling circuit.

The Froth Flotation module is focused only on the water consumed in the froth flotation process considering bulk concentrate circuits and/or independent metal circuits in the same operation. Additionally, it is possible to adjust all kinds of cell arrangements, including scavengers and cleaners because the flexibility of the conceptual model.

The solid-liquid separation module looks upon the infrastructure involved in water reclamation from the concentrate, such as thickeners and pressure filters recirculation of water is possible and/or needed, which could be limited to only when the water quality is suitable for the desired use.

The Tailing Storage facility module could represent the component with the highest water loss, and it is an important source of water makeup (Bleiwas, 2012b) because Water is vital for the process because it is used at many points as a direct input (milling and flotation modules).

Water/Solution management module is a remarkable factor to consider for the WF determination in this method because water management practices require great infrastructure variety. The possible scenarios for this module are multiple, depending on the operational configuration and the operational practices of water management on site. This includes pipelines, canals, reservoirs, and ponds as the main solution handling systems to manage the process solutions, such as water recovery from tailings dams in the process.

Most of the related WF mining studies do not mention the inclusion of ponds and reservoirs; however, this topic is gaining relevance, and there is a recent report on the global estimation of the WF of an artificial reservoir due to evaporation (Hogeboom et al., 2018). The runoff canals that are commonly used as rainfall controls in the perimeter of specific areas are not included in this module.

Within these modules, the inputs, outputs, and system transfers were identified and classified according to their association with the different components of the Water Footprint based on their origin, destination, and interaction with the environment.

The implementation of this methodology was carried out in an industrial-scale case study in the operational phase at Negociación Minera Santa María de la Paz y Anexas S.A. de C.V., which involves underground mining, primary



crushing within the mine, truck haulage, ball mill grinding, froth flotation, concentrate thickening, press filtration of the concentrate, and a tailings storage facility. The case study is located in a semi-arid area of the state of San Luis Potosí, in Villa de la Paz town.

The application of remote sensing techniques allowed the identification of areas in the tailings dam that aided in estimating evaporation.

The analysis of the results obtained with the methodology in the case study revealed that the Water Footprint of the process was 0.265 m³/t, with 0.1375 m³/t attributed to the Green Water Footprint and 0.1275 m³/t to the Blue Water Footprint. It was observed that the Haulage and Tailings Storage Facility modules were the main contributors to this indicator. Additionally, it was identified the main causes of 66.75% of the Blue Water Footprint is associated with evaporation losses, with road irrigation in the haulage module and the exposure to environmental conditions in the tailing storage facility. The remaining 24.75% corresponds to the volume of water lost by evaporation on the roads. The calculation of the Grey Water Footprint in the case study process resulted in 0 m³/t, as it was designed as a zero-discharge process where most of the process water is recovered through the tailings dam. However, the proposed methodology was designed to estimate this volume in case there were potential flows that can generate a Grey Water Footprint flow.

The magnitude of the Green Water Footprint is primarily related to the capture of rainwater in the process infrastructure, such as haul roads and the tailings storage facility. Therefore, the tailings storage facility and its interaction with climatic conditions are the most relevant stages of the process, both for the Water Footprint assessment and for the loss and gain of water in the process.



I. Introducción

El agua es un recurso presente y necesario en gran parte de los procesos vinculados al desarrollo humano de cualquier índole (urbano, industrial, agrícola, etc.), por lo que en conjunto, las actividades humanas consumen grandes cantidades de agua (Khare y Martínez, 2012). De esta forma, todo lo que es cotidianamente consumido requiere agua para su creación, producción o transformación y por ello, se debe considerar que, al intercambiar productos y servicios, también se intercambian grandes cantidades de agua (AgroDer, 2012).

En el caso del aprovechamiento de los recursos minerales, el agua se emplea para la obtención de una gran diversidad de materiales como piedras preciosas, minerales industriales, elementos metálicos y no metálicos. Todos estos materiales son empleados en una amplia gama de procesos alimenticios, farmacéuticos e industriales para generar muchos de los productos de uso cotidiano (Crowson, 2011).

Parece que no se puede concebir una vida en la sociedad moderna sin pensar en el aprovechamiento de los recursos minerales, principalmente porque al mirar a nuestro alrededor, muchos de los objetos o servicios con los que contamos actualmente son un reflejo del uso de estos materiales (Younger et al., 2002).

Claramente, existe una postura de la sociedad en general a favor y otra en contra de la minería, lo cual se debe principalmente a los efectos que las prácticas de este sector pueden causar. Comúnmente, estos efectos se encuentran ligados entre otros al deterioro ambiental y en ese sentido existe una preocupación generalizada por el aumento en extensión del cambio de uso de suelo en las unidades mineras, la seguridad operativa en sus unidades, el deterioro ambiental en sus inmediaciones, así como la calidad, disponibilidad y uso de los recursos hídricos. Por lo cual, tanto por parte de la sociedad, como de la industria en este sector, existe gran interés en la protección de este recurso; orientado principalmente a lograr una disminución en el consumo, una recirculación hacia los procesos productivos y un especial interés en zonas áridas y semiáridas en donde la disponibilidad de agua es limitada. (Bleiwass, 2012a)

Particularmente en los procesos hidrometalúrgicos, la calidad del agua requerida y su uso, son aspectos importantes tanto en el procesamiento de minerales como para el ambiente, ya que, según su manejo, las características y las prácticas operativas de cada sitio demanda situaciones particulares. (Northey et al., 2016). Cabe destacar que, debido a la naturaleza



de estos procesos, el agua es fundamental por cuestiones operativas, en donde este recurso es empleado en la producción minera como medio para la recuperación de los minerales de interés. De esta forma, el agua se convierte en un recurso estratégico para este sector y se reporta que en los procesos hidrometalúrgicos se aplican una diversidad de estrategias para reciclar y reutilizar el agua (Rao, 2006), esto como respuesta a los desafíos de sostenibilidad en los lugares específicos donde se realiza la extracción de minerales (Bebbington y Bury, 2010).

Muchas de estas estrategias de mitigación se encuentran enfocadas a mejoras tecnológicas o procedimientos que reduzcan el impacto ambiental de este sector, sin embargo, también existe una constante presión por parte de la sociedad en la aceptación de tales medidas de mitigación, así como la manera en la que éstas son traducidas a la misma sociedad.

En la búsqueda para mejorar, entender y cuantificar el manejo de agua dentro del sector minero-metalúrgico se han realizado numerosos esfuerzos por aplicar criterios de sustentabilidad y reporte de sus operaciones. Estos esfuerzos incluyen a la Iniciativa de Reporte Global (GRI, por sus siglas en inglés) (Northey et al., 2019), la cual es una institución independiente que estableció el primer estándar mundial de lineamientos para la elaboración de memorias de sustentabilidad en donde las industrias presentan los impactos generados por sus actividades. Otro ejemplo son los reportes corporativos de agua del Consejo Internacional de Minería y Metales (ICMM, por sus siglas en inglés) (ICMM, 2017), en donde, comúnmente las plantas minero-metalúrgicas realizan balances hídricos de sus sistemas para implementar control sobre el agua en el proceso buscando un buen manejo de los recursos.

La búsqueda industrial por la implementación de indicadores que muestren el estatus de un sector o una empresa no es exclusivo de la minería. Esta búsqueda industrial ha llevado al desarrollo de herramientas como los indicadores de "Huella", como por ejemplo la Huella Ecológica (Rees, 1992), la Huella Energética (Wackernagel et al., 1999), la Huella de Carbono (Wiedmann y Minx, 2007) y la Huella Hídrica (Hoekstra, 2003).

Estos indicadores tienen el potencial y propósito de proveer una imagen más completa de la complejidad existente en la interacción de diversos factores con el medio ambiente (Ridoutt y Pfister, 2013). Si bien el desarrollo y la aplicación de estos indicadores no es propio del sector minero-metalúrgico, existe cada vez más un interés por el uso de indicadores ecológicos (Murakami et al., 2020), por la Huella de Carbono (Azadi et al., 2020; Ulrich et al., 2020) y por la Huella Hídrica (HH).



En el caso de la HH existe una tendencia por emplear principalmente dos metodologías de evaluación, una es el estándar ISO 14046 (ISO, 2014) basado en la metodología del análisis de ciclo de vida que emplea indicadores para su cuantificación y otra es la metodología propuesta por el Red internacional de la Huella Hídrica (WFN, por sus siglas en inglés) que plantea clasificar el agua según su procedencia en verde, azul y gris, según si esta proviene de la lluvia (verde), de algún cuerpo de agua (azul) y su calidad (gris). Ambas metodologías son capaces de evaluar los puntos importantes en los procesos, cuantificar volúmenes de inventario, y plantear indicadores que permitan la toma de decisiones en el manejo de los recursos hídricos (Northey et al., 2016). Sin embargo, no se debe de perder de vista que la complejidad de cada caso está sujeta a la diversidad operativa de la industria minero metalúrgica, a la magnitud y prácticas en el cambio de uso de suelo ya que impactan directamente sobre los recurso hídricos (Guo et al., 2023), y las condiciones ambientales y climáticas del entorno de cada lugar.

Las características de ambas metodologías dejan abierta la oportunidad de desarrollar herramientas de cuantificación integral que evalúen el sector minero metalúrgico con indicadores hídricos desde un punto de vista sustentable (Fonseca et al., 2014).

A pesar de que se han realizado algunas investigaciones acerca de la HH en el sector minero, la aplicación de este indicador ha sido limitada hasta la fecha y no contempla la importancia de la interacción entre las variables climáticas y la propia operación, debido principalmente a la carencia de metodologías y la necesidad de sistemas adaptados a las características particulares de los procesos minero-metalúrgicos. El principal reto es lograr un desarrollo optimizado de la actividad minero-metalúrgica en el cual las mismas empresas que lo conforman tengan un enfoque integrado hacia la disminución del impacto ambiental causado por el consumo de agua de sus actividades (IIED, 2002).

Teniendo en cuenta lo anterior, en esta investigación se desarrolló una metodología para la cuantificación de la HH enfocada en el proceso de beneficio de sulfuros de cobre, con el objetivo de adaptar de forma general los conceptos de la WFN a las condiciones operativas dinámicas de los procesos minero-metalúrgicos y su interacción con las condiciones climáticas y el medio ambiente en donde se desarrollan.





I.1 Justificación

El presente trabajo está enfocado en el uso y el consumo del agua en el proceso de concentración de sulfuros de cobre (PCSC) debido a las grandes cantidades de agua que demanda este proceso. Aproximadamente se requieren entre 1.5 y 3.5 m³ de agua por cada tonelada de mineral de cobre procesado (Bleiwas, 2012a). Asimismo, de forma global se ha reportado que el proceso de producción de cobre consumió aproximadamente 1x10⁹ m³ en 2009 (Gunson, 2013), lo que resulta ser relevante al tomar en cuenta la magnitud de producción de esta actividad, la cual, a nivel mundial en el año 2016 alcanzó alrededor de 19 millones de toneladas del metal. Particularmente en México la producción de cobre para el mismo año fue de 766,129 toneladas, lo que corresponde al 3.2% de la producción mundial (CAMIMEX, 2017)

Es importante considerar que la tendencia de la producción minera en México ha aumentado prácticamente al doble en los últimos 10 años (CAMIMEX, 2017) por lo que es importante considerar no únicamente el manejo actual de los recursos, si no también tener un enfoque hacia los años futuros, ya que al aumentar esta actividad aumentará el consumo general de agua asociado a este tipo de procesos.

En estos términos el desarrollo de la HH como indicador para procesos mineros, plantea ser una buena alternativa dentro del enfoque de sustentabilidad dentro en el sector minero-metalúrgico para mejorar la gestión del agua. Sin embargo, a pesar de que se han realizado algunos estudios para la cuantificación del consumo de agua dentro de algunos procesos particulares del sector minero y algunos de estos trabajos se encuentran enfocados específicamente en la determinación de la HH de la producción de cobre, resulta complicado comparar el impacto que generan estos procesos debido a que los estudios realizados hasta el momento no se encuentran delimitados de la misma manera.

En algunos casos de estudio no se incluye el uso indirecto del agua, no se toman en cuenta los efectos del clima o simplemente el producto final al cual se está haciendo la evaluación de la HH no es comparable. Por lo que existe la necesidad de desarrollar la HH más allá de la cuantificación del inventario de agua en este tipo de procesos, en los cuales se emplean únicamente los datos operativos o relevantes en cuestión del agua para comúnmente generar un balance hídrico.



Por tal motivo, el presente trabajo se enfoca en los procesos de beneficio de cobre ya que el 80% de la producción mundial implica la aplicación de procesos de flotación (Singh, 2010). Por lo que es previsible que el desarrollo de este indicador tendría un impacto significativo al profundizar en su desarrollo e incluir variables que tienen un efecto dinámico en el consumo del agua, lo cual permitirá identificar puntos críticos en el proceso y su asociación con cada uno de los componentes de la HH.

De esta forma, la metodología propuesta contempla aspectos específicos del proceso, la variabilidad operativa de cada distinto sitio, el cambio de uso de suelo, el efecto de los factores climáticos y la importancia del manejo de los recursos hídricos en el proceso.



II. Antecedentes sobre la Huella Hídrica y su aplicación en el sector minero metalúrgico.

II.1 La Huella Hídrica como indicador ambiental

La Huella Hídrica (HH) es un indicador ambiental que permite conocer el uso directo e indirecto del agua, de algún producto, proceso o institución. Es también un indicador multidimensional tanto geográfica como temporalmente (Hoekstra et al., 2011). El término de HH fue acuñado por Hoekstra y Hung (2002) como una propuesta para medir la “apropiación” de agua de un país respecto a los recursos hídricos globales; es decir, qué volumen de agua usaba cada nación considerando los recursos propios y la dependencia hacia otras naciones.

La HH pertenece a un serie de indicadores denominados “indicadores de huella”, los cuales son herramientas que dan como resultado información de utilidad del objetivo a evaluar, determinando la situación y los puntos críticos del mismo, para facilitar la toma de decisiones y acciones que promuevan la búsqueda de la sustentabilidad (Fang et al., 2014).

El impacto que han tenido los indicadores de Huella en las últimas dos décadas ha aumentado año con año. Esto se puede ver reflejado al momento de analizar el número de publicaciones que incluyen dentro del título el nombre del indicador, como se muestra en la Figura 1, o el número de publicaciones que incluyen el nombre de indicador dentro del tema de la investigación, Figura 2. Es posible observar cómo año tras año el número de publicaciones enfocadas a los indicadores de huella ha ido aumentando, siendo la huella de carbono (“*carbon footprint*”, en idioma inglés) la de mayor número, probablemente por la importancia que tiene este indicador en los efectos del cambio climático.

Por su parte, la HH ha tenido un desarrollo importante principalmente en dos temas: en manejo de recursos hídricos y en materia de ciencias ambientales. En la Figura 1, se observa el impacto y desarrollo que ha tenido este indicador reflejado en el número de publicaciones que incluyen dentro del título las palabras “*water footprint*” (término en idioma inglés para HH). Una gran parte de estas publicaciones se encuentran enfocadas a la cuantificación del volumen y el impacto de los productos agrícolas o bienes del sector productivo debido a que la agricultura es el sector de mayor demanda hídrica mundial (Mekonnen, 2020). En algunas de estas



investigaciones se ha llegado hasta determinar la HH de la dieta alimenticia de todos los países (Harris et al., 2019).

Actualmente la HH ha sido aplicada en muchos procesos y productos, extendiéndose a más sectores interesados en conocer el estado del manejo de los recursos hídricos, ya que permite evaluar el uso y el impacto de estos dentro de algún proceso, organización o alguna delimitación geográfica en específico.

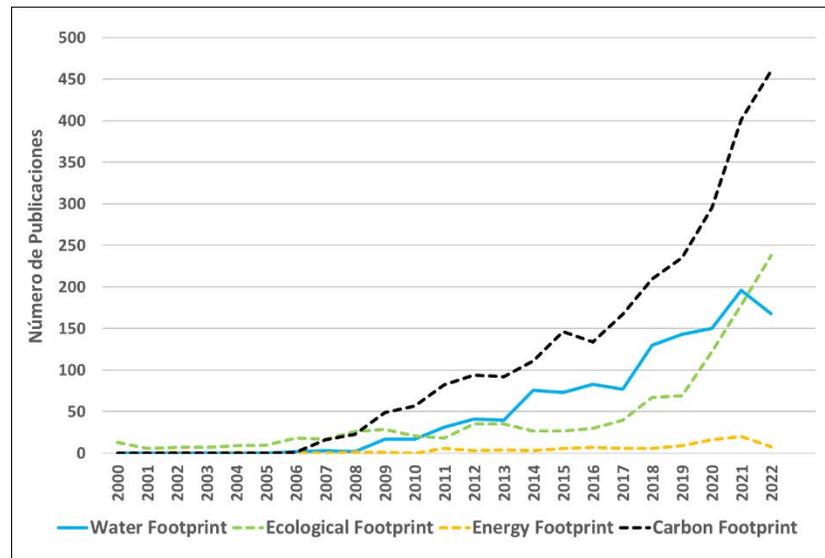
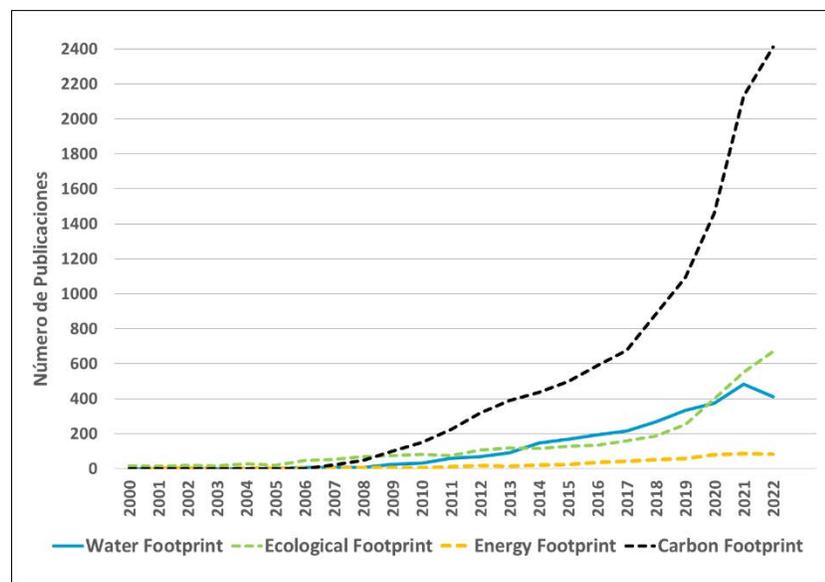


Figura 1. Número de publicaciones que incluyen el nombre del indicador de huella en el título de la publicación, en idioma inglés. ¹



¹ Fuente de los datos de Web of science, 2023



Figura 2. Número de publicaciones que incluyen el nombre del indicador de huella en el tema de la publicación, en idioma inglés ¹

Por otra parte, la aplicación de este indicador no ha sido únicamente en el tema alimenticio. La Figura 2 muestra el número de publicaciones que tienen relación con los nombres en idioma inglés de los indicadores, en donde se puede observar como la HH ha ido aumentando. La Figura 3, muestra que los temas de interés relacionado a la HH son diversos, ya que también las investigaciones se han enfocado en otros temas de interés como el manejo de los recursos hídricos de distintos procesos, la HH de cuencas, de productos, de regiones productivas en diversos países, etc.

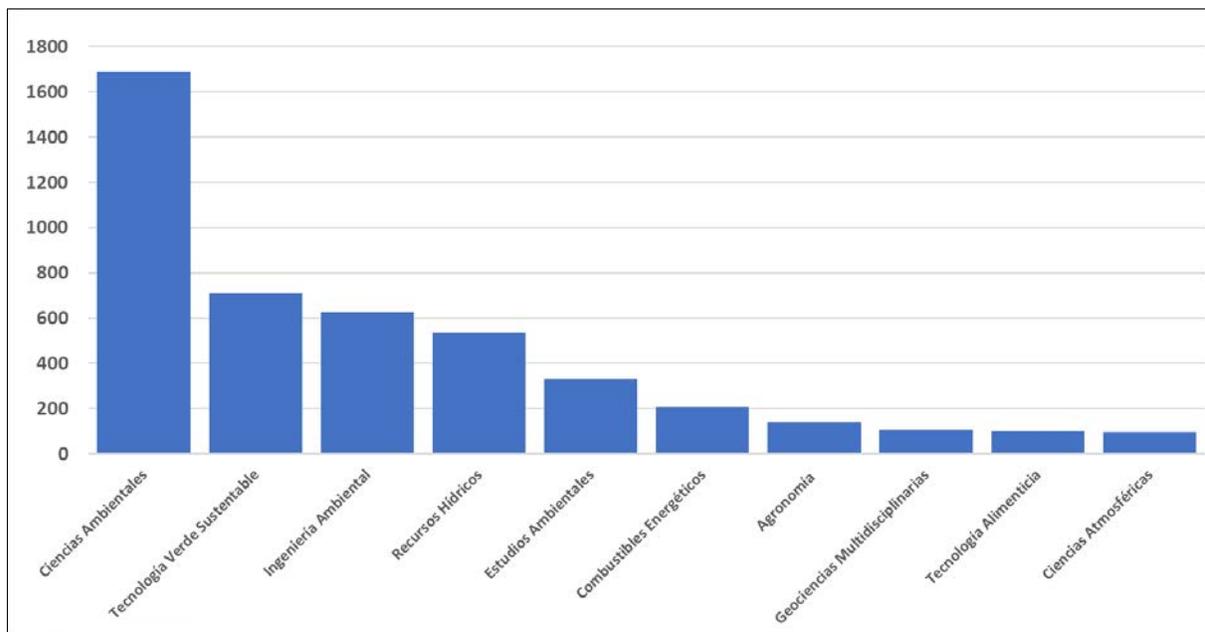


Figura 3. Número de publicaciones por categoría¹

Las metodologías más utilizadas para la evaluación de la HH son a través de un estándar internacional ISO 14046 (ISO, 2014) basado en el análisis de ciclo de vida (ACV) y de la presentada en el Manual de Evaluación de la Huella Hídrica (MEHH) (Hoekstra et al., 2011). Estos métodos están estructurados de manera similar y constan de cuatro etapas de evaluación. Estas etapas son:

- 1) Objetivos y alcances:

¹ Fuente de los datos de Web of Science 2023



En donde se plantea el objetivo de la evaluación de la HH y se establecen las consideraciones y criterios de la evaluación y se determinan los límites del sistema evaluado.

2) Cuantificación

En donde se establecen los volúmenes asociados al sistema evaluado y se hace la cuantificación de las entradas y salidas del sistema.

3) Evaluación del impacto

En donde se considera el impacto que tiene el proceso respecto a sus alrededores o respecto a algún aspecto en específico.

4) Interpretación de los resultados y soluciones.

Una vez realizado el análisis se plantea proponer una respuesta que sistemáticamente proporcione una solución al impacto generado por el manejo de los recursos hídricos del sistema evaluado.

Ambas metodologías son herramientas útiles en la cuantificación de la HH y son muy similares en cuanto a su estructura; sin embargo, existen tres principales diferencias conceptuales en sus alcances.

La primera se encuentra en la etapa **cuantificación**, en donde, una característica que tiene el MEHH y no el ACV, es la clasificación de la HH en tres componentes para identificar la procedencia del agua, uso e interacciones con el ambiente. Esta clasificación se enfoca principalmente en conocer los volúmenes de agua relacionados a los factores climáticos, al uso consuntivo, y a la calidad con la que es devuelta el agua al medio ambiente. Estos componentes son la Huella Hídrica Verde (HHV), la Huella Hídrica Azul (HHA) y la Huella Hídrica Gris (HHG).

La segunda diferencia recae en forma de delimitar la cuantificación, en el ACV se deben considerar todos los componentes del sistema evaluado para posteriormente relacionarlos a los impactos identificados, en donde se deben de describir todas las entradas y salidas en una descripción general de todo el sistema evaluado, mientras que con el MEHH se pueden evaluar



etapas del proceso por separado sin afectar de manera general el inventario, es decir, se podrían cuantificar independientemente sólo entradas o sólo salidas.

La tercera involucra las unidades de medida o de cuantificación de las metodologías, ya que en el ACV es necesario definir una unidad de cuantificación para todo el sistema descrito que sea útil para expresar el alcance establecido en la evaluación según los posibles impactos identificados, por ejemplo, metros cúbicos de agua por millón de toneladas procesadas. De forma similar, en el MEHH las unidades de cuantificación son definidas por el evaluador para la HHA y la HHV, sin embargo, la HHG permite estimar el volumen de agua necesario para evitar el impacto ambiental en la calidad del agua, tomando como referencia los límites máximos establecidos por la normatividad aplicable para las descargas o la calidad original del cuerpo receptor.

En términos generales, el ACV ha sido la metodología que ha sido mayormente aplicada en los diferentes sectores evaluados por la HH debido principalmente a estándares o marcos de referencia internacional como la Iniciativa de reporte global (GRI, por sus siglas en idioma inglés para Global Reporting Initiative) que a través de sus estándares establecidos para agua, los cuales son reportes públicos de las empresas, es posible conocer el volumen de agua extraída del subsuelo (GRI 303-2), el agua de reúso o reciclada que se emplea (GRI 303-3), así como las descargas en los procesos (GRI 306-1). Sin embargo, estos estándares generales de las empresas pueden proporcionar información incompleta de las condiciones reales o información en la que puede malinterpretarse el uso, el destino del agua, esquemas de consumo particulares o donde ocurren fenómenos relacionados con el clima como la ganancia de agua por precipitación o pérdida por evaporación.

Por lo anterior, este trabajo se encuentra alineado a los principios metodológicos y conceptos generales que establece el MEHH, en los cuales como se mencionó anteriormente la procedencia del agua es importante y se encuentra relacionada con cada uno de los componentes de la HH.

Como lo marca el MEHH, cada uno de los componentes de la HH (HHV, HHA y HHG) se define de esa forma ya que semántica y conceptualmente depende del tipo de agua asociado (agua verde, agua azul y agua gris). Las características de cada uno de los tipos de agua según el MEHH se describen a continuación:



- i) Agua Verde: Corresponde al volumen de agua proveniente de la precipitación que no produce escurrimiento, que no se infiltra, no se incorpora al sistema o se queda temporalmente en la superficie del área u objeto evaluado. Se considera como agua verde a todo aquel volumen de agua proveniente de la precipitación que se consume durante un proceso productivo.
- ii) Agua Azul: Es el agua de uso consuntivo, proveniente de cuerpos de agua superficiales o subterráneos, en donde, el “consumo de agua” es considerado cuando el agua se pierde por evaporación, es trasladado de una cuenca a otra o se incorpora en el producto o proceso.
- iii) Agua Gris: Corresponde al volumen de agua necesario para diluir algún contaminante hasta que la concentración de este se encuentre dentro de los estándares de calidad o se alcance la calidad original del cuerpo receptor.

La clasificación de los recursos hídricos en estos tres tipos de agua facilita la identificación de la procedencia de los flujos, el uso y las interacciones que tiene el proceso con el medio ambiente. Estos tipos de agua a su vez se encuentran correlacionados con los tres componentes de la HH, cada componente con un tipo de agua, los cuales son: la Huella Hídrica Verde (HHV), la Huella Hídrica Azul (HHA) y la Huella Hídrica Gris (HHG).

Las ecuaciones generales del MEHH (Hoekstra et al., 2011) que describen los tres componentes de la HH se muestran a continuación, expresadas en unidades de metros cúbicos por año ($m^3/año$).

Para la HHV, se presenta la Ecuación 1 :

$$HH_{Verde} = E_{Verde} + In_{Verde}$$

Ecuación 1

En donde:

E_{Verde} : Volumen de Agua Verde perdido por evaporación

In_{Verde} : Incorporación de Agua Verde al producto o al proceso

HH_{Verde} : Huella Hídrica Verde



Para la HHA, se presenta la Ecuación 2:

$$HH_{Azul} = E_{Azul} + In_{Azul} + Pe_{Azul}$$

Ecuación 2

En donde:

E_{Azul} : Volumen de Agua Azul perdido por evaporación

In_{Azul} : Incorporación del Agua Azul al producto o al proceso

Pe_{Azul} : Pérdidas de Agua Azul del volumen que es extraído, no regresa al cuerpo de origen, ni tampoco se incorpora al producto o proceso.

HH_{Azul} : Huella Hídrica azul

Para la HHG, se presenta la Ecuación 3:

$$HH_{Gris} = \frac{c_{Eflue} - c_{act}}{c_{max} - c_{nat}} \times Eflue$$

Ecuación 3

En donde:

c_{Eflue} : Concentración del parámetro en efluente

c_{act} : Concentración del parámetro en el cuerpo de agua superficial

c_{max} : Concentración estándar buscada del parámetro

c_{nat} : Concentración natural del parámetro en el cuerpo de agua

$Eflue$: Gasto de efluente (volumen/tiempo)

HH_{Gris} : Huella Hídrica Gris

Los tres componentes de la HH se encuentran diseñados para cuantificar geográfica y temporalmente el volumen asociado a cada tipo de agua. Así la HHV obtiene la cantidad de agua que es aprovechada de la lluvia, cuánta es perdida por evaporación y cuánta se incorpora en el producto, proceso o sistema evaluado.

La HHA es el volumen de agua aprovechado y extraído de cuerpos de agua, y cuánto de este volumen extraído se incorpora al producto, se pierde por evaporación o se descarga.

Por último la HHG asocia qué tanto impacto causa el volumen de agua gris con relación al volumen de agua azul, es decir, que tanto afecta la calidad del agua el objetivo evaluado (proceso, producto, región, etc.) (Hoekstra et al., 2011)



Es importante recalcar la importancia de diferenciar entre el agua azul y verde, ya que hidrológica, ambiental, económica y socialmente puede llegar a repercutir en los lugares en donde es evaluada. Por ello se necesita la correcta identificación del origen de cada uno de estos dos distintos volúmenes.

II.2 La Huella Hídrica en el aprovechamiento de los recursos minerales

En el caso del aprovechamiento de los recursos minerales, la importancia del agua viene dada en que este recurso se emplea para la obtención de una gran diversidad de materiales como piedras preciosas, minerales industriales, elementos metálicos y no metálicos; los cuales a su vez, son empleados en una gran gama de procesos alimenticios, farmacéuticos e industriales para generar muchos de los productos de uso cotidiano (Crowson, 2011).

Por la naturaleza de estos procesos, el agua resulta ser fundamental y prioritaria por cuestiones operativas ya que estratégicamente este recurso es empleado en la producción minera, como sistema de control en la supresión de fuego y polvos y por ser un potencial riesgo ambiental una vez que entra en contacto con las sustancias químicas empleadas en el proceso y por los desafíos a la sostenibilidad en los lugares específicos donde se realiza la extracción de este recurso (Bebbington y Bury, 2010). El interés en la recuperación de este recurso está orientado principalmente a lograr una recirculación hacia el proceso y es de especial relevancia en zonas áridas y semiáridas en donde las tasas de evaporación son altas (Bleiwas, 2012b).

Se considera que la HH tiene un gran potencial de aplicación en la industria minera, ya que es necesario la aplicación de indicadores particularmente en operaciones en las que la relación con los recursos hídricos represente un tema sensible desde el punto de vista social, ambiental y económico. (Northey et al., 2016)

Comúnmente, las plantas minero-metalúrgicas calculan balances hídricos de sus sistemas para implementar control sobre el agua en el proceso, sin embargo, estas empresas únicamente consideran las variables operativas importantes para el proceso en las cuales implementan controles y acciones para buscar un buen manejo de los recursos. Sin embargo, existe la necesidad de contar con indicadores que comparen la eficiencia operativa en las unidades mineras de manera equitativa (Northey et al., 2016) y que permitan



expresar el desempeño, considerando la relación con el ambiente y así satisfacer las exigencias en términos de las autoridades y de la sociedad, ya el agua es uno de los temas que más preocupa en general a la comunidad (IFC, 2014).

Lo anterior ha conducido a la búsqueda de metodologías que permitan mostrar como la minería, los minerales y los metales pueden contribuir al desarrollo sustentable (ICMM, 2012), teniendo como principal reto el lograr un desarrollo optimizado de la actividad, con un enfoque integrado entre las mismas empresas mineras para lograr la disminución del impacto ambiental causado (IIED, 2002). En este sentido, en la actualidad se emplean algunas metodologías como el análisis de ciclo de vida (ACV) para realizar análisis y evaluaciones de los recursos hídricos en las empresas mineras debido principalmente a la escasa disponibilidad pública de información en temas hídricos que usualmente se llega a encontrar solo en los reportes de sustentabilidad de las empresas.

El ACV es la metodología que ha sido empleada con mayor frecuencia en los primeros estudios y evaluaciones de la HH, esto con el fin de que el sector minero metalúrgico pudiera conocer los volúmenes asociados a la producción de algunos metales (Norgate y Lovel, 2004; Northey y Haque, 2013; Northey et al., 2014), en donde se han establecido los consumos generales del recurso hídrico para algunos metales y en algunos casos por tipo de proceso o ley del mineral.

De igual forma, han surgido algunos estudios en donde se ha empleado el Manual para la Evaluación de la Huella Hídrica (MEHH), con la diferencia de que estos han sido específicos de ciertos metales, como por ejemplo el estudio enfocado en el platino (Ranchod et al., 2015) en donde se estimó la HHA del proceso de obtención de este metal. Este estudio involucró el minado, la concentración, la molienda, la separación magnética y los procesos de purificación y refinación en donde se calculó la HHA. Asimismo, se consideraron las pérdidas por evaporación y la incorporación de agua en las distintas etapas del proceso.

Otro ejemplo es el trabajo realizado por Peña y Huijbregts (2014) enfocado al cobre, en donde se determinó la HHA del proceso de beneficio de sulfuros y de óxidos para la obtención de cátodos de cobre. En este estudio, de igual forma separaron las principales actividades y determinaron el volumen del componente asociado a cada etapa dando como resultado que las etapas relacionadas a los procesos de beneficio (concentración o lixiviación) resultan ser los de mayor consumo de agua azul, siendo la



evaporación el principal mecanismo de pérdida. Del mismo modo, Chan y colaboradores (2014), reportan que dentro del proceso productivo de cátodos de cobre, la HHA se encuentra directamente relacionada a las pérdidas por evaporación ya que no hay incorporación de agua al producto o agua de uso consuntivo en el proceso.

También se han hecho evaluaciones únicamente enfocados en la cuantificación de la HHG, en donde Corredor y colaboradores (2021) determinaron el impacto ambiental en la zona de Suarez Cauca, Colombia; al calcular el volumen de agua necesario para diluir los contaminantes procedentes del proceso artesanal de amalgamación de oro. También existe otro estudio en esa misma zona, en donde Álvarez-Pugliese y colaboradores (2021) determinaron la HHA y la HHG de empresas mineras de oro que emplean el agua de los ríos para los procesos y devuelven los efluentes del proceso al mismo río. Dentro de estos trabajos se incluyeron los procesos de amalgamación, cianuración, diferentes métodos extractivos y el aprovechamiento de depósitos aluviales.

En una investigación previa al presente trabajo de investigación, se determinó la HH del proceso de lixiviación en montones para la extracción de oro y plata (Rodríguez, 2016). La evaluación de este proceso se abordó partiendo de la generación de un modelo conceptual que fuese representativo para cualquier caso, adaptando los conceptos del MEHH al proceso y considerando algunos aspectos dinámicos asociados como los aspectos operativos, los factores climáticos y el cambio de uso de suelo. En este sentido, el presente trabajo amplía la adaptación de los conceptos del MEHH en los procesos minero-metalúrgicos, al enfocarse en el beneficio de concentrados de sulfuros de cobre, el cual considera elementos e infraestructura que interactúan de forma particular con el entorno.

A pesar de que se han realizado algunas investigaciones acerca de la HH en el sector minero, la aplicación de este indicador ha sido limitada hasta la fecha y ningún estudio contempla la importancia de la interacción entre los sistemas dinámicos de la minería y el entorno desde el punto de vista ambiental, como el climatológico, debido principalmente a la carencia de metodologías y sistemas adaptados a las características particulares de los procesos minero-metalúrgicos y particularmente en el beneficio de sulfuros de cobre.

Asimismo, otros factores que anteriormente no han sido considerados en las evaluaciones son el cambio en el uso del suelo y su relevancia para escenarios de cambio climático, del cual existe evidencia que están



fuertemente relacionados en la disminución de la precipitación, el aumento de la evapotranspiración potencial y el aumento de la temperatura (Zhu et al., 2023). Esto se convierte en un punto importante sobre todo para las operaciones mineras que se encuentran en zonas áridas en donde por lo regular la disponibilidad de los recursos hídricos disminuye.

II.3 El agua y su relación en el proceso del beneficio de concentrados de sulfuros de cobre.

El cobre ha sido un metal que ha acompañado a la humanidad en su evolución tecnológica desde los tiempos antiguos (2500 a.C.) en donde se usaba para producir bronce y elaborar herramientas, armas y una gran diversidad de objetos de todo tipo (Liebbrandt, 2001). El consumo de este metal ha venido aumentado de manera significativa e históricamente se reconocen dos periodos importantes en su producción antes de la revolución industrial, como se muestra en la Figura 4. El primero se encuentra dentro la edad del bronce representando el auge del imperio romano y el segundo el auge de la dinastía *Sung* en china, en donde ya se aprovechaban los sulfuros de cobre mediante su fundición para la obtención del metal (Hong et al., 1996). El periodo en China resulta importante para la historia ya que durante esta dinastía se tuvieron grandes avances como el primer uso de la pólvora y el uso del papel moneda.

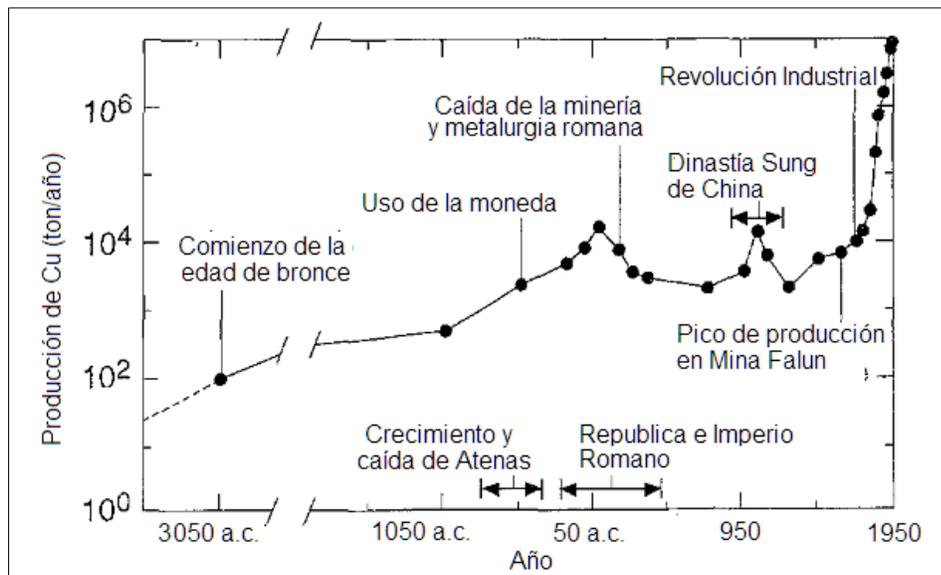


Figura 4. Producción histórica de cobre (modificado al español de Hong et al., 1996)



Posteriormente, la revolución industrial marcó una nueva era en donde el crecimiento en la extracción de minerales y de metales creció exponencialmente debido al gran avance tecnológico de la época. Hoy en día el cobre se usa en una innumerable cantidad de aplicaciones y productos. Esto se puede ver reflejado en cómo la producción mundial paso de 1×10^4 t en el año de 1750, a 1.55×10^7 t en 2007 (Radetzki, 2009).

Resulta importante enfocarse a la extracción de sulfuros de cobre y su procesamiento, debido a la relevancia que representa este tipo de minerales como fuente de cobre. La producción mundial de cobre reportada para en 1998 fue de 1.22×10^7 t, de las cuales aproximadamente el 85% del mineral procesado provino de sulfuros de cobre y 15% de óxidos de cobre (Davenport, 2001).

De forma general, los minerales que tienen óxidos de cobre usualmente son beneficiados a través de lixiviación, extracción por solventes y electrodeposición (Schlesinger et al., 2021), mientras que en los minerales con sulfuros de cobre se aprovechan su naturaleza hidrofóbica y capacidad de ser acondicionado superficialmente por agentes químicos para recuperar los minerales de cobre por medio del proceso de flotación (Davenport et al., 2002)

Debido a las características operacionales relacionadas al proceso de flotación, el agua juega un papel fundamental en varias de las etapas, por lo que es de suma importancia conocer la dinámica de este recurso en cada una de ellas.

Anteriormente se ha reportado que este proceso requiere de 1.5 a 3.5 m^3 de agua por cada tonelada de mineral procesado, pudiéndose traducir en un consumo mundial de 4.4×10^7 t/año de agua, basándose en un mineral de 0.5% de contenido y obteniendo un concentrado con 27% de Cu. (Bleiwas, 2012a).

En este sentido, es importante describir el proceso del beneficio de sulfuros de cobre y la relación que guarda con el agua, ya que comprende una serie de etapas que abarcan desde el minado, hasta la obtención de un concentrado del mineral de interés.

a) Minado

En esta etapa se realiza la extracción del mineral, la cual puede ser de manera superficial (Tajo Abierto) o de manera subterránea. Esto se logra mediante una exploración previa en donde se determina la localización de



los yacimientos de interés, se realiza la planeación y forma de la mina, dependiendo del tipo de material, la profundidad, la ley del mineral y la cantidad de material del yacimiento (Lottermoser, 2010)

En las unidades mineras se busca la manera óptima para llegar a los minerales de interés, sin embargo, es inherente la producción de residuos mineros durante esta etapa, ya que no todo el material dentro de la mina contiene la ley buscada y resulta necesario mover gran parte de material estéril para poder acceder a los minerales buscados que contienen valores

Asimismo, y con un enfoque hídrico, el manejo del agua durante esta etapa juega un rol sumamente importante ya que por una parte es necesaria para las actividades de exploración y perforación, y por otra parte puede presentarse el caso en el cual el nivel de minado alcance el nivel freático y por lo general esto representa un problema para el proceso productivo, lo cual se resuelve extrayendo el agua de la mina. Dependiendo de la calidad y cantidad del agua, esta puede ser empleada en el proceso productivo o se puede realizar una descarga (Gunson et al., 2012a)

Otro punto importante para remarcar es el porcentaje de humedad que se encuentra contenida en el mineral el cual generalmente es bajo, pudiendo incorporarse al proceso durante la extracción.

Una vez que el material es extraído de la mina es necesario transportarlo. Dependiendo de la distancia puede ser transportado en camiones, bandas transportadoras o una combinación de ambas. En el caso del mineral como ya se mencionó comúnmente es transportado para su reducción de tamaño dentro de la mina y posteriormente hasta la planta de beneficio.

b) Trituración y molienda

En esta etapa se reduce el tamaño del mineral mediante el uso de quebradoras y molinos para su posterior procesamiento. El tamaño requerido para el proceso depende de diversos factores, como las características de los equipos empleados, las características mecánicas del mineral y la forma en la que se encuentren los minerales contenidos en la roca o matriz, ya que esto dará la pauta para determinar el tamaño en el cual los minerales de interés puedan ser recuperados. Para lograr la molienda del mineral, comúnmente se emplean molinos de tipo semiautógeno (SAG, término para *semiautógeno* en inglés) o mediante el uso de molinos de bolas, para generar una pulpa con un contenido de sólidos del 20-55% (Bleiwass, 2012a; Singh, 2010).



En la trituración generalmente se emplea el agua únicamente como un método de control de polvos, mientras que en la etapa de molienda comúnmente se emplean grandes cantidades de agua, la cual se adiciona para generar un medio en donde la molienda se lleva a cabo, se genera una pulpa y esta es clasificada antes de que sea enviada a la etapa de flotación.

La cuantificación del volumen de agua empleado en esta etapa es de suma importancia ya que de esta dependen parámetros operacionales como el porcentaje de sólidos de la pulpa y la carga circulante del proceso.

c) Flotación

En esta etapa se lleva a cabo la separación de los minerales de interés y los que no tienen valor económico, conocido como *ganga*. En esta etapa el uso del agua es indispensable ya que al combinarse con el mineral se forma una pulpa y mediante la inyección de aire se genera espuma mineralizada con el objetivo de separar y concentrar al mineral de interés. En esta etapa algunos parámetros operativos son modificados continuamente dependiendo de las características mineralógicas para que pueda llevarse a cabo. La anterior se describe con mayor detalle más adelante en este mismo capítulo por la relevancia que tienen esta etapa para el proceso.

d) Secado y filtrado

En esta etapa, el concentrado del mineral es dirigido a tanques espesadores y filtros (prensa, disco o tambor), que disminuyen el contenido de agua en la pulpa. En esta etapa se logra recuperar parte del agua empleada en las etapas de molienda y flotación, llegando hasta un rango entre el 2%-8% de humedad (Gunson et al., 2012a; Singh et al., 2010). La reducción del contenido de agua en el concentrado es principalmente para su comercialización y transporte.

e) Disposición de residuos mineros

Una vez que se obtiene la espuma mineralizada de la flotación, el material restante son los residuos de esta etapa, a los cuales se les denomina **jales**. Estos residuos consisten en una pulpa de material sin valor económico o de material de *ganga* la cual contiene entre 40 y 60 % de sólidos (Bleiwas, 2012a; Mular et al., 2002; Wels y Robertson, 2003). Esta pulpa es transportada generalmente por ductos para ser depositada en grandes estructuras llamadas **presas de jales**. En estas estructuras se recupera la mayor cantidad de agua dejando asentar los sólidos y posteriormente bombeándola de nuevo hacia el proceso.



Estas presas son estructuras que se encuentran construidas con el mismo material que al momento de asentarse y perder agua hacen el papel de dique o bordo para contener más material en su interior. Se encuentran siempre expuestas a las condiciones climáticas, ya que por sus dimensiones suelen ser de gran tamaño y estar a la intemperie, por lo que se encuentran sujetas a la ganancia de agua por la precipitación, pero también a las pérdidas por evaporación, infiltración y por la retención intersticial de los jales (Barrera et al., 2015).

En este sentido, la disposición de los jales resulta de suma relevancia para el proceso ya que es aquí donde comúnmente se presenta la mayor pérdida y también se recupera la mayor cantidad de agua del circuito. Existen lugares en donde se llega a perder hasta el 30% del volumen de agua que necesita el proceso (Wels y Robertson, 2003). La recirculación en este proceso es importante ya que de esta manera el consumo de agua disminuye notablemente.

En el beneficio de sulfuros de cobre, también existe otro tipo de residuos mineros provenientes del material estéril. Estos pueden ser depositado en montones fuera de la mina en *tepetateros*, aunque también existe la posibilidad que en el caso de minería subterránea este material sea empleado para el rellenado de áreas en donde se ha extraído mineral anteriormente (Rankine et al., 2007)

Al conocer las etapas del PCSC es posible identificar que existe una estrecha relación entre los recursos hídricos y el proceso, la cual no es exclusiva del diseño operativo, sino también entre el medio ambiente y la infraestructura relacionada a la operación. Esta interacción entre el ciclo hidrológico y el PCSC se da cuando los procesos hidrológicos afectan el volumen de agua mediante una ganancia, como es el caso de la precipitación, o mediante pérdidas a través de la evaporación, infiltración, escorrentías o almacenamiento.

Es importante conocer y determinar los mecanismos de dicha relación para determinar los volúmenes asociados a cada etapa del proceso.

II.4 Flotación de sulfuros de cobre

Consiste en un proceso de separación fisicoquímica que utiliza la diferencia de las propiedades superficiales entre los minerales valiosos y los minerales de ganga (Wills y Napier-Munn, 2006).



Este proceso involucra tres fases (sólido, líquido y gas) las cuales se mezclan de manera heterogénea y de esta manera forman interfases (sólido-líquido, sólido-gas, líquido-gas) en donde la fase gaseosa representada por el aire, la fase sólida representa el mineral y comúnmente el agua en la fase líquida.

El proceso consiste en hacer pasar un flujo de gas (comúnmente aire) en forma de burbujas a través de la mezcla sólido-líquido (pulpa). Ya que algunos minerales son naturalmente hidrofóbicos debido a la gran cantidad de energía libre en su superficie no polar (Wills y Napier-Munn, 2006), la flotación emplea la interacción interfacial y la diferencia de tensión superficial de las tres fases para separar el sólido por medio de espuma (Leja, 1982).

En este proceso se emplean distintos tipos de reactivos que ayudan a modificar las condiciones de las tres fases involucradas para controlar el proceso. Estos reactivos pueden ser colectores, depresores, activadores superficiales, reguladores de pH, floculantes y coagulantes (Rao, 2004).

La Figura 5 muestra el funcionamiento del proceso flotación, la cual comúnmente se lleva a cabo en celdas en las cuales se mantiene en agitación la pulpa y el aire es inyectado desde el fondo. El aire mientras asciende acarrea las partículas del mineral por interacción interfacial y el mineral concentrado es recuperado en la espuma generada por la aeración por la parte superior de celda.

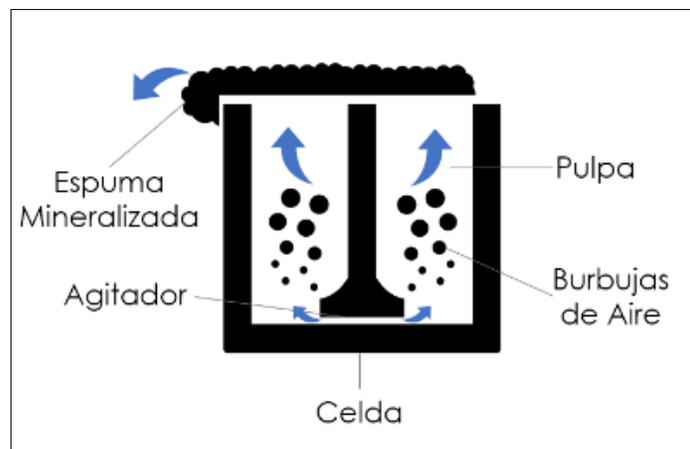


Figura 5. Diagrama que muestra el funcionamiento de una celda de flotación.

El concentrado contiene por lo general >20% de cobre. Posteriormente, el concentrado es llevado a espesadores y filtros (de tambor o prensa por lo general) en donde el contenido de humedad es reducido hasta un 10%-12%



(Haldar, 2018). Los residuos mineros que fueron separados en la etapa de flotación son mandados y depositados en presas de jales (PJ).

Este proceso es la parte de medular del beneficio de sulfuros de cobre, ya que gracias a esta etapa se logra la separación y concentración de los minerales de interés. Este proceso se puede llevar a cabo mediante flotaciones polimetálicas o "bulk" o mediante flotaciones selectivas las cuales se logran mediante el uso de colectores selectivos o modificadores de superficie. (Bhanbhro, 2014)

Cada proceso es único en cuanto a su configuración, instrumentación, tipo y composición del mineral, sin embargo, existe un extensa investigación acerca de este proceso y se ha identificado variables importantes para el proceso como las propiedades de la pulpa, parámetros electroquímicos, la cantidad de aire y de reactivos empleados, la composición mineralógica; la concentración en mineral de cabeza, concentrado y jales; el nivel de agua dentro de las celdas, entre otros (Shean y Cilliers, 2011)

II.5 Técnicas de percepción remota y su aplicación en el sector minero metalúrgico

Las técnicas de percepción remota están basadas en la ciencia y el arte de obtener información de un objeto, área, o algún fenómeno a través de un análisis de datos obtenido por un aparato que no se encuentra en contacto con el objeto, el área o el fenómeno en investigación (Lilles et al., 2016)

Estas técnicas tienen una amplia aplicación en todos los sectores, desde el agrícola, aplicaciones marinas, geológicas, ambientales, constructivas, astronómicas etc.

Parte de la información generada por estas técnicas tienen que ver con sensores remotos que de alguna u otra forma aprovechan el espectro electromagnético en alguna región en específico para obtener información.

Un ejemplo de esto son los satélites Landsat que desde 1972 en sus diferentes misiones ha proporcionado imágenes, en donde básicamente a través de sus múltiples sensores tienen la capacidad de detectar bandas del espectro electromagnético y convertirlas en imágenes que pueden ser procesadas y de las cuales se obtiene una gran cantidad de información



A manera de ejemplo la Figura 6 muestra el espectro electromagnético que capturan los sensores de todas las misiones landsat, obteniendo información de la superficie terrestre desde el espacio.

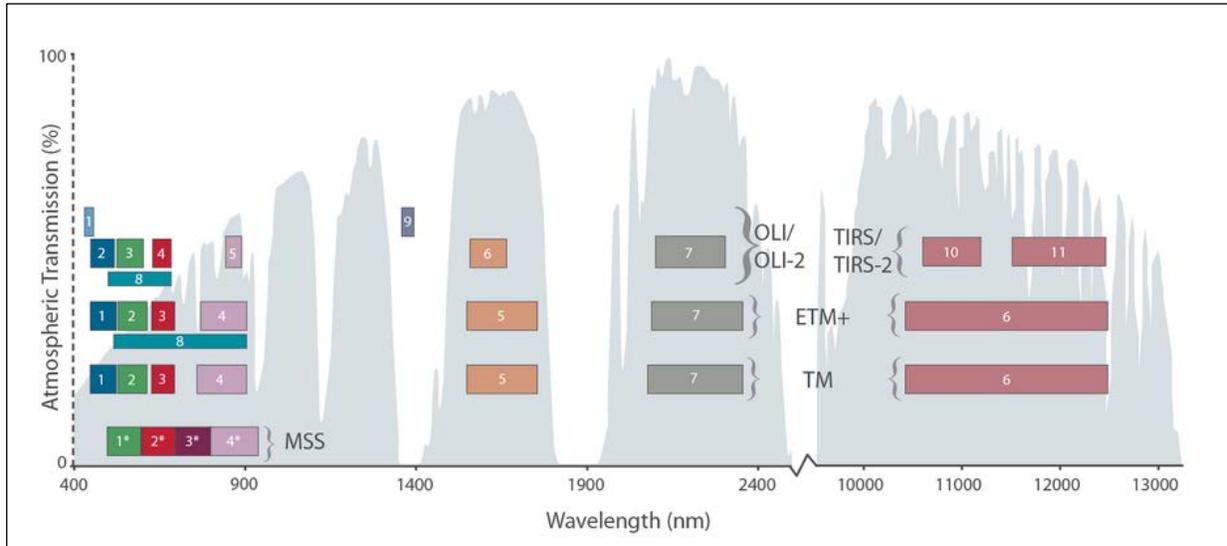


Figura 6. Bandas espectrales de las misiones Landsat (obtenido de www.landsat.gsfc.nasa.com)

Algunas de las aplicaciones ampliamente usadas desde la década pasada han sido en la agricultura de precisión, la cual combina las técnicas más avanzadas agroindustriales con el uso de drones para optimar el rendimiento de las plantas y donde se ha empleado para monitorear el riego a través de índices espectrales.

Este tipo de aplicaciones ha ido en aumento y particularmente en la minería ha aumentado su aplicación con el desarrollo no solo de mejores sensores, sino también por el desarrollo de drones (RPAS) que en los últimos años ha sido una industria de rápido crecimiento.

Algunos de los sensores que han sido habilitados para drones son las cámaras SEQUOIA Parrot, MICASense, Mapker, entre otros dando nuevas herramientas a la industria minera, que han permitido por ejemplo, tener aplicaciones para la detección de wolframio (Tejado-Ramos et al., 2021) o su uso en restauraciones ecológicas de sitios mineros (Morcillo et al., 2023) ya que la versatilidad de los sensores permite que se genere una gran cantidad de información.



Hipótesis

Los procesos hidrológicos que ocurren en una presa de jales son los factores más relevantes en la cuantificación de la Huella Hídrica involucrada en el proceso de concentración de sulfuros de cobre.

Objetivos

Objetivo General

Desarrollar una metodología para la evaluación de la Huella Hídrica de procesos de minado y beneficio de sulfuros de cobre e implementar su aplicación a nivel industrial.

Objetivos Específicos

1. Establecer un modelo conceptual flexible, aplicable y representativo de las características particulares de los procesos de minado y concentración de sulfuros de cobre.
2. Identificar y generar datos de las variables relevantes para la medición de la Huella Hídrica.
3. Establecer un modelo numérico a partir del modelo conceptual para cuantificar la Huella Hídrica del proceso.
4. Generar una herramienta de cuantificación que sea aplicable a nivel industrial para la evaluación de la Huella Hídrica de procesos de concentración de sulfuros de cobre.



III. Desarrollo metodológico para la evaluación de la Huella Hídrica de los procesos de concentración de sulfuros de cobre.

Para generar una metodología representativa para la evaluación de la HH de los procesos de concentración de sulfuros de cobre (PCSC), es necesario tomar en cuenta la variabilidad operativa existente en este tipo de operaciones minero-metalúrgicas y con ello las distintas configuraciones de ingeniería que se puedan presentar.

La variabilidad representa un factor importante a considerar, ya que ningún sitio minero-metalúrgico es igual a otro, la configuración de equipos empleados, sus dimensiones y configuraciones operativas varían dependiendo de los minerales de interés, el material estéril, la ley del mineral, etc., haciendo que la minería sea considerada como una de las industrias de mayor diversidad respecto a su naturaleza misma. Asimismo, dicha complejidad se encuentra en también en el manejo de los recursos hídricos en ella, derivado de 2 principales razones: el enfoque de la hidrología que el personal operativo dirige de manera preponderante al proceso y las características particulares del comportamiento hídrico en los sistemas minero-metalúrgicos (Younger et al., 2002).

Asimismo, esta industria también se encuentra sujeta a las condiciones ambientales y climáticas particulares en el lugar en que se desarrolla, lidiando con condiciones de abastecimiento de agua en zonas áridas o de demasías en zonas en donde el volumen de agua que llega a introducirse al proceso es mayor al requerido por el sistema, por lo que tiene que manejarse en forma de descargas.

Otro factor importante para considerar es el hecho de que el PCSC es un proceso cambiante en el tiempo respecto al uso de suelo y las dimensiones de las áreas involucradas. Un ejemplo de esto es el continuo crecimiento de las presas de jales, terreros o *tepetateros*, tajos y caminos. En donde, al pasar el tiempo algunos de ellos pueden cambiar y otros aumentan en superficie y volumen, lo que demanda que la evaluación de la HH y sus componentes no puedan realizarse de forma estacionaria ya que algunos de sus parámetros como la superficie o el volumen, cambian respecto al tiempo, es decir, son dinámicos.

En este sentido, el proceso metodológico de este trabajo se encuentra enfocado a considerar la variabilidad operativa del proceso de



concentración de sulfuros de cobre, el crecimiento dinámico en sus áreas operativas y la interacción que existe de las operaciones y los factores climáticos, evaluando de forma separada cada etapa del proceso, clasificando los flujos de entrada y de salida de cada etapa, analizando las variables involucradas en cada uno de los flujos y determinando la aportación de cada etapa al indicador de la HH.

Es por eso que para el desarrollo de la metodología se empleó a manera de guía el MEHH (Hoekstra et al., 2011), debido a que éste establece los criterios base para evaluar la HH y sus componentes en un proceso productivo. Sin embargo, debido a las características específicas del proceso evaluado fue necesario hacer una adaptación de los criterios y lineamientos del MEHH para tener una coherente y correcta cuantificación del indicador.

III.1 Adaptación metodológica de la HH a los PCSC

De acuerdo con el MEHH, determinar la HH de un proceso es el nivel más fundamental de evaluación y jerárquicamente le sigue la evaluación para un producto, sin embargo, al adaptar los criterios del MEHH a un proceso minero-metalúrgico se obtiene que las actividades en este sector son múltiples y por lo tanto estas dos evaluaciones deben de llevarse a cabo simultáneamente. Si se obtiene la HH de cada uno de los módulos (subprocesos) se obtiene la HH del proceso en general y por ende del producto (concentrado de cobre).

El indicador de la HH en su fase de cuantificación es expresado comúnmente como una relación entre el volumen de agua cuantificada y la cantidad del producto evaluado (Hoekstra, 2015; Northey et al., 2016; Peña y Huijbregts, 2014). Sin embargo, dadas las condiciones dinámicas de los procesos minero-metalúrgicos, es necesario conocer la HH de cada uno de los subprocesos involucrados.

Según el MEHH, de la cuantificación se obtiene como resultado un volumen de agua usado en una cierta cantidad de producto, servicio, o institución, sin embargo, en el contexto de las unidades mineras, esto no es un reflejo ni de las características, ni de las prácticas de gestión del agua en el sitio. Un ejemplo hipotético podrían ser dos minas que estuvieran expuestas a las mismas condiciones climáticas, tuvieran el mismo consumo de agua pero que la ley del mineral fuera distinta. Si se basa el resultado de la evaluación de la HH en el volumen de agua consumido por unidad de producción, la mina con la ley más baja tendrá una HH más alta ya que producirá menos usando la misma cantidad de agua. Sin embargo, al tener condiciones iguales del



lugar y del consumo se podría decir que sus prácticas de gestión hídrica son las mismas, y no necesariamente que uno de los dos procesos representa ser más o menos eficiente en términos del uso de los recursos hídricos.

El resultado de la HH debe ser representado por unidad de producción, y ya que en los procesos extractivos se toma en cuenta tanto el mineral de mena, como el material de ganga, se consideró que se emplearía el total del material extraído como el parámetro de referencia, expresando implícitamente el uso del agua y su relación con la cantidad de material procesado en función del uso de suelo.

La HH en el PCSC ha sido planteada como un indicador ambiental que ayuda a determinar el impacto a distintos niveles de la actividad humana y en el caso de los sitios minero-metalúrgicos esto no debería de representar solo la producción de un bien, si no las prácticas y el manejo que se tiene de los recursos hídricos y su impacto ambiental.

Dentro de este sector el impacto ambiental es algo que se encuentra relacionado a la propia actividad y a pesar de eso las buenas prácticas en la minería ayudan a reducir este impacto o a compensarlo con diversas acciones, como la disminución del uso de suelo o la restauración temprana de áreas ya no utilizadas en el proceso (Favas et al., 2018).

Las principales instalaciones que comprenden el uso de grandes extensiones de terreno en el caso de minería superficial son los tajos a cielo abierto, los caminos de servicio, los terreros, tepetateros y la presa de jales. Las plantas de beneficio suelen no ser significativamente grandes en relación con el tamaño de las otras obras descritas. Todas estas obras se encuentran relacionadas al cambio de uso de suelo y por lo tanto a la interacción con los factores climáticos que al estar a la intemperie tienen el potencial de ganar o perder agua para el proceso. (Northey et al., 2016)

Lo anterior es una consideración metodológica de interés durante la aplicación del indicador porque se habla de que las áreas con cambio de uso de suelo influyen directamente en el manejo y la cantidad de los recursos hídrico. Entre más grandes sean las instalaciones e infraestructura relacionadas al proceso, aumenta la interacción con los factores climáticos y con ello la potencial magnitud del indicador.



III.2 Etapas principales del proceso metodológico

El proceso metodológico se encuentra dividido en seis etapas principales como se muestra en la Figura 7, en cada una de ellas se consideran aspectos particulares del proceso para lograr el desarrollo de una metodología de evaluación de la HH específica, en este caso para el PCSC.

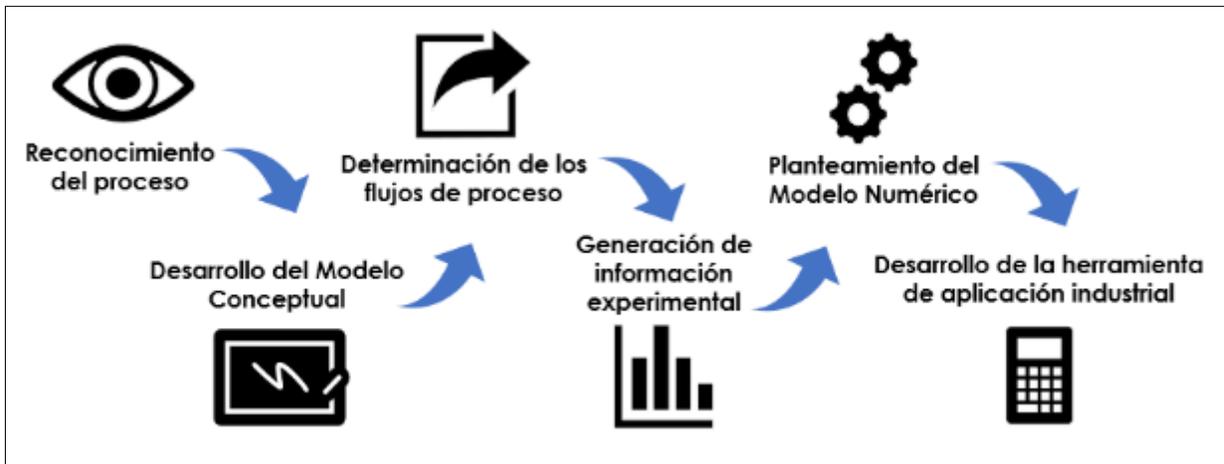


Figura 7. Etapas de la metodología propuesta.

Cada una de las etapas mostradas dentro de la Figura 7, es descrita a continuación:

III.3 Reconocimiento del proceso.

Es fundamental para el desarrollo de la metodología conocer detalladamente el PCSC, para poder identificar las áreas que deberán ser incluidas en la evaluación de la HH y considerar las particularidades del PCSC en cada una de sus etapas. Esto permite conocer las variables fundamentales del proceso, como son la producción de mineral, los parámetros de trituración y molienda, el uso del agua en la molienda y flotación, la recuperación de agua en la presa de jales, las dimensiones de las áreas operativas (caminos e instalaciones), el tipo de acarreo del mineral y el uso de agua como control de polvos.

La Figura 8 muestra de manera general el diagrama simplificado del PCSC, el cual comienza extrayendo el mineral de minas a cielo abierto o subterráneas en donde para llegar al mineral el material estéril debe de ser retirando y depositado como residuos mineros para liberar el mineral de interés



con contenido de cobre (sulfuros de cobre) y reducirlo de tamaño mediante quebradoras o trituradoras. Posteriormente el mineral es transferido a la planta de beneficio a un molino semiautógeno (SAG) o a molinos de bolas para reducir aún más su tamaño.

Este tipo de molinos demanda una gran cantidad de energía y utiliza agua para generar una pulpa con contenidos del mineral. La pulpa generada en estos molinos es clasificada y parte de ella se recircula para una remolienda. Posteriormente, la pulpa es transferida a circuitos de celdas de flotación en donde los sulfuros de cobre son acondicionados, concentrados y recuperados en forma de espuma, como se mostró anteriormente en la Figura 5. Esta espuma se recupera, se espesa y se filtra para su posterior venta. Todo el material restante son residuos mineros los cuales son depositados en presas de jales.

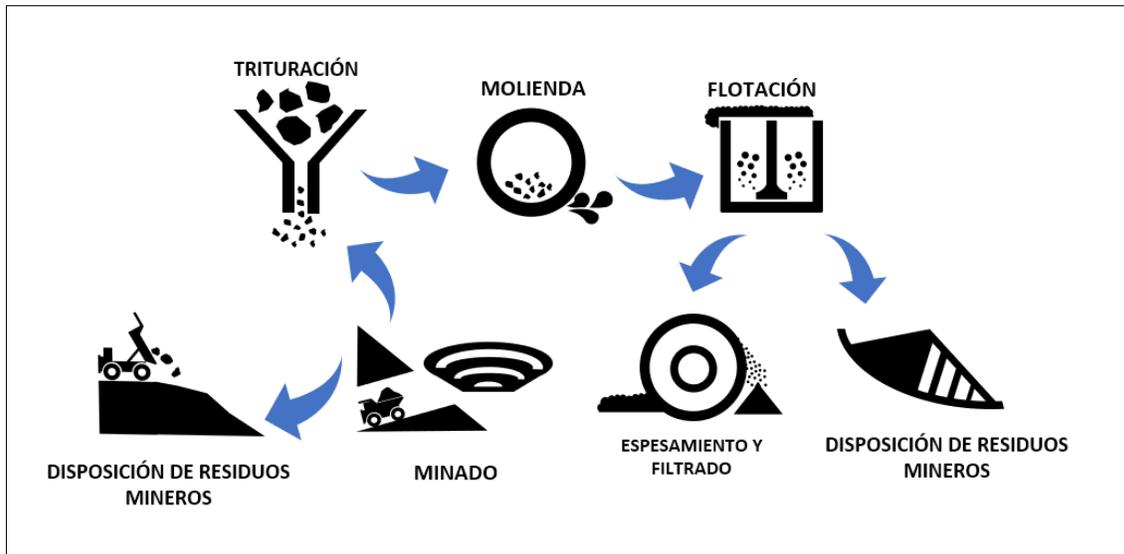


Figura 8. Diagrama simplificado del proceso general de concentración de sulfuros

Una vez identificadas las generalidades del proceso, se realizó un análisis más detallado para determinar aquellas actividades involucradas en el PCSC que se distinguieran por el tipo de infraestructura empleada, si las características de los procedimientos operativos tenían similitud o si se realizaban o compartían en un área en específico. Este análisis permitió identificar que el PCSC puede ser dividido en 11 actividades principales y puntualizar las características en cada una ellas, como son:



- **El minado subterráneo o a tajo abierto** - el minado es la etapa del PCSC en donde el mineral y el material estéril son extraídos del subsuelo. La etapa de exploración y perforación se encuentran incluidas en esta actividad.
- **La reducción de tamaño del mineral dentro de mina** – Esta etapa se enfoca en reducir el tamaño de partícula del mineral y optimizar el transporte hacia las etapas posteriores.
- **El acarreo de materiales (estéril o mineral de mena)** – Contempla el transporte de material estéril a terreros, tepetateros y rellenos de áreas, y el mineral hacia las etapas de trituración.
- **El uso y construcción de caminos de servicio** – la construcción de caminos dentro de una unidad minera es indispensable, su configuración y dimensiones dependen particularmente de cada sitio.
- **La disposición dentro y fuera de mina de residuos mineros de la etapa de minado** – tanto en la minería superficial, como subterránea se generan residuos mineros de materiales estériles que tiene que ser extraídos para llegar a los minerales de interés. Estos residuos son colocados en depósitos llamados tepetateros
- **La reducción de tamaño del mineral fuera de mina** – el mineral extraído y transportado a la planta de beneficio es reducido de tamaño con trituradoras y quebradoras para lograr un tamaño óptimo previo a la molienda.
- **La molienda del mineral** – en esta actividad se busca reducir el tamaño de partícula de mineral hasta lograr la liberación de los sulfuros de cobre, comúnmente se emplea agua en esta actividad y algunos equipos de clasificación como hidrociclones.
- **La flotación como método de concentración de los sulfuros de cobre** – esta es la etapa medular del proceso en donde se genera el concentrado de cobre mediante el uso de celdas de flotación.
- **Generación y depósito de los jales mineros**– la etapa de flotación genera residuos (jales) que se componen de la fracción sin valor de



la separación del mineral en la flotación, es decir, todo aquel material que no es recuperado en la separación de la espuma.

- **La recuperación de agua y/o descargas del proceso** – Esta actividad corresponde al manejo del agua dentro de la unidad minera, la cual depende totalmente de las condiciones climáticas y operacionales de cada sitio. Este manejo contempla el uso o descarga de agua proveniente de diversas fuentes como: i) la generación de escurrimientos y captación de agua a partir de cualquier tipo de infraestructura que este expuesta a la precipitación pluvial, y ii) agua, recuperada o descargada de las presas de jales, tajos o labores dentro de las minas.
- **La reducción de humedad en el concentrado** – consiste en reducir el contenido de agua del concentrado mediante espesadores y filtros hasta un porcentaje óptimo.

III.1.1 Desarrollo del modelo conceptual

En esta etapa se plantea el desarrollo de un modelo conceptual (MC) representativo del PCSC, diseñado de manera flexible que considere todos los posibles escenarios operacionales, así como la consideración de las especificaciones técnico-operativas descritas en fuentes bibliográficas. Para ello se realizó una búsqueda en la base de datos del SEMARNAT de 16 proyectos sometidos a evaluación de impacto ambiental que propusieran realizar este tipo de proceso, con el fin de considerar todos los arreglos posibles de las instalaciones, así como la revisión bibliográfica extensa en otras fuentes (Davenport et al., 2002; Gunson et al., 2012a; Haldar, 2018; Lottermoser, 2010; Northey et al., 2017; Peña y Huijbregts, 2014; Schlesinger et al., 2021; Hocking, 2005) que pueda proporcionar información acerca de los distintos arreglos operacionales que pudieran existir. De esta manera, al contemplar la variabilidad de la configuración operativa en el MC, se pretende que sea aplicable no solo al caso de estudio, sino a cualquier planta con este tipo de proceso.

La identificación de las principales actividades del PCSC permitió desarrollar un MC capaz de considerar la variabilidad operativa en un esquema en el que la cuantificación del indicador no dependa de la clase de infraestructura, tamaño de la operación o el número de equipos o áreas involucradas.



Como se mencionó anteriormente, uno de los retos de la aplicación de este indicador es la adaptación de los criterios propuestos en el MEHH (Hoekstra et al., 2011) ya que los lineamientos establecidos en el manual consideran las generalidades de un proceso productivo. Sin embargo, las características operativas y de infraestructura particulares de este sector demandan una adaptación especial en donde los criterios de identificación de cada uno de los tipos de agua (verde, azul y gris) sean coherentes con el comportamiento y el manejo de los flujos en el PCSC. De esta forma se considera la inclusión de variables climáticas y la dinámica de algunos parámetros que implican cambios temporales y espaciales. Por esa razón, se emplearon estaciones meteorológicas instaladas en las cercanías de la unidad minera para la obtención de los datos climatológicos, así como la información fundamental del proceso productivo.

Las adaptaciones del MEHH al PCSC se encuentran descritas a continuación.

a. Huella Hídrica Verde (HHV) del PCSC

En el caso de la HHV, se tuvo que adecuar el criterio de aprovechamiento, es decir, el manual establece que la HHV es todo aquel volumen de agua que proviene de la precipitación, que no genera escurrimientos, se incorpora al producto o es perdido mediante el proceso de evapotranspiración. Sin embargo, en el PCSC la forma en que el agua de lluvia se incorpora al proceso, ocurre a través de las áreas que se encuentra a la intemperie. Estas áreas incluyen los caminos, los camiones, las bandas transportadoras (en caso de estar descubiertas), los tajos, las piletas o reservorios, terreros, tepetateros y la presa de jales, debido a que una vez que el agua de lluvia entra en contacto con estas áreas entra al sistema evaluado. Sin embargo, no en todas ellas el volumen se incorpora al proceso, en algunos casos ocurre un escurrimiento.

De este modo la cuantificación del agua verde estará en relación con el balance entre la evaporación y la precipitación y con el tipo de área involucrada. Este balance de agua que puede existir en cualquier elemento expuesto a los factores climáticos, pero, sobre todo, en aquellos en donde se considere que puede existir una pérdida de agua verde o agua azul del proceso por efectos de la evaporación.

Es necesario considerar los criterios de distinción para el tipo de agua, de los cuales en este caso dependen dos escenarios, de acuerdo con el factor climático que resulte dominante diariamente.



En el primer escenario, si el balance resulta que la precipitación es mayor a la evaporación, la evaporación no será cuantificada para la HHV, pero la captación sí, por ser un volumen proveniente de la atmósfera que fue aprovechado potencialmente por el proceso, pero parte de este se perdió por efectos de la evaporación, como se muestra en la Figura 9. En el segundo escenario, si el valor de evaporación resulta ser igual a la precipitación, se calcula la evaporación, pero no se toma en cuenta para ningún componente de la HH, ya que se considera que el agua pérdida por evaporación fue el volumen ganado de la atmósfera por medio de precipitación.

Por último, en el tercer caso, la evaporación resulta ser más grande que la precipitación. Al valor obtenido de la evaporación se le debe restar el valor de la precipitación (agua verde en este caso) para poder determinar la evaporación del agua del proceso, y no cuantificar dos veces la que se perdió proveniente de la atmósfera. Por esa razón en este caso la diferencia del balance se cuantifica como pérdida de agua azul por evaporación.



Figura 9. Consideración para la cuantificación para el balance diario entre evaporación y precipitación.



b. Huella Hídrica Azul (HHA) del PCSC

Partiendo de la consideración del MEHH de que el agua azul es todo aquel volumen de uso consuntivo proveniente de algún cuerpo de agua y tomando en cuenta que los escurrimientos de agua verde no pasan a ser agua azul (se incorporan al proceso) se definió que el agua azul para el PCSC correspondería al agua de laboreo o de cualquier otra fuente subterránea o superficial de la cual se extraiga agua y se añada al proceso. El agua de laboreo es agua subterránea que aflora como resultado de la actividad minera. Cuando una empresa minero-metalúrgica lleva a cabo actividades de exploración, suelen encontrar agua subterránea en las zonas montañosas o en regiones donde los acuíferos y sus niveles son relativamente poco profundos. Para extraer de manera eficiente el mineral, se tiene que extraer también toda el agua y disponer de ella. Esta es el agua de laboreo, que la mayor parte del tiempo se aprovecha en la fase de construcción y operación de un proyecto minero. La cuantificación de la HHA corresponderá únicamente a las salidas de agua del sistema como lo son: las descargas, las pérdidas por evaporación, o la incorporación en el concentrado. Mientras el volumen de agua permanezca dentro del sistema evaluado ya sea en forma de humedad, en la presa de jales o en alguna etapa del proceso de concentración, será considerado como parte del sistema y no tendría por qué cuantificarse su huella asociada al uso sino a las pérdidas.

c. Huella Hídrica Gris (HHG) del PCSC

La adaptación conceptual para la HHG se encuentra en la consideración de dos escenarios principalmente. El primero, relacionado con los sitios en donde existen descargas en alguna de las etapas del proceso (ya sea agua de laboreo o demasías) en donde estas pueden ser evaluadas como se plantea en el MEHH, en donde, se compara la calidad del flujo de entrada contra la calidad del flujo de salida y dependiendo de las concentraciones del parámetro medido de interés se determina el volumen de dilución necesario para alcanzar los límites máximos permisibles. Sin embargo, existe un segundo escenario en el PCSC en donde se pueden generar concentraciones de algún parámetro de interés mediante los escurrimientos que entran en contacto con los terreros, tepetateros, presas de jales o bien mediante cualquier escurrimiento que saliera del sistema hacia el entorno.

La Tabla 1 muestra un resumen de los criterios empleados en el balance evaporación-precipitación para las áreas que se encuentran expuestas a la atmósfera, en las que comúnmente se maneja agua dentro del proceso y las



consideraciones hechas para las áreas en las que no se hace manejo agua o pulpa. Es importante distinguir el manejo de agua del proceso de la posible interacción de las áreas con los factores climáticos. Un ejemplo de esto son los caminos de acarreo los cuales no tienen relación con el manejo de soluciones, pero se hace uso de agua mediante riego como control de polvos y si están expuestos a la precipitación y evaporación ambiental.

Tabla 1. Criterios de caracterización del agua verde, azul y gris para el PCSC y los elementos del sistema involucrados en el manejo de agua

	Evaporación > Precipitación	Evaporación < Precipitación
Manejo en ausencia de agua DE PROCESO (caminos generales, caminos de acarreo, tajo abierto, terreros)	<ul style="list-style-type: none">• Pérdida continua de agua verde por evaporación (áreas a la intemperie)• Pérdidas por agua azul por irrigación y contenido de humedad)• No hay generación de huella gris	<ul style="list-style-type: none">• Agua verde aprovechada que se incorpora al sistema.• Potencial agua gris de las diferentes interacciones con terreros y descargas
Manejo en presencia de agua DE PROCESO (tajos abiertos, lagos, reservorios y presa de jales)	<ul style="list-style-type: none">• No hay pérdida de agua verde• Pérdida continua de agua azul por evaporación• Agua gris proveniente de las descargas	<ul style="list-style-type: none">• Agua verde aprovechada por incorporación al sistema• Potencial agua gris de las diferentes interacciones con terreros y descargas

La identificación de las principales actividades en el PCSC en conjunto con la adaptación de los criterios de la HH a un proceso minero metalúrgico, permitieron que se planteara el MC desde una perspectiva modular. Abarcando las actividades que típicamente se llevan a cabo en el proceso, se realizó una conceptualización se dividió el PCSC en los siguientes 9 módulos: 1) Mina, 2) Acarreo, 3) Acumulamiento, 4) Trituración, 5) Molienda, 6) Flotación, 7) Filtración, 8) Presa de Jales, 9) Manejo de Agua.

Separar el proceso por módulos representativos de las principales áreas y actividades permitió realizar un análisis más detallado en la cuantificación con el fin de buscar versatilidad con las condiciones operativas y permitiera identificar los puntos críticos que rigen la magnitud del indicador.



En conjunto, abarcan las principales actividades propias del PCSC, considerando la infraestructura relacionada, las prácticas comúnmente usadas y su interacción geoespacial con el ambiente. Asimismo, el modelo no debe de depender de características como la ley del mineral, la cantidad de mineral procesado o algún otro parámetro operativo, a fin de que pueda adecuarse a cualquier caso siempre y cuando este se encuentre apegado a las consideraciones tomadas en el modelo para llevar a cabo la evaluación.

Dado que cada uno de los módulos tiene características particulares relevantes, es preciso describir la cobertura de cada uno de ellos, sus fronteras y las consideraciones tomadas en su funcionamiento como parte del MC. A continuación, se describe cada uno de los módulos.

1) Mina

Considera las operaciones de minería como son los tajos abiertos y los procesos de minería subterránea. Asimismo, las actividades de trituración dentro de mina, de exploración y perforación se encuentran consideradas en este módulo. En el caso de los tajos abiertos, se considera que estos se encuentran expuestos a las condiciones climáticas y son sujetos a la ganancia-pérdida de agua por precipitación o evaporación. De igual forma, en la minería subterránea se toma en cuenta que el agua de laboreo es una ganancia de volumen para el proceso siempre y cuando se haga aprovechamiento de esta en el proceso. Se considera que el sistema no tiene una ganancia de agua si el agua extraída de la mina se emplea en actividades como control de polvos dentro de la mina o perforación, esto bajo el criterio de que el agua que está siendo empleada en la actividad retorna a la misma fuente de la que provino.

Otra consideración en el caso de la minería subterránea es el hecho de que se descarta el equilibrio de ganancia-pérdida de agua con respecto a los factores climáticos, es decir, se descarta la ganancia o pérdida de agua por efecto atmosférico en forma de precipitación o de evaporación.

Para este módulo se consideró el agua de laboreo, el agua empleada en los equipos de perforación, la humedad del mineral, el agua empleada como control de polvos y para otros usos.



2) Acarreo

Considera el transporte del material de la mina hacia la planta de beneficio mediante el posible uso de bandas transportadoras o de camiones de acarreo. En este sentido, este módulo se encuentra delimitado por dos sistemas, el medio de transporte (bandas o camiones) y los caminos utilizados, en los cuales el agua se presenta en contenido de humedad del mineral y la irrigación de caminos como método de control de polvos.

Se considera que ambos sistemas están sujetos a la ganancia o pérdida de agua por la exposición a los factores climáticos. Comúnmente los caminos de servicio empleados no forman parte del control de escorrentías interno de los sitios mineros por lo que para el MC se considera que todo el volumen aplicado en irrigación es una salida para el sistema evaluado principalmente por dos mecanismos, la infiltración y la evaporación.

El agua empleada en el control de polvos puede provenir de alguna fuente externa, de los laboreos o tajos de la mina y de la recuperación del proceso, siempre y cuando tenga la calidad para esta actividad.

3) Acumulamiento

Este módulo fue diseñado para abarcar los depósitos de roca estéril, o de depósitos de baja ley, conocidos como *terreros* y *tepetateros*. Estos depósitos de residuos pueden ser construidos al interior de las minas subterráneas y ser usados como rellenos de zonas en donde la fase extractiva ha concluido reduciendo el impacto ambiental en materia de uso de suelo (Zengxiang y Meifeng, 2012). Estas áreas también son construidas al exterior, en donde un factor importante a considerar es el dinamismo operacional enfocado al crecimiento constante de la superficie expuesta por efectos del aumento de volumen. Esto es relevante principalmente por la ganancia de agua dada en el área de captación pluvial y en la superficie expuesta de estos depósitos que tienen pérdida por evaporación, debido a que estas aumentan con respecto al tiempo durante la vida útil de la mina.

4) Trituración

Considera el mineral extraído y no toma en cuenta la reducción primaria que pueda existir al interior de la mina, solo las etapas de trituración posteriores previas a la molienda. En ese sentido, este módulo toma en cuenta que durante las etapas de trituración el mineral puede ganar o perder humedad



sí se emplea agua para control de polvos o para aumentar el contenido de humedad en el mineral como acondicionamiento para la molienda.

5) Molienda

La etapa de molienda del mineral demanda grandes cantidades de energía (Jeswiet y Szekeres, 2016) y es uno de los módulos de mayor consumo de agua junto con la etapa de flotación, por la relación sólido-líquido que se requiere en ambas etapas (Bleiwas, 2012a; Muzenda, 2010). Esto se debe a que es necesario realizar la molienda con la mayor eficiencia posible y, por lo tanto, la adición de agua es un parámetro que se controla en la operación. Por lo general, se acondiciona el material junto con agua y en algunos casos hasta alcanzar un contenido aproximado del 80% en sólidos y cerca de este valor se consigue la mayor eficiencia de molienda (Davenport et al., 2002; Iwasaki et al., 1985)

Las configuraciones operacionales de los sistemas de clasificación de la pulpa, como los hidrociclones, fueron considerados como parte del sistema de molienda, De esta manera, si existen series de molinos destinados a la molienda y otros a la remolienda, fácilmente pueden ser incluidos todos al considerar la adición de agua a todo el sistema por completo, aun con los sistemas de clasificación intermedios.

6) Flotación

El módulo de flotación se encuentra enfocado únicamente a esta etapa del proceso para poder determinar su aportación al indicador. Este módulo puede ser empleado para circuitos de flotación *bulk* o para circuitos de flotación secuencial de metales independientes.

La configuración y dimensiones del circuito de flotación son variables que no afectan la cuantificación, siempre y cuando se considere como una sola entidad.

7) Separación sólido-líquido

El módulo considera la infraestructura involucrada en la etapa de espesamiento y filtrado del concentrado. Una vez que es recuperado en forma de espuma en el circuito de flotación es llevado a sistemas de



espesamiento y filtrado para reducir el contenido de agua, hasta alcanzar rangos de humedad de 10% a 12% (Gunson et al., 2012b; Haldar, 2018)T

Este es un módulo en el que se considera que la única salida de agua del sistema es el contenido de humedad del concentrado. No está considerado que este módulo este expuesto a las condiciones climáticas aun cuando pueda existir un poco de evaporación durante esta etapa.

8) Presa de Jales

Este módulo hace un análisis particular de las presas de jales a fin de poder definir su comportamiento hidrológico. Estas estructuras son parte crucial en términos de HH por que representan sistemas de almacenamiento temporal de la gran mayoría de agua del proceso. Asimismo, representa el componente con la mayor pérdida de agua en el sistema y una fuente importante de recuperación de agua (Bleiwass, 2012a).

9) Manejo de Agua

Este módulo es una contribución notable del presente trabajo para el análisis del proceso porque a diferencia de los otros módulos con infraestructura claramente identificable, este módulo puede ser el de mayor variabilidad operativa debido a las prácticas de manejo de agua. Este módulo puede incluir tuberías, canales, reservorios y piletas empleadas en el PCSC para llevar a cabo el manejo del agua y sus recirculaciones, ya que el agua puede ser recuperada y reincorporada en diferentes puntos del proceso.

Con la creación del MC y la definición de cada uno de los módulos es posible representar el PCSC en un mapa conceptual que nos permita relacionar el flujo del proceso con los módulos descritos. La Figura 10 muestra el MC del proceso, la conectividad que existe entre módulos en términos de transferencia de agua y el concentrado como salida del proceso. En la mayoría de los casos, la transferencia de agua de módulo a módulo es por el contenido de agua en el material o por la recuperación y/o almacenamiento de agua del proceso.

El concentrado de sulfuros de cobre es el producto final en el PCSC y por ello únicamente está delimitado como el resultado del proceso y no en el MC que corresponde a los 9 módulos descritos anteriormente.

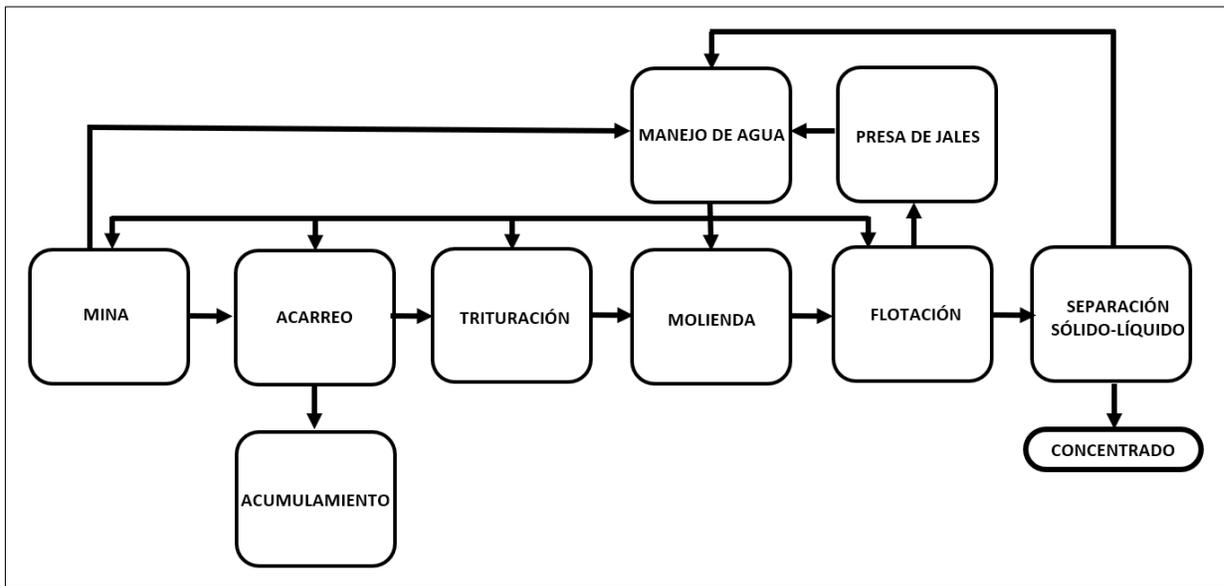


Figura 10. Modelo conceptual del proceso.

III.1.2 Determinación de flujos del proceso

En esta etapa mediante la revisión bibliográfica, recorridos en un sitio con el PCSC, entrevistas con responsables de la operación del PCSC, se caracterizó el proceso, las etapas involucradas y las variables relevantes para establecer el balance de agua. De esta forma se identificaron los principales mecanismos mediante los cuales entra o sale agua del PCSC.

Para este análisis se tomó en cuenta cada uno de los módulos, logrando clasificar por separado las entradas y salidas que corresponden a cada uno de ellos. Con la ayuda del MC separado modularmente, también es posible identificar flujos de transición entre cada módulo, principalmente asociados al volumen de agua que se va incorporando en el procesamiento del mineral.

Es importante recalcar que el análisis realizado consideró únicamente el proceso y no la cadena de abastecimiento, es decir, únicamente se encuentran considerados como flujos de entrada aquellos flujos que tiene relación directa con el proceso, como la adición de agua en cualquiera de las etapas o la incorporación de agua de lluvia. Sin embargo, para la cuantificación de la Huella Hídrica total no es considerada el agua virtual que pudiera estar contenida en los productos de la cadena de abastecimiento, lo que incluye reactivos y productos necesarios para el proceso, o la asociada a la energía eléctrica consumida.



Cada uno de los flujos fue identificado mediante un código con el fin de tener una clasificación uniforme que pudiera otorgar información de cada flujo en específico de manera sencilla. La Tabla 2, muestra los criterios para la generación del código de identificación de los flujos en el cual se va otorgando caracteres según cada clasificación. Asimismo, toma en cuenta el módulo al que pertenece el flujo, si este pertenece a una entrada o una salida del sistema y la numeración consecutiva respecto a otros flujos del mismo módulo.

Tabla 2. Criterio de clasificación para los flujos.

EJEMPLO	MÓDULO	ENTRADA O SALIDA	NUMERACIÓN
	3 primeras letras representativas del módulo	"I" para entrada "O" para salida	Numeración consecutiva de tres dígitos
MIN-I-001	MIN	I	001

La lista de flujos identificados en cada uno de los módulos se muestra en la Tabla 3, en donde se puede observar la clasificación por módulo, si es de entrada o salida, según la codificación dada, las unidades en las cuales se expresan todos los flujos son metros cúbicos por día [m³/d].

Los flujos de entrada de los módulos se relacionan principalmente a existencia de un flujo de agua en relación con la actividad del proceso que se lleva a cabo en ese módulo. A manera de ejemplo, dentro del módulo *Mina* el agua de laboreo representa una *entrada* debido a que pudiera extraerse el material en la mina y no tener presencia de agua en él, pero al existir agua de laboreo, condiciona al módulo a considerarlo como un flujo de entrada.

Para la determinación de las salidas, es importante mencionar que una consideración de la cuantificación de la HH y sus componentes es que mientras se esté usando el agua en la misma cuenca, el mismo cuerpo de agua o no salga del sistema evaluado (en este caso el módulo) no representa un consumo de agua azul sino hasta el momento en el que sale del módulo mediante su transferencia en forma de humedad o de bombeo a otro módulo, de esta forma son cuantificados los flujos de salida que aportan a la cuantificación de la HHA. En un escenario en donde el agua de laboreo fuese usada para el riego de caminos dentro de la misma mina donde se extrajo el agua, no se estaría rompiendo este criterio y por lo tanto no habría HH relacionado a este flujo. Si el agua del riego fuese de un cuerpo de agua externo a la mina o se estuviera transfiriendo o bombeando a otro módulo, entonces si se debiese cuantificar el consumo como parte de la HHA.



Es preciso mencionar que algunos de los flujos de salida de los módulos no necesariamente representan una pérdida para el sistema, ya que un flujo de salida de un módulo puede representar un flujo de entrada para algún módulo sucesivo. La Tabla 3 muestra cuales son flujos de transferencia indicando su nuevo nombre en la columna de "*transferencia a*". Estos flujos de transferencia cambian de nombre de módulo a módulo, conservando el mismo valor, pero ajustándose a la nomenclatura del nuevo módulo evaluado para que de esa forma cada módulo tiene su propia nomenclatura de entradas y salidas.

En ese sentido, es de igual importancia identificar aquellos flujos que también representan una transferencia del agua de un módulo a otro, pero dadas las condiciones operativas no se lleva a cabo el reúso del agua en el módulo siguiente y en su lugar se convierte en un flujo que pudiera ser aprovechado en cualquier otra parte del proceso a manera de recirculación. Por tal motivo, estos flujos en particular se les denomina *recirculaciones* y son identificados mediante un asterisco (*) en la misma Tabla 3.

Dentro de la Tabla 3 también se encuentra indicado el componente de la HH al cual se encuentra asociado cada flujo a través de la identificación del tipo de agua (verde, Azul y Gris). Algunos flujos tienen más de un componente señalado, en el caso de los flujos de agua azul/gris se debe al potencial que tienen de convertirse en flujos de agua gris según su calidad; en el caso de los flujos que son verde/azul, es debido al balance que existe entre las pérdidas de evaporación diaria y la precipitación como se mencionó en el balance de la Figura 9, en donde, el volumen evaporado diariamente es mayor a la precipitación la evaporación será de agua azul, mientras que si el volumen de evaporación es menor a la precipitación diaria entonces el volumen perdido es de agua verde.

El análisis realizado al MC y aplicado propiamente a la identificación de los flujos por módulo permitió la identificación de 33 flujos de entrada, 29 flujos de salida, 12 flujos de transferencia y 8 posibles recirculaciones.



Tabla 3. Lista de flujos del Modelo Conceptual.

Modulo	Nombre	Código	Transferencia a	Condición	Tipo de Agua	
					Verde	Azul Gris
MINA	Agua de laboreo	MIN-I-001	WSM-I-002	Entrada	●	●
	Usos Varios*	MIN-I-002		Entrada	●	
	Riego de caminos*	MIN-I-003		Entrada	●	
	Equipo de perforación y exploración*	MIN-I-004		Entrada	●	
	Precipitación (Mina cielo abierto)	MIN-I-005		Entrada	●	
	Descarga del agua de laboreo	MIN-O-001		Salida	●	●
	Humedad del Mineral	MIN-O-002	ACA-I-001	Salida	●	
	Evaporación (Mina cielo abierto)	MIN-O-003		Salida	●	
	Humedad del Tepetate	MIN-O-004	ACA-I-002	Salida	●	
ACARREO	Humedad del Mineral	ACA-I-001		Entrada	●	
	Humedad del Tepetate	ACA-I-002		Entrada	●	
	Captación mineral camiones/bandas	ACA-I-003		Entrada	●	
	Captación tepetate camiones/bandas	ACA-I-004		Entrada	●	
	Captación caminos	ACA-I-005		Entrada	●	
	Riego de caminos	ACA-I-006		Entrada	●	
	Evaporación mineral (camiones o bandas)	ACA-O-001		Salida	●	
	Evaporación tepetate (camiones o bandas)	ACA-O-002		Salida	●	
	Evaporación caminos	ACA-O-003		Salida	●	
	Humedad del Mineral	ACA-O-004	RED-I-001	Salida	●	
	Humedad del Tepetate	ACA-O-005	ACU-I-001	Salida	●	
ACUMULAMIENTO	Humedad tepetate	ACU-I-001		Entrada	●	
	Captacion	ACU-I-002		Entrada	●	
	Evaporacion	ACU-O-001		Salida	●	
	Escurrimiento o Infiltración	ACU-O-002		Salida	●	
	Escurrimiento o Infiltración (contaminado)	ACU-O-003		Salida	●	●
TRITURACIÓN	Humedad del Mineral	RED-I-001		Entrada	●	
	Usos Varios*	RED-I-002		Entrada	●	
	Control de polvos	RED-I-003		Entrada	●	
	Humedad del Mineral	RED-O-001	MOL-I-001	Salida	●	
MOLIENDA	Humedad del Mineral	MOL-I-001		Entrada	●	
	Usos Varios*	MOL-I-002		Entrada	●	
	Acondicionamiento*	MOL-I-003		Entrada	●	
	Equipos auxiliares *	MOL-O-001		Salida	●	
	Evaporación	MOL-O-002		Salida	●	
	Pulpa	MOL-O-003	FLO-I-001	Salida	●	
FLOTACIÓN	Pulpa	FLO-I-001		Entrada	●	
	Acondicionamiento Flotación*	FLO-I-002		Entrada	●	
	Acondicionamiento Concentrado*	FLO-I-003		Entrada	●	
	Acondicionamiento pulpa*	FLO-I-004		Entrada	●	
	Usos Varios*	FLO-I-005		Entrada	●	
	Evaporación en celdas de flotación	FLO-O-001		Salida	●	
	Espuma Mineralizada	FLO-O-002		Salida	●	
	Jales	FLO-O-003	JAL-I-001	Salida	●	
SEPARACIÓN SÓLIDO LÍQUIDO	Espuma Mineralizada	FIL-I-001		Entrada	●	
	Recuperación Espesadores	FIL-O-001	WSM-I-003	Salida	●	
	Recuperación Filtros	FIL-O-002	WSM-I-004	Salida	●	
	Humedad del Concentrado	FIL-O-003		Salida	●	
PRESA DE JALES	Jales	JAL-I-001		Entrada	●	
	Captación pluvial	JAL-I-002		Entrada	●	
	Recuperación	JAL-O-001	WSM-I-005	Salida	●	
	Evaporación	JAL-O-002		Salida	●	
	Infiltración	JAL-O-003		Salida	●	
	Escurrimiento	JAL-O-004		Salida	●	
	Pérdida Intersticial Jales	JAL-O-005		Salida	●	
Manejo de Agua	Agua Fresca	WSM-I-001		Entrada	●	
	Agua de laboreo	WSM-I-002		Entrada	●	
	Recuperación Espesadores	WSM-I-003		Entrada	●	
	Recuperación Filtros	WSM-I-004		Entrada	●	
	Recuperación Presa de Jales	WSM-I-005		Entrada	●	
	Captación pluvial	WSM-I-006		Entrada	●	
	Usos Varios	WSM-O-001	*	Salida	●	
	Evaporación Reservorios	WSM-O-002		Salida	●	



III.1.3 Desarrollo del modelo numérico

Para el desarrollo del Modelo Numérico (MN) se empleó la lista de los flujos de entrada y de salida de cada uno de los módulos. De acuerdo con el MC, el MN fue diseñado modularmente para realizar los cálculos correspondientes en cada módulo por separado.

El MN calcula los valores de los flujos tomando en cuenta todas las posibles consideraciones realizadas en el MC, es decir, los distintos arreglos operacionales (número de minas, camiones, piletas, caminos, molinos, espesadores, filtros, presas de jales, etc.)

Se consideró que algunos de los flujos de relevancia para la HH tienen relación con algunos otros parámetros de importancia para el proceso productivo o por su interacción con el medio ambiente. Así entonces, el MN consideró el análisis dimensional de estos parámetros para obtener el valor de cada uno de los flujos en términos de volumen de agua, pero relacionando variables hídricas, productivas, de diseño y climáticas, con el fin de distinguirlo de los balances hídricos que convencionalmente se realizan.

Además, el MN fue diseñado con una base de cálculo diaria, esto con el fin de representar el dinamismo de la operación de una manera más precisa y poder modelar la interacción de todos los parámetros lo más semejante a la realidad durante el periodo de evaluación.

Para el desarrollo del MN se empleó el software GoldSim versión 12, un software de simulación Montecarlo que permite el cálculo y manejo de una gran cantidad de datos simultáneamente, a través del uso de herramientas matemáticas y lógicas. Este software se utilizó para validar el modelo numérico aplicado a un caso de estudio, permitiendo el cálculo de los flujos con la posibilidad de registrar los resultados con un lapso de evaluación diario, tomando esos datos como valores iniciales para el siguiente lapso, recalculando diariamente los parámetros que tuvieron cambios con relación a la temporalidad o según el dinamismo de la operación durante un periodo de 1 año. Es importante mencionar que el uso del software GoldSim permitió realizar análisis de sensibilidad con las variables evaluadas con lo cual se logró identificar aquellas variables de mayor peso para la simulación.

Una vez obtenido el valor numérico de cada uno de los flujos se integraron para determinar la cuantificación de cada uno de los componentes de la HH (HHV, HHA, HHG). De esta manera fue posible conocer el valor de cada componente de la HH en cada uno de los módulos y así



obtener los valores totales de la HH y el total de cada componente por separado en el beneficio de sulfuros de cobre.

El software GoldSim mediante una interfaz permite relacionar en un mismo modelo valores estocásticos y determinísticos, así como elementos de acumulación, operaciones lógicas y matemáticas, todo relacionado en un periodo determinado, dando la posibilidad de simular condiciones operativas reales si se cuenta con la información necesaria, como el volumen de agua bombeado de un pozo de forma diaria o permitiendo estimar la cantidad agua captada por un camión de acarreo de mineral en el traslado de la mina a la planta de beneficio.

Como información adicional el software requiere una licencia para su uso, que el equipo de cómputo cuente con sistema operativo Windows 7 o superior en cualquiera de las versiones de 32-bits o 64-bits. También el equipo debe de contar con el software Microsoft Excel en la versión 2010 o posterior y espacio mínimo de 500 MB en disco

III.1.4 Caso de estudio

Se evaluó la adaptabilidad y representatividad de la separación modular y la identificación de flujos del MC del PCSC mediante un caso de estudio. Esto permitió la aplicación conceptual de la evaluación de la Huella Hídrica y su aplicación a un proceso productivo real.

La empresa Negociación Minera Santa María de la Paz y Anexas, S.A. de C.V. permitió la colaboración en conjunto, para el desarrollo de esta investigación. La empresa se encuentra ubicada en el municipio de Villa de la Paz, dentro de la zona altiplano del estado de San Luis Potosí, como se muestra en la Figura 11.

La empresa cuenta con dos minas subterráneas, mina Dolores y mina Cobriza de las cuales se extraen minerales como calcopirita, galena, esfalerita y argentita, siendo la calcopirita la de mayor ley, con contenidos de cobre que van del 1% al 2% en peso. Las actividades minero-metalúrgicas de la empresa se encuentran enfocadas al proceso del beneficio de sulfuros de cobre

Como se muestra en la Figura 12, el mineral es transportado a una planta de beneficio en donde el proceso comienza con la trituración del material, pasa al circuito de molienda en donde se usan molinos de bolas y después a los circuitos de flotación y limpias, en donde se separan el concentrado de los minerales de interés del material estéril. El concentrado obtenido se filtra para



su comercialización, mientras que los residuos mineros son enviados a una presa de jales, para su depósito y la recuperación de agua que es empleada nuevamente en el proceso

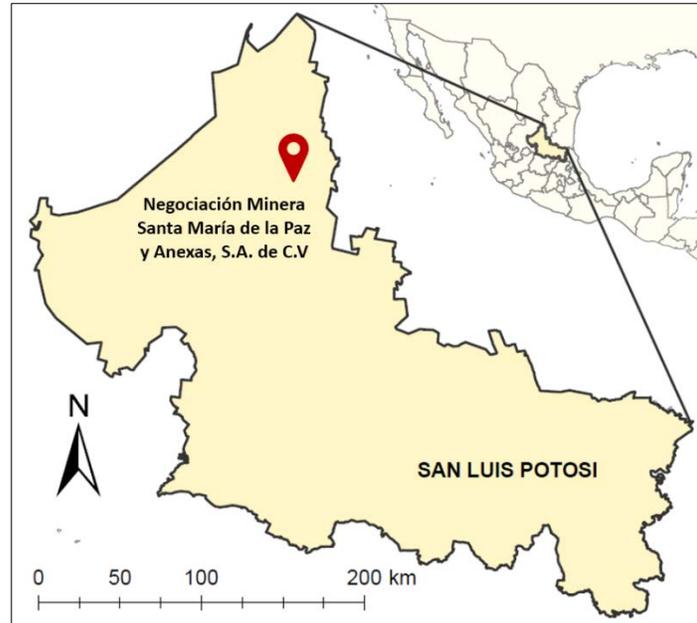


Figura 11. Ubicación del caso de estudio respecto al estado de San Luis Potosí.

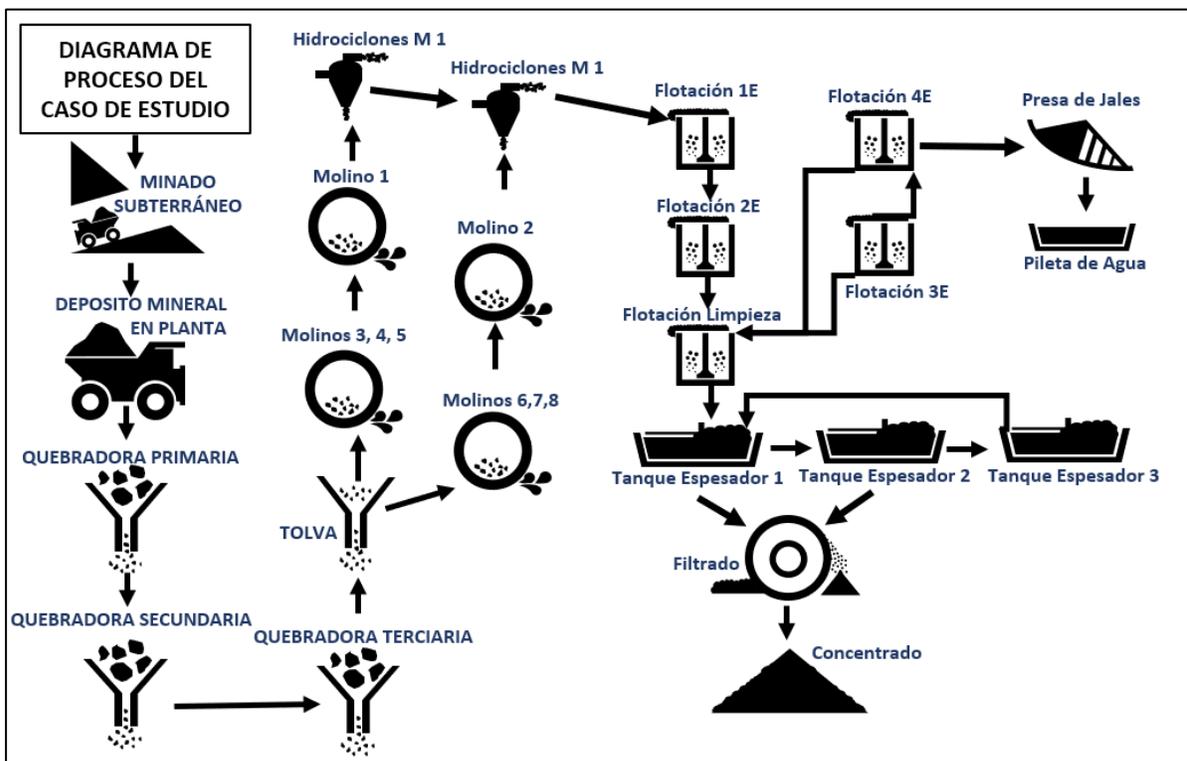


Figura 12. Diagrama general del proceso de Negociación Santa María de la Paz y Anexas S.A. de C.V.



En la zona del caso de estudio predominan dos tipos de clima: i) BS0hw Seco semicálido y ii) BS0kw(x´) Seco templado, con una temperatura anual entre los 14 °C y 23 °C, con lluvias en verano (CEFIM, 2015). La precipitación media anual es de 380 mm y la evaporación alrededor de los 434.9 mm por año (CONAGUA, 2020). La Figura 13 muestra el climograma de la zona en donde se encuentra ubicado el proyecto.

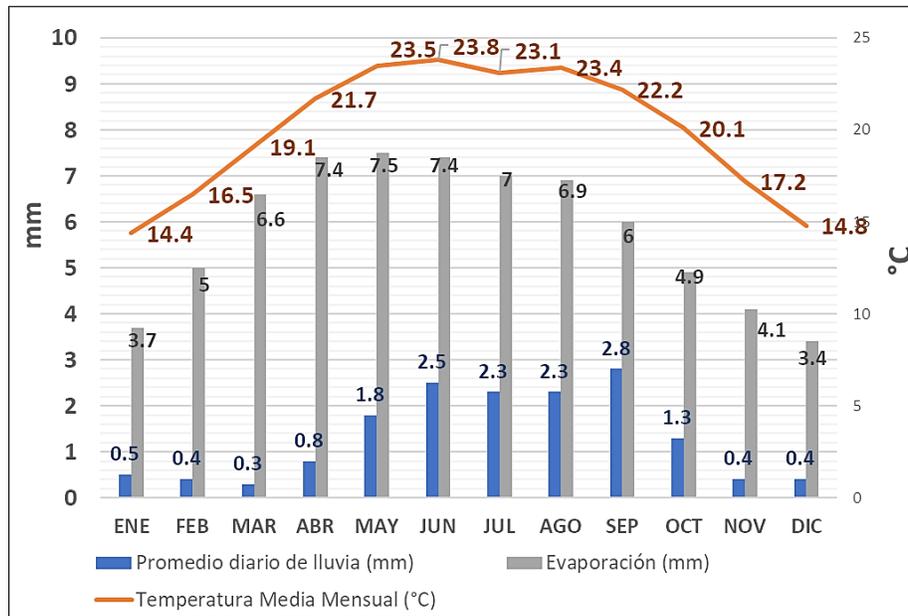


Figura 13. Climograma de la zona de estudio.²

Las características operativas generales del caso de estudio son:

- Minado subterráneo
- Depósito de residuos mineros dentro y fuera de la mina.
- Transporte de mineral en camiones.
- Trituración primaria dentro de mina y secundaria fuera de mina.
- Molienda en 5 molinos de bolas.
- Circuito de flotación: primario (10 celdas), agotativo (8 celdas) y limpias (3 celdas).
- 1 presa de jales en operación.
- Piletas y bordos para recuperación de agua de proceso

² (origen de datos: normales climatológicas de la CONAGUA)



III.1.5 Generación de información experimental

El caso de estudio permitió aplicar los conceptos desarrollados desde el enfoque metodológico al hacer un análisis sobre la disponibilidad de información en el sitio y de esa forma se observó que existe una carencia sobre algunos parámetros que, si bien pueden ser importantes en términos del MC para determinar la HH, no influyen de manera significativa en la operación. Por ello, que durante esta etapa se generó la información faltante de aquellos parámetros que no estaban disponibles directamente, mediante mediciones y experimentos o en la cual fue necesario realizar su procesamiento para dejarla en términos del indicador. Se generó información de aquellos parámetros que se determinó que su dinámica influye en el cálculo de la cuantificación de la HH. La descripción de la generación de información por módulo se detalla a continuación:

a. Mina

- Determinar la humedad del mineral

Para determinar la humedad del mineral se empleó el estándar ASTM 2216, el cual permite establecer la humedad en suelo y rocas por masa. Se realizó un muestreo del mineral en el interior de la mina, tanto en la época húmeda como en la época seca. El personal de la empresa muestreó el mineral aleatoriamente según el avance de la mina, se tomaba una muestra de zonas en las que recientemente se había minado mineral y después las muestras fueron transportadas en bolsas aislantes para evitar la pérdida o ganancia de humedad y cambios en la temperatura. Las muestras eran recibidas en el laboratorio en donde se pesaban al llegar y eran introducidas en un horno de secado hasta llegar a tener un peso constante. De esta forma, el contenido de agua para 78 muestras se determinó por diferencia de peso, en donde el promedio de la humedad del mineral fue del 2%.

- Determinar el volumen de agua en las etapas de exploración y perforación:

Esta información se obtuvo mediante la estimación del gasto de los equipos por hora de funcionamiento. Para determinar el volumen diario empleado por los equipos de perforación y exploración en esta actividad fue necesario conocer las horas de funcionamiento de los equipos, los turnos trabajados por los equipos y el gasto de agua que estos requerían para las operaciones.



Con los datos obtenidos se calculó el flujo de esta actividad diariamente en metros cúbicos mediante la relación del gasto, según se expresa en la Ecuación 4.

$$Q_{Perfo} = Q_{Equipos} \cdot t_{equipo}$$

Ecuación 4

En donde:

Q_{Perfo} : Gasto de los equipos de perforación (m³/d)

$Q_{Equipos}$: Gasto de agua empleada por lo equipos por hora (m³/h)

t_{equipo} : Horas de uso de los equipos por día (h/d)

b. Acarreo

- Determinar la pérdida o ganancia de humedad durante el acarreo

Para la determinación de esta información fue necesario conocer las dimensiones de los camiones, la longitud de los caminos de acarreo, determinar el tiempo traslado y la ganancia o pérdida de agua por efecto de la precipitación o evaporación de la zona de estudio. Una vez determinada la humedad del mineral proveniente de la mina, se realizó un muestreo en el stock y en la alimentación al área de trituración para determinar la humedad con la que el mineral es alimentado al proceso. La determinación de la humedad se realizó según el estándar ASTM 2216.

En esta etapa del proceso también se calculó la pérdida por evaporación o escurrimiento que existe en los caminos debido al agua empleada como control de polvos.

Se empleó un infiltrómetro Cornell Sprinkle (Ogden et al., 1997) para determinar la infiltración del agua y la conductividad hidráulica del suelo y con ello obtener el punto de saturación del suelo, y así conocer en qué momento el agua puede llegar a perderse por escurrimiento. Esto con el fin de estimar el agua que se infiltra o escurre durante un evento de precipitación o durante el riego de caminos y por diferencia calcular el agua perdida por escurrimiento o evaporación.

c. Trituración

- Evaluar los sitios en donde el agua es empleada como método de control de polvos y estimar el volumen de agua empleada diariamente.



Para estimación de este volumen se instaló un medidor volumétrico en la línea de adición de agua del circuito de trituración y previó a la molienda, del cual se obtuvieron datos por turno de trabajo y se determinó la frecuencia con la cual se adiciona agua en dichos circuitos durante la operación diaria. De esta manera se estimó el volumen de agua empleada en el control de polvos por tonelada de mineral procesado.

d. Flotación

- Evaluar la pérdida por evaporación en las celdas de flotación

Se realizaron experimentos a nivel laboratorio para determinar la evaporación del agua en la celda de flotación por efecto de la temperatura y el burbujeo. Para llevar a cabo estos experimentos fue necesario realizar flotaciones bajo condiciones similares a las empleadas en planta, para lo cual se empleó una celda marca Denver modelo D12 de un litro de capacidad, en donde se midió el volumen de agua inicial en la celda, el volumen recuperado en la "espuma mineralizada" y el volumen final en la celda nuevamente, y por diferencia se estimó el volumen evaporado.

Asimismo, se midió el volumen de agua añadido durante el experimento, para la limpieza de la celda y el acarreo del concentrado durante la flotación para simular el agua que puede ser añadida a nivel industrial con este mismo propósito, para lo cual se empleó una piseta convencional con un volumen determinado. El experimento consideró el aire que es añadido a la celda y el área transversal de la misma para determinar si estas condiciones propician la pérdida por evaporación durante esta etapa.

e. Secado y Filtración

- Analizar el sistema de recuperación de agua de los espesadores y filtros.

Se analizó la humedad del concentrado de mineral antes y después de ser filtrado. Se tomó la muestra húmeda que fue pesada y posteriormente secada en un horno para obtener la diferencia de peso mediante la determinación de la humedad según el estándar ASTM 2216 y después comparada con el contenido de humedad final del concentrado.



f. Determinación del balance hídrico de la presa de jales

- Determinar la granulometría de los jales para evaluar el efecto que tiene la infiltración en ellos

El muestreo se llevó a cabo tomando muestras superficiales de la composición de los jales en los taludes y la zona de descarga del vaso de la presa de jales. Para realizar un análisis granulométrico de las muestras, el material se homogenizó y se separó por el método de cuarteo, después se cribó por malla No.10 y No.16. Posteriormente se analizó el material en un equipo Zetasizer marca Malvern Panalytical para determinar la distribución del tamaño de partícula.

- Evaluar la formación de escurrimientos provenientes de la presa de jales

Los taludes de la presa de jales se evaluaron como una superficie con potencial de generar escurrimientos, de los cuales puede ser determinado el escurrimiento medio y el escurrimiento máximo instantáneo. El escurrimiento máximo instantáneo involucra la precipitación por evento (mm) y la retención máxima potencial (mm), la cual puede ser obtenida de las curvas numéricas desarrolladas por el Servicio de Conservación de Suelos de los E.U.A.

Se realizó un muestreo en 14 puntos en el talud la presa de jales con un infiltrómetro Cornell Sprinkle de disco para simular evento de precipitación con un periodo de retorno de 100 años, para conocer el momento en el cual los taludes pueden generar escurrimientos y la posible generación o arrastre de sedimentos.

- Evaluar la infiltración dentro de la presa de jales.

Se evaluó la infiltración en la presa de jales haciendo uso de un infiltrómetro Cornell Sprinkle para determinar el agua que queda instantáneamente retenida en los jales y cuanta escurre hacia el vaso de la presa.

- Determinar las distintas zonas de la presa de jales para estimar la pérdida por evaporación.

Se realizaron vuelos con una aeronave pilotada a distancia (RPAS) en distintas áreas de la presa de jales para zonificar su superficie empleando



técnicas de percepción remota que permitieron distinguir zonas con diferente contenido de agua en la presa de jales, esto con el fin de poder determinar el área del espejo de agua formado en la presa, las zonas parcialmente saturadas y las zonas secas, para las cuales se tiene la hipótesis que la pérdida de agua por evaporación es distinta.

- Evaluar el efecto de la calidad del agua sobre la pérdida por evaporación dentro del proceso

Para evaluar el efecto de la evaporación sobre los distintos tipos de agua, se instalaron 3 tanques evaporímetros de Clase A, de acuerdo con la NMX-AA-166/1-SCFI-2013, para determinar si existe diferencia significativa en la pérdida de agua por evaporación dependiendo de la calidad y la etapa del proceso. Los tanques fueron llenados con: i) agua fresca proveniente del abastecimiento de la mina, ii) agua recuperada de la presa de jales y iii) una mezcla de ambas. Este último, representó las condiciones y calidad del agua, que resultan de juntar los flujos del agua recuperada y el agua fresca. Los tres tanques evaporímetros se colocaron en el sitio del caso de estudio para determinar si existen factores de evaporación asociados a cada uno de los tipos de agua.



IV. La evaporación y su importancia en los procesos minero metalúrgicos

Los sitios minero-metalúrgicos enfocados a la concentración de sulfuros de cobre necesitan la continua gestión de los recursos hídricos, ya que, en actividades como la flotación y la molienda, el agua es indispensable como parte del proceso y en otras debido al manejo que involucra su recuperación, almacenamiento, bombeo, descarga o reincorporación (Gunson et al., 2012a)

Debido a la naturaleza de las actividades que conforman el PCSC, es inevitable que existan pérdidas de este recurso en distintos puntos ya que es un sistema que se encuentra expuesto a las condiciones ambientales en algunas de sus etapas. Estas pérdidas se componen principalmente por infiltraciones al subsuelo, incorporación de agua en los concentrados, descargas programadas, por el volumen de agua que queda incorporado o atrapado dentro de los jales que no es posible recuperar y por evaporación. (Singh, 2010; Wels y Robertson, 2003).

La importancia del manejo del agua en una unidad minera radica principalmente en aspectos económicos y ambientales, ya que los costos operativos pueden incrementar si no se hace un correcto manejo del agua dentro del proceso pudiendo impactar la zona en donde está siendo empleada y/o extraída (Ossa-Moreno et al., 2018)

Como se mencionó, la naturaleza de la industria minera y de sus actividades, se llevan a cabo en escenarios en donde generalmente las unidades mineras se encuentran expuestas a las condiciones climáticas y por ende a la ganancia o pérdida de agua por esta vía.

La ganancia de agua al sistema por efectos climáticos se encuentra asociada a la precipitación y de manera sencilla es posible calcular el área de captación de alguna infraestructura. Sin embargo, la determinación de la evaporación asociada a las etapas del proceso se vuelve más compleja debido a que dependiendo de la superficie evaluada en algunos casos es posible medir y en otros es necesario estimar. En comparación, estimar datos de evaporación es más sencillo asumiendo las variables que rigen los mecanismos de evaporación, sin embargo, al hacer esto aumenta el grado de incertidumbre mientras que realizar mediciones reduce en gran medida la incertidumbre, pero generalmente es un proceso más difícil de realizar. Particularmente para el caso del PCSC se identificaron actividades en donde



el uso de agua dentro del proceso resulta relevante y en cuales se realizaron mediciones para reducir la incertidumbre. Dichas actividades son descritas a continuación.

IV.1 Control de Polvos en caminos

Un uso importante del agua en una operación minera es en el riego de caminos no pavimentados, ya que resulta el método más económico para el control de polvos cuando se dispone de la suficiente cantidad y calidad de recursos hídricos (Thompson y Visser, 2007). Esta actividad se encuentra regulada principalmente por el efecto negativo que tienen las partículas PM₁₀ y PM_{2.5} a la salud por la norma oficial mexicana NOM-025-SSA1-2021, *salud ambiental Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente, con respecto a las partículas suspendidas PM10 y PM2.5. Valores normados para la concentración de partículas suspendidas PM10 y PM2.5 en el aire ambiente, como medida de protección a la salud de la población*, Por esta misma razón es una actividad altamente regulada y de importancia para el proceso.

Asimismo, la erodabilidad del suelo depende de factores tales como: la actividad mecánica involucrada (paso de las llantas de vehículos), la cantidad de energía que es aplicada al camino (fuerza, velocidad y peso del vehículo), el tráfico vehicular, la velocidad del viento, el tamaño de partícula del suelo, la compactación y las condiciones climáticas (Thompson y Visser, 2007).

Esta actividad es considerada desde un punto de vista operativo como salida de agua del sistema, ya que se considera que todo el volumen aplicado se evaporará en algún momento y se perderá. Asimismo, esta actividad dentro del PCSC es importante ya que puede implicar el uso de grandes cantidades de agua dependiendo de la longitud de los caminos de acarreo usados y las tasas de evaporación del sitio.

En la práctica, existen productos que se pueden añadir al agua como supresores que ayudan a mejorar este proceso y a prolongar el tiempo que el agua es retenida en el suelo, algunos de estos productos son:

- Sales higroscópicas; como el cloruro de calcio, silicatos de sodio o cloruro de magnesio, que atrapan humedad del aire y lo retienen un mayor tiempo en el suelo.



- Surfactantes. Como algunos jabones o detergentes, que reducen la tensión superficial del agua y permiten una mayor humectación en el suelo.
- Cementos, que mezclan con el suelo para genera una superficie o cobertura distinta.
- Bitúmenes, compuestos derivados del petróleo.
- Películas de polímeros o membranas,

Algunos de estos compuestos pueden llegar a ser sumamente efectivos hasta en un 82% después de dos semanas de su aplicación como el cloruro de calcio (Kessell, 2002).

El riego de caminos fue considerado durante el desarrollo del MC, el MN y para el desarrollo e implementación de la herramienta a nivel industrial. Por lo cual, se planteó un muestreo con un infiltrómetro Cornell Sprinkle en los caminos del caso de estudio, para determinar tanto la velocidad de saturación de los caminos, como la cantidad de agua que era retenida en el suelo y la que escurría.

El muestreo fue propuesto para tener información directamente medida en el sitio, sin embargo, en los puntos de muestreo no fue posible insertar en el suelo el anillo del infiltrómetro debido a su dureza y alta compactación. La Figura 14 muestra los puntos propuestos para realizar las pruebas de infiltración en los caminos de acarreo empleados por la empresa.

Mediante una inspección para determinar las condiciones en las que se encontraban los caminos, y con base en la observación directa se concluyó que las características constructivas generaban condiciones de alta compactación por lo que todo el volumen de agua aplicado en riego o de lluvia se perdiera por evaporación o escurrimiento superficial y por lo tanto en estas áreas no se presentó un efecto de infiltración significativo. Cabe mencionar que los escurrimientos de los caminos son conducidos de forma que no tienen contacto con ninguna otra área de interés para la evaluación del indicador.

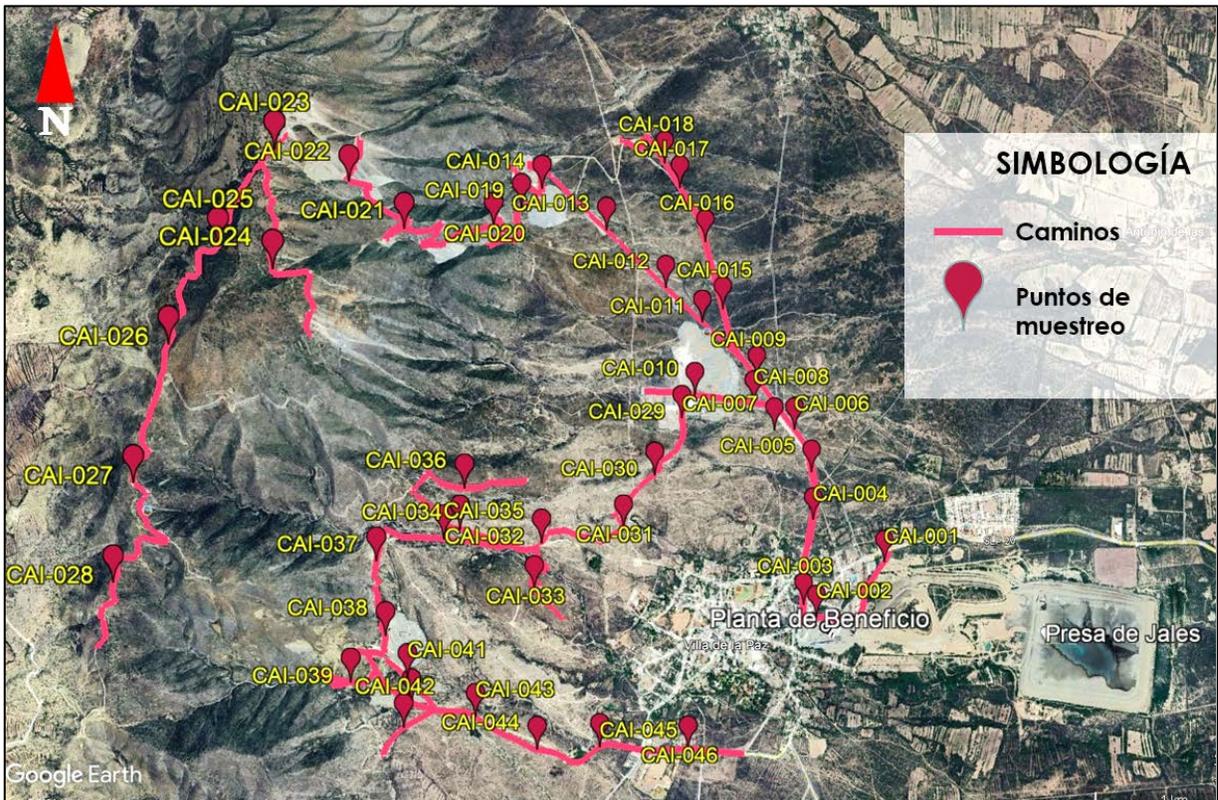


Figura 14. Puntos de muestreo de infiltración en caminos de acarreo

IV.2 Evaporación en plantas de beneficio

Mediante observación directa e recorridos realizados en la planta de beneficio del caso de estudio, se identificó que dentro de las etapas de molienda y flotación del PCSC existen pérdidas por la generación por evaporación en los molinos, hidrociclones y posiblemente en celdas de flotación.

Eso se puede entender si se analiza la pérdida de energía del sistema por la transformación irreversible de energía mecánica proporcionada por las celdas de flotación, los molinos, o los hidrociclones, convertida en movimiento por los rotores, bolas, bombas, etc.; y transferida como trabajo para mover el volumen de agua, aumentando su energía interna y aumentando las pérdidas por fricción reflejadas en un aumento de temperatura del agua (Bouchard et al., 2016; Hosseini et al., 2024)

En el caso de los molinos, se puede deber principalmente a la transferencia de energía cinética del molino a la pulpa y la energía transferida por los procesos de abrasión en donde se ha estimado que, del total de energía suministrada al molino, gran parte se pierde como transferencia de



calor. De esta forma la transferencia en forma de calor hacia la pulpa puede variar entre un 68% y 82%, dependiendo del tipo de molino, y la pérdida de energía en forma de evaporación de agua va desde el 1.2% para un molino de bolas, hasta 8.3% para un molino SAG (Bouchard et al., 2016)

IV.2.1. Estudio de Evaporación en etapa de flotación

La determinación de la evaporación en la etapa de flotación del beneficio de sulfuros de cobre se llevó a cabo en una celda Denver modelo D12 de capacidad de 2 L, a una velocidad de 1070 rpm. El diagrama de la celda empleada se muestra en la Figura 15. Se plantearon 2 distintos escenarios para poder observar cómo el efecto del burbujeo, la circulación y el movimiento son una adición de energía al sistema en la flotación, lo que provoca aumento de energía, aumento de temperatura y la pérdida de agua por evaporación.

Los escenarios planteados son los siguientes:

- 1) **Agua – Espumante:** En este escenario no se agregó mineral, ni activador, con el fin de tener una solución agua – espumante, considerando la misma cantidad de espumante empleada durante la flotación convencional (40 g/t de metil isobutil carbinol, MIBC).
- 2) **Agua:** Este escenario únicamente contempla el uso de agua, sin reactivos, ni mineral.

Ambos escenarios se realizaron simultáneamente para que la temperatura ambiental no fuese una variable más al momento de comparar las dos pruebas.

Al momento de realizar las pruebas el volumen aproximado ocupado de la celda fue de 1350 cm³, procurando que se llenara a la misma altura en todas las pruebas por igual y la superficie expuesta fuese la misma, como se muestra en la Figura 15.

Se realizaron 8 pruebas en las cuales se adicionó la misma cantidad de agua en ambas celdas (1330 ml) con el fin de generar la misma área de burbujeo (Figura 15).



Se emplearon dos celdas, Celda A y Celda B de 2 l de capacidad. Durante la experimentación la celda A fue empleada para llevar a cabo las pruebas en las que el fluido (solución o agua) se ponía en agitación y se le suministraba aire para la generación de burbujas, mientras que a la celda B no se le suministraba aire y se mantenía en reposo fuera del equipo, esto con el fin de cuantificar la evaporación en la mezcla en reposos y poder distinguir entre la evaporación generada por efectos de la flotación (E_{flo}) y evaporación por efectos del ambiente (E_e) por sí mismo.

Para simular las condiciones operativas en la flotación se añadió un esquema calculado de reactivos como si se tuviese 50% de sólidos, en donde se adicionó un espumante y un colector en el agua de las celdas, en concentraciones de 40 g/t de Metil Isobutil Carbinol (MIBC), empleado como espumante y 30 g/t de Xantato Isopropílico como colector.

Ambas celdas se encontraban expuestas a la misma temperatura ambiente, sin embargo, por efectos del calentamiento mecánico y el aumento de la energía en el sistema se esperaba que la solución con agitación aumentara su temperatura.

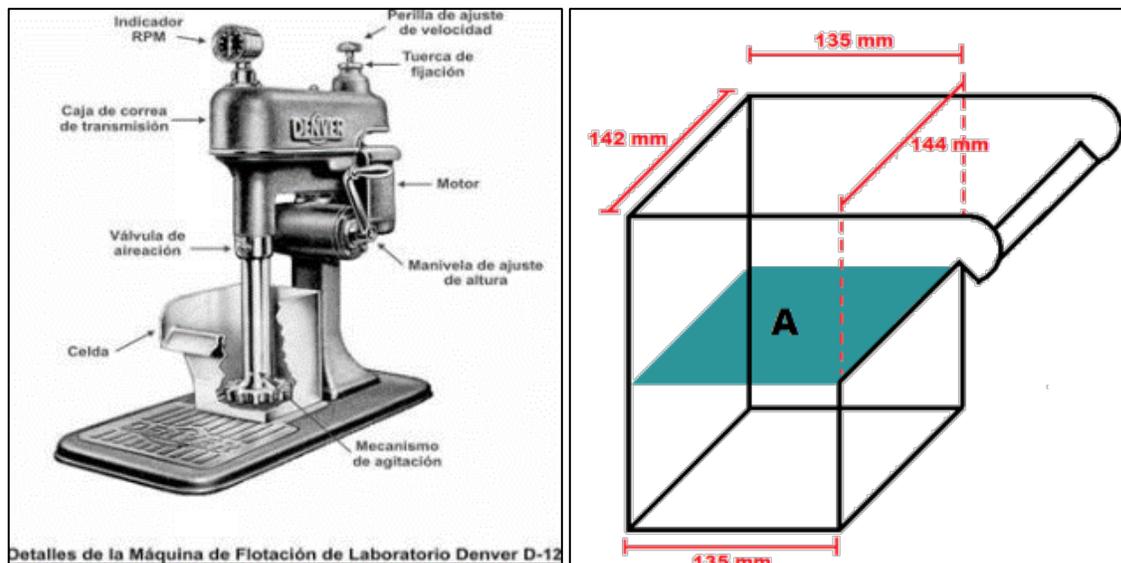


Figura 15. Especificaciones de celda de flotación Denver D-12

Para determinar la cantidad de agua pérdida por evaporación en ambas celdas, se pesó cada una de ellas junto con la mezcla antes y después de llevar a cabo la flotación. De esta manera es posible atribuir la diferencia de pesos a la cantidad de agua evaporada durante la prueba.



Con un termómetro se midió la temperatura inicial de las dos celdas en cada una de las pruebas. La prueba únicamente se llevaba a cabo si no existiera diferencia de temperatura.

La Figura 16 muestra el aumento de temperatura en todas las pruebas realizadas en la celda con agitación. La que estaba en reposo no mostró cambios significativos en la temperatura durante el tiempo de las pruebas, por lo que la temperatura inicial de cada prueba en la Figura 16 resultó ser la temperatura constante en la celda sin agitación durante todas las pruebas.

El aumento de la energía interna del sistema puede estar provocado por la agitación en conjunto con el burbujeo, lo que pueda llevar a un aumento de la temperatura del agua en la celda.

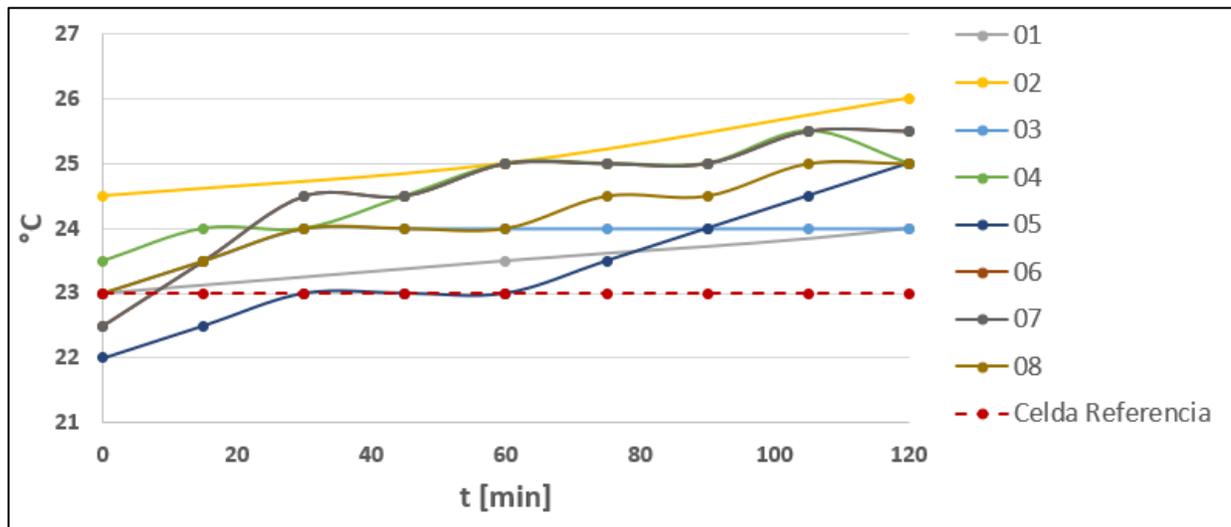


Figura 16. Temperatura de la celda en agitación y la celda empleada como referencia (sin agitación)

Tomando en cuenta los cambios de peso en las celdas, se calculó la tasa de evaporación para las pruebas con agitación y sin agitación. La Tabla 4 muestra las tasas de evaporación calculadas en mililitros por hora, la diferencia que en la evaporación por efectos asociados a la flotación y por último la columna normalizada evaporada, la cual discrimina el área de la celda y es expresada en milímetros de columna de agua por tiempo (mm/h).



Tabla 4. Tasas de evaporación en celda de laboratorio

Prueba	Evaporación con Agitación [ml/h]	Evaporación sin Agitación [ml/h]	Evaporación por flotación [ml/H]	Columna evaporada [mm/h]
1	11.12	1.81	9.31	0.48
2	10.00	2.25	7.75	0.40
3	10.00	1.50	8.50	0.44
4	11.00	2.25	8.75	0.45
5	9.50	0.75	8.75	0.45
6	9.50	1.50	8.00	0.41
7	12.50	1.50	11.00	0.56
8	12.25	2.25	10.00	0.51
Máx	12.50	2.25	11.00	0.56
Mín	9.50	0.75	7.75	0.40
SD	1.18	0.52	1.07	0.05
Media	10.73	1.72	9.00	0.46

La Figura 17 muestra una gráfica de barras con las tasas de evaporación en las celdas y la diferencia entre ellas. Tomando el valor de la media se puede observar que la evaporación generada por los efectos asociados a la etapa de flotación resulta ser 5.2 veces mayor. Lo que muestra que los equipos y las actividades de flotación están transfiriendo energía suficiente a la solución como para que se esté evaporando agua de las celdas de flotación, ya sea por calentamiento del equipo y que el agua esté funcionando a manera de refrigerante o bien que el burbujeo y el movimiento estén añadiendo energía al sistema elevando su temperatura.

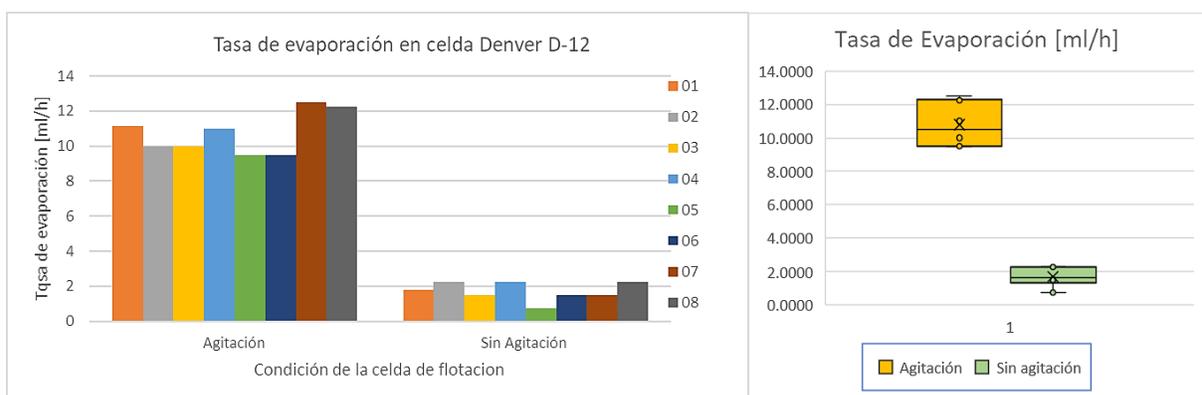


Figura 17. Tasa de evaporación en celdas con agitación y sin agitación (izq), rangos de los datos de evaporación (der).

A pesar de haber determinado la tasa de evaporación en ambas celdas, es importante considerar la aportación de las condiciones ambientales al



efecto de evaporación de agua, por lo que es necesario restar la tasa de evaporación de la celda B (E_{ambi}) a la tasa de evaporación de la celda A (E_{celda}), como se muestra en la Ecuación 5. El resultado obtenido será la tasa real de evaporación asociada a la transferencia de energía por efectos del movimiento, la temperatura del equipo, el burbujeo y la fricción ($E_{f_{celda}}$).

$$E_{f_{celda}} = E_{celda} - E_{ambi}$$

Ecuación 5

Los efectos de la pérdida de agua podrían estar explicados desde el punto de vista termodinámico. La primera ley de la termodinámica establece que el cambio en la energía interna de un sistema es igual al calor neto que se le transfiere, Q , más el trabajo que se hace sobre él, W , de forma que queda como la Ecuación 6.

$$\Delta U = Q + W$$

Ecuación 6

Tomando en cuenta que la energía interna del sistema también es igual a la suma de energía cinética y potencial, se puede relacionar que el trabajo aplicado a la celda de flotación por medio del rotor aumenta la energía del sistema, en donde parte de ella se convierte en energía cinética, en energía interna específica del líquido y otra parte en calor, lo que se puede ver reflejado en conjunto en la agitación que tiene el líquido, el aumento de temperatura y la disminución del volumen por evaporación.

Por último, para obtener un valor independiente al área de la celda y poder extrapolarlo, la tasa real de evaporación ($E_{f_{celda}}$) debe ser dividida entre el área de la celda ($A = 193.04 \text{ cm}^2$), y considerar una equivalencia volumétrica de $1 \text{ mL} = 1 \text{ cm}^3$, para poder obtener la tasa de evaporación en términos de una columna de agua, con unidades de milímetros/hora, como se muestra en la Ecuación 7. De esta manera el valor puede ser extrapolado a una mayor área y con ello determinar la cantidad de agua evaporada.

$$E_{f_{flo}} = \frac{E_{f_{celda}}}{A}$$

Ecuación 7

El valor promedio de evaporación en términos de columna de agua de 0.46 mm/h ($E_{f_{flo}}$) para las celas de flotación, a una temperatura ambiente de 25°C . Conociendo el valor $E_{f_{flo}}$ en milímetros de altura se puede obtener el



valor de la tasa por día, para ser empleado en el cálculo de un circuito de flotación que se encuentre operando 24 h. El valor obtenido fue

de $E_{f_{flo}}=11.04$ mm/d, que al considerar la unidad estándar de área (1 m^2) se obtiene una tasa de evaporación diaria por unidad de área de $11.04 \text{ L/m}^2\text{d}$. Este valor fue empleado en la estimación de los datos del caso de estudio.

IV.2.2. Cálculo de Evaporación en celdas de flotación para el caso de estudio

En el caso de estudio se realizó una aproximación para determinar la pérdida por evaporación en el circuito de flotación de sulfuros, la cual tiene un arreglo de 21 celdas para llevar a cabo el proceso, en donde 10 celdas son para el proceso primario, 8 para el agotativo y 3 para limpias.

Para la aproximación se consideró que la pérdida sería igual en las 21 celdas. No se consideró la temperatura inicial de la pulpa en sitio, así como tampoco se consideró la pérdida por evaporación que pueda provocar el burbujeo de aire al momento de ascender por la pulpa.

Cada una de celdas tiene un área disponible para llevar a cabo dicho proceso de 6.62 m^2 . Las celdas de flotación trabajan 24 h al día y tomando como referencia el valor de la evaporación real obtenido en laboratorio, en términos de columna de agua ($E_{f_{flo}}$), es posible obtener una primera aproximación a la cantidad de agua que se pierde por evaporación durante este proceso haciendo uso de la Ecuación 8.

$$E_{f_{flo}} = A_{f_{flo,cel}} \cdot N_{f_{flo,cel}} \cdot \left(\frac{E_{f_{flo}}}{1000} \right) \cdot t_{f_{flo,cel}}$$

Ecuación 8

En donde:

$E_{f_{flo}}$: Volumen de Agua Azul en pérdida por evaporación en las celdas de flotación (m^3)

$N_{f_{flo,cel}}$: Número de celdas empleadas en el circuito de flotación (adimensional)

$E_{f_{flo}}$: Tasa de evaporación determinado para circuito de celdas de flotación (mm/h)

$A_{f_{flo,cel}}$: Área de exposición de una celda unitaria del circuito de flotación (m^2)

$t_{f_{flo,cel}}$: tiempo de operación diario del circuito de flotación (h)



De esta manera y sustituyendo los datos se obtiene un valor de 1.53 m³/d de evaporación en el banco de celdas empleados para llevar a cabo la flotación, lo que representaría un total de 560.19 m³ anuales, calculado en la Ecuación 9.

$$E_{Flotacion} = 6.62m^2 \cdot 21 \cdot \frac{0.46 \frac{mm}{h}}{1000} \cdot 24 \frac{h}{día}$$

Ecuación 9

$$E_{Flotacion} = 1.53 \frac{m^3}{día}$$

Ecuación 10

Considerando que es necesario añadir al proceso un volumen de agua aproximado a 5962 m³/d, proveniente del tiro de abastecimiento de agua subterránea, la pérdida por evaporación en las celdas de flotación representaría el 0.03% de ese volumen añadido diariamente.

Cabe mencionar que la experimentación realizada se llevó a cabo a temperaturas entre 22 y 25 °C (temperatura ambiente), mientras que se tienen registros de mediciones en planta de los flujos de salida de los molinos y la pulpa de las celdas de flotación que van desde 33 °C hasta los 41 °C, lo que podría aumentar magnitud de la tasa de evaporación. Además la pérdida por evaporación depende de otros factores como la humedad, la presión atmosférica y la velocidad del viento (Bouchard et al., 2016).

IV.2.1. Evaporación en molinos

Durante el PCSC, la etapa que demanda la mayor cantidad de energía es la molienda del mineral debido a que solo del 1 al 2% de la energía suministrada a los molinos en esta etapa es aprovechada como trabajo para la reducción del tamaño de las partículas y mucha de la energía la consume el mismo equipo, se transfiere en movimiento que no es aprovechado para la fractura del material o se pierde en forma de calor (Wills y Napier-Munn, 2006).

Parte de esa energía es transferida al agua dentro de los molinos en forma de calor, provocando que aumente su temperatura y genere pérdidas por evaporación. Mediante balances de energía se ha estimado la fracción de la energía suministrada al molino que es transferida al aire mediante la evaporación del agua, siendo de 8.3% para los molinos SAG y de 1,2% para los molinos de bolas (Bouchard et al., 2016)



Dentro de este trabajo de investigación no se estimó la cantidad de agua evaporada que se pierda dentro del circuito de mollienda para el caso de estudio. Sin embargo, es importante considerar que este flujo de salida puede ser agregado al módulo mollienda en caso de contar con la información siendo un aporte para el cálculo de la HHA del módulo.

Las pérdidas por evaporación de los circuitos de mollienda tienen en potencial de ser una salida de agua del proceso considerable tomando en cuenta que las pérdidas están en función de la energía y esta etapa es la de mayor demanda energética. Asimismo, entre más elevada sea la temperatura del agua que es añadida a esta etapa podría incrementar la cantidad de agua evaporada.

IV.3 Evaporación en piletas y presas de jales

Comúnmente las unidades minero-metalúrgicas emplean piletas para contener los volúmenes de agua fresca y agua recuperada para sus operaciones. La capacidad, forma y cantidad de las piletas depende de las necesidades operativas de cada sitio, sin embargo, la gran mayoría de estas piletas o reservorios de agua se encuentran expuestos a las condiciones climáticas y por ese motivo parte del volumen contenido se pierde por evaporación.

Naturalmente se tiene un concepto de que la infraestructura que almacena agua no la consume, sin embargo, las piletas y reservorios son consumidores de agua debido al espejo de agua que se forma en ellos, dejando expuesto el líquido a las condiciones climáticas.

El análisis de las principales actividades del PCSC a través del MC permitió identificar que en los módulos *Manejo de Agua* y *Presa de Jales* existía infraestructura dedicada al almacenamiento del recurso hídrico que no se contempla generalmente en los balances de agua y en los cuales la medición de la evaporación no puede ser medida directamente por lo que se hacen estimaciones a través de tanques evaporímetros de estaciones meteorológicas más cercanas o *in-situ*. Es importante remarcar que existe evidencia que las mediciones de los evaporímetros suelen ser mayores al volumen de evaporación entre mayor sea el reservorio de agua, como en el caso de lagos o lagunas debido a que la parte externa del evaporímetro está expuesta al aire y al sol y el tanque evaporímetro tiene menor capacidad de almacenar calor (Lowe et al., 2009)

La estimación de la evaporación a través de tanques evaporímetros (*pan evaporation en inglés*), es una medición que permite integrar los efectos de



los elementos climáticos como la temperatura, la humedad, la precipitación de lluvia, la radiación solar y el viento en una medición de la columna de agua perdida diariamente por estos efectos. Este equipo se encuentra estandarizado como evaporímetro de clase A por la NMX-AA-166/1-SCFI-2013, el cual consiste en un cilindro de un diámetro de 120.7 cm y una profundidad de 25 cm, reposado sobre unas tablas ventiladas de madera, como se muestra en la Figura 18.



Figura 18. Tanque evaporímetro Clase A.³

Cuando se cuenta con un tanque evaporímetro en el sitio de estudio, es posible relacionar los resultados de columna de agua evaporada diariamente (mm/d) y multiplicarlos por el área (m²) de las piletas, reservorios y cuerpos de agua empleados en el PCSC, para obtener el volumen perdido diariamente por evaporación (m³/d). Actualmente existe poca información disponible acerca de la cantidad de agua perdida en forma de evaporación en piletas y presas de jales y por lo resulta adecuado medir la evaporación y la precipitación de forma local para determinar las tasas de evaporación de las superficies expuestas.

Como se mencionó en capítulos anteriores, parte del agua del PCSC es recuperada en la presa de jales y en la etapa de separación sólido-líquido

³ Tomado de (Karbasi et al., 2024).



para de nuevo ser usados dentro del proceso. Esta recuperación del proceso significa que también solutos y partículas en general pueden ser recuperados junto con el volumen de agua. Esta recirculación podría llevar a que la concentración de algunos solutos incrementara provocando que las propiedades coligativas del agua se vieran afectadas, es decir, que la cantidad de solutos en el agua pudiera afectar la presión de vapor o la temperatura de ebullición y que a su vez tuviera un efecto en la disminución en la tasa de evaporación cuando está expuesta a los factores climáticos. Por esa razón se realizaron mediciones en el sitio de estudio con 3 evaporímetros simultáneamente para determinar si la calidad del agua en el PCSC afecta la tasa de evaporación del agua.

Esta prueba consistió en la instalación de 3 evaporímetros Clase A según lo estandarizado, en donde cada uno de ellos fue rellenado con una calidad de agua distinto. El primer evaporímetro fue llenado con agua extraída de la fuente de abastecimiento subterránea, con la que comúnmente se repone el agua consumida por el proceso. El segundo tanque evaporímetro se llenó con una mezcla de agua fresca y agua recuperada del proceso, tomada de una pileta receptora que se emplea para almacenar este tipo de agua para posteriormente emplearse en el proceso, a este segundo tipo se le denominó "Planta". Por último, el tercer tanque evaporímetro fue llenado con agua recuperada directamente de la presa de jales.

Para llevar a cabo la prueba se realizaron mediciones de la columna de agua evaporada con un tornillo milimétrico. Para la obtención de datos, se midió la altura de los 3 tanques evaporímetros el mismo día y a la misma. Se realizaron 35 mediciones de en un periodo que abarca del mes de mayo al mes de julio. La Tabla 5 muestra los resultados de las mediciones tomadas simultáneamente para los 3 tanques evaporímetros durante el periodo evaluado.

Se puede observar dentro de la Tabla 5 que los datos son similares, pero no iguales, tomando como punto de referencia el Agua Fresca, ya que posiblemente la calidad del agua este teniendo algún efecto sobre la tasa de evaporación. Por esa razón, se planteó hacer un análisis de varianza y una prueba de medias de Tukey para determinar si los datos son estadísticamente similares entre si o si existe evidencia de que alguno de ellos es distinto.

Los resultados del análisis de varianza se pueden observar en la Tabla 5, en donde usando un valor de alfa de 0.05 se obtuvo un valor de $P = 0.9349$ lo que significa que las diferencias entre las medias no son estadísticamente significativas. La Tabla 5 muestra los resultados de la prueba de medias de



Tukey en donde se observa que el valor de q de cada grupo de encuentra muy por debajo del valor de q -critica lo que sugiera que no hay diferencia estadística entre grupos de medias, por lo que se concluye que la calidad del agua no es un factor que influya en la evaporación del agua.

Tabla 5. Mediciones y prueba diferencia significativa de Tukey de tanques evaporímetros.

Evaporímetros [mm/día]				Anova			
No.	Agua Fresca (A)	Agua de Proceso (B)	Recuperación (C)	A	B	C	
1	4.98	4.84	5.36	SS	249.61	222.89	210.25
2	7.02	6.92	7.83	Error estandar	0.44	0.44	0.44
3	7.94	8.87	8.37	Alpha	0.05	0.05	0.05
4	6.16	5.25	3.15				
5	10.75	7.78	7.82				
6	2.37	5.69	6.93	Grados libertad	104		
7	4.73	3.22	4.97	F	0.0672		
8	0.33	0.57	0.72	p	0.9349		
9	7.02	4.97	4.96				
10	5.83	8.36	7.17				
11	4.07	2.6	4.89				
12	3.57	4.97	3.75				
13	2.44	2.4	1.56				
14	3.3	4.49	4.74				
15	4.67	5.59	4.29				
16	6.82	5.49	7.57				
17	5.6	7.02	6.16				
18	6.26	6.45	5.59				
19	13.15	6.49	8.01				
20	3.73	6.59	7.66				
21	6.69	3.23	4.89				
22	7.03	4.26	6.36				
23	4.18	5.04	7.79				
24	8.3	0.85	10.91				
25	2.78	3.85	2.38				
26	7.44	11.99	7.08				
27	5.04	4.46	3.5				
28	4.05	3.72	7.34				
29	4.49	8.84	1.01				
30	4.18	9.4	2.23				
31	8.83	4.5	5.13				
32	2.34	6.07	6.18				
33	6.34	5.55	2.1				
34	1.01	0.8	0.66				
35	9.67	9.22	6.22				
Sumatoria	193.11	190.34	185.28				
Promedio	5.52	5.44	5.29				
Varianza	7.34	6.56	6.18				
SS	249.61	222.89	210.25				
Máximo	0.33	0.57	0.66				
Mínimo	13.15	11.99	10.91				
				Prueba diferencia significativa de Tukey			
				A-B	A-C	B-C	
				Media	5.5174	5.4383	5.2937
				Error estandar	0.4373	0.4373	0.4373
				valor de p	0.9910	0.9305	0.9703
				media-crit	1.4709	1.4709	1.4709
				q-stat	0.1810	0.5116	0.3306
					Grados Lib.	102	
					n	35	
					alpha	0.05	
					q-critico	3.3634	



V. Estudio de factores hidrológicos en una presa de jales

V.1. Condiciones de operación de una presa de jales

La presa de jales es un caso particular de reservorio de agua debido a que es cuerpo que almacena, retiene, evapora y capta agua, además de ser un depósito de residuos mineros (BAAR, 2008).

Esta estructura se encuentra diseñada para retener tanto los residuos, como agua, esto debido a que comúnmente después del proceso de flotación los jales son enviados a la presa de jales con un contenido aproximado de 40 a 60 por ciento de sólidos (Bleiwass, 2012a). Ya que es la principal fuente de recuperación de agua del PCSC, resulta relevante determinar el comportamiento hidrológico para tener un marco de referencia sobre los parámetros ambientales y operativos que rigen la recuperación y el manejo del agua en la presa para mejorar le gestión del agua en el proceso. Por lo tanto, existe una necesidad de cuantificar/estimara los factores hidrológicos y su comportamiento en las presas de jales.

La Figura 19 muestra un esquema de las distintas áreas y elemento que conforman el comportamiento hidrológico en una presa de jales.

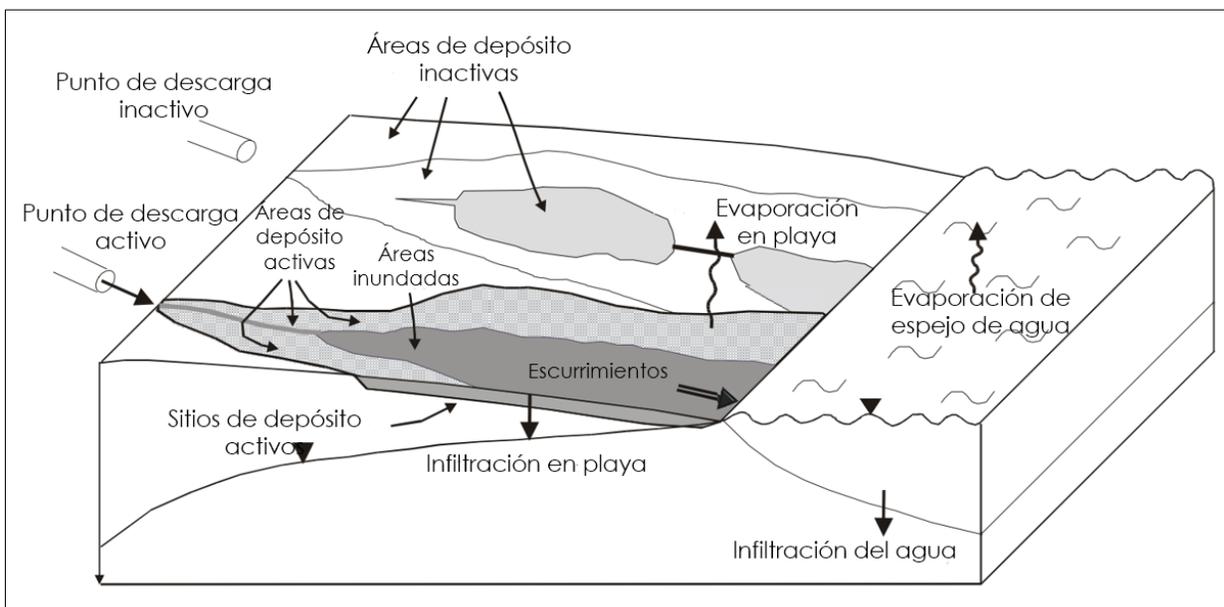


Figura 19. Diagrama esquemático del depósito de jales y los componentes asociados ⁴

⁴ modificado al español de Wels y Robertson, 2003)



V.2. Recuperación de Agua

La recuperación de agua en la presa de jales se refiere al volumen de agua que es posible volver a utilizar en el proceso, este es un volumen que constantemente debe de ser manejado en la presa de jales (Gunson, 2013)

Típicamente en las presas de jales el agua es recuperada por estabilidad mecánica de la presa y por tratar de reutilizar dentro del proceso la mayor cantidad de agua posible. Para una mejor práctica respecto al manejo de las presas de jales, la mayor cantidad de agua posible debería de ser recuperada en las presas para reusarla en los procesos metalúrgicos (Barrera et al., 2015)

Como lo muestra la Figura 19 una vez que los sólidos son depositados en la presa, por sedimentación se van depositando en capas, generando un área húmeda o saturada que va generando un escurrimiento de agua hacia el centro de la presa de jales en donde puede ser recuperada por el principio de decantación.

La fracción de los materiales más gruesos de los jales se encuentran cerca de los sitios de depósito de los jales mientras que el material más fino se encuentra cerca del espejo de agua de recuperación (Wels y Robertson, 2003) esto debido a que las partículas grandes se depositan relativamente rápido y a las partículas más finas les toma más tiempo (Wills y Napier-Munn, 2006)

Algunos sistemas para recuperación del agua de los jales son mediante la construcción de diques o cortinas con el material en donde el agua es recuperada en un extremo y el material es depositado en donde se llega a recuperar el 65-75% del contenido de agua; otro sistema es el espesamiento de los jales el cual consiste en reducir el contenido de agua previo al depósito de los jales con una recuperación del 80% del agua también existen otros métodos en los cuales los jales son filtrados antes de ser depositados para recuperar la mayor cantidad de agua posible. (Cacciuttolo y Valenzuela, 2022)

V.3. Pérdida intersticial del agua

La retención de agua en los jales es uno de los volúmenes importantes a considerar en el manejo del agua en el PCSC y representa una de los dos formas en las que principalmente se pierde agua en las presas de jales (Cacciuttolo y Valenzuela, 2022) en donde puede llegar a ser de hasta 52% de total del volumen de agua durante el depósito de los jales en la presa (Wels



y Robertson, 2003). En otros casos este volumen ha sido estimado en un 30% del total del volumen descargado a la presa (Singh, 2010)

Este efecto se da ya dentro del espacio poroso de los jales ya que el agua se queda atrapada, y por lo tanto una fracción del volumen no podrá ser recuperado. La forma de reducir esta pérdida es reduciendo el volumen mediante filtración o mediante algún mecanismo que haga que los jales sean exprimidos un poco más y aumente su recuperación, como menciono en el apartado V.2.

V.4. Interacción con el medio ambiente

Es importante considerar que la presa de jales se encuentra sujeta a las condiciones climáticas, ambientales y a los efectos que estas puedan generar. Desde el punto de vista hídrico, esto resulta de suma importancia ya que estas estructuras tienen la capacidad de ganar o de perder agua por efectos de la evaporación o de la precipitación. Las dimensiones de estas estructuras generan escenarios en donde el volumen de la evaporación y el de la precipitación se convierten en volúmenes importantes debido a la gran cantidad de superficie expuesta que en su momento tendrá interacción con el medio, a mayor superficie, mayor evaporación y captación

Esta interacción resulta de suma importancia para el proceso ya que significa que a través de la precipitación se puede obtener agua para el proceso, pero que por efectos de la evaporación también se puede perder.

V.5. Factores de evaporación

Los distintos componentes de la presa de jales que se muestran en la Figura 19, generan diferentes condiciones superficiales, principalmente dadas por la cantidad de agua que existe en ellas y su relación con el porcentaje de sólidos. Se ha estudiado que estas condiciones generan distintos efectos dependiendo de la granulometría del material (Wels y Robertson, 2003), en materiales gruesos la evaporación a inicios del depósito de jales es mayor que en los materiales finos, y cuando el asentamiento de los jales está más consolidado los materiales finos dejan mayor cantidad de agua disponible por la forma en la que se van ocupando los espacios al momento de la sedimentación.

Estas condiciones distintas del depósito de jales y tomando en cuenta el espejo de agua en la presa, generan 3 áreas distintas que deben de tomarse en cuenta para estimar lo mejor posible la evaporación en la presa de jales.



Las mediciones de la evaporación con tanques evaporímetros proporciona información sobre la evaporación en un espejo de agua, sin embargo, existen la posibilidad de que las superficies puedan contener agua en distinta proporción. Un ejemplo son los lodos, los cuales contienen cierta cantidad de agua pero al tener una superficie de lodo el comportamiento de la evaporación no será igual a la evaporación en un espejo de agua, principalmente por la cantidad de sólidos de la superficie. Es por esa razón que no es posible usar la información del taque evaporímetro de forma directa, ya que el evaporímetro es un espejo de agua y se tiene que usar un factor de evaporación que represente la salida de agua de ese material. Tomando como referencia del valor del evaporímetro, este valor se expresa de 0 a 1 en donde 1 es igual al valor obtenido de tanque evaporímetro y 0 superficie en donde no contengan agua.

Cada una de las áreas formadas en la presa tiene un factor de evaporación correspondiente que depende de la evaporación diaria, es decir, es una fracción de la evaporación si se considera que el espejo de agua tiene un factor de evaporación de 1 dado que se asemeja a las condiciones del evaporímetro y conforme se aumente el porcentaje de sólidos disminuirá este factor.

Se consideró que la playa húmeda tiene un factor de 0.6 semejante al porcentaje de sólidos de los jales cuando son depositados (60% sólidos) y la playa seca de 0.2 por el rango aproximado de saturación del material. Para obtener la evaporación en cada una de las áreas es necesario multiplicar el factor correspondiente por el valor diario de la evaporación y obtener así la evaporación de esa área.

Una consideración importante es que para realizar una estimación precisa es necesario conocer el área y esta se encuentra sujeta al dinamismo de la operación en donde continuamente están cambiando las condiciones del depósito de jales en donde a su vez cambian las áreas de playas y el espejo de agua y por lo tanto es necesario establecer valor continuo o estimado estático de estas condiciones para la presa de jales.

La Figura 20 muestra la zonificación de la presa de jales mediante dos imágenes multiespectrales capturadas en dos meses distintos, en donde se puede apreciar el agua y las zonas más húmedas de la presa haciendo un arreglo de bandas. Este arreglo consiste en sustituir bandas del espectro RGB (término en inglés para rojo, verde y azul) en donde se sustituyó la banda del infrarrojo cercano por el rojo, el rojo por el verde, y por último el verde en la



banda del azul. Con lo cual es posible destacar la zona en donde esta presente el agua para comenzar a notar una zonificación en la presa de jales.

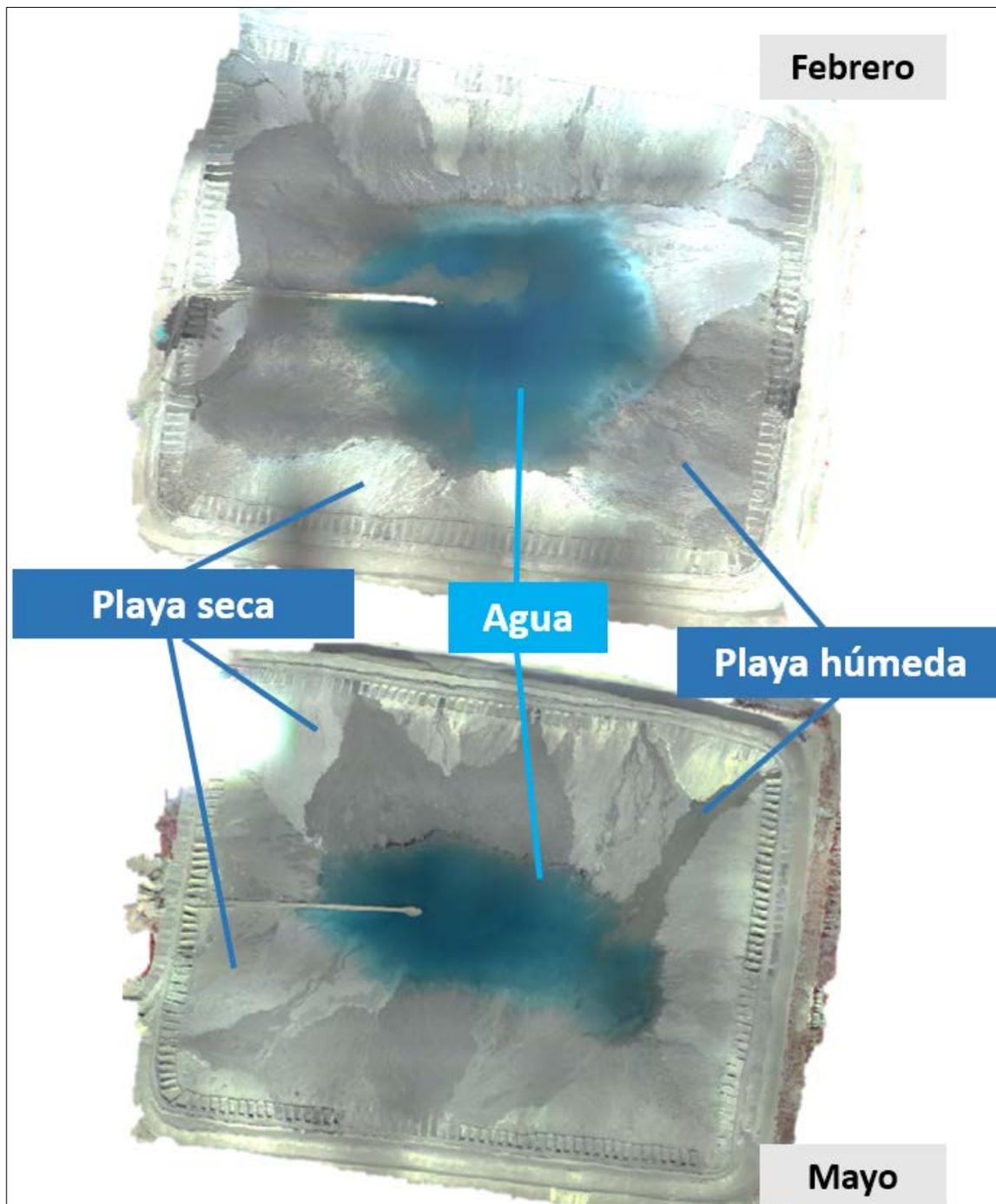


Figura 20. Zonificación en la presa de jales, (imagen multiespectral acomodado de banda: IRC, Rojo y Verde).



V.6. Infiltración

En el caso de estudio evaluado, al igual que en cualquier otro sitio, la infiltración de la presa de jales podría suceder de dos formas. La primera es la infiltración de la precipitación pluvial dentro de la misma presa y la segunda es el potencial mecanismo de infiltración dado por el agua contenido en la presa de jales hacia el subsuelo (Cacciuttolo y Valenzuela, 2022).

En el caso hacia el subsuelo, se descarta la idea de la infiltración debido a que la empresa cuenta con dos pozos de monitoreo aguas abajo de la ubicación de la presa en los cuales no se tiene registro alguno de que presenten agua, lo que indica que no hay flujo por infiltración.

En el caso de la infiltración superficial de los jales, se utilizó un infiltrómetro para medir la infiltración en las distintas superficies de los residuos (taludes, cresta y playa) para determinar el momento y la velocidad de los escurrimientos generados.

Para realizar estas mediciones se empleó un infiltrómetro Cornell Sprinkle (Ogden et al., 1997), el cual funciona como un simulador de lluvia fijado sobre un anillo de metal que se introduce en la superficie de los jales a una profundidad de 15 a 20 cm desde la altura rasante, para separar la parcela mediante las paredes del anillo. El agua es adicionada por la parte superior simulando diferentes intensidades de lluvia y cuando el suelo se satura de agua y comienza a acumularse el líquido en la superficie es recuperado para su medición como se muestra en la Figura 21.

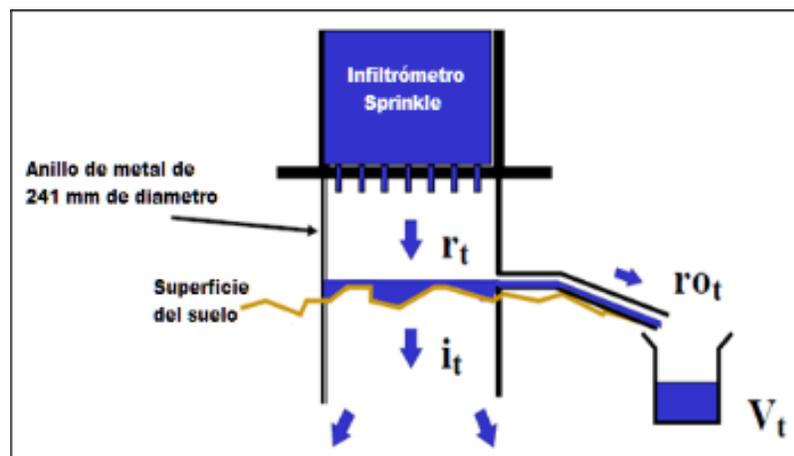


Figura 21. Esquema de funcionamiento del infiltrómetro Cornell Sprinkle.



Para determinar la infiltración es importante tomar en cuenta la precipitación a simular y por eso es necesario conocer los datos históricos del sitio para definir eventos con periodos de retorno largos (100 años) como lo marca la NOM-141-SEMARNAT-2003 para las presas jales. Esto con el fin de para poder observar cómo se comportarían los jales bajo tales condiciones simuladas. La Tabla 6 muestra las intensidades de lluvia que fueron simuladas en la presa de jales. Los valores fueron tomados de las referencias que tiene la secretaria de Comunicaciones y Transportes (SCT) para las tormentas de diseño de 100 años aproximadamente para las duraciones de 5, 10 y 60 minutos.

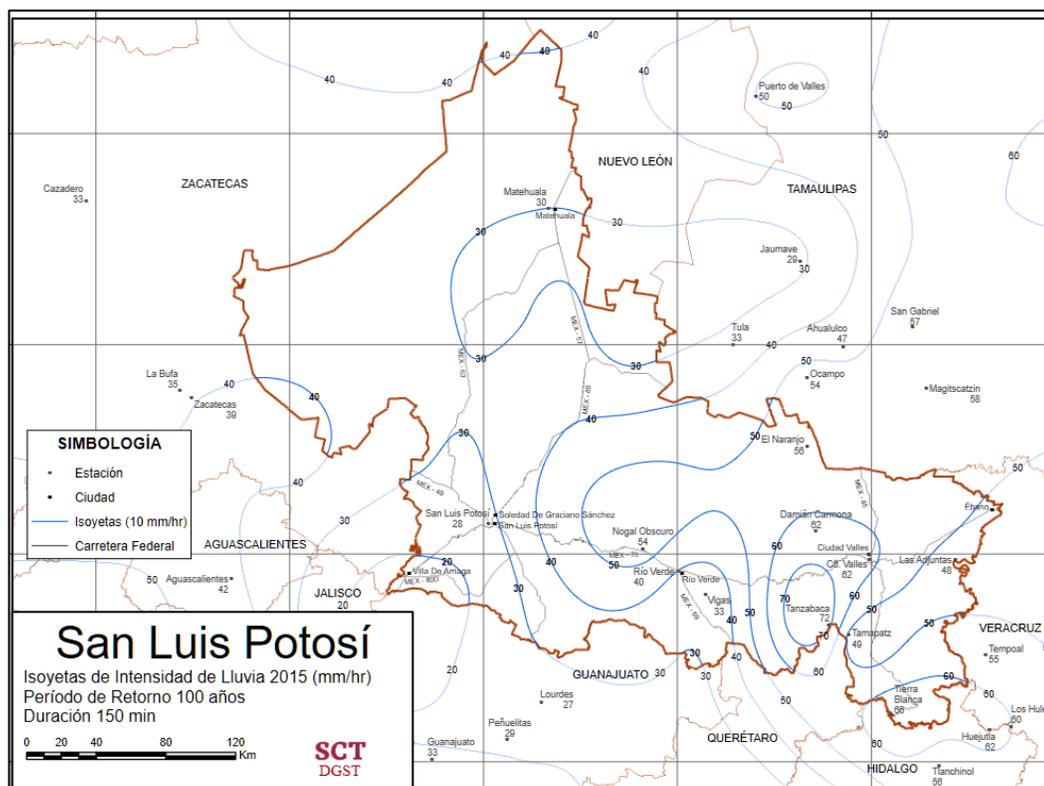


Figura 22. Ejemplo de los mapas de isoyetas de intensidad de lluvia de la SCT para el estado de San Luis Potosí.

Tabla 6. Parámetros de tormenta de diseño para pruebas de infiltración.

Duración de la tormenta (min)	Intensidades de Lluvia (mm/h)	Duración (min)
30	200	5
	150	10
	60	60



La Figura 23 muestra los puntos de muestreo en se realizaron las simulaciones de lluvia dentro de la presa de jales para determinar la infiltración.

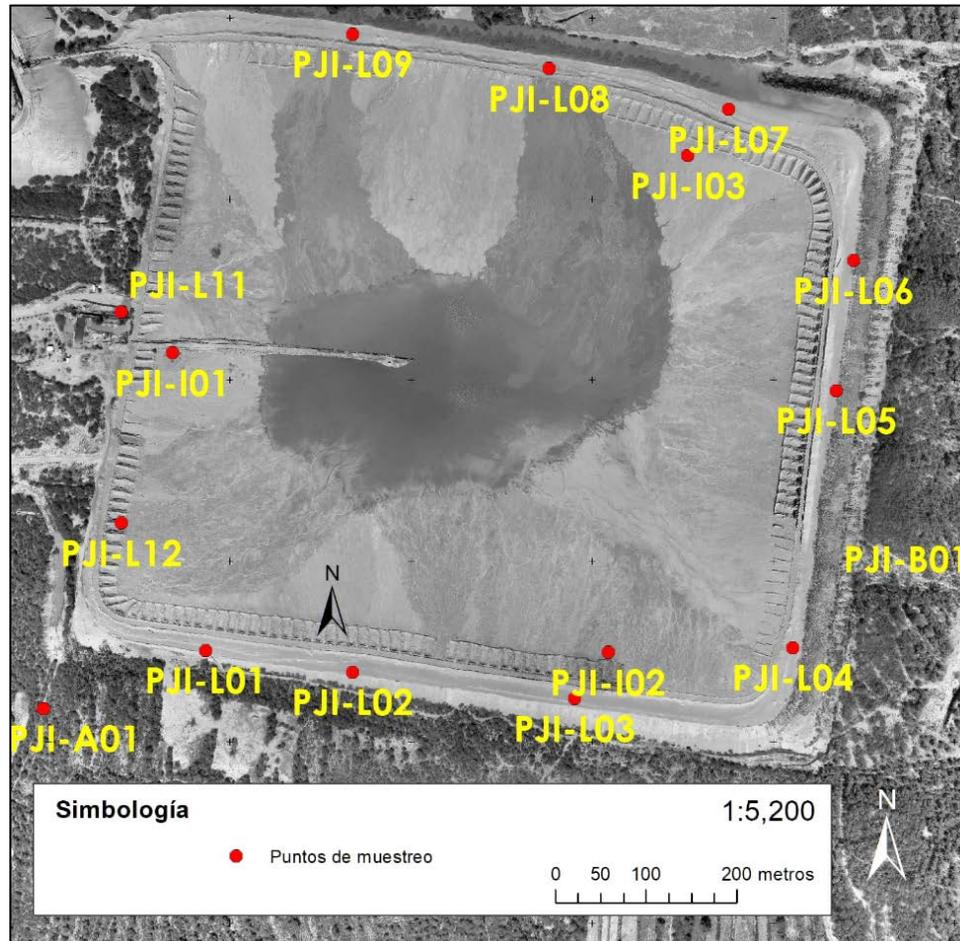


Figura 23. Puntos de muestreo de infiltración en la presa de jales

Se tomaron dos puntos como de referencia el suelo de las zonas aledañas naturales a la presa de jales. Un punto fue tomado antes de la presa de jales en la dirección del flujo de las escorrentías (PJI-A01) y el otro punto fue tomado después de la presa de jales (PJI-B01, esto con el fin de ver si existe una diferencia con la infiltración del terreno respecto a los jales.

La Figura 24 muestra el porcentaje de escurrimiento en los puntos fuera de la presa de jales en donde es posible observar que las pruebas realizadas aguas arriba (PJI-A01) con una tasa de intensidad de lluvia de 150 y 200 m/h (tormentas de diseño) generaron escurrimiento entre los 5 y los 7 minutos, y el porcentaje de escurrimiento a lo largo del tiempo llegó a estar en un rango del 45 % al 60 %, esto principalmente generado por el Horizonte A del suelo y la



vegetación, como se puede observar en la Figura 25 (izq). Por otro lado, las pruebas realizadas aguas abajo mostraron un comportamiento similar en donde el porcentaje de escurrimiento a tiempos mayores a 12 minutos alcanzó el 90% del volumen de agua aplicado. Eso significa que el suelo aguas abajo tiene una capacidad de capacidad de retención mayor del agua en su estructura, lo que provoca que una vez saturado el suelo va a generar escurrimientos prácticamente del 90% del agua que provenga de la precipitación, cuando la cantidad de agua sea similar a la simulada.

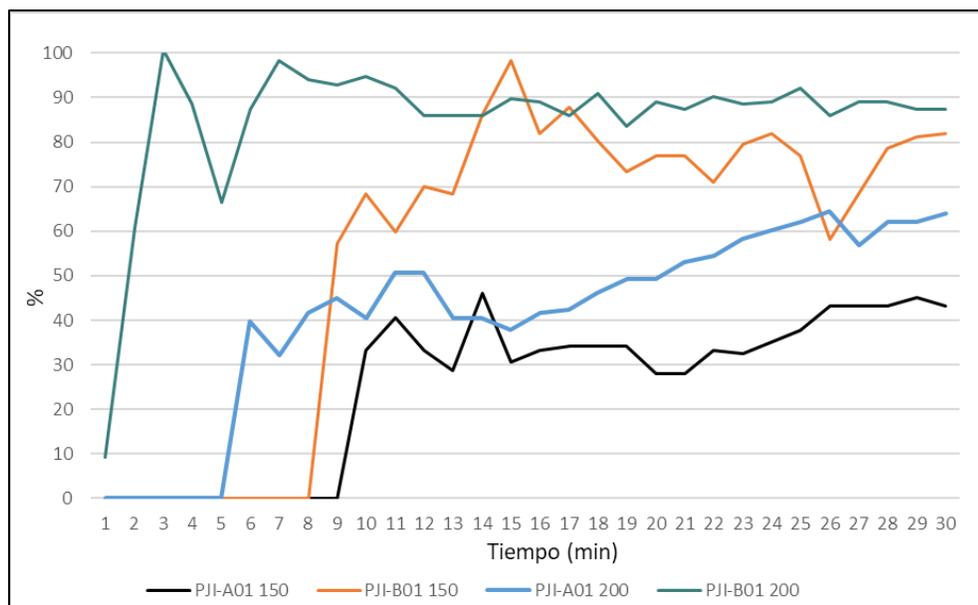


Figura 24. Porcentaje de escurrimiento de los puntos fuera de la presa de jales

Asimismo, se realizaron pruebas de infiltración en los taludes de la presa de jales, con el fin de conocer la respuesta hidrológica del material ante una tormenta de diseño. Para esto, se tomaron 12 puntos distribuidos en los 4 taludes de la presa de jales como se muestra en la Figura 23 en los cuales se realizaron pruebas con las intensidades de la Tabla 6.

Los resultados obtenidos de las pruebas de infiltración mostraron que la estructura que forma las cortinas de la presa de jales (talud) en ninguno de los tres escenarios propuestos genera escurrimientos, incluso en las pruebas realizadas con tormentas de diseño de 200 mm/h, no se obtuvieron escurrimientos lo que significa que el talud tiene un importante potencial de infiltración.



Cuando se verificó el perfil de escurrimiento de las pruebas no era posible distinguir el volumen de escurrimiento de la humedad del material, como se observa en la Figura 25 (derecha), en comparación con el perfil de humedad de la prueba aguas arriba en suelo vegetal (izquierda). Esto significa que el agua no queda retenida en el material debido principalmente a factores como el grado de compactación y la granulometría.



Figura 25. Perfil de infiltración en horizonte A de suelo aguas arriba de la presa de jales (izq) y perfil sin definición en jales mineros (der)

Algo que es importante remarcar es que en los puntos que las infiltraciones de 60 mm/h no presentaron escurrimientos, eran zonas relativamente de reciente depósito de jales, en cambio el punto PJI-I-001 se encuentra ubicado en donde en ese nivel los jales llevan más tiempo depositados y se puede observar cómo estaba formado por un material más consolidado debió a que las 3 simulaciones (60,150 y 200 mm/h) inician con escurrimientos muy abruptos y se estabilizan casi en el 90% de la precipitación aplicada, es decir, casi todo el volumen de agua que fue aplicado se recuperó por salida, como se muestra en la Figura 26. En las zonas en donde los jales han sido depositados recientemente el porcentaje de escurrimiento varía en un rango del 20% al 60%..

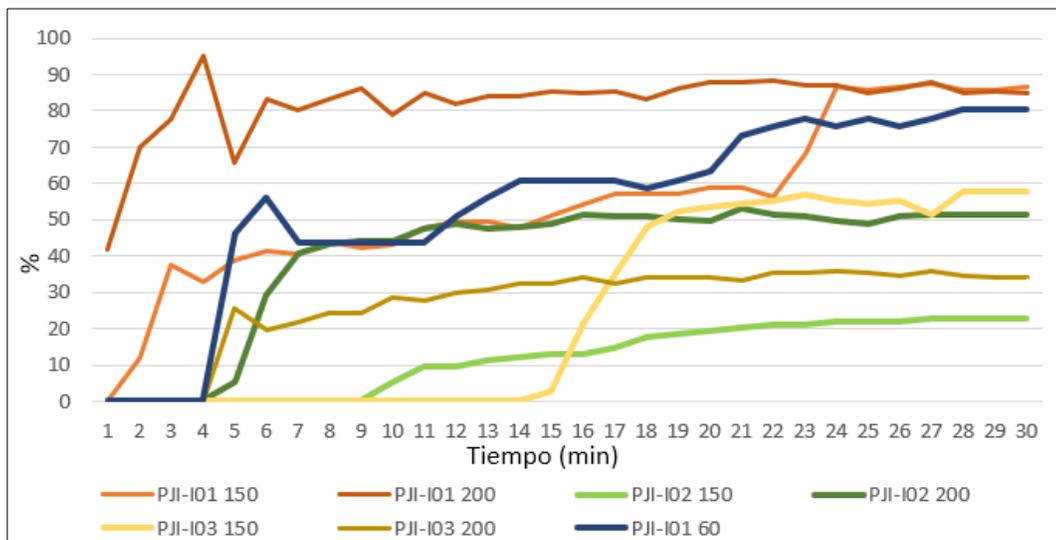


Figura 26. Porcentaje de escurrimiento en la zona de la playa de la presa de jales.

Por esa razón se tomaron unas muestras representativas de los taludes de la presa para analizar su granulometría, en donde el material primero fue cribado por malla No.10 y No.16 por donde pasó todo el material.

Posteriormente, se analizó en un equipo Zetasizer marca Malvern Panalytical para determinar la distribución del tamaño de partícula. La Tabla 7 muestra la distribución granulométrica de las pruebas realizadas en los taludes, en donde se puede observar que el Dv80 en promedio de todas las muestras es de 374.55 μm , el cual corresponde al tamaño al cual el 80% del material se encuentra en un tamaño específico.

La Figura 27 muestra la gráfica granulométrica de dos muestras de la presa de jales, en la parte superior corresponde a la muestra tomada aguas arriba en donde se puede observar una distribución más homogénea de las partículas en donde se encuentra una parte importante del material con partículas muy finas ($<75 \mu\text{m}$) y el resto de la distribución hasta las partículas de 1 mm. Sin embargo, en la muestra de los jales (abajo) claramente se ve que la granulometría se concentra en partículas mayores a $75 \mu\text{m}$ por lo que según la clasificación AASHTO esto corresponde a un material granular de tipo A-1-A descrito como: *Suelos granulados de grava o arena con granulometría gruesa, incluyen un cierto porcentaje de finos*, por lo cual se comporta como un medio poroso que deja pasar todo el volumen de agua de la precipitación simulada.



Tabla 7. Distribución granulometría de los taludes

μm	D [3,2]	D [4,3]	Dv (50)	Dv (80)
PJI-L01	28.9	222.0	187.0	358.0
PJI-L02	36.7	220.0	200.0	337.0
PJI-L03	40.3	332.0	317.0	496.0
PJI-L04	48.3	194.0	167.0	294.0
PJI-L05	95.3	227.0	211.0	337.0
PJI-L06	108.0	271.0	244.0	391.0
PJI-L07	54.3	301.0	174.0	459.0
PJI-L08	37.5	181.0	143.0	272.0
PJI-L09	32.0	279.0	246.0	445.0
PJI-L11	36.3	277.0	265.0	421.0
PJI-L12	20.7	183.0	146.0	310.0
Media	48.94	244.27	209.09	374.55
SD	27.69	50.57	54.11	73.17

Se realizaron 14 pruebas de infiltración, pero únicamente 12 dentro de la presa de jales y en el área de playa seca, para determinar el comportamiento hídrico en la parte superior de la corona donde los jales se van depositando poco a poco.

Durante las pruebas realizadas en la parte superior de la presa de jales con una intensidad de 60 mm/h, en dos de ella no ni hubo escurrimiento en durante los 30 minutos que duró la prueba. Esto indica que a esa intensidad de lluvia todo el volumen que provenga de la precipitación será infiltrara en esas zonas.

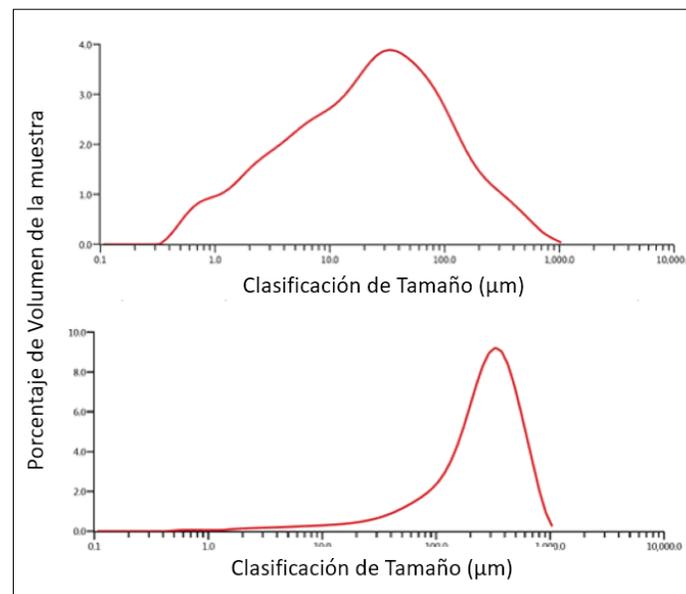


Figura 27. Distribución granulométrica de la muestra aguas arriba (arriba) y de muestra de los taludes (abajo).



La Figura 28, muestra comparativamente los datos obtenidos de la distribución granulométrica de los taludes en conjunto con los realizados en la playa de la presa de jales

Se puede observar que la curva obtenida en la muestra de la playa tiende a tener una distribución más amplia con partículas más finas, mientras que los taludes presentan partículas más gruesas. Este comportamiento se da debido a que las partículas más finas se tardan más tiempo en asentarse libremente, mientras que las partículas gruesas tardan menos (Wills y Napier-Munn, 2006) y se quedan en la parte cercana al punto de descarga, que en ese caso es desde la corona de la presa y con ese material se va construyendo los taludes.

Este efecto también podría estar explicado por la formación de una capa conocida como *hardpan* que se forma naturalmente por efecto de la meteorización formando sulfatos, carbonatos y silicatos secundarios que funcionan como materiales cementantes y disminuyen la infiltración (Ahn et al., 2011)

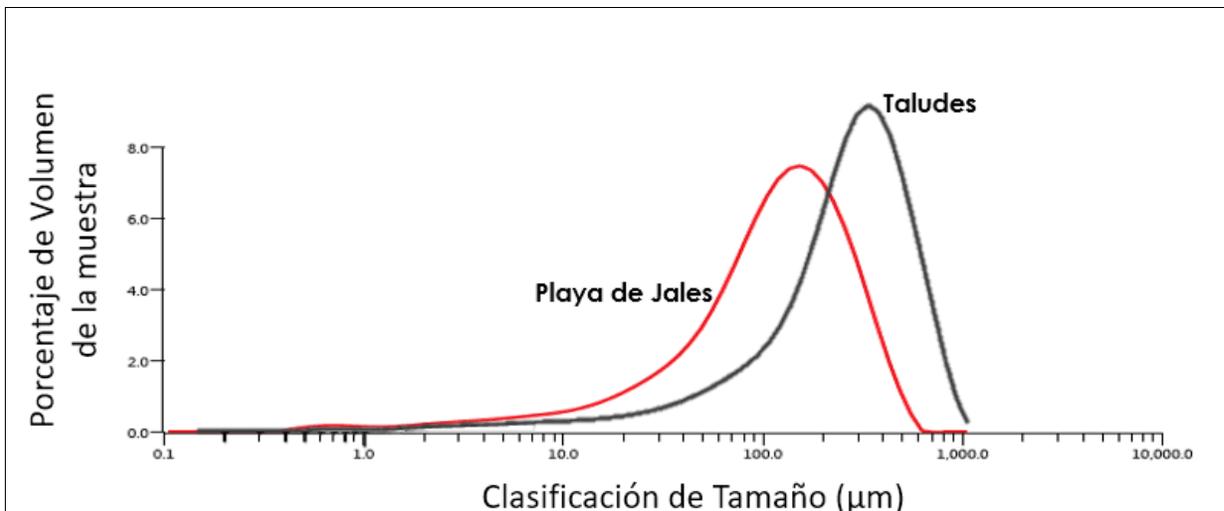


Figura 28. Comparación de las curvas granulométricas de los taludes y la playa de la presa de jales.



VI. Técnicas de percepción remota aplicadas a la determinación del balance hídrico en una presa de jales

Para identificar y distinguir las distintas zonas que se generan al depositar los jales (playa y espejo de agua) y determinar su evaporación de una forma más precisa, se empleó un equipo RPAS o Aeronave pilotada remotamente (conocido como drone) el cual es un vehículo pilotado a distancia que mediante sensores del espectro electromagnético logran la captura de información del terreno. La RPAS que se utilizó en el caso de estudio es de marca PARROT y cuenta con una cámara multispectral SEQUOIA, con 4 sensores multispectrales específicos para una longitud de onda en particular.

- B1- Verde (g): 560 nm \pm 40nm
- B2- Rojo (R): 650 nm \pm 40nm
- B3- Borde Rojo (RE): 735 nm \pm 10nm
- B4- Infrarrojo cercano (NIR): 790 nm \pm 40nm

Las salidas del equipo corresponden a imágenes con extensión JPEG (imágenes en espectro visible) y TIFF (imágenes espectrales) clasificadas por sensor.

Con el uso de estos sensores se puede obtener una gran cantidad de información asociada a las imágenes multispectrales como información para geolocalización, profundidad del terreno, distancias y los valores de reflectancia de cada banda medida.

El procedimiento para la obtención de las imágenes multispectrales comienza con planificar el vuelo que realizará la RPAS, el cual consiste en configurar y establecer los parámetros generales como la altura de vuelo, área de muestreo, velocidad, dirección de vuelo, puntos de muestreo, orientación de las imágenes, entre otros, con el fin de abarcar el área en donde se encuentra el sitio de interés, el cual para el caso de estudio es la presa de jales.

Es necesario procurar que el área definida tenga una cobertura amplia y se logre tener una superposición (Overlap) de imágenes adecuada (mayor al 80% lateral y frontal), esto con el fin de abarcar el área en la que se localiza el residuo. Esto debido a que los software en los cuales se procesan las imágenes multispectrales dentro de su procesamiento buscan puntos de



coincidencia en la secuenciación de las imágenes para poder hacer correcciones optométricas, las cuales consisten en ajustar los valores de las alturas del terreno respecto a una superficie de referencia geoide (Richards and Jia, 2002)

La superposición de imágenes consiste en cubrir el área de medición traslapando imágenes tanto en forma lateral, como en forma frontal, así es posible obtener puntos de referencia y coincidencia entre imágenes y poder lograr una secuencia en el vuelo coherente que abarque la zona de estudio, como se muestra en la Figura 29

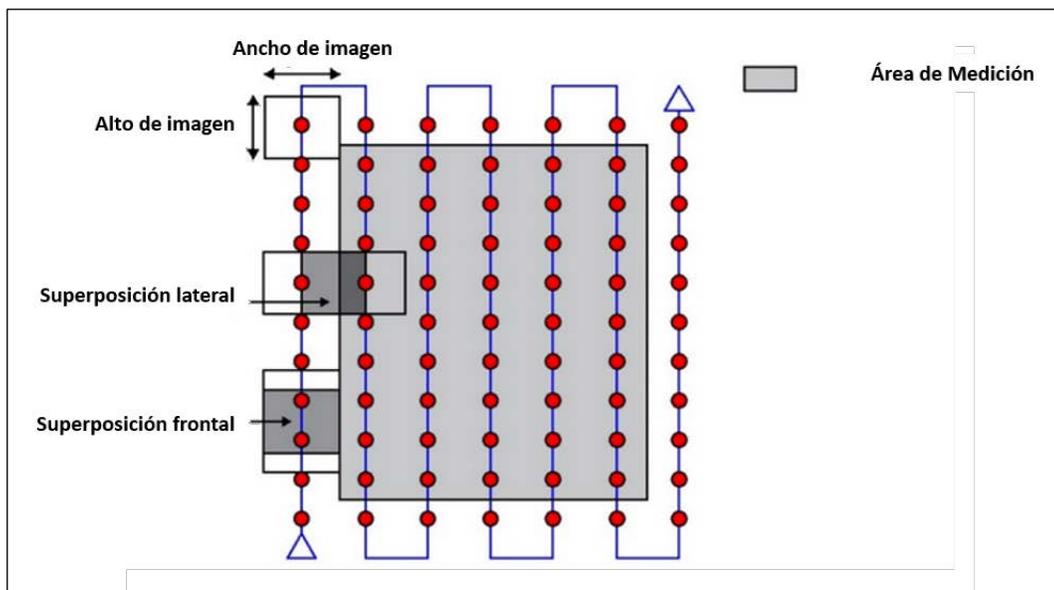


Figura 29. Ejemplo de superposición de imágenes con vuelo de RPAS⁵

Una vez que se ha realizado el vuelo, y obtenido la información de la RPAS, es necesario realizar un post procesamiento para comenzar a trabajar con la información generada.

VI.1. Post procesamiento y obtención de imágenes multiespectrales (mosaicos)

Para realizar el procesamiento de las imágenes multiespectrales es necesario contar con un software de procesamiento de imágenes (Agisoft, Pix4D, QGIS, ArcGIS, ENVI, etc). Con el software es necesario realizar una

⁵ fuente: Lewicka 2022



ortorectificación y la alineación de las cámaras o puntos de muestreo, en donde, gracias a la superposición de imágenes es posible determinar una nube de puntos tridimensional que de la cual se pueden obtener varios productos como un modelo digital de elevación del terreno evaluado y los respectivos ortomosaicos de cada una de las bandas, rectificadas, alineados y georreferenciados del área de estudio para su posterior análisis.

Para el caso de estudio se determinó el modelo digital de elevación que se muestra en la Figura 30 con el cual se puede obtener la altura aproximada respecto al nivel medio del mar dado que el dron cuenta con un sistema de posicionamiento global y la información que genera contiene dicha información.

Este tipo de información ayuda a tener de manera precisa el área y las dimensiones de una estructura como la presa de jales, de una manera en la que no se invierte mucho tiempo en obtener la información y tampoco en su procesamiento.

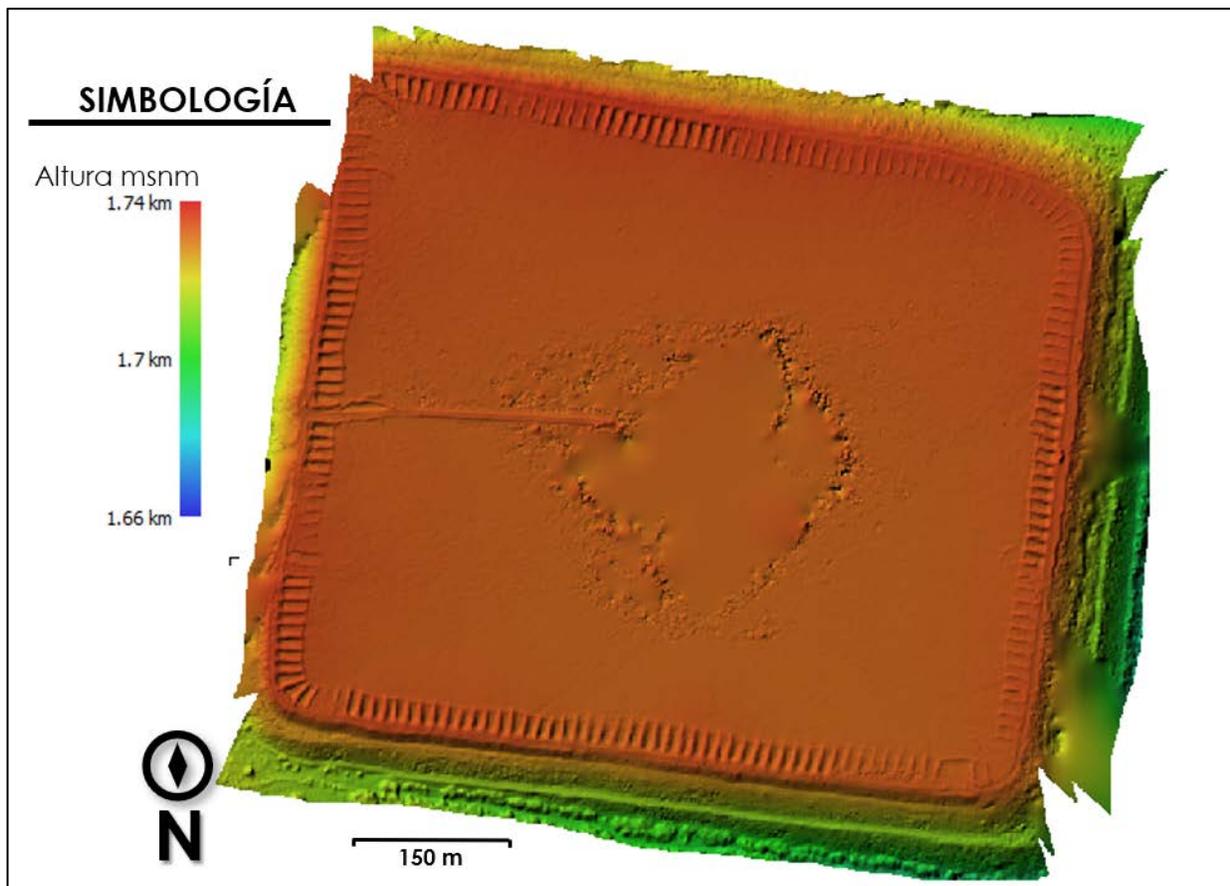


Figura 30. Modelo digital de elevación generado a partir de imágenes multiespectrales.



VI.2. Procesamiento de mosaicos multispectrales

Después de obtener una imagen por cada banda (4 ortomosaicos), es necesario emplear el software de procesamiento de imágenes para unificarlas y obtener un mosaico multibanda, en donde, este contenga toda la información generada, es decir, que nos permita identificar en cada uno de los píxeles la información almacenada de reflectancia de cada una de las bandas. La imagen resultante permite que se pueda manipular toda la información obtenida por la RPAS durante el vuelo en una sola imagen que ya cuenta con las 4 bandas.

Este tipo de imágenes permite que se visualicen de manera algunas superficies en colores que no son los reales debido a que se puede sustituir una banda por otra. En el caso de las imágenes obtenida es posible observar la distinción notoria que existe con el agua y los jales gracias al intercambio de bandas en donde se sustituyó el infrarrojo cercano por el rojo, el rojo por el verde y el verde en el lugar del azul como se observa en la Figura 31.

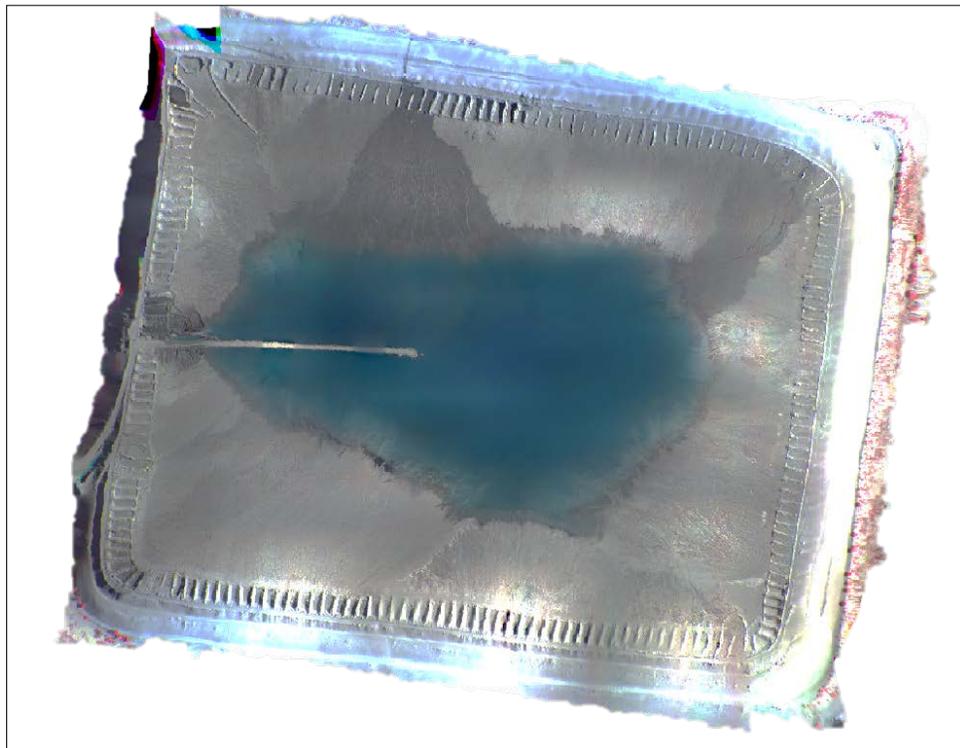


Figura 31. Imagen multispectral de la presa de jales (bandas: NIR,rojo, verde)



VI.3. Obtención de Firma Espectral

La obtención de las firmas espectrales se realiza mediante el análisis de zonas denominadas ROI (Regions Of Interest), la cuales, básicamente consisten en una parte de la imagen que se desea filtrar o procesar particularmente. Esta puede representar cualquier cobertura que uno desea en un concepto lógico según la información que contenga esa sección dentro de los píxeles y se basa en un proceso binario en donde la información de la ROI es 1 y el valor del área que se sitúa fuera es de 0, de esta forma se pueden hacer distinciones de las áreas que se buscan para lograr una zonificación de la imagen según los criterios de las ROI que se determinen (Richards y Jia, 2002)

En una cierta forma, es un entrenamiento lógico en el análisis de imágenes para que el software pueda reconocer con cierto rango áreas similares a las que hemos definido. Para la presa de jales se analizaron las imágenes multiespectrales como la Figura 31 en donde haciendo uso del software de acceso libre y código abierto QGis versión 3.32.3 Lima, se pudieron analizar las imágenes multiespectrales y determinar las ROI del caso de estudio. La Figura 32 muestra la definición de los polígonos dentro del Sistema de Información Geografía, con los cuales se “entrena” al programa. Estos polígonos son clasificados a criterio del usuario y deben de ser representativos de la zona que se está definiendo (Lillesand et al., 2016)

Una vez identificados los ROI se puede obtener su firma espectral promedio. La firma espectral es la respuesta de una superficie a la incidencia electromagnética, es decir, la forma en la que cual una superficie refleja o observe el espectro electromagnético y como este responde en forma de reflectancia (Richards y Jia, 2002). Se llama firma porque cada superficie tiene una respuesta única y por lo tanto es posible rastrear o conocer que tipo de superficie es únicamente con ver la respuesta de la reflectancia. Bajo ese principio es por la cual es posible hacer la distinción de áreas entrenando al software para que distinga áreas que sean similares y las agrupe.

Las firmas espectrales encontradas para las imágenes del caso de estudio se muestran en la Figura 33, en donde la banda 1 corresponde al color verde, la banda 2 al color rojo, la banda 3 al borde rojo y la banda 4 al infrarrojo cercano (NIR),

El software puede hacer esta distinción porque estadísticamente son distintas por lo que cada una puede estar dentro de una clasificación por separado.

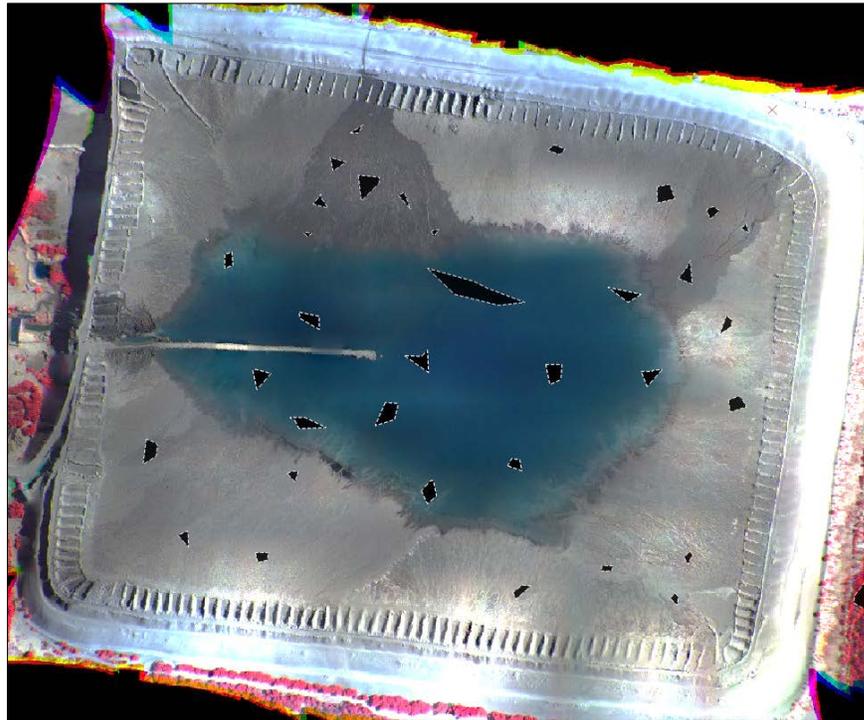


Figura 32. Polígonos de definición para las ROI en Sistema de Información geográfica

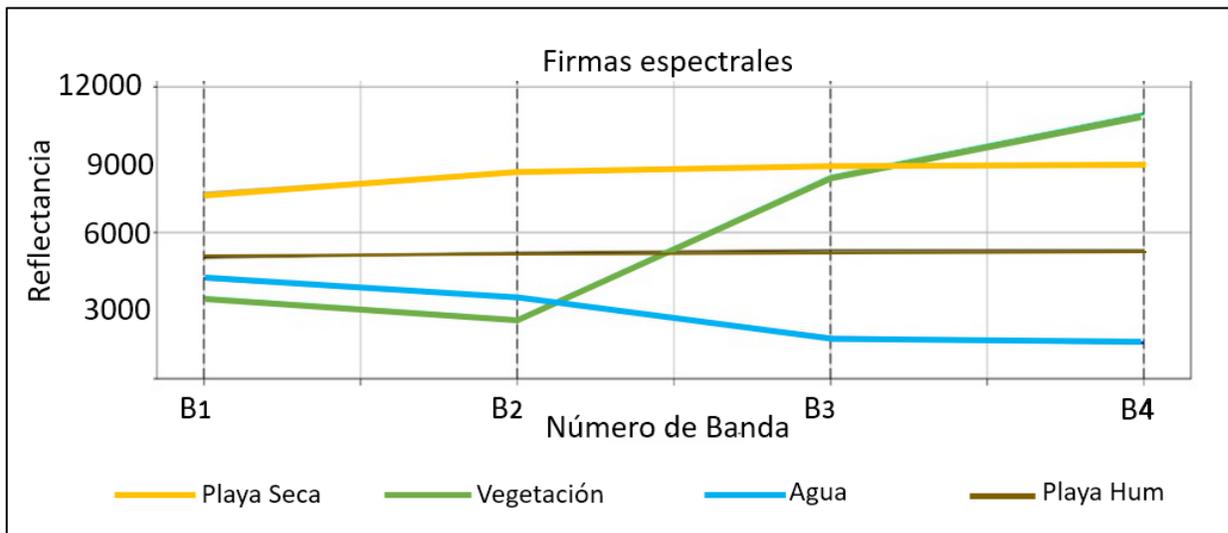


Figura 33. Firmas espectrales de las superficies de la presa de jales.

Con las firmas identificadas es posible clasificar la imagen multispectral, en donde en conjunto con el entramiento es posible definir zonas que se asemejen a la clasificación definida.



VI.4. Zonificación de la presa de jales

Como se trabaja con imágenes de tipo ráster, los software de procesamiento de imágenes deben trabajar sobre una zona definida por lo general de forma de cuadrilátero, pero esto genera mucho información que puede ser mal clasificada sobre todo si la imagen tiene espacios en donde carecer de información como se muestra en la Figura 34 en la cual zonas próximas a los bordes la imagen que carecían de información están siendo clasificadas como *agua* la cual se encuentra representada en color azul. En color verde se tiene la vegetación, en color arena se encuentran definidos los *jales secos* y en color marrón los *jales húmedos* que hacen referencia aquella zona definida como playa en las presas de jales. Con esta, se obtiene una imagen zonificada cualitativamente por áreas o regiones de interés

La zonificación realizada de manera cualitativa es una herramienta que permite determinar la magnitud de las áreas clasificadas mediante la identificación del número de píxeles que conforma cada zona y multiplicarlo por la resolución de la imagen, sin embargo, es necesario recortar el área de interés de la imagen para evitar la cuantificación más área de la que en realidad corresponde a cada clasificación de forma que la

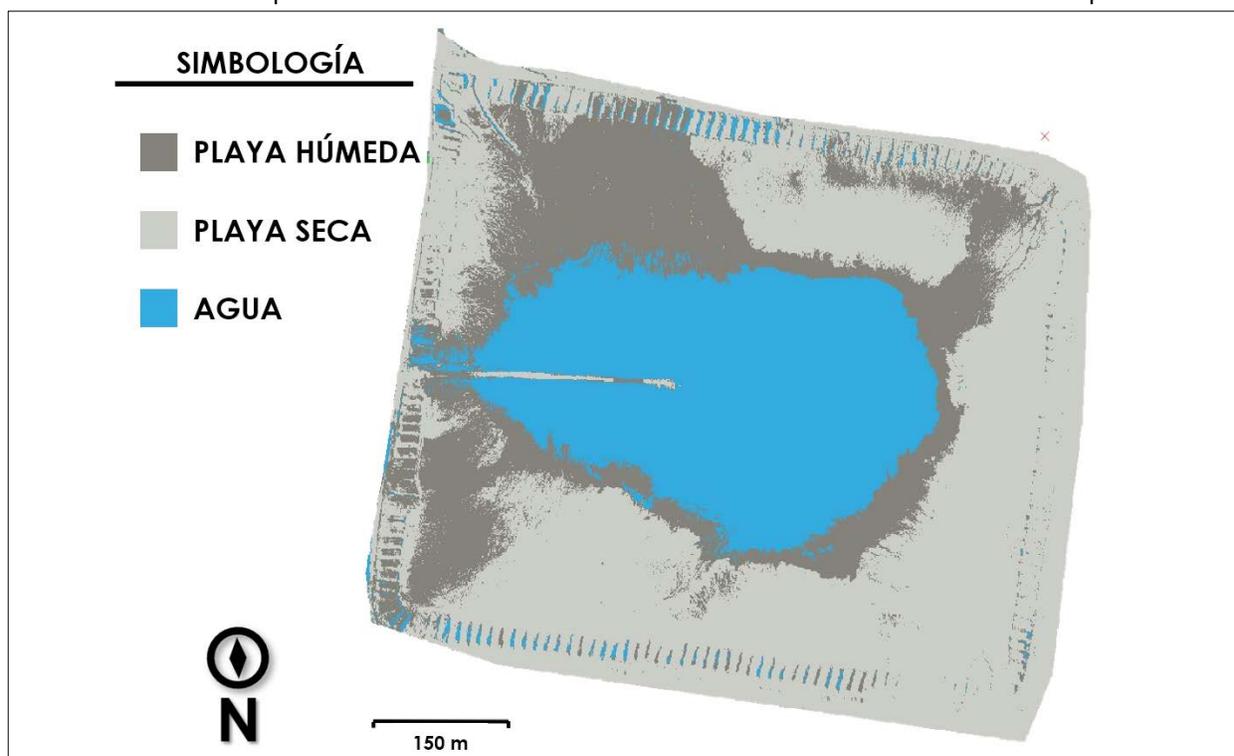


Figura 35 muestra como quedaría finalmente la zonificación en la presa de jales y la Tabla 8 muestra los datos obtenidos para cada una de las zonas.



Tabla 8. Cuantificación de las zonas en la presa de jales.

Zona	Píxeles	Área (m ²)	%
Agua	5,407,569	120,053.44	24.67
Playa Seca	11,031,570	244,911.89	50.33
Playa Hum	5,479,472	121,649.76	25.00
Vegetación	816	18.12	0.00
TOTAL		486,633.20	100
Resolución	14.9	cm/pixel	
	222.01	cm ² /pixel	

Después del procesamiento de distintas imágenes se obtuvo que los espejos generados en la presa de jales van desde un 20% a un 37% por ciento de la cobertura de la presa, mientras que la playa seca se encuentra en un rango de 40% al 52% y la playa húmeda alrededor del 25% de la cobertura superficial de la presa.

La Figura 36 muestra una superposición de la imagen zonificada obtenida sobre una imagen satelital.

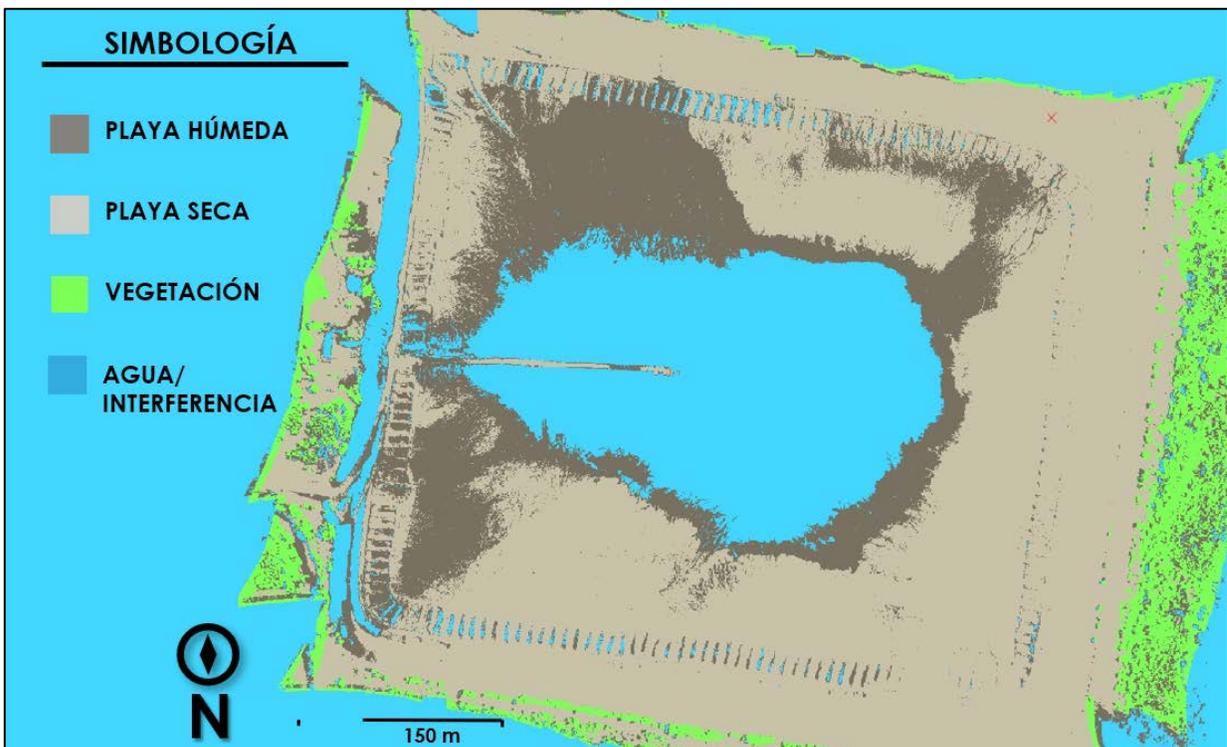


Figura 34. Zonificación de la identificación con ROIs, (sin ajuste, sin recorte)

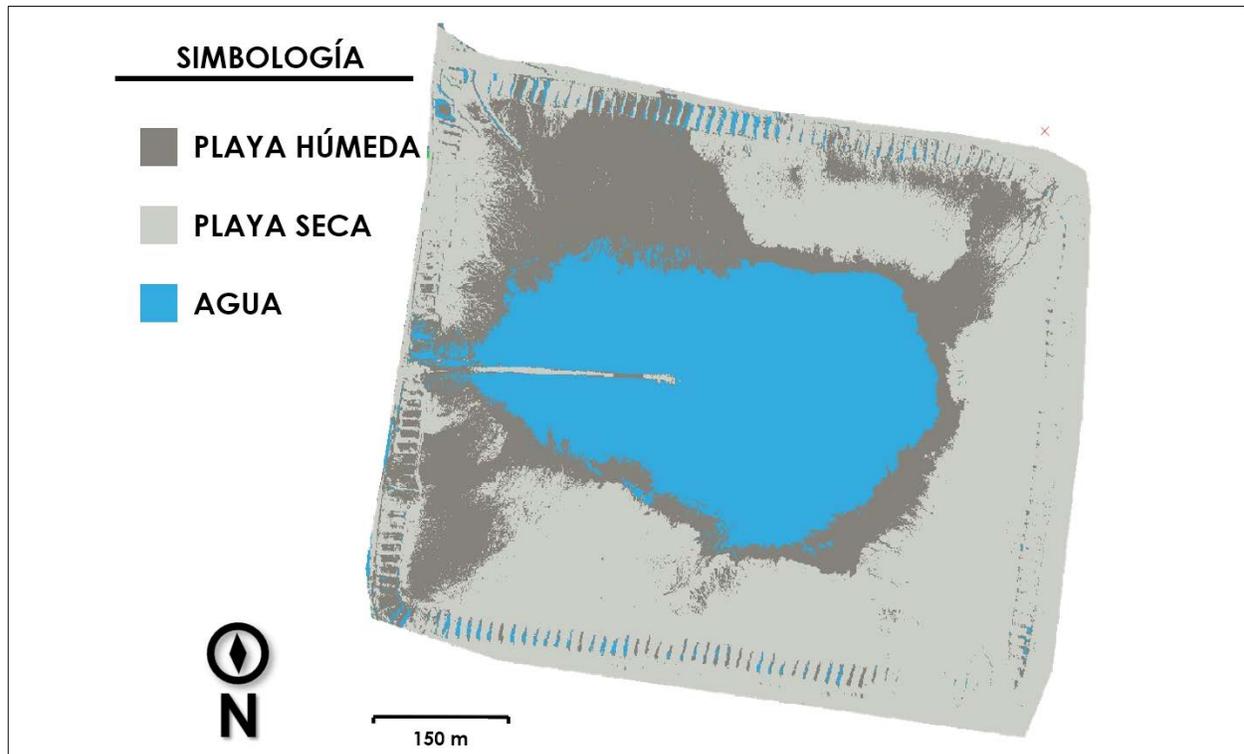


Figura 35. Zonificación acotada de la presa de jales.

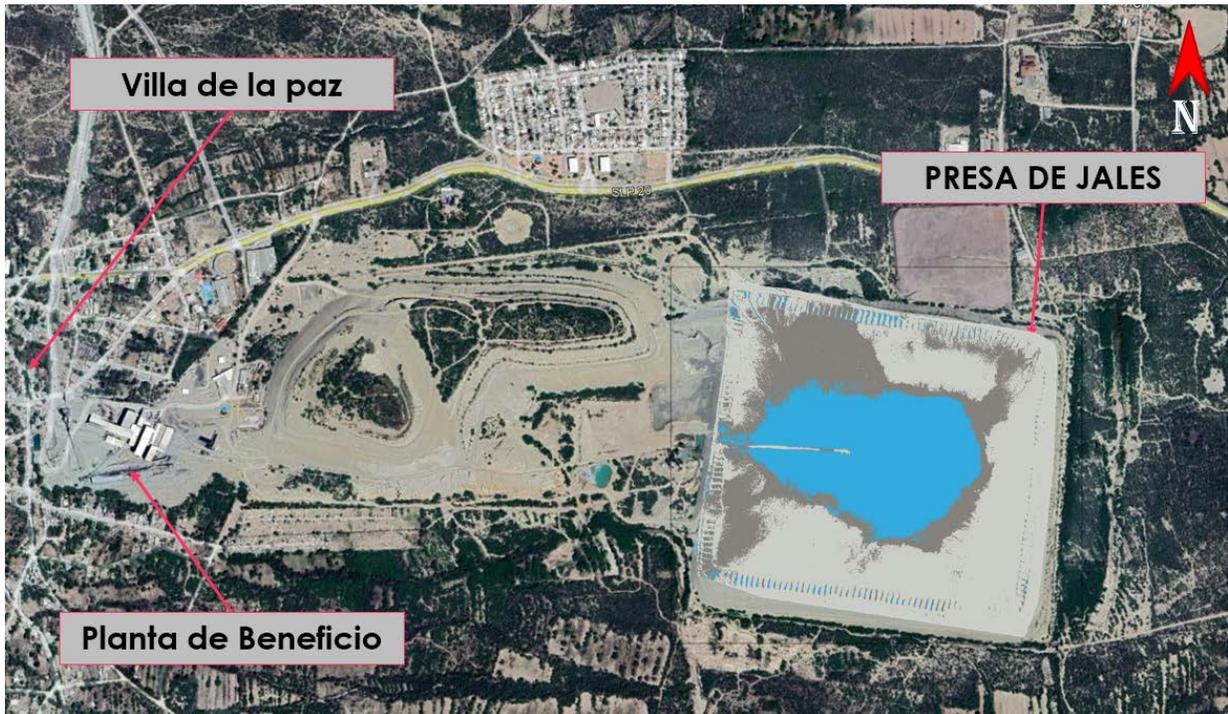


Figura 36. Superposición de imagen zonificada de la presa de jales sobre imagen satelital.



VII. Modelo numérico para inventario de Huella Hídrica en el proceso de concentración de sulfuros de cobre.

El modelo numérico se diseñó a partir del desarrollo del MC del PCSC, a través del análisis modular y la determinación de flujos. Mientras que el MC representa la idea sistemática del proceso del PCSC, el MN cuantifica la HH mediante cálculos en cada uno de los módulos independientemente. Esto se logra mediante la determinación del valor de cada uno de los flujos que son evaluados en cada uno de los módulos del MC y son calculados diariamente.

Cada uno de los flujos depende de parámetros específicos que deben ser calculados o medidos según las condiciones en el sitio, debido a que la variabilidad en las condiciones ambientales y operativas en cada sitio minero-metalúrgico es diferente.

VII.1. Simbología del Modelo Numérico

Cada módulo se representó gráficamente a partir del análisis resultante del MC con una simbología acorde al tipo de actividad que representa, como se muestra en la Figura 37.

Los módulos se encuentran unidos secuencialmente de la misma forma en la cual comúnmente se lleva a cabo este proceso en la operación real. Por lo que el traslado de agua entre módulos se encuentra simbolizado mediante flechas que los conectan entre sí, representando la interacción que puede existir y brinda una idea acerca del dinamismo hídrico en el proceso.

En la descripción de los flujos de entrada y de salida de cada módulo, se encuentra una figura que facilita la identificación. A manera de ejemplo, la Figura 38, muestra el módulo y la forma en la que se encuentra delimitado por una línea punteada, la cual representa conceptualmente los límites y actividades considerados y establecidos en el capítulo III para el MC de cada módulo. Las flechas que apuntan hacia los límites del módulo pertenecerán a flujos de entrada, sin importar su posición respecto al módulo. Las flechas que apuntan del límite punteado hacia afuera corresponderán a flujos de salida del módulo.

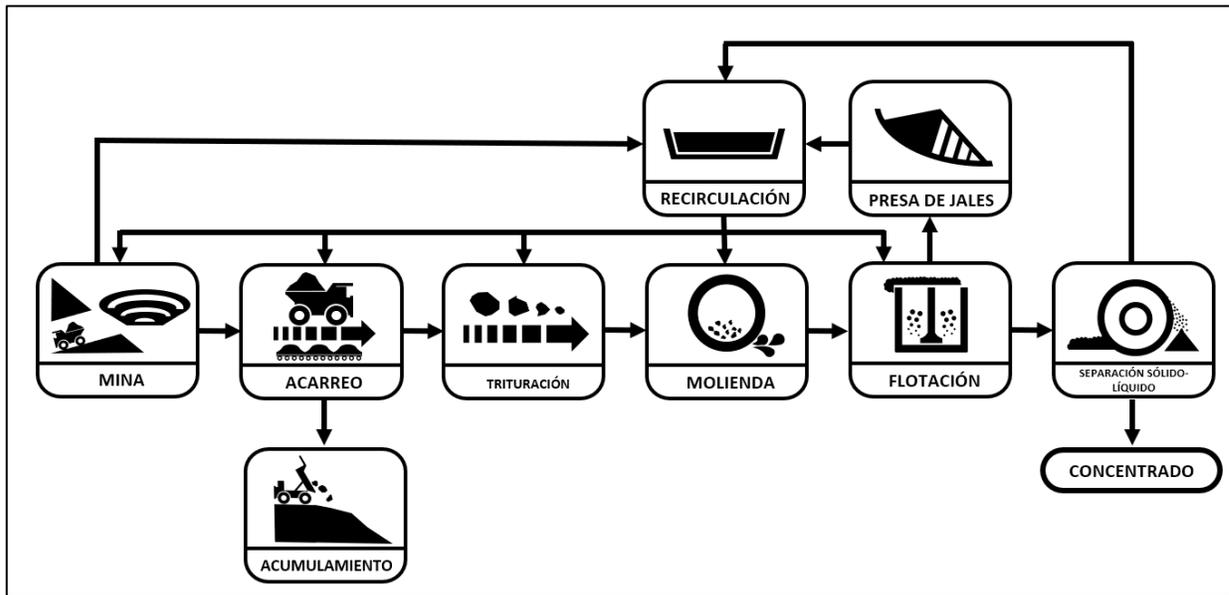


Figura 37. Modelo Conceptual representado gráficamente.

Un indicador de doble flecha continua es empleado después del nombre de un flujo para indicar que, ese flujo en particular es un flujo de transferencia hacia alguno de los módulos siguientes en el proceso, como se observar para el *Flujo 5* de la Figura 38.

Para indicar un flujo, considerado como recirculación, dentro del mismo módulo, se emplea un indicador de retorno en el nombre del flujo, que significa que el flujo de agua es empleado y descargado/retornado en el mismo sitio de donde fue extraído, sin existir consumo de éste, únicamente su uso.

El último elemento que muestra la Figura 38 corresponde a un indicador del tipo de agua. Este indicador se localiza en forma de línea por encima del nombre de los flujos que contribuyen al inventario en alguno de los componentes de la H.H. Este indicador puede presentar varios colores, dependiendo del flujo y su potencial cuantificación en los componentes. Un ejemplo de esto sería la descarga del agua de laboreo a un cuerpo de agua, el cual al cumplir con una calidad esperada se cuantificaría como agua azul o en caso de que un parámetro fisicoquímico no cumpliera con una calidad se cuantificaría como agua gris. En este caso, el flujo del agua de laboreo no tendría un indicador de flujo (flecha), sin embargo, tendría una línea de color azul y gris si fuera una descarga (indicador de tipo de agua) como se muestra en la Figura 38. Cabe resaltar que todos los flujos son expresados en unidades de metros cúbicos por día (m^3/d).

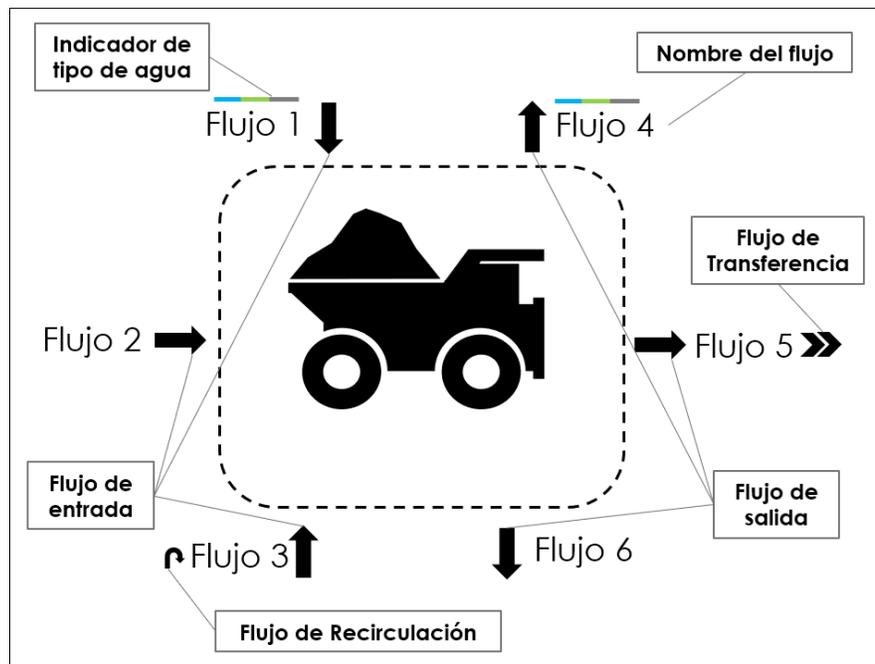


Figura 38. Descripción de los elementos gráficos en la representación de los flujos de entrada y de salida de cada módulo

Es importante resaltar que los componentes de la HH son resultado de ciertos flujos asociados a ellos en cada módulo, es decir, se debe de realizar un balance general del módulo para conocer los flujos como se muestra en la Ecuación 11, en donde las entradas al módulo tienen que ser iguales a las salidas más las retenciones o recirculaciones, pero no todos los flujos calculados aportarán valor a la cuantificación de los componentes la huella. Únicamente aquellos que estén relacionados a su respectivo tipo de agua.

$$\sum Ent_N = \sum Sal_N + \sum Re_N$$

Ecuación 11

En donde:

$\sum Sal_N$: Sumatoria del volumen de agua de los flujos de salida del módulo N (m^3/d).

$\sum Ent_N$: Sumatoria del volumen de agua de los flujos de entrada de módulo N (m^3/d).

$\sum Re_N$: Sumatoria del volumen del agua asociado a retenciones o recirculaciones dentro del módulo N (m^3/d).

N : Representa cualquier módulo del modelo.



VII.2. Módulo Mina

El módulo mina consta de 9 flujos: 5 entradas, 4 salidas, como se muestra en la Figura 39. Algunos de estos flujos pueden presentarse como recirculaciones provenientes del módulo *Manejo de Agua*. En este paso en particular la humedad del mineral y la humedad del tepetate representar la transferencia de agua a módulos siguientes.

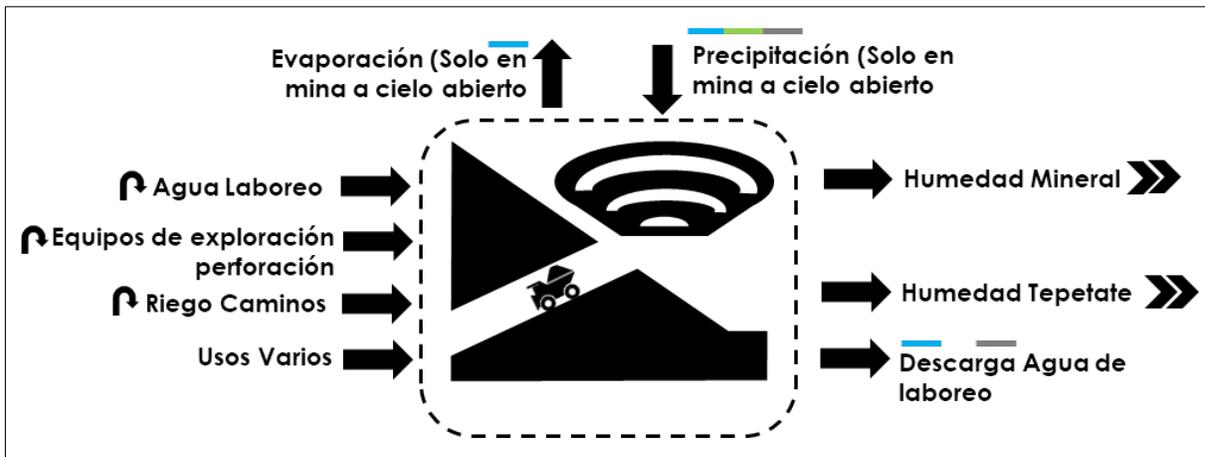


Figura 39. Diagrama de flujos del módulo Mina.

VII.2.1 Flujos de entrada módulo Mina

- Agua de laboreo – MIN-I-001

El agua de laboreo en minas (V_{mina}) considera el agua que necesariamente debe de extraerse del subsuelo para permitir las labores de exploración y explotación de mineral. Este flujo puede ser posteriormente empleado dentro del proceso si cumple con la calidad requerida en la etapa en la que se planee usarla, incluidas las actividades de molienda, flotación, limpieza, riego de caminos, etc. Este flujo puede ser descargado siempre y cuando la calidad del agua esté dentro de los límites máximos permisibles por las regulaciones ambientales aplicables. Este flujo puede ser o no considerado dentro de la HH, su cuantificación dependerá si el volumen de agua proveniente de este flujo es empleado dentro del proceso o si es descargado a una cuenca o acuífero diferente de donde proviene o del sitio en donde se extrajo (labores, pozo o cuerpo de agua).



En el caso de ser empleado dentro del proceso o empleada para otro fin será cuantificado como *agua azul*. En el caso de que sea descargado en otra cuenca será cuantificada también como *agua azul*, siempre que se encuentre dentro de los límites establecidos por la normatividad aplicable, en caso contrario, se cuantificará como *agua gris* a partir del parámetro de mayor concentración.

Este flujo por lo general es medido por la cantidad de agua bombeada de las labores o del fondo del tajo, por el bombeo de algún pozo en el sitio o también puede ser medido al momento de pasar a ser una salida del sistema en forma de descarga.

- Usos varios – MIN-I-002

Se considera que dentro de las actividades minero-metalúrgicas existen múltiples necesidades de acuerdo con las características particulares de cada sitio, generando escenarios en donde se puede requerir del recurso hídrico fuera de los flujos planteados anteriormente. Estas eventuales pueden incluir lavado de equipos, recirculaciones en los circuitos de las piletas empleadas dentro de la mina o cualquier otra que el proceso demande, Por esa razón, este flujo puede cuantificar aquellos consumos adicionales a los planteados en el esquema general. Sin embargo, estos usos generalmente se encuentran asociados a recirculaciones cuando el agua es extraída del agua de laboreo, solo en el caso en que el agua proviniera de alguna fuente externa o de algún cuerpo de agua de otra cuenca entonces debería cuantificarse dentro del indicador como (V_{mimu}).

- Riego de caminos – MIN-I-003

Este flujo considera el volumen de agua utilizado para riego de caminos dentro de la mina, como método de control de polvos (V_{miroad}). La cuantificación de este flujo dentro de la HH depende principalmente del hecho de que los caminos sean superficiales o subterráneos. En el escenario en donde el riego se lleve a cabo dentro de una mina subterránea, se considera que el volumen aplicado regresa a la cuenca de la cual fue extraído y se considera como una recirculación dentro de la misma. Todos los escenarios distintos al anterior deberán incluirse en la cuantificación del indicador, ya que se considera que el agua que es extraída del subsuelo no retornara a la misma cuenca o acuífero del cual fue extraída y por lo tanto el



agua empleada en los caminos expuestos a las condiciones climáticas deberá de cuantificarse al perderse por evaporación.

- Equipo de perforación y exploración – MIN-I004

Durante las etapas de perforación y explotación, tanto superficial, como subterránea; se hace uso del agua para el funcionamiento de los equipos (V_{perfo}). Este flujo considera el volumen de agua utilizado por los equipos para esta actividad. En este caso, es necesario conocer el número de equipos requeridos diariamente y el consumo promedio diario de agua por equipo. De esta manera puede ser estimado el volumen de agua necesario para esta actividad diariamente, como se muestra en la Ecuación 12.

Si los equipos de perforación son abastecidos con agua extraída de las mismas labores mineras, el flujo se considera como una recirculación del agua dentro de la cuenca y no será cuantificado en el indicador de HH. Puede existir la posibilidad que el agua empleada en los equipos se cuantifique dentro del consumo general de agua fresca proveniente de alguna fuente de abastecimiento externa, lo importante sería determinar cuanta corresponde al consumo de los equipos dentro de este punto. En caso de que los equipos sean abastecidos mediante el aprovechamiento de alguna fuente externa de agua (superficial o subterráneo), el consumo tendrá que ser cuantificado dentro de la HH como *agua azul*.

$$V_{perfo} = perfo_u * perfo_c$$

Ecuación 12

En donde:

V_{perfo} : Volumen de agua empleado en las actividades diarias de perforación y exploración (m^3/d).

$perfo_u$: Número de unidades/equipos empleados diariamente en las actividades de perforación y exploración (adimensional).

$perfo_c$: Volumen de consumo de agua diario por equipo (m^3/d)

- Captación (Mina a cielo abierto) – MIN-I-005

En el caso que se tuviera una mina a cielo abierto dentro de la unidad minero-metalúrgica, se debería de tomar en cuenta el balance de agua que puede existir dentro del tajo y la posible aportación de agua verde o agua azul al proceso por efectos de la precipitación y la evaporación. El criterio de



distinción para el tipo de agua depende de tres escenarios, dependiendo que factor climático resulta dominante diariamente como se mostró en la Figura 9 la cual se muestra nuevamente a manera para las consideraciones de los módulos.



Consideración para la cuantificación para el balance diario entre evaporación y precipitación.

Cuando en el balance diario la precipitación sobrepasa la evaporación, se considera que el volumen excedente $[(P - E) > 0]$ es un posible escurrimiento dentro del proceso, y por lo tanto se cuantifica como una aportación al volumen total de *agua Verde*. Este escurrimiento podría ser aprovechado o perdido por evaporación o infiltración, y por lo tanto el valor de la evaporación sería el flujo de *agua verde* que contaría para el componente.

Si el valor de evaporación resulta mayor que la precipitación, entonces se considera la captación como el valor para el volumen de *agua verde*, debido a que el impacto del área está generando una condición de aprovechamiento del agua disponible en el medio ambiente para el sistema y consecuentemente una pérdida por evaporación en toda su extensión.



Se considera que el valor de la evaporación al superar al valor de la captación, todo el volumen captado está siendo evaporado por lo tanto regresa a la atmosfera y es cuantificado para el indicador como agua azul.

Para la determinación de este flujo es importante conocer el área del tajo a cielo abierto en metros cuadrados y el balance entre la evaporación y la precipitación diaria en unidades de milímetros por día (mm/d). De este modo es posible obtener las unidades en metros cúbicos por día al multiplicar el resultado del balance diario evaporación-precipitación y el área del tajo como lo muestran la Ecuación 13.

$$Bal_{meteo} = P - E$$

Ecuación 13

$$\text{Si } Bal_{meteo} < 0 \therefore C_{tajo} = 0$$

Ecuación 14

$$\text{Si } Bal_{meteo} > 0 \therefore C_{tajo} = Bal_{meteo} * A_{tajo}$$

Ecuación 15

$$C_{tajo} = AA_{tajo}$$

Ecuación 16

En donde:

Bal_{meteo} : Balance entre evaporación y precipitación (m/d)

E : Evaporación diaria (m/d)

P : Precipitación diaria (m/d)

C_{tajo} : Captación en el tajo proveniente de la precipitación (m³/d)

A_{tajo} : Área del tajo abierto con vista en planta (m²)

AA_{tajo} : volumen de agua azul del tajo planta (m³/d)

VII.2.2 Flujos de Salida Módulo Mina

- Descarga de Agua de Laboreo – MIN-O-001

El flujo de agua de laboreo contempla varios escenarios, aquel en el que se aprovecha la totalidad del flujo obtenido de las labores de las minas. Sin embargo, este flujo no será cuantificado hasta su pérdida por evaporación o en algún flujo o módulo en donde sea aprovechable el agua extraída.

El segundo escenario corresponde a aquel en que no exista el aprovechamiento del agua de laboreo o éste sea parcial, es decir, que existiera un permiso de descarga para el flujo no aprovechado y este sea retornado a algún cuerpo de agua receptor. En este caso el flujo de agua se



consideraría como un flujo de salida del sistema al descargar el agua en algún otro cuerpo de agua que se encuentre fuera del sistema. Este flujo sería cuantificado para el volumen de *agua azul* siempre y cuando cumpla con los niveles máximos permisibles de calidad del agua establecidos ya sea por normativa o por los niveles del cuerpo receptor, como se muestra en la ecuación siguiente:

$$VD_{mina} = V_{mina}$$

Ecuación 17

En donde:

VD_{mina} : Volumen del efluente de descarga (m³)

V_{mina} : Volumen de agua de laboreo (m³)

En el caso de que se sobrepase alguno o varios de los niveles máximos, deberá de calcularse el volumen necesario para diluir dicho parámetro hasta tener la concentración del cuerpo receptor o dentro de los límites. Es necesario determinar un *factor de dilución* que refleje la proporción de la concentración del parámetro de interés respecto al nivel buscado, para después calcular el volumen de *agua gris*. En el caso de presentarse más de un parámetro fuera de los niveles permitidos se tomará como referencia el parámetro con una mayor concentración en proporción a la magnitud del límite permitido, es decir, el que resulte con un factor de dilución mayor, el cual se obtiene mediante la Ecuación 18.

$$F_c = \frac{Cn_x}{Cn_{lim}}$$

Ecuación 18

En donde:

F_c : Factor de dilución del parámetro n para cálculo de volumen de agua gris (adimensional)

Cn_x : Concentración del parámetro n en el efluente (unidades de concentración)

Cn_{lim} : Concentración máxima permitida del parámetro n en el efluente (unidades de concentración)

Cuando el F_c de alguno(s) de los parámetros sea mayor a 1, se debe considerar el valor más alto de F_c correspondiente y cuantificarse como se muestra en la Ecuación 19, para poder el volumen de *agua gris*.

$$W_{G.eflu} = V_{eflu} * (F_c - 1)$$

Ecuación 19



En donde:

$W_{G,eflu}$: Volumen total de agua necesario para diluir la concentración del parámetro n en el efluente de descarga. (m^3)

V_{eflu} : Volumen del efluente de descarga (m^3)

Para el caso del volumen de descarga de agua gris en el módulo mina se emplea la Ecuación 20, pero esta ecuación es aplicable a todos los módulos o potenciales efluentes generadores de un flujo de agua gris

$$W_{G.mina} = W_{G.eflu}$$

Ecuación 20

En donde:

$W_{G,mina}$: Volumen de agua gris resultante del exceso de concentración del parámetro n en el efluente de descarga para el módulo mina (m^3).

En el último escenario, el agua es extraída, no se almacena, no es descargada y es transferida hacia el módulo Manejo de Agua para su aprovechamiento en el proceso. En este caso el volumen de *agua azul* que podría aportar este flujo sería igual a cero, ya que al convertirse en una transferencia de flujo no se cuantificaría para la HHA y por lo tanto el término asociado queda como $VD_{mina} = 0$.

- Humedad del mineral – MIN-O-002

La humedad del mineral ($V_{min.m}$) se considera como un flujo de salida y de transferencia, lo que quiere decir que a pesar de ser una salida para el módulo mina representa un flujo de entrada para el módulo acarreo. Por lo general es un parámetro que es medido por cuestiones operativas y en caso contrario, puede ser determinado mediante el estándar ASTM 2216-19.

- Evaporación en mina a cielo abierto (tajo) – MIN-O-003

Este flujo corresponde a la pérdida por efectos de la evaporación en tener minería a cielo abierto. Esta evaporación es el resultado de la interacción de la radiación solar, el viento y la humedad existente en el mineral expuesto en la superficie del tajo. El MN considera que la pérdida de agua por evaporación varía entre los diferentes tipos de superficies expuestas, ya que



en algunas de ellas la pérdida de agua será menor a la evaporación de espejos de agua, la cual corresponde a la evaporación que es registrada mediante tanques evaporímetros en las estaciones meteorológicas y que el MN la considera como la evaporación máxima que puede ocurrir en el sitio. En el caso de la superficie del tajo, al no contar con agua fácilmente evaporable se puede considerar que la tasa de evaporación es baja y que sus características son similares a un suelo desnudo sin riego, por lo que se consideró aplicar el factor de corrección para suelos desnudos (0.15) reportado por la FAO (2018).

Se considera que independientemente del resultado del balance precipitación- evaporación (Ecuación 13), la evaporación del tajo a cielo abierto será siempre considerada como un flujo de salida y por lo tanto se cuantifica para el volumen de *agua verde* del módulo.

$$E_{mina} = (A_{tajo} * E) * Ef_{sd}$$

Ecuación 21

$$AV_{tajo} = E_{mina}$$

Ecuación 22

En donde:

- E_{mina} : Flujo de evaporación en el tajo (m³/d)
- E : Evaporación diaria (mm/d)
- A_{tajo} : Superficie del tajo abierto (m²)
- Ef_{sd} : Factor de evaporación de suelos desnudo (adimensional)
- AV_{tajo} : Volumen de agua verde proveniente del tajo (m³)

- Humedad del tepetate – MIN-O-004

La humedad del tepetate ($V_{tep,m}$) se considera como un flujo de salida y de transferencia al igual que la humedad del mineral, al representar un flujo de entrada también para el módulo acarreo. Todas las determinaciones de humedad de los materiales pueden ser determinadas mediante el estándar ASTM 2216-19.

VII.2.3 Cuantificación de la HHV del módulo Mina

La HHV del módulo mina se encuentra dada por el aprovechamiento de la precipitación únicamente en el escenario en donde se cuente con una



mina a cielo abierto. Se asume bajo los criterios y consideraciones establecidas en esta metodología que en el caso de minería subterránea no habría HHV cuantificable. Para el indicador se considera que toda el agua verde que es captada por el tajo tiene el potencial de ser trasladada como humedad en el mineral o en el caso de que genere escurrimiento, este puede ser recuperado en el fondo del tajo y aprovechado. Además, parte del volumen se puede perder por infiltración, por lo tanto, se considera que todo el volumen de la precipitación es aprovechado como *agua verde*.

La humedad del mineral ganada por la precipitación no se toma en cuenta debido a la consideración de que el agua sigue dentro del sistema evaluado por lo que aún no simboliza una pérdida para el sistema.

$$AV_{mina} = \sum_{i=1}^d C_{tajo}$$

Ecuación 23

En donde:

AV_{mina} : Volumen de Agua Verde del módulo Mina (m^3)

$\sum_{i=1}^d AV_{mina}$: Sumatoria del agua verde del Tajo (m^3)

C_{tajo} : Volumen de la precipitación captado por el tajo (m^3)

d : Día 365 o 366 (año bisiesto)

La sumatoria anual del volumen de Agua Verde dividida entre la sumatoria de producción del total de material anual dará como resultado la HHV del módulo Mina (tajo)

$$HHV_{mina} = \frac{AV_{mina}}{\sum_{i=1}^d p_{total}}$$

Ecuación 24

En donde:

HHV_{mina} : Huella Hídrica Verde del módulo Mina (m^3/t)

AV_{mina} : Volumen de Agua Verde del módulo Mina (m^3)

$\sum_{i=1}^d p_{total}$: Sumatoria de la producción de material (tepetate + mineral), (t)

d : Número de días del periodo de evaluación (365 o 366)



VII.2.4 Cuantificación de la HHA del módulo Mina

Para la cuantificación del *agua azul* del módulo mina se deben de considerar todas las posibles salidas del proceso, las cuales incluyen el flujo empleado en usos varios, es decir, volúmenes de agua de reúso que se encuentren fuera de los flujos ya establecidos. Por ejemplo, aquellos en que se pierde el volumen de agua del sistema, la posible descarga del volumen de agua de laboreo en el caso en el que cumpla con los límites máximos permitidos por la normatividad aplicable, el volumen de agua empleado en el riego de caminos y el agua empleada en el equipo de perforación cuando esta provenga de otro cuerpo de agua externo a la mina. De esta manera la cuantificación del volumen de *agua azul* se encuentra descrita con la Ecuación 25.

$$AA_{mina} = \sum_{i=1}^d VD_{mina} + \sum_{i=1}^d V_{miroad} + \sum_{i=1}^d V_{perfo} + \sum_{i=1}^d V_{mimu}$$

Ecuación 25

En donde:

AA_{mina} : Volumen de Agua Azul del módulo Mina (m^3)

$\sum_{i=1}^d VD_{mina}$: Sumatoria del flujo de descarga del agua de laboreo, desde el día 1 hasta el día d (m^3)

$\sum_{i=1}^d V_{miroad}$: Sumatoria del flujo del riego de caminos dentro del área de la mina, desde el día 1 hasta el día d (m^3)

$\sum_{i=1}^d V_{perfo}$: Sumatoria del flujo del agua empleada en el equipo de perforación, desde el día 1 hasta el día d (m^3)

$\sum_{i=1}^d V_{mimu}$: Sumatoria del volumen empleado en usos múltiples, desde el día 1 hasta el día d (m^3)

d : Número de días del periodo de evaluación (365 o 366).

La sumatoria anual del volumen de Agua Azul dividida entre la producción total anual dará como resultado la HHA del módulo Mina, como se muestra en la Ecuación 26.

$$HHA_{mina} = \frac{AA_{mina}}{\sum_{i=1}^n p_{total}}$$

Ecuación 26

En donde:

HHA_{mina} : Huella Hídrica Azul del módulo Mina (m^3/t)

AA_{mina} : Volumen de Agua Azul del módulo Mina (m^3)



$\sum_{i=1}^n p_{total}$: Sumatoria de la producción total de material (tepetate + mineral), (t)

d : Número de días del periodo de evaluación (365 o 366).

VII.2.5 Cuantificación de la HHG del módulo Mina

El cálculo de la HHG se deberá incluir en el módulo Mina en el caso que durante el periodo de evaluación se generen descargas de agua de laboreo con algún parámetro por encima del límite permitido por la normatividad aplicable o de los límites del cuerpo receptor. En este caso, se empleará la Ecuación 27

$$AG_{mina} = \sum_{i=0}^d W_{G,mina}$$

Ecuación 27

En donde:

AG_{mina} : Volumen de Agua Gris del módulo Mina (m³)

$\sum_{i=0}^d W_{G,mina}$: Sumatoria del flujo de Agua necesario para diluir el parámetro de mayor concentración hasta su límite permisible o natural (m³)

d : Número de días del periodo de evaluación (365 o 366).

La sumatorio anual del volumen de agua Gris dividida entre la producción total anual dará como resultado la HHG del módulo Mina mediante la Ecuación 28.

$$HHG_{mina} = \frac{AG_{min}}{\sum_{i=1}^n p_{total}}$$

Ecuación 28

En donde:

HHG_{mina} : Huella Hídrica Azul del módulo Mina (m³/t)

n : Número de días del periodo de evaluación (365 o 366)

$\sum_{i=1}^n p_{total}$: Sumatoria de la producción total de material (tepetate + mineral), durante el periodo de evaluación (t)

VII.3. Módulo Acarreo



El esquema de los flujos de entrada y salida del módulo acarreo se muestra en la Figura 40. Este módulo cuenta con 6 flujos de entrada, de los cuales 2 son de transferencia y 5 salidas, de las cuales también 2 son flujos de transferencia a otros módulos siguientes.

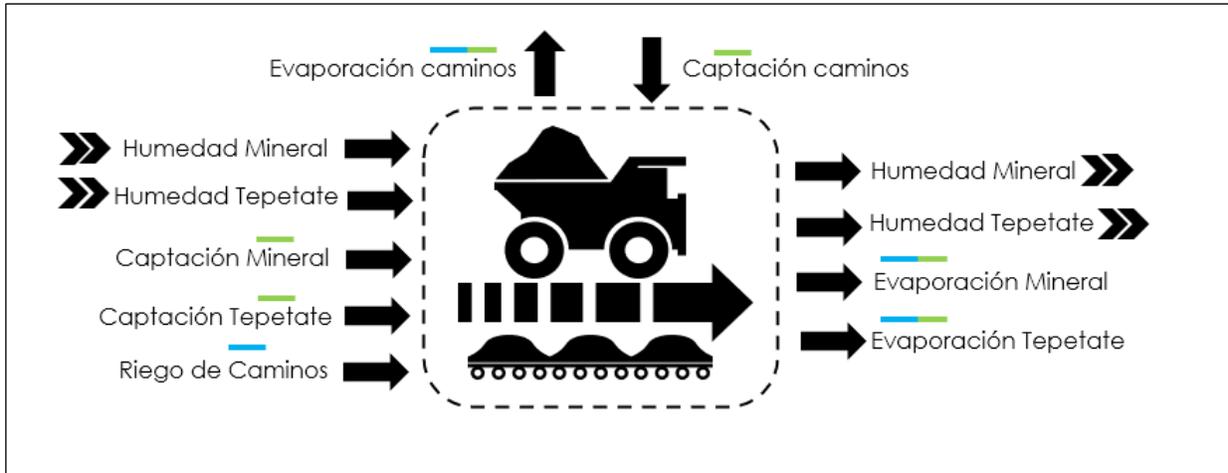


Figura 40. Flujos del módulo acarreo

VII.3.1 Flujos de entrada módulo Acarreo

- Humedad del Mineral - ACA-I-001

Este flujo representa la humedad contenida en el mineral, siendo un flujo de transferencia del flujo MIN-O-002 del módulo *mina* ($V_{min.m}$), por lo tanto, el valor de este flujo de entrada no se ve modificado.

- Humedad del Tepetate - ACA-I-002

Al igual que el flujo ACA-I-001 ($V_{tep.m}$), la humedad del tepetate corresponde a un flujo de transferencia proveniente del flujo MIN-O-004 del módulo *mina*, por lo cual su valor será el mismo.

- Captación pluvial en el traslado del mineral (camiones/bandas transportadoras) – ACA-I-003

Este flujo de entrada corresponde al volumen de la precipitación pluvial captado por el sistema de acarreo de mineral, ya sea en bandas transportadoras o en las cajas de los camiones de carga. Este flujo permite la



cuantificación independientemente del sistema de acarreo que se utilice o si se emplean ambos simultáneamente y pretende cuantificar el volumen de agua captado durante el tiempo de traslado del mineral si se llega a presentar un evento de precipitación.

Cabe mencionar que para este flujo es importante contar con la información básica de los equipos empleados, así como los tiempos de traslado y la longitud del camino a recorrer por el sistema de acarreo. De esta forma la captación puede ser calculada mediante las siguientes ecuaciones.

$$A_v = l_{camion} \cdot a_{camion} \quad \text{Ecuación 29}$$

$$Lap_{min} = \frac{p_{min}}{m_{camion}} \quad \text{Ecuación 30}$$

$$f_{exp,min} = \frac{t_{cam,min}}{1440 \frac{min}{d}} \quad \text{Ecuación 31}$$

$$C_{m,c} = A_v \cdot Lap_{min} \cdot P \cdot f_{exp,min} \quad \text{Ecuación 32}$$

En donde:

- A_v : Área de la caja de camión de volteo (m²)
- l y a : Largo y ancho de la caja del camión de volteo (m)
- Lap_{min} : Número de traslados necesarios para la producción (1/d)
- p_{min} : Masa de la producción de mineral (t/d)
- m_{camion} : Capacidad de camión de volteo (t)
- $f_{exp,min}$: Fracción de exposición, fracción del día que se encuentra expuesto el camión a las condiciones climáticas. (d)
- $t_{cam,min}$: Tiempo promedio que tarda un camión en realizar el traslado del mineral (min)
- P : Precipitación pluvial (m/d)
- $C_{m,c}$: Flujo de captación de la precipitación pluvial en los camiones, en el acarreo de mineral (m³/d)

En el caso de que el sistema para el transporte del mineral sea mediante bandas transportadoras es necesario contar con las dimensiones reales sobre el área aproximada del mineral que ocupa la banda y el tiempo que tarda la banda en llevar el material cargado desde el inicio hasta el final de la banda, relacionándolo al número de horas de operación y posteriormente contar con



los días en los cuales el equipo trabajó. Para el cálculo de este flujo se emplean las siguientes ecuaciones.

$$A_b = l_{banda} \cdot a_{banda} \quad \text{Ecuación 33}$$

$$Lap_{min} = \frac{t_{op,ban}}{t_{banda}} \quad \text{Ecuación 34}$$

$$f_{exp,min} = \frac{t_{banda}}{1440 \text{ min/d}} \quad \text{Ecuación 35}$$

$$C_{m,b} = A_b \cdot Lap_{min} \cdot P \cdot f_{exp,min} \quad \text{Ecuación 36}$$

En donde:

A_b : Área de la banda transportadora (m^2)

l y a : Largo y ancho de la banda transportadora (m)

Lap_{min} : Número de traslados requeridos por producción (1/d)

$t_{op,ban}$: Tiempo de operación de la banda durante el día (min)

t_{banda} : Tiempo promedio que tarda la banda transportadora en el traslado del mineral de extremo a extremo (min)

$f_{exp,min}$: Fracción de exposición, fracción del día que se encuentra expuesto el camión a las condiciones climáticas. (d)

P : Precipitación pluvial (m/d)

$C_{m,b}$: Flujo de captación de precipitación pluvial en las bandas transportadoras, en el acarreo de mineral (m^3/d)

En el escenario en donde sean empleados los dos métodos de acarreo (bandas transportadoras y camiones) el resultado de la captación será igual a la suma de las captaciones resultantes de cada método como se muestra en la Ecuación 37.

$$C_{m,a} = C_{m,c} + C_{m,b} \quad \text{Ecuación 37}$$

En donde:

$C_{m,a}$: Flujo captación del mineral en el módulo acarreo (m^3/d)

Podría existir el caso en el que las bandas transportadoras se encuentren cubiertas o protegidas de las condiciones climáticas, lo mismo para los



camiones de carga, por esta razón se considera que en este escenario la ganancia o pérdida de agua sería igual a cero.

- Captación pluvial en traslado del tepetate (camiones/bandas transportadoras) – ACA-I-004

Este flujo de entrada corresponde al volumen de la precipitación pluvial captado por el sistema de acarreo de tepetate, siempre y cuando el traslado se lleve al exterior de la mina. Al igual que el caso del mineral, puede ser por bandas transportadoras o en las cajas de los camiones de carga. Este flujo permite la cuantificación independientemente del sistema de acarreo que se utilice o si se emplean ambos simultáneamente, y pretende cuantificar el volumen de agua captado durante el tiempo de traslado del acarreo si se llega a presentar un evento de precipitación.

Al igual que con el mineral, es importante contar con la información básica de los equipos empleados, así como los tiempos de traslado y la longitud del camino a recorrer por el sistema de acarreo. De esta forma la captación puede ser calculada analógicamente con las ecuaciones empleadas para el mineral mediante las siguientes ecuaciones.

$$Lap_{tepe} = \frac{p_{tepe}}{m_{camion}}$$

Ecuación 38

$$f_{exp,tepe} = \frac{t_{cam,tepe}}{1440 \frac{min}{d}}$$

Ecuación 39

$$C_{t,c} = A_v \cdot Lap_{tepe} \cdot P \cdot f_{exp,tepe}$$

Ecuación 40

En donde:

Lap_{tepe} : Número de traslados necesarios para la producción (1/d)

p_{min} : Masa de la producción de tepetate (t/d)

m_{camion} : Capacidad de camión de volteo tipo (t)

$f_{exp,tepe}$: Fracción de exposición, fracción del día que se encuentra expuesto el camión a las condiciones climáticas. (d)

$t_{cam,tepe}$: Tiempo promedio que tarda un camión en realizar el traslado del tepetate (min)

P : Precipitación pluvial (m/d)



$C_{t,c}$: Flujo de captación de la precipitación pluvial en los camiones, en el acarreo de tepetate (m^3/d)

Para el caso en el que sean empleadas bandas transportadoras en el acarreo del tepetate se deberán de conocer las características geométricas de las bandas y calcularlo mediante las siguientes ecuaciones.

$$A_b = l_{banda} \cdot a_{banda} \quad \text{Ecuación 41}$$

$$Lap_{tep} = \frac{t_{op,ban}}{t_{banda}} \quad \text{Ecuación 42}$$

$$f_{exp,tep} = \frac{t_{banda}}{1440 \text{ min/d}} \quad \text{Ecuación 43}$$

$$C_{t,b} = A_b \cdot Lap_{min} \cdot P \cdot f_{exp,tep} \quad \text{Ecuación 44}$$

En donde:

A_b : Área de la banda transportadora (m^2)

l_{banda} y a_{banda} : Largo y ancho de la banda transportadora (m)

Lap_{tep} : Número de traslados necesarios para la producción (1/d)

$t_{op,ban}$: Tiempo de operación de la banda durante el día (min)

t_{banda} : Tiempo promedio que tarda la banda transportadora en el traslado del tepetate de extremo a extremo (min)

$f_{exp,tep}$: Fracción de exposición, fracción del día que se encuentra expuesto el camión a las condiciones climáticas. (d)

P : Precipitación pluvial (m/d)

$C_{t,b}$: Flujo de captación de precipitación pluvial en las bandas transportadoras, en el acarreo de tepetate (m^3/d)

Del mismo modo, en el escenario del acarreo del tepetate en donde sean empleados los dos métodos de acarreo (bandas transportadoras y camiones) el resultado de la captación será igual a la suma de las captaciones resultantes de cada método como se muestra en la Ecuación 45.

$$C_{t,a} = C_{t,c} + C_{t,b} \quad \text{Ecuación 45}$$

En donde:

$C_{m,a}$: Flujo captación del mineral en el módulo acarreo (m^3/d)



Podría existir el caso en el que las bandas transportadoras se encuentren cubiertas o protegidas de las condiciones climáticas, lo mismo para los camiones de carga, por esta razón se considera que en este escenario la ganancia o pérdida de agua sería igual a cero.

- Captación pluvial en caminos – ACA-I-005

El flujo de captación en los caminos es similar a la captación en el método de acarreo ya que es necesario conocer las dimensiones de los caminos para poder determinar el área y el volumen de captación durante un evento de precipitación. A pesar de que normalmente el escurrimiento de los caminos no es un volumen empleado dentro del proceso, es considerado parte de la HH por ser un área en donde hubo un cambio de uso de suelo para ser empleada como servicio para el proceso, la cual tiene el potencial de aprovechar el agua que capta y asimismo perderla por evaporación.

El cálculo de la captación en los caminos se describe empleando las siguientes ecuaciones.

$$A_{\text{caminos}} = l_{\text{caminos}} \cdot a_{\text{caminos}} \quad \text{Ecuación 46}$$

$$C_{\text{caminos}} = A_{\text{caminos}} \cdot P \quad \text{Ecuación 47}$$

En donde:

A_{caminos} : Área de los caminos empleados en el acarreo (m²)

l_{caminos} y a_{caminos} : Largo y ancho de los caminos de acarreo (m)

P : Precipitación pluvial (m/d)

C_{caminos} : Flujo de captación de los caminos (m³/d)

- Riego de caminos – ACA-I-006

El agua en el riego de caminos es empleada como método de control de polvos por lo que representa una salida del proceso y por lo tanto un volumen de *agua azul* que debe ser cuantificado dentro del indicador. Esta actividad comúnmente se lleva a cabo por medio de pipas o camiones tanque o también existe la posibilidad de que se lleve a cabo empleado aspersores. El volumen empleado para el riego se define como V_{riego} y puede ser medido mediante contadores volumétricos o flujómetros. Como se



mencionó anteriormente, este flujo a pesar de ser una entrada, se considera que el 100% del volumen aplicado en el riego de caminos se pierde por evaporación o infiltración y por lo tanto todo el volumen aplicado al riego de caminos contará directamente para la HHA.

VII.3.2 Flujos de salida módulo Acarreo

- Evaporación en el traslado del mineral – ACA-O-001

Este flujo corresponde al volumen perdido por efectos de la evaporación durante el acarreo del mineral, es decir, el flujo de salida perdió en camiones y bandas transportadoras por su interacción con los factores climáticos. Como se mencionó anteriormente, se emplearon distintos factores para la estimación de la evaporación en distintas superficies (suelos desnudos, espejo de agua, playa húmeda), para este flujo se utiliza el factor de *suelos desnudos*.

Los valores de A_v , Lap_{min} , $f_{exp,min}$, obtenidos de las ecuaciones 26,27 y 28; ya que la evaporación y la precipitación emplean estas mismas variables en los cálculos. El presente flujo se debe de calcular mediante la Ecuación 48.

$$E_{m,c} = A_v \cdot Lap_{min} \cdot E \cdot f_{exp,min} \cdot e_{sd}$$

Ecuación 48

En donde:

A_v : Área de la caja de camión de volteo (m²)

Lap_{min} : Número de traslados necesarios para la producción (1/dl)

$f_{exp,min}$: Fracción de exposición, fracción del día que se encuentra expuesto el camión a las condiciones climáticas. (d)

E : Evaporación diaria (m/d)

e_{sd} : Factor de la evaporación de suelos desnudos (adimensional)

$E_{m,c}$: Flujo de agua evaporada en camiones durante el acarreo de mineral (m³/d)

En el caso de las bandas transportadoras, es necesario al igual que en el cálculo de la captación, contar con las dimensiones propias de la banda, por la cual se transporta el mineral y el tiempo que la banda tarda en dar un ciclo, es decir, el tiempo necesario que le tomase a la banda el transportar el mineral de extremo a extremo llevar el mineral y el número de horas de operación de la banda durante el día.



Los valores de A_b , Lap_{min} , $f_{exp,min}$, para las bandas transportadoras se obtiene de las ecuaciones Ecuación 38, Ecuación 39 y Ecuación 40, ya que la evaporación y la precipitación emplean estas mismas variables en los cálculos. El presente flujo es calculado mediante la Ecuación 49.

$$E_{m,b} = A_b \cdot Lap_{min} \cdot E \cdot f_{exp,min} \cdot e_{sd}$$

Ecuación 49

En donde:

A_b : Área de la banda transportadora (m²)

Lap_{min} : Número de traslados necesarios para la producción (1/d)

$f_{exp,min}$: Fracción de exposición, fracción del día que se encuentra expuesto el camión a las condiciones climáticas (d)

E : Evaporación diaria (m/d)

e_{sd} : Factor de la evaporación de suelos desnudos.

$E_{m,b}$: Flujo de agua evaporado durante el acarreo en bandas del mineral (m³/d)

Como se mencionó anteriormente, en el caso de que las bandas transportadoras se encuentren cubiertas, el flujo de evaporación en las bandas es igual a cero. De esta manera, el resultado del flujo será la suma del volumen de agua evaporado en los camiones y las bandas transportadoras que acarrean mineral.

$$E_{m,a} = E_{m,c} + E_{m,b}$$

Ecuación 50

En donde:

$E_{m,a}$: Flujo de agua perdido por efectos de la evaporación en el acarreo de mineral (m³/d)

- Evaporación en el traslado del tepetate - ACA-O-002

Este flujo corresponde al volumen de agua perdido por evaporación dentro del área de las cajas de los camiones de volteo y las bandas transportadoras que transportan tepetate debido a la interacción climática durante su traslado, por lo que de forma análoga se calcula como el flujo anterior. En el caso de que el tepetate se use para rellenar áreas dentro de la mina subterránea, se considera que no existe exposición a las condiciones climáticas y por lo tanto no se consideran pérdidas por evaporación.



Nuevamente se empleada el término A_v , el cual fue calculado anteriormente con la Ecuación 29, mientras que los valores de Lap_{tep} y $f_{exp,tep}$ son obtenidos nuevamente mediante la Ecuación 42 y la Ecuación 43 respectivamente. El cálculo de este flujo emplea la Ecuación 51.

$$E_{t,c} = A_v \cdot Lap_{min} \cdot E \cdot f_{exp,tep} \cdot e_{sd}$$

Ecuación 51

En donde:

A_v : Área de la caja de camión de volteo (m²)

Lap_{tep} : Número de traslados necesarios para la producción (1/d)

$f_{exp,tep}$: Fracción de exposición, fracción del día que se encuentra expuesto el camión a las condiciones climáticas. (d)

E : Evaporación diaria (m/d)

e_{sd} : Factor de la evaporación de suelos desnudos (adimensional)

$E_{t,c}$: Volumen de agua evaporado en camiones durante el acarreo del tepetate (m³/d)

Al obtener el área de la banda transportadora (Ecuación 41), el número de traslados necesarios para la producción (Ecuación 42) y la fracción del día que se encuentra expuesto el camión a las condiciones climáticas (Ecuación 43), el flujo asociado a la pérdida por evaporación durante el transporte de tepetate mediante bandas transportadoras es calculado mediante la Ecuación 52.

$$E_{t,b} = A_b \cdot Lap_{tep} \cdot E \cdot f_{exp,tep} \cdot e_{sd}$$

Ecuación 52

En donde:

A_b : Área de la banda transportadora (m²)

Lap_{tep} : Número de traslados necesarios para la producción (1/d)

$t_{op,ban}$: Tiempo de operación de la banda durante el día (min)

t_{banda} : Tiempo promedio que tarda la banda transportadora en el acarreo del tepetate de extremo a extremo (min)

$f_{exp,tep}$: Fracción de exposición, fracción del día que se encuentra expuesto el camión a las condiciones climáticas. (d)

E : Evaporación diaria (m/d)

e_{sd} : Factor de la evaporación de suelos desnudos

$E_{t,b}$: Flujo de agua evaporada en las bandas transportadoras durante el acarreo del tepetate (m³/d)



El resultado de este flujo será la suma de los flujos de agua evaporada en los camiones y las bandas transportadoras que acarrean tepetate.

$$E_{t,a} = E_{t,c} + E_{t,b}$$

Ecuación 53

En donde:

- $E_{t,a}$: Flujo de agua perdida por efectos de la evaporación en el acarreo de tepetate (m^3/d)
- $E_{t,b}$: Flujo de agua evaporada en las bandas transportadoras durante el acarreo del tepetate (m^3/d)
- $E_{t,c}$: Volumen de agua evaporado durante el acarreo del tepetate (m^3/d)

- Evaporación en los caminos – ACA-O-003

La estimación del flujo de la evaporación en los caminos empleados para el acarreo y transporte, tanto del mineral, como del tepetate, es independiente a la evaporación en las bandas y/o camiones, este flujo se refiere a la pérdida por evaporación generada en el riego de los caminos de servicio.

Es necesario calcular el área de los caminos mediante la Ecuación 46, para después calcular la evaporación empleando la Ecuación 54.

$$E_{caminos} = A_{caminos} \cdot E \cdot e_{sd}$$

Ecuación 54

En donde:

- $A_{caminos}$: Área de los caminos (m^2)
- E : Evaporación diaria (m/d)
- e_{sd} : Factor de la evaporación de suelos desnudos
- $E_{caminos}$: Flujo de evaporación en los caminos (m^3/d)

- Humedad del mineral – ACA-O-004

Este flujo es el resultado de la interacción de los elementos climáticos durante la fase de acarreo. Esta es la principal salida del módulo por parte del mineral y representa un flujo de transferencia ya que este es empleado como flujo de entrada dentro del módulo de *Trituración (RED-I-001)*.



Este flujo se calcula haciendo un balance entre la humedad con la que entra al módulo proveniente del módulo mina y los elementos climáticos como la precipitación y la evaporación (Ecuación 55).

$$V_{m,a} = V_{minu} + C_{m,a} - E_{m,a}$$

Ecuación 55

En donde:

V_{minu} : Flujo de agua contenida en la producción de mineral en el módulo mina (m³/d)

$V_{m,a}$: Flujo de agua contenida en el mineral en el acarreo (m³/d)

$C_{m,a}$: Flujo de captación del mineral en el módulo acarreo (m³/d)

$E_{m,a}$: Flujo de agua perdido por efectos de la evaporación en el acarreo de mineral (m³/d)

- Humedad del tepetate – ACA-O-005

Análogo al flujo anterior, este flujo es el resultado y otra principal salida de módulo debido a la humedad contenida en el tepetate. Representa un flujo de transferencia ya que este también representa un flujo de entrada dentro del módulo *Acumulamiento* (ACU-I-001).

De igual forma es necesario realizar un balance entre la humedad con la que entra al módulo acarreo, proveniente del módulo mina y la interacción con los elementos climáticos para determinar el flujo resultante. El balance se encuentra definido por la Ecuación 56.

$$V_{t,a} = V_{tep,t} + C_{t,a} - E_{t,a}$$

Ecuación 56

En donde:

$V_{tep,t}$: Flujo de agua contenida en la producción de tepetate en el tajo (m³/d)

$V_{t,a}$: Flujo de agua contenida en la producción de tepetate en el acarreo (m³/d)

$C_{t,a}$: Flujo de captación del tepetate en el módulo acarreo, en bandas y/o camiones (m³/d)

$E_{t,a}$: Flujo de agua perdida por efectos de la evaporación en el acarreo de tepetate (m³/d)



VII.3.3 Cuantificación de la HHV en el módulo Acarreo

Para realizar el cálculo de la HHV del módulo Acarreo se consideró que la evaporación calculada en los camiones, bandas transportadoras y caminos será cuantificada dentro del volumen de Agua Verde del módulo para la determinación de la HHV.

La segunda consideración contempla que en el cálculo de la evaporación no se toma en cuenta el volumen de agua evaporada generado por riego de los caminos, ya que se considera como un uso consuntivo y se espera que en algún momento ese volumen de agua aplicado se pierda por completo por efectos de la interacción climática y por este motivo no se cuantifica para la HHV y es cuantificado dentro de la HHA.

La tercera consideración consiste en contabilizar para la HHV el volumen de agua generado por la precipitación y que pudiera ser captado por los camiones o por las bandas transportadoras durante el recorrido del mineral y del tepetate, cuantificando este valor mediante el balance entre la captación y la evaporación dentro de los camiones y bandas, en donde, en el caso de ser positiva dicha diferencia el valor corresponderá al volumen de agua que se ha incorporado al material. Además, se considera la captación de los sistemas de acarreo por el aprovechamiento de agua pluvial para el módulo. El cálculo del Agua Verde para el módulo acarreo se encuentra definido por la ecuación Ecuación 57.

$$AV_{Aca} = \sum_{i=1}^d C_{m,a} + \sum_{i=1}^d C_{t,a} + \sum_{i=1}^d C_{caminos} + \sum_{i=1}^d E_{caminos}$$

Ecuación 57

En donde:

AV_{Aca} : Volumen de Agua Verde del módulo Acarreo (m³)

$\sum_{i=1}^d C_{m,a}$: Sumatoria del flujo de agua aprovechado por la captación en el acarreo de mineral (m³)

$\sum_{i=1}^d C_{t,a}$ Sumatoria del flujo de agua aprovechado por la captación en el acarreo de tepetate (m³)

$\sum_{i=1}^d E_{caminos}$: Sumatoria del flujo de evaporación de los caminos (m³)

$\sum_{i=1}^d C_{camino}$ Sumatoria del flujo de la captación de los caminos(m³)

d : Número de días del periodo de evaluación (365 o 366)



La sumatoria anual del volumen de Agua Verde dividida entre la producción total anual dará como resultado la HHV el módulo Acarreo.

$$HHV_{Aca} = \frac{AV_{Aca}}{\sum_{i=1}^d p_{total}}$$

Ecuación 58

En donde:

HHV_{Aca} : Huella Hídrica Verde del módulo Acarreo (m^3/t)

d : Número de días del periodo de evaluación (365 o 366)

AV_{Aca} : Volumen de Agua Verde del módulo Acarreo (m^3)

$\sum_{i=1}^d p_{total}$: Sumatoria de la producción total de material (tepetate + mineral), (t)

VII.3.4 Cuantificación de la HHA en el módulo Acarreo

Para el cálculo de la HHA dentro del módulo Acarreo se considera el agua correspondiente al riego de los caminos y a los flujos de evaporación de los camiones y bandas, esto es debido a que no existe adición de agua en el acarreo de mineral o el tepetate, y por la posible pérdida del agua de la humedad del mineral que proviene de un módulo anterior.

El cálculo del Agua Azul para el módulo Acarreo es descrito a continuación:

$$AA_{Aca} = \sum_{i=1}^d V_{riego} + \sum_{i=1}^d V_{m.a} + \sum_{i=1}^d V_{t.a}$$

Ecuación 59

En donde:

AA_{Aca} : Volumen de Agua Azul del módulo Acarreo (m^3)

$\sum_{i=1}^d V_{riego}$: Sumatoria del flujo del agua de riego en los caminos (m^3)

$\sum_{i=1}^d V_{m.a}$: Sumatoria del flujo de evaporación del mineral durante el acarreo (m^3)

$\sum_{i=1}^d V_{t.a}$: Sumatoria del flujo de evaporación del tepetate durante el acarreo (m^3)

d : Número de días del periodo de evaluación (365 o 366)

El volumen de Agua Azul dividida entre la sumatoria producción total anual dará como resultado la HHA del módulo Acarreo.



$$HHA_{Aca} = \frac{AA_{Aca}}{\sum_{i=1}^d p_{total}}$$

Ecuación 60

En donde:

HHA_{Aca} : Huella Hidrica Azul del módulo Acarreo (m^3/t)

AA_{Aca} : Volumen de Agua Azul del módulo Acarreo (m^3)

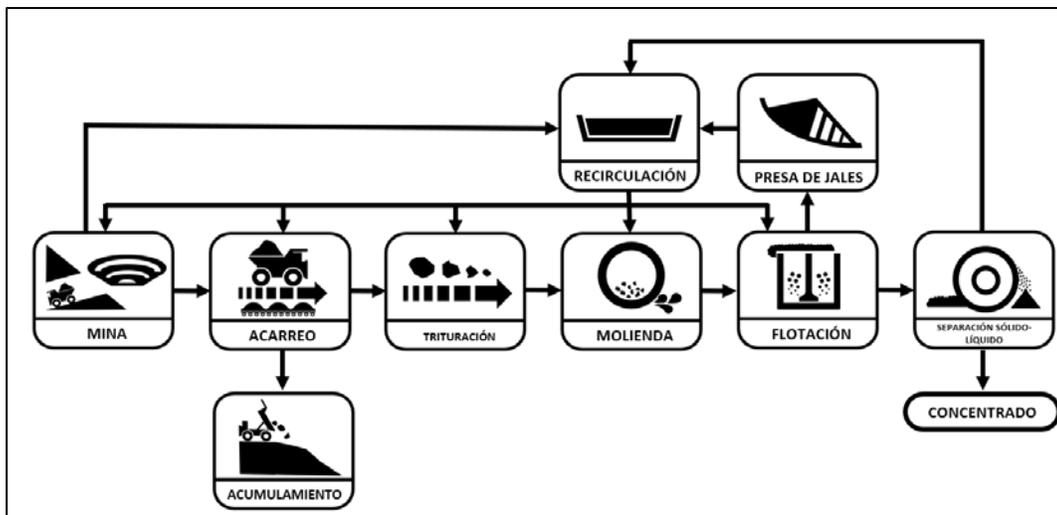
d : Número de días del periodo de evaluación (365 o 366)

$\sum_{i=1}^d p_{total}$: Sumatoria de la producción total de material (mineral y tepetate), (t)

VII.3.5 Cuantificación de la HHG en el módulo Acarreo

Para el módulo Acarreo se considera que no existe ningún flujo de descarga o efluente que represente una salida del sistema o que contemple aportaciones al componente de la HHG con una concentración elevada de algún parámetro. Por ese motivo el volumen de agua gris del módulo Acarreo resulta igual a cero y por lo tanto la HHG del módulo también.

Con fines de facilitar la relación entre módulos y el seguimiento del proceso se la siguiente figura muestra nuevamente el diagrama modular desarrollado en la Figura 37.





VII.4. Módulo Acumulamiento

La Figura 41 muestra los flujos correspondientes al módulo acumulamiento y sus condiciones de aporte para los componentes de la HH.

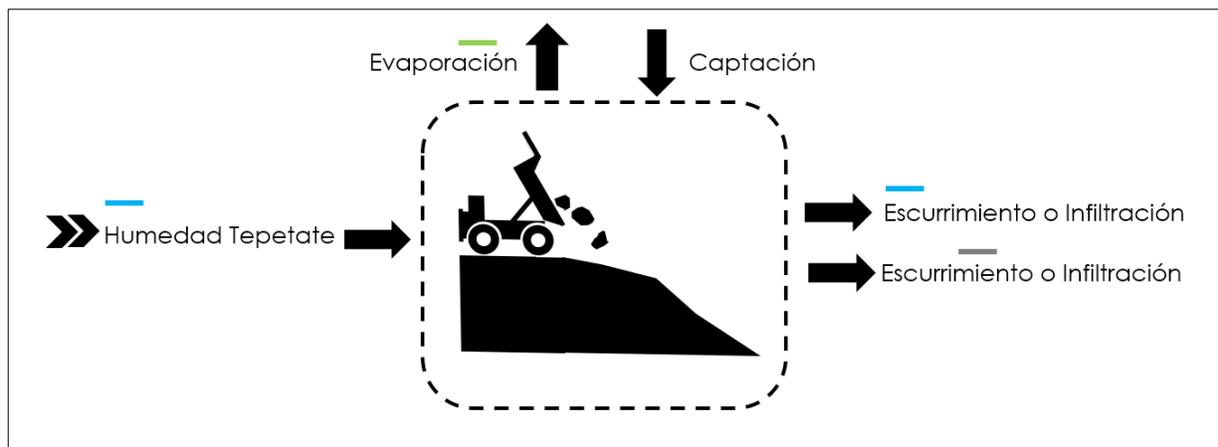


Figura 41. Flujos del módulo Acumulamiento

VII.4.1 Flujos de entrada módulo Acumulamiento

- Humedad del Tepetate – ACU-I-001

Este flujo ($V_{acu,hum}$) correspondiente a la humedad del tepetate, es de transferencia y proviene del módulo *acarreo*, del flujo ACA-O-005 y por lo tanto no cambiará su valor. Se considera para ser cuantificado para la HHA, ya que el hecho de acumular material (residuos mineros) por un tiempo indefinido, representa una salida del proceso ya que la humedad contenida no será aprovechada por el proceso.

- Captación – ACU-I-002

Este flujo representa la captación de agua por efectos de la precipitación sobre el área ocupada por el acumulamiento de los residuos mineros. Asimismo, es la única entrada externa de agua hacia el módulo *Acumulamiento*.

En este caso se considera que la precipitación pluvial cae de manera vertical sobre el área delimitada para los terreros, por lo que la variación del terreno no afecta el volumen captado, es decir, no importa qué clase de



variación en altura tenga el terreno, dado que la precipitación será la misma sobre un área determinada.

Para realizar el cálculo del flujo de la captación es necesario tomar en cuenta la Ecuación 13, del balance precipitación- evaporación, ya que si $Bal_{meteo} < 0$, entonces no existe escurrimientos, y si el $Bal_{meteo} > 0$, y por lo tanto los excedentes o escurrimientos del balance se cuantificaran como un volumen de *agua azul*, de lo contrario el volumen implícitamente estará siendo contado en la evaporación del módulo. Por lo tanto, para el cálculo se emplea la Ecuación 61.

$$C_{acu} = A_{acu} \cdot Bal_{meteo}$$

Ecuación 61

En donde:

- Bal_{meteo} : Balance entre evaporación y precipitación (m/d)
- C_{acu} : Flujo de captación del módulo acumulamiento (m³/d)
- A_{acu} : Área de diseño de los terreros (m²)

VII.4.2 Flujos de salida módulo Acumulamiento

- Evaporación – ACU-O-001

Este flujo se considera como una salida de agua todo el volumen de agua que se pierde por efectos de la evaporación, sin importar el resultado de del balance de la Ecuación 13 (balance precipitación- evaporación). Toda la evaporación estimada en la superficie de los terreros y/o tepetateros debe de cuantificarse como *agua verde*.

Es preciso contar con la magnitud de la superficie diaria para estimar la evaporación en los terreros y/o tepetateros, empleando los datos de evaporación y el factor de evaporación para suelos desnudos (e_{sd}), mediante la Ecuación 62.

$$E_{acu} = S_{ter} \cdot E \cdot e_{sd}$$

Ecuación 62

En donde:

- E_{acu} : Flujo de evaporación de los terreros y/o tepetateros (m³/d)
- S_{ter} : Superficie de los terreros y/o tepetateros (m²)
- e_{sd} : Factor de evaporación de suelos desnudos (adimensional)
- E : Evaporación diaria (m/d).



- Ecurrimiento/ Infiltración – ACU-O-02

Este flujo de salida representa el flujo proveniente de los escurrimientos generados en el módulo *acumulamiento* cuando en el balance diario entre la evaporación y la precipitación resulta ser mayor la precipitación, es decir, se considera que existirá una salida de agua del sistema por medio del escurrimiento o infiltración generado por los excedentes de agua (Ecuación 63). En el caso de que la evaporación supere la captación en el balance diario, el volumen del escurrimiento se cuantificará como 0 empleando la Ecuación 63.

Este flujo se considera como una pérdida del volumen de Agua Azul, ya que al infiltrarse el agua al subsuelo se vuelve no disponible y en el caso de un escurrimiento, el agua puede recorrer una distancia considerable fuera del área de los terreros o depositarse en un lugar fuera del área del módulo en donde se evapore o se infiltre.

$$V_{ro,acu} = (C_{acu} - E_{acu})$$

Ecuación 63

En donde:

$V_{ro,acu}$: Flujo de escurrimientos en el módulo acumulamiento (m^3/d)

E_{acu} : Flujo de evaporación de los terreros (m^3/d)

C_{acu} : Flujo de captación del módulo acumulamiento (m^3/d)

- Ecurrimiento/ Infiltración Parámetros elevados – ACU-O-03

Este flujo se presenta en el escenario cuando el escurrimiento generado en el flujo ACU-O-002 contiene una concentración de algún parámetro de interés mayor a los valores naturales del cuerpo receptor o a los establecidos por la legislación aplicable.

Para el cálculo de este flujo es fundamental contar con información de muestreos de cuerpos de agua superficiales (cárcamos, estanques, bordos, escorrentías, etc.) que se encuentren aguas abajo del sitio en donde se localizan los terreros y/o tepetateros. De esta manera es posible conocer la concentración del escurrimiento generado y calcular un volumen aproximado.

En el caso de que existiera la infraestructura y las concentraciones mayores a lo establecido en algún parámetro, este flujo no sustituye al ACU-O-002, ya que ese flujo se cuantifica dentro del a HHA y este dentro de la HHG.



Para la cuantificación del flujo es necesario emplear la Ecuación 64, en donde el volumen de escurrimiento calculado será igual al excedente del balance de la evaporación-precipitación, asumiendo que todo el excedente tiene un potencial de formar parte del escurrimiento, y posteriormente ser multiplicado por el factor de dilución (F_c) establecido en la Ecuación 18

$$V_{dil,acu} = F_c * V_{ro,acu}$$

Ecuación 64

En donde:

$V_{dil,acu}$: Flujo de Agua Gris necesario para disminuir la concentración del parámetro concentrado (m³)

F_c : Factor de dilución del parámetro n para cálculo de volumen de agua gris (adimensional)

$V_{ro,acu}$: Flujo de escurrimientos en el módulo Acumulamiento (m³)

VII.4.3 Cuantificación de la HHV del módulo Acumulamiento

Para el cálculo del volumen de *agua Verde* y de la HHV en el módulo *Acumulamiento*, se considera únicamente el volumen por evaporación en la superficie de los terreros, debido a que el único flujo de entrada de agua puede ser proveniente de la precipitación y dado que, una vez depositados los residuos no son movidos de lugar. Por lo que se considera que es el único flujo de *Agua Verde* presente. Al igual que con las otras superficies expuesta la evaporación siempre es cuantificada para la HHV sin importar que el balance diario entre evaporación y precipitación (Ecuación 13) resulte positivo.

$$AV_{Acu} = \sum_{i=1}^d E_{acu}$$

Ecuación 65

En donde:

AV_{Acu} : Volumen de agua Verde del módulo Acumulamiento (m³)

$\sum_{i=1}^d E_{acu}$: Sumatoria del flujo de evaporación del módulo Acumulamiento (m³)

d : Número de días del periodo de evaluación (365 o 366)



El volumen de agua verde dividido entre la sumatoria de la producción total de material anual dará como resultado la HV del módulo Acumulamiento.

$$HHV_{Acu} = \frac{AV_{Acu}}{\sum_{i=1}^d p_{total}}$$

Ecuación 66

En donde:

HHV_{Acu} : Huella Hídrica Verde del módulo Acumulamiento (m^3/t)

AV_{Acu} : Volumen de Agua Verde del módulo Acumulamiento (m^3)

$\sum_{i=1}^d p_{total}$: Sumatoria de la producción total de material (tepetate + mineral), (t)

d : Número de días del periodo de evaluación (365 o 366)

VII.4.4 Cuantificación de la HHA del módulo Acumulamiento

Del mismo modo que para la HHV de este módulo, se considera que la única manera en la que puede existir un volumen de *Agua Azul* en los terreros es mediante el escurrimiento originado por el balance entre la evaporación y la captación en el área del residuo minero. De esta forma cuando $Bal_{meteo} > 0$, se considera que existirán escurrimientos en la superficie de los terreros con un valor igual a la diferencia positiva entre la precipitación y la evaporación y será sumado anualmente mediante la Ecuación 67.

$$AA_{Acu} = \sum_{i=1}^d V_{ro,acu}$$

Ecuación 67

En donde:

AA_{Acu} : Volumen de Agua Azul del módulo Acumulamiento (m^3)

$\sum_{i=1}^d V_{ro,acu}$: Sumatoria del flujo de los escurrimientos en el módulo Acumulamiento (m^3)

d : Número de días del periodo de evaluación (365 o 366)

La sumatoria anual del volumen de Agua Azul dividida entre la producción total anual dará como resultado la HHA del módulo Acumulamiento

$$HHA_{Acu} = \frac{AA_{Acu}}{\sum_{i=1}^d p_{total}}$$



Ecuación 68

En donde:

HH_{Acu} : Huella Hídrica Azul del módulo Acumulamiento (m^3/t)

AA_{Acu} : Volumen de Agua Azul del módulo Acumulamiento (m^3)

$\sum_{i=1}^d p_{total}$: Sumatoria de la producción total de material (tepetate + mineral), (t)

d : Número de días del periodo de evaluación (365 o 366)

VII.4.5 Cuantificación de la HHG del módulo Acumulamiento

Con el mismo criterio que en el módulo *Mina*, los escurrimientos que pudieran contener algún parámetro concentrado deberán ser calculados mediante el flujo ACU-O-003. La cuantificación del volumen de *Agua Gris* será la sumatoria del flujo de dichos escurrimientos empleando la Ecuación 69.

$$AG_{Acu} = \sum_{i=1}^d V_{dil.acu}$$

Ecuación 69

En donde:

AG_{Acu} : Volumen de Agua Gris del módulo Acumulamiento (m^3)

$\sum_{i=1}^d V_{dil.acu}$: Sumatoria del flujo de Agua Gris necesario para disminuir la concentración del parámetro concentrado (m^3)

d : Número de días del periodo de evaluación (365 o 366)

La sumatoria anual del volumen de *Agua Gris* dividida entre la producción total anual dará como resultado la HHG del módulo Acumulamiento.

$$HHG_{Acu} = \frac{AG_{Acu}}{\sum_{i=1}^d p_{total}}$$

Ecuación 70

En donde:

HHG_{Acu} : Huella Hídrica Gris del módulo Acumulamiento (m^3/t)

AG_{Acu} : Volumen de Agua Gris del módulo Acumulamiento (m^3)

$\sum_{i=1}^d p_{total}$: Sumatoria de la producción total de material (tepetate + mineral), (t)

d : Número de días del periodo de evaluación (365 o 366)



VII.5. Módulo Trituración

Este módulo operativamente cumple la función de una primera etapa de acondicionamiento previa a la molienda, reduciendo de tamaño las rocas grandes del mineral. La Figura 42 muestra el diagrama de los flujos de entrada de salida de este módulo.

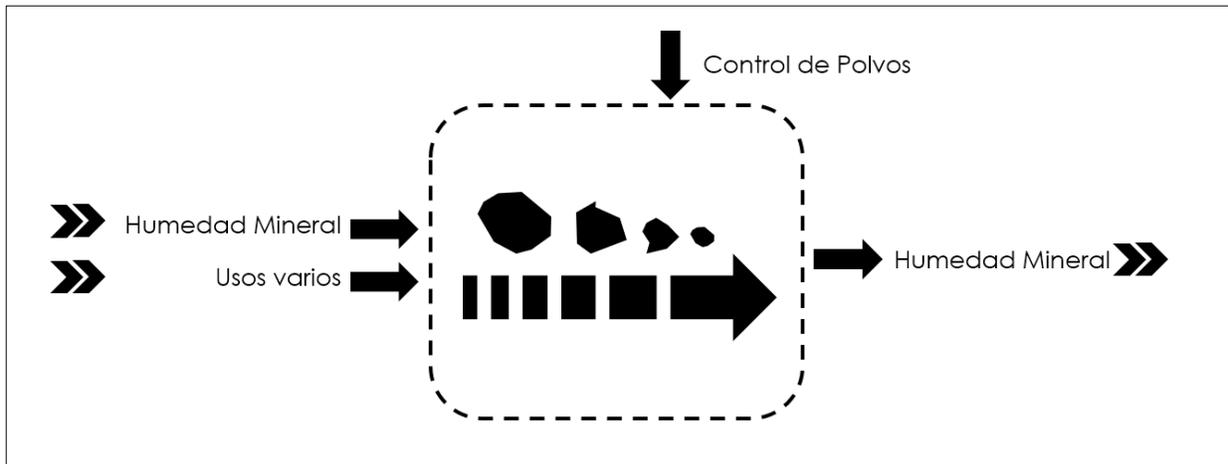


Figura 42. Flujos del módulo Trituración.

VII.5.1 Flujos de entrada módulo Trituración

- Humedad del Mineral – RED-I-001

Este flujo representa la humedad del mineral de entrada ($V_{min,a}$) proveniente del módulo acarreo. Este flujo es de transferencia, lo que quiere decir que a pesar de ser una salida para el módulo *acarreo*, representa un flujo de entrada para el *módulo Trituración*.

- Usos Varios – RED-I-002

Al igual que en el módulo mina, se considera que existen múltiples necesidades de acuerdo con las características particulares de cada sitio, generando escenarios en donde se puede requerir del recurso hídrico fuera de los flujos planteados anteriormente. Estas eventuales pueden incluir lavado



de equipos, recirculaciones en los circuitos de las piletas empleadas dentro de la mina o cualquier otro que el proceso demande. Por esa razón, este flujo puede cuantificar aquellos consumos adicionales a los planteados en el esquema general. Sin embargo, estos usos generalmente se encuentran asociados a recirculaciones. Para este módulo cuando el volumen de agua no pueda regresar al proceso entonces deberá de cuantificarse como una pérdida de volumen de *Agua azul* (V_{redmu}).

- Control de Polvos – RED-I-003

Este flujo representa el volumen de agua que se añade durante la trituración ($V_{polvos,red}$) para el control de polvo. Pueden existir dos escenarios para este flujo, el primero en el cual el volumen de agua se emplee como método de control de polvos y este volumen no se incorpore al mineral, para posteriormente ser trasladado en polvos húmedos hacia otra parte del proceso. De esta forma se consideraría como una salida para el sistema y por lo tanto deberá de ser cuantificado como un volumen de *agua azul*, sin tener interacción con el mineral, por lo que el valor de la humedad de entrada ($V_{min,a}$) quedaría sin modificaciones, y también existe el escenario en el cual el volumen de agua sea añadido directamente al mineral con lo cual aumentaría su contenido de humedad.

VII.5.2 Flujos de salida módulo Trituración

- Humedad del mineral - RED-O-001

Este flujo representa la humedad del mineral de salida ($V_{min,red}$) y es de transferencia, lo que quiere decir que a pesar de ser una salida para el módulo *Trituración*, representa un flujo de entrada para el módulo *molienda*.

El valor del flujo será igual a la humedad de entrada más las ganancias de agua si el agua empleada en el control de polvos es añadida al mineral. El flujo de salida del mineral del módulo Trituración se encuentra expresado mediante la Ecuación 71.

$$V_{min,red} = V_{min,a} + V_{polvos,red}$$

Ecuación 71



En donde:

$V_{min,red}$: Humedad del mineral a la salida del módulo *Trituración* (m^3/d).

$V_{min,a}$: Humedad contenida en el mineral en el acarreo (m^3/d)

$V_{polvos,red}$: Flujo de agua adicionado como control de polvos (m^3/d)

VII.5.3 Cuantificación de la HHV del módulo Trituración

Se considera que las actividades del presente módulo comúnmente no se realizan a la intemperie o en la exposición a las condiciones climáticas, por lo que se considera que no existe una interacción directa con la precipitación o los efectos de la evaporación con el proceso y por consiguiente no se identificaron pérdidas de *Agua verde* cuantificables.

VII.5.4 Cuantificación de la HHA del módulo Trituración

El módulo *Trituración* cuenta con 3 flujos de entrada y uno de salida en donde todos ellos se relacionan con el tipo de *agua azul* y por lo tanto con la HHA, sin embargo, ninguno de estos flujos representa una pérdida o salida del sistema. A pesar de que existe la posibilidad de la adición de agua al mineral durante el control de polvos y que el origen del agua de esta actividad puede ser de uso consuntivo, no se debe de cuantificar como un volumen de *agua azul* que aporte a la HHA debido a que este volumen está siendo aprovechado por el proceso.

VII.5.5 Cuantificación de la HHG del módulo Trituración

Dadas las condiciones operativas del PCSC, se considera que no existe ningún flujo asociado a la HHG en este módulo.

VII.6. Módulo Molienda

Este módulo contempla las actividades de molienda y los distintos arreglos operativos que puedan existir. Las actividades de los molinos de remolienda y de los hidrociclones deben de ser englobados dentro de este



módulo para la cuantificación del total de los flujos, la Figura 43 muestra los flujos de entrada y de salida del módulo molienda.

Se considera que las actividades de este módulo se llevan a cabo en lugares resguardados de la interacción climática y por este motivo ninguno de los flujos se encuentra relacionado a la HHV. Asimismo, al no tener descargas ni posibles escurrimientos, el módulo tampoco contempla condiciones en las que se genere un flujo de HHG, debido a que es un sistema en donde el objetivo es emplear el agua para generar las condiciones ideales de operación y la descarga o salida operacional del proceso se convierte en la alimentación del módulo de flotación.

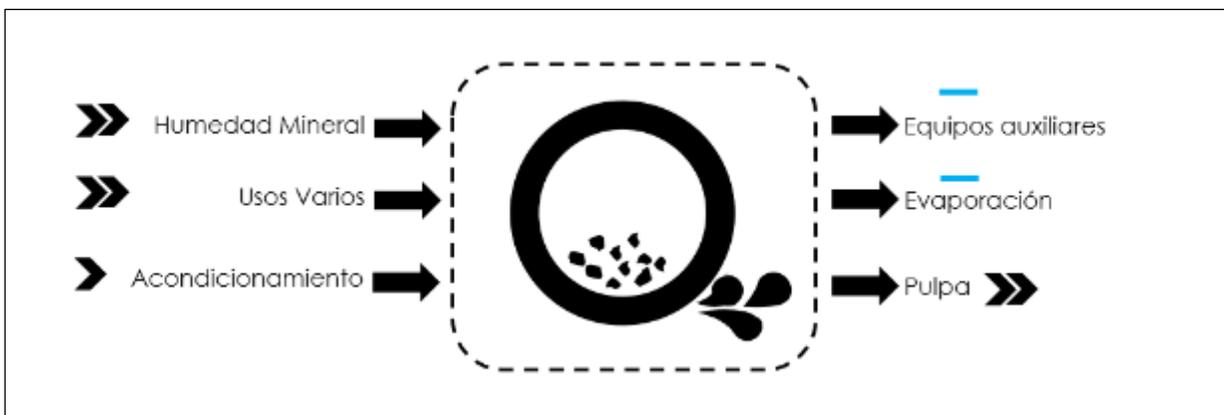


Figura 43. Flujos del módulo Molienda.

III.1 Flujos de entrada módulo Molienda

- Humedad del mineral - MOL-I-001

Este flujo de entrada representa la humedad del mineral al módulo proveniente del módulo *Trituración* ($V_{min,red}$), lo que significa que es un flujo de transferencia. En este punto del proceso es muy importante conocer la humedad del mineral ya que es un parámetro importante para la operación y por cuestiones operativas generalmente si se conoce.

- Usos Varios - MOL-I-002

Al igual que en el módulo mina, se considera que existen múltiples necesidades de acuerdo con las características particulares de cada sitio, generando escenarios en donde se puede requerir del recurso hídrico fuera de los flujos planteados anteriormente. Estos eventuales pueden incluir lavado



de equipos, en las áreas en donde se ubican los molinos, hidrociclones u otros equipos empleados dentro del área de molienda o cualquier otro proceso que la actividad demande. Por esa razón, este flujo puede cuantificar aquellos consumos adicionales a los planteados en el esquema general. Sin embargo, estos usos generalmente se encuentran asociados a recirculaciones. Para este módulo cuando el volumen de agua no pueda regresar al proceso entonces deberá de cuantificarse como un volumen de *Agua azul* ($V_{mol,mu}$).

- Acondicionamiento - MOL-I-003

Este flujo contempla el volumen de agua adicionado durante la molienda ($V_{mol,acon}$) para acondicionar el material según las especificaciones operativas y el porcentaje de sólidos buscado, como se mencionó dentro del Capítulo III. Este flujo representa una entrada de *agua azul* para el módulo, sin embargo, tomando en cuenta que únicamente las salidas del sistema representan pérdidas, este flujo es fundamental para el balance general del módulo, pero no se cuantifica dentro de la HHA.

III.1.6 Flujos de salida módulo Molienda

- Equipos Auxiliares - MOL-O-001

Este flujo tiene el potencial de representar una salida para el sistema, ya que, en operaciones algunos equipos de limpieza de las áreas o algún otro equipo auxiliar emplean agua fresca. Por este motivo si el agua no retorna al proceso, se cuantificará como una salida o consumo por el sistema. Este flujo se puede emplear de manera versátil y flexible en conjunto con el flujo MOL-I-002 (usos varios) ya que los puntos de adición de agua fresca pueden ser variados y puede existir la posibilidad de que se tengan puntos de suministro de agua en cada módulo o también puede ser que todo se maneje a través del módulo *Manejo* y de ahí se distribuya o se cuantifique. Por esa razón el módulo *Manejo* tiene la capacidad de conectarse con todos los demás módulos en donde se hace uso de los recursos hídricos del proceso. Este flujo es representado como $V_{mol,ea}$.



- Evaporación - MOL-O-002

Para este flujo se considera como una salida de agua en donde todo el volumen de agua que se pierde por evaporación en los molinos es debido por efectos mecánicos y la liberación de energía. Para este flujo se considera el mismo valor obtenido dentro del flujo FLO-O-001 correspondiente a la evaporación calculada en el circuito de flotación, bajo la consideración que la temperatura de la pulpa es similar en ambos circuitos y es representado como E_{mol} .

- Pulpa - MOL-O-003

Este flujo contempla la pulpa de mineral ($Pulpa_{mol}$), la cual es el resultado de la combinación del mineral previamente triturado y molido, y la adición de agua hasta llegar al porcentaje de sólidos óptimo requerido para la operación, el cual comúnmente se maneja hasta un valor del 80% de sólidos (Iwasaki et al., 1985). Este flujo es la transferencia hacia el módulo *Flotación*, por lo que el agua contenida no se cuantifica para la HHA.

Este es uno de los flujos en donde se puede observar la dinámica de los procesos minero-metalúrgicos, ya que constantemente tiene que ser ajustado la adición de agua para los requerimientos operativos de la siguiente etapa y es fácil observar su variación cuando se tiene una resolución temporal diaria de esta información.

III.1.7 Cuantificación de la HHV del módulo Molienda

Como se mencionó anteriormente este módulo no cuenta con flujos asociados a la HHV. A pesar de que existe una potencial pérdida de agua por evaporación en este módulo, esta no se encuentra ligada a la evaporación por efectos climatológicos y se asume que la infraestructura de este módulo no se encuentra a la intemperie y por lo tanto la evaporación está asociada a los efectos de la energía que es transferida a agua durante la etapa de la molienda.



III.1.8 Cuantificación de la HHA del módulo Molienda

La cuantificación del módulo molienda consiste básicamente en el consumo que pudiera existir en equipos auxiliares a la actividad y las pérdidas estimadas de evaporación como se puede mostrar en la Ecuación 72.

$$AA_{mol} = \sum_{i=1}^d V_{mol,ea} + \sum_{i=1}^d E_{mol}$$

Ecuación 72

En donde:

AA_{mol} : Volumen de Agua Azul del módulo Molienda (m^3)

$\sum_{i=1}^d V_{mol,ea}$: Sumatoria del flujo de salida de los equipos auxiliares en el módulo Molienda (m^3)

$\sum_{i=1}^d E_{mol}$: Sumatoria del flujo de evaporación en los equipos asociados al módulo Molienda (m^3)

d : Número de días del periodo de evaluación (365 o 366)

La sumatoria anual del volumen de Agua Azul dividida entre la producción total anual dará como resultado la HHA del módulo Molienda.

$$HHA_{mol} = \frac{AA_{mol}}{\sum_{i=1}^d p_{total}}$$

Ecuación 73

En donde:

HHA_{Acu} : Huella Hídrica Azul del módulo Molienda (m^3/t)

AA_{mol} : Volumen de Agua Azul del módulo Molienda (m^3)

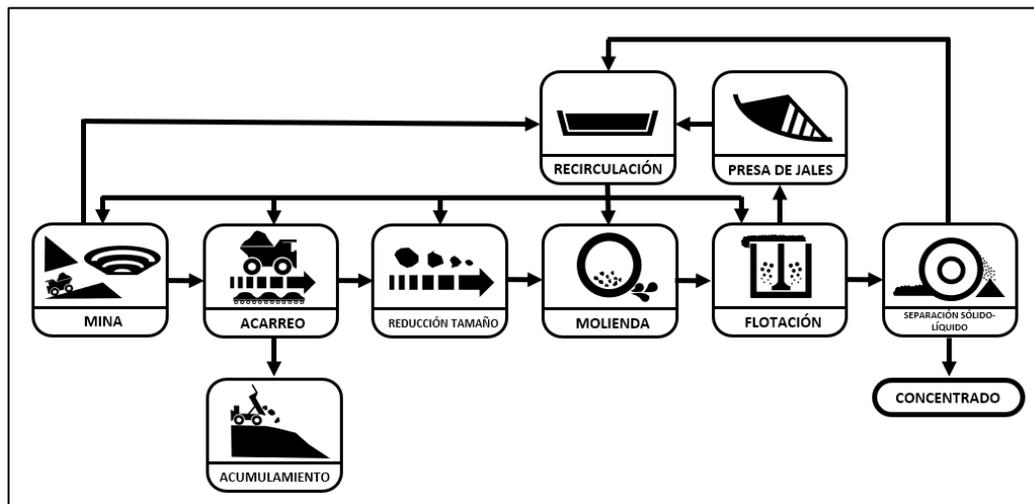
$\sum_{i=1}^d p_{total}$: Sumatoria de la producción total de material (tepetate + mineral), (t)

d : Número de días del periodo de evaluación (365 o 366)

III.1.9 Cuantificación de la HHG del módulo Molienda

Este módulo no cuenta con flujos de descarga fuera de proceso que propicien condiciones en donde se pueda generar un flujo de *agua gris*. En ese sentido, se considera que no existe aportación de este módulo para la HHG.

Con fines de facilitar la relación entre módulos y el seguimiento del proceso la siguiente figura muestra nuevamente el diagrama modular desarrollado en la Figura 37.



VII.7. Módulo Flotación

Este módulo representa el núcleo del PCSC debido al proceso de flotación, ya que los sulfuros de cobre son recuperados y concentrados a través de la espuma mineralizada. La Figura 44 muestra los flujos de entrada y de salida del módulo *flotación*.

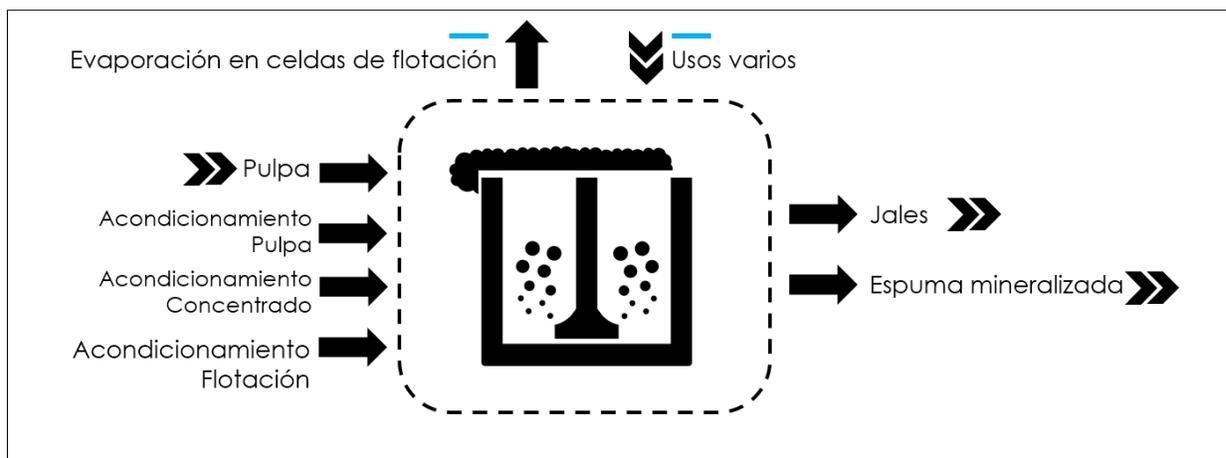


Figura 44. Flujos del módulo Flotación.

VII.7.1 Flujos de entrada módulo Flotación

- Pulpa - FLO-I-001

Este flujo de entrada consiste en la pulpa de mineral transferida del módulo *molienda*, la cual pasa de ser $Pulpa_{mol}$ a ser $Pulpa_{flo}$, y es el resultado



de la combinación del mineral previamente triturado y la adición de agua. En esta etapa se adicionará más agua por medio del flujo FLO-I-002, hasta llegar al porcentaje de sólidos óptimo requerido para realizar la flotación.

En los datos de este flujo también se puede observar la dinámica de los procesos, ya que este flujo constantemente se tiene que monitorear y ajustar para que la adición de agua sea la óptima.

- Acondicionamiento Flotación- FLO-I-002

Este flujo representa el volumen de agua adicionado para alcanzar el porcentaje de sólidos necesario para el proceso ($V_{flo,acon}$). Este flujo fue contemplado únicamente para cuantificar la adición de agua (en unidades de m^3/d) antes de que se lleve a cabo la etapa de flotación siempre y cuando esta adición provenga de un cuerpo de agua consuntivo y no del mismo proceso, de esta manera puede ser cuantificado dentro de la HHA. Las recirculaciones del agua en el proceso para este módulo se encuentran contempladas dentro del flujo FLO-O-005.

- Acondicionamiento del Concentrado - FLO-I-003

Del mismo modo que la pulpa tiene que ser acondicionada para su correcto procesamiento, la espuma mineralizada se acondiciona principalmente para su manejo y transporte hacia el módulo siguiente en donde se hace la separación sólido líquido.

Este acondicionamiento consiste en la adición de agua que estará descrita como $V_{flo,conc}$, en donde al igual que el flujo FLO-I-002⁶ en caso de que el suministro de agua para este flujo sea una fuente externa al proceso, se deberá cuantificar como *agua azul*, si se llegase a emplear agua recirculante en el proceso, podría ser cuantificada usando el flujo FLO-I-005.

Para la cuantificación de este flujo se tiene que realizar mediciones directas con un medidor de volumen.

⁶ Se tienen que realizar mediciones directas con un medidor de volumen para la cuantificación de este flujo



- Acondicionamiento de la Pulpa- FLO-I-004

Acondicionamiento de la pulpa contempla la adición de agua durante la flotación y se encuentra representado como $V_{pulpa,acon}$ ⁸. Este flujo fue pensado de manera análoga al flujo FLO-I-002, sin embargo, se hace la distinción por los distintos arreglos operativos que pudieran existir y dejando abierta y de manera flexible las distintas adiciones de agua durante esta etapa del proceso.

Al igual que los dos flujos anteriores, si la fuente de agua que suministra este flujo es una fuente externa al proceso entonces se deberá de cuantificar dentro de la HHA, en caso de que sea agua reutilizada del proceso entonces no deberá cuantificarse para el componente de la HH.

- Usos Varios- FLO-I-005

Este flujo ($V_{flo,mu}$), representa la última entrada de agua al módulo *Flotación* y se encuentra diseñado como un flujo flexible que puede ser empleado en equipos para limpieza u otras actividades en donde el criterio de pérdida se mantiene, considerando que si el agua empleada regresa al sistema, entonces seguirá siendo una recirculación del volumen de agua y en dado caso de que se pierda por evaporación deberá ser cuantificada como una salida para el módulo y se deberá de cuantificar dentro del volumen de *agua azul* y de la HHA.

VII.7.2 Flujos de salida módulo Flotación

- Evaporación en celdas de flotación – FLO-O-001

Este flujo representa las pérdidas que puedan existir en las celdas de flotación por la transferencia de energía hacia la pulpa. Para calcular este flujo es necesario conocer los parámetros de una celda de flotación del circuito y el número de celdas empleadas, como se muestra en la Ecuación 74.

$$E_{flo} = A_{flo,cel} \cdot N_{flo,cel} \cdot \left(\frac{E_{fflo}}{1000} \right) \cdot t_{fflo,cel}$$

Ecuación 74



En donde:

$E_{f_{lo}}$: Volumen de Agua Azul en pérdida por evaporación en las celdas de flotación (m^3)

$N_{f_{lo}}$: Número de celdas empleadas en el circuito de flotación (adimensional)

$E_{f_{f_{lo}}}$: Tasa de evaporación determinado para circuito de celdas de flotación de la sección IV.2.2 (mm/h)

$A_{f_{lo,cel}}$: Área de exposición de una celda unitaria del circuito de flotación (m^2)

$t_{f_{lo,cel}}$: tiempo de operación diario del circuito de flotación (h)

- Espuma mineralizada – FLO-O-002

Este flujo corresponde a la fracción del agua que contiene la espuma mineralizada ($V_{f_{lo,esp}}$), una vez que ha sido acondicionada y sale del circuito de flotación a los espesadores o filtros. Este flujo de transferencia se convierte en la entrada del módulo *filtración* (FIL-I-001) y así como del cual es importante tener en consideración que al realizar el balance del módulo se deben de tomar en cuenta el volumen de agua contenido en la pulpa y no el volumen de la pulpa como tal.

- Jales – FLO-O-003

Este flujo representa la fracción del agua que se va en los jales de flotación ($V_{f_{lo,jal}}$) y tiene la condición de ser de transferencia, ya que pasa a ser el flujo JAL-I-001, correspondiente a la principal entrada al módulo *jales*. A pesar de ser un flujo significativo para el balance del módulo, los *jales* no son cuantificados como ningún tipo de pérdida para la HH, ya que el recurso hídrico se sigue manteniendo dentro del proceso.

Este flujo puede ser estimado por diferencia en el balance general del módulo junto con la espuma mineralizada o puede ser medido a través de flujómetros ultrasónicos por la cantidad de sólidos que contiene.

VII.7.3 Cuantificación de la HHV del módulo Flotación



Al igual que el módulo *molienda*, se consideró que el módulo *flotación* no se encuentre a la intemperie y por lo tanto tampoco a los factores climáticos, razón por la cual no existen flujos de *agua verde* asociados al módulo.

VII.7.4 Cuantificación de la HHA del módulo Flotación

La cuantificación de la HHA para este módulo contempla 2 flujos de salida únicamente, la pérdida por evaporación y el consumo de agua mediante el flujo de *usos varios*, siempre que la fuente de agua sea externa al proceso. De esta forma el volumen de la HH del módulo flotación puede ser calculada mediante la Ecuación 75.

$$AA_{flo} = \sum_{i=1}^d E_{flo} + \sum_{i=1}^d V_{flo,mu}$$

Ecuación 75

En donde:

AA_{flo} : Volumen de Agua Azul del módulo Flotación (m³)

$\sum_{i=1}^d V_{flo,mu}$: Sumatoria del flujo de salida de los equipos auxiliares en el módulo Flotación (m³)

$\sum_{i=1}^d E_{flo}$: Sumatoria del flujo de evaporación en los circuitos de flotación (m³)

d : Número de días del periodo de evaluación (365 o 366)

La sumatoria anual del volumen de Agua Azul dividida entre la producción total anual dará como resultado la HHA del módulo Flotación.

$$HHA_{flo} = \frac{AA_{flo}}{\sum_{i=1}^d p_{total}}$$

Ecuación 76

En donde:

HHA_{flo} : Huella Hídrica Azul del módulo Flotación(m³/t)

AA_{flo} : Volumen de Agua Azul del módulo Flotación (m³)

$\sum_{i=1}^d p_{total}$: Sumatoria de la producción total de material (tepetate + mineral), (t)

d : Número de días del periodo de evaluación (365 o 366)

VII.7.5 Cuantificación de la HHG del módulo Flotación



La forma en la que el proceso de flotación se lleva a cabo genera principalmente dos flujos de salida, el concentrado y los jales. En este sentido los jales corresponden a la salida del proceso, pero no a una descarga y por lo tanto se convierten un flujo de transferencia. Este flujo posteriormente cuenta tanto con infraestructura, como con un módulo particular para su cuantificación. Por lo tanto, el módulo *Flotación* no cuenta con flujos de descarga fuera de proceso que propicien condiciones en donde se pueda generar un flujo de *agua gris* y con ello no existe aportación para la HHG.

VII.8. Módulo Filtración (separación sólido-líquido)

Este módulo representa los sistemas operativos para hacer la separación sólido-líquido en la espuma mineralizada para obtener el concentrado de sulfuros de cobre, incluyendo filtros y espesadores. La Figura 45 muestra la representación de los flujos de entrada y de salida del módulo *Filtración*,

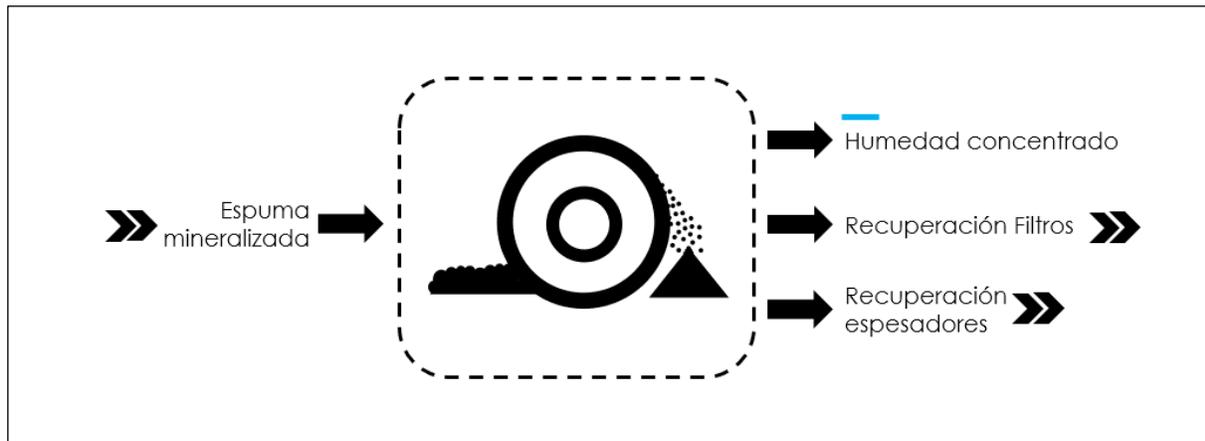


Figura 45. Flujos del módulo Filtración (separación sólido líquido).

VII.8.1 Flujos de entrada módulo Filtración

- Espuma mineralizada – FIL-I-001

Este flujo corresponde a la única entrada del módulo *Filtración* y es un flujo de transferencia del módulo flotación para cuantificar el volumen de espuma mineralizada. Este flujo se representa por Esp_{fil} y al ser un flujo de transferencia de *agua azul* no se cuantificará dentro de la HHA.



Este flujo puede ser estimado mediante aforo, medidores ultrasónicos o indirectamente calculando la producción de concentrado y relacionándolo al porcentaje de sólidos y la humedad del concentrado empleando, debido a que operativamente se puede facilitar medir o aforar los flujos de agua recuperada de esta actividad. Para calcular este flujo considerando que no hay ninguna pérdida, fuga o escurrimiento en el sistema se puede emplear la Ecuación 77.

$$V_{flo.esp} = V_{fil.esp} + V_{fil,fil} + V_{fil,con}$$

Ecuación 77

En donde:

$V_{flo.esp}$: Volumen de Agua Azul de la espuma mineralizada (m³/d)

$V_{fil.esp}$: Volumen de Agua Azul recuperado de los espesadores (m³/d)

$V_{fil,fil}$: Volumen de Agua Azul recuperado de los filtros(m³/d)

$V_{fil,con}$: Volumen de Agua Azul contenido como humedad del concentrado (m³/d)

VII.8.2 Flujos de salida módulo Filtración

- Recuperación de Espesadores – FIL-O-001

Los espesadores al momento de ir concentrado la espuma mineralizada pueden ir recuperando poco a poco el volumen de agua contenido. Este volumen puede ser colectado en piletas o tanques y puede ser empleado nuevamente en el proceso, teniendo la posibilidad de convertirse en el flujo REC-I-003. La recuperación de agua en este módulo dependerá de la eficiencia de los equipos. De esa forma este flujo corresponde al flujo de transferencia WSM-I-003 del módulo Manejo de Agua. Este flujo está representado mediante $V_{fil,esp}$ ⁷.

- Recuperación en los Filtros– FIL-O-002

⁷ Este flujo puede ser medido con un medidor volumétrico o estimado mediante aforo al momento de realizar la recirculación.



Al igual que el agua de recuperación del flujo FIL-O-001, la recuperación en los filtros dependerá del tipo de equipo y de la eficiencia. La recuperación en los filtros suele ser una fracción pequeña. Este volumen también puede ser colectado en piletas o tanques y puede ser empleado nuevamente en el proceso, teniendo la posibilidad de convertirse en el flujo REC-I-004. Este flujo de transferencia pasa al módulo Manejo de Agua y está representado mediante $V_{fil,fil}$.⁹.

- Humedad del Concentrado– FIL-O-003

Este flujo corresponde a la única salida cuantificable para la HHA del módulo *Filtración*, el cual sirve para cuantificar el volumen agua que sale en conjunto con el concentrado de mineral después de la flotación. Este flujo se calcula multiplicando el porcentaje de humedad del concentrado por la producción de concentrado y dividiendo por la densidad del agua para obtener el volumen Ecuación 78. La determinación de la fracción de la humedad se puede determinar mediante la diferencia de peso usando el estándar ASTM 2216.

$$V_{fil,conc} = \frac{Hum_{conc} \cdot Conc_{hum}}{\rho_{agua}}$$

Ecuación 78

En donde:

$V_{fil,conc}$: Volumen de Agua Azul contenido en el concentrado (m³)

Hum_{conc} : Fracción de la humedad del concentrado determinado en laboratorio (adimensional)

$Conc_{hum}$: Producción del concentrado (t)

ρ_{agua} : Densidad del agua (t/m³)

VII.8.3 Cuantificación de la HHV del módulo Filtración

Al igual que el módulo *molienda* y también al módulo *flotación*, se consideró que el módulo *filtración* no se encuentre a la intemperie y por lo tanto tampoco a los factores climáticos, por lo que no existen flujos de entrada o salida de *agua verde* al módulo.

VII.8.4 Cuantificación de la HHA del módulo Filtración



La cuantificación de la HHA para este módulo contempla únicamente 1 flujo de salida, el agua contenida en el concentrado en forma de humedad. De esta forma el volumen de la HH del módulo flotación puede ser calculada mediante la Ecuación 79

$$AA_{fil} = \sum_{i=1}^d V_{fil,conc}$$

Ecuación 79

En donde:

AA_{fil} : Volumen de Agua Azul del módulo Filtración(m³)

$\sum_{i=1}^d V_{fil,conc}$: Sumatoria del flujo de salida como humedad en el concentrado (m³)

d : Número de días del periodo de evaluación (365 o 366)

La sumatoria anual del volumen de Agua Azul dividida entre la producción total anual dará como resultado la HHA del módulo Filtración.

$$HHA_{fil} = \frac{AA_{fil}}{\sum_{i=1}^d p_{total}}$$

Ecuación 80

En donde:

HHA_{fil} : Huella Hídrica Azul del módulo Filtración (m³/t)

AA_{fil} : Volumen de Agua Azul del módulo Filtración (m³)

$\sum_{i=1}^d p_{total}$: Sumatoria de la producción total de material (tepetate + mineral), (t)

d : Número de días del periodo de evaluación (365 o 366)

VII.8.5 Cuantificación de la HHG del módulo Filtración

Debido a que el módulo *Filtración* se encuentra enfocado a la reducción y recuperación de agua en el concentrado de mineral, no se contempló ningún flujo de descarga que pudiera tener el potencial de generar un flujo de *agua gris* por lo que para este módulo no habría HHG, ya que comúnmente en esta etapa del proceso no se descarga el líquido recuperado.

VII.9. Módulo Presa de Jales



Este módulo involucra y cuantifica lo descrito dentro del capítulo V, tomando en cuenta los factores que influyen en la determinación de la HH y la forma en la que estos pueden ser medidos o estimados. La Figura 46 muestra los flujos de entrada y salida del módulo *Presa de jales*.

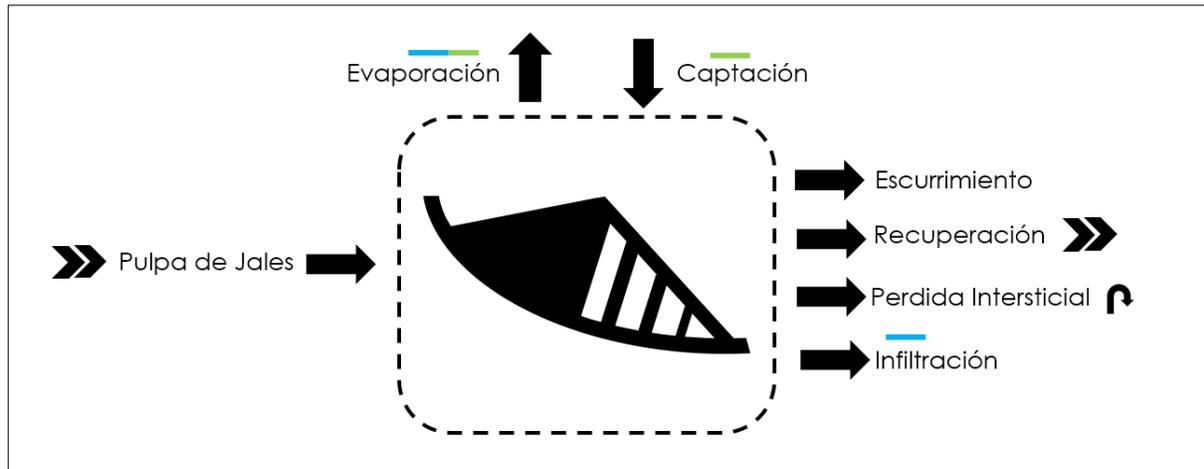


Figura 46. Flujos del módulo *Presa de Jales*.

VII.9.1 Flujos entrada módulo *Presa de Jales*

- Jales – JAL-I-001

Este flujo representa el volumen agua que se va en la pulpa de los jales de flotación procedentes del flujo FLO-O-003 ($V_{flo,jal}$). La pulpa de residuos mineros generada durante las etapas de molienda y flotación es enviada hacia la presa de jales para depósito. La pulpa de los jales normalmente se constituye alrededor de 60% de sólidos (Mular et al., 2002). El flujo de la pulpa de jales es el principal aporte de agua al módulo, en el cual, según las características particulares y su manejo, se busca recuperar la mayor cantidad agua posible.

Este flujo de transferencia es calculado en el módulo flotación y tomado como un dato de entrada en este módulo, de esta forma es posible conocer el volumen de agua que ingresa a la presa de jales conociendo el flujo de jales que es enviado a la presa, el porcentaje de sólidos de la pulpa y la densidad del agua.

Este flujo no aporta en la cuantificación de ninguno de los 3 componentes de al HH.



- Captación pluvial – JAL-I-002

Este flujo de entrada a la presa de jales es similar a la captación en una mina a cielo abierto. De la misma forma se debe de tomar en cuenta el balance de agua que puede existir dentro de la presa y la posible aportación de *agua verde* o *agua azul* al proceso por efectos de la precipitación y la evaporación. Asimismo, es necesario considerar los criterios de distinción para el tipo de agua, los cuales dependen de tres escenarios, de acuerdo con que factor climático resulta dominante diariamente.

En el primer escenario, si el valor de evaporación resulta mayor que la precipitación, el flujo de captación, se considera el valor de la evaporación para el volumen de *agua verde*, debido a que el impacto del área está generando una condición de aprovechamiento del agua disponible en el medio ambiente para el sistema y consecuentemente una pérdida por evaporación en toda su extensión. Se considera que el valor de la evaporación al superar al valor de la captación, todo el volumen captado está siendo evaporado por lo tanto regresa a la atmósfera y no es cuantificado para el indicador.

Cuando en el balance diario la precipitación sobrepasa la evaporación, se considera que el volumen excedente $[(P - E) > 0]$ es un posible escurrimiento dentro del proceso, y por lo tanto se cuantifica como una aportación al volumen total de *agua Azul*. Este escurrimiento podría ser aprovechado o perdido por evaporación o infiltración, y por lo tanto el valor de la evaporación sería el flujo de *agua verde* que contaría para el componente.

Para la determinación de este flujo es importante conocer el área del polígono formado por la presa de jales en metros cuadrados, el área de *playa* y el área del espejo de agua, así como y el balance entre la evaporación y la precipitación (Ecuación 12) diaria en unidades de metros por día (m/d). De este modo es posible obtener las unidades en metros cúbicos por día al multiplicar el resultado del balance diario evaporación-precipitación y las distintas áreas y poder estimar la captación lo muestran las siguientes ecuaciones.

$$\text{Si } Bal_{meteo} < 0 \therefore C_{n,jales} = 0$$

Ecuación 81

$$\text{Si } Bal_{meteo} > 0 \therefore C_{n,jales} = Bal_{meteo} * A_{n,jales}$$

Ecuación 82



$$C_{Jales} = C_{1,jales} + C_{2,jales} + C_{3,jales}$$

Ecuación 83

$$A_{Jales} = A_{1,jales} + A_{2,jales} + A_{3,jales}$$

Ecuación 84

En donde:

Bal_{meteo} : Balance entre evaporación y precipitación (m/d)

$C_{n,jales}$: Captación en la superficie n ($n=1,2$ o 3) (m^3/d)

n : Superficies de la presa de jales (1=Espejo de agua, 2 = playa, 3 = taludes).

A_{jales} : Área total de la presa de jales (m^2)

$A_{n,jales}$: Área de la superficie n ($n=1,2$ o 3) (m^2)

C_{jales} : volumen de captación total en la presa de jales (m^3/d)

VII.9.2 Flujos de salida módulo Presa de Jales

- Recuperación Jales – JAL-O-001

Este flujo se encuentra representado por $V_{jales,recu}$ y la principal fuente de recuperación de agua de todo el proceso, en donde básicamente se deja asentar los jales en la presa para que se separen del agua y así recuperarla.

Este flujo de transferencia pasa al módulo Manejo de Agua como WSM-I-005 y puede ser medido a la salida de la presa de jales, para tener una precisa cuantificación del volumen asociado a la recuperación. Este flujo resulta indispensable para el balance general de todo el PCSC ya que es la forma en la que el agua es recuperada y reingresada al proceso.

- Evaporación – JAL-O-002

Este flujo de salida del módulo es la principal pérdida de agua del módulo ya que el agua que se pierda por evaporación no puede ser recuperada. Para este flujo en particular se tuvo una consideración especial, se debe de tomar en cuenta que la superficie no es una superficie *natural* y por lo tanto la incorporación y la pérdida de agua se deben de enfocar en las características del proceso.



Al igual que en el caso de la captación se debe considerar el balance de agua que puede existir dentro de la presa y la posible pérdida de *agua verde* o *agua azul* del proceso por efectos de la evaporación. Asimismo, es necesario considerar los criterios de distinción para el tipo de agua, de los cuales en este caso dependen dos escenarios, de acuerdo con el factor climático que resulte dominante diariamente.

En el primer escenario, si el valor de evaporación resulta ser igual a la precipitación, se calcula la evaporación, pero no se toma en cuenta para ningún componente de la HH, ya que se considera que el agua pérdida por evaporación fue el volumen ganado de la atmosfera por medio de precipitación.

En el segundo escenario, en el balance diario (Ecuación 12) la precipitación resulta ser mayor a la evaporación, por lo tanto, la evaporación no será cuantificada para la HHV, pero la captación si, por ser un volumen proveniente de la atmosfera que fue aprovechado potencialmente por el proceso, pero parte de este perdió por efectos de la evaporación, como se muestra en la Figura 9.

Por último, en el tercer caso, la evaporación resulta ser más grande que la precipitación. Al valor obtenido de la evaporación se le debe restar el valor de la precipitación (agua verde en este caso) para poder determinar la evaporación del agua del proceso, y no cuantificar dos veces la que se perdió proveniente de la atmosfera. Por esa razón en este caso la diferencia del balance se cuantifica como pérdida de *agua azul* por evaporación. Las ecuaciones que describen este flujo se describen a continuación:

$$\text{Si } Bal_{meteo} < 0 \therefore E_{calcu,jales} = E_{T,jales} - C_{n,jales} \quad \text{Ecuación 85}$$

$$E_{T,jales} = E_{talud,jales} + E_{playa,jales} + E_{espejo,jales} \quad \text{Ecuación 86}$$

$$E_{talud,jales} = E \cdot F_{talud,jales} \quad \text{Ecuación 87}$$

$$E_{playa,jales} = E \cdot F_{playa,jales} \quad \text{Ecuación 88}$$

$$E_{espejo,jales} = E \cdot F_{espejo,jales} \quad \text{Ecuación 89}$$

$$\text{Si } Bal_{meteo} = 0 \therefore E_{T,jales} = C_{n,jales} \quad \text{Ecuación 90}$$



Si $Bal_{meteo} > 0 \therefore E_{T,jales}$ se calcula con Ecuación 86, pero no se cuantifica para ningún indicador

En donde:

Bal_{meteo} : Balance entre evaporación y precipitación (m/d)

$E_{calcu,jales}$: Evaporación calculada cuando la evaporación es mayor a la precipitación (m^3/d)

$E_{T,jales}$: Evaporación total en los jales (incluyendo taludes, playa y espejo de agua) (m^3/d)

$C_{n,jales}$: Captación en la superficie n (m^3/d)

$E_{talud,jales}$: Evaporación en la superficie de los taludes de la presa de jales (m^3/d)

$E_{playa,jales}$: Evaporación en la superficie de la playa de la presa de jales (m^3/d)

$E_{espejo,jales}$: Evaporación del espejo de agua en la presa de jales (m^3/d)

$F_{talud,jales}$: Factor de evaporación empleado en taludes (% < 100%)

$F_{playa,jales}$: Factor de evaporación empleado en playa de la presa de jales (% < 100%)

$F_{espejo,jales}$: Factor de evaporación empleado en el espejo de agua de la presa de jales (% < 100%)

E : Evaporación diaria (m/d)

- Infiltración – JAL-O-003

Este flujo representa el volumen de una posible salida de agua por infiltración. Es necesario tomar en cuenta que, por cuestiones operativas, de seguridad e hídricas, las presas de jales son construidas con el objetivo que este flujo no exista, sin embargo, existe la posibilidad de que parte del volumen se infiltre y el módulo lo considera a través de este flujo el cual representaría una salida de *agua azul* para el proceso a través del término $V_{infil,jales}$:

- Ecurrimiento – JAL-O-004

Este flujo de agua correspondería a una salida de un volumen de *agua azul* o de *agua gris*, todo dependiendo de la caracterización de los jales y de la calidad del agua de los escurrimientos.



Estos escurrimientos de la presa de jales pueden ser calculados a través de mediciones de infiltración para determinar el porcentaje de agua que en un evento de precipitación escurriría por los taludes de la presa. Este flujo se encuentra definido por $V_{esc,jales}$:

- Pérdida Intersticial Jales – JAL-O-005

La pérdida Intersticial de lo jales está sujeta a condiciones del material de cada sitio en particular. En este caso, el volumen del flujo es calculado por diferencia del balance. sin embargo, existen métodos de cuantificar físicamente este volumen de agua mediante barrenación y determinación del porcentaje de humedad de los jales (BAAR, 2008).

Para fines de este modelo la pérdida intersticial del agua se considera como una “retención necesaria” para lograr el transporte, el depósito de los jales en la presa y para lograr cierta saturación que promueve la recuperación en el espejo de agua de la presa. Por esta razón, este flujo no es cuantificado para ningún componente de la HH. Solo cuantificado para determinar el balance general del módulo. Este flujo se encuentra definido por (INT_{jales})

VII.9.3 Cuantificación de la HHV en módulo Presa de Jales

La cuantificación de la HHV para este módulo contempla tanto la evaporación, como la precipitación. Dependiendo sea el resultado del balance evaporación-precipitación, como se muestra en la Figura 9, la captación siempre será considerada como el volumen de *agua verde*. Dependiendo del resultado del balance se le restará la evaporación o se considerará el total del volumen captado por cada una de las superficies de la presa de jales. De esta forma se puede describir mediante la Ecuación 91.

$$AV_{jales} = \sum_{i=1}^d C_{jales}$$

Ecuación 91

En donde:

AV_{jales} : Volumen de Agua Verde del módulo jales(m³)

$\sum_{i=1}^d C_{jales}$: Captación en la superficie n (m³)

d : Número de días del periodo de evaluación (365 o 366)



La sumatoria anual del volumen de Agua verde dividida entre la producción total anual dará como resultado la HHV del módulo Jales como se muestra en la Ecuación 92.

$$HHV_{jales} = \frac{AV_{jales}}{\sum_{i=1}^d p_{total}}$$

Ecuación 92

En donde:

HHV_{jales} : Huella Hídrica Verde del módulo jales (m^3/t)

AV_{jales} : Volumen de Agua Verde en módulo Jales (m^3)

$\sum_{i=1}^d p_{total}$: Sumatoria de la producción total de material (tepetate + mineral), (t)

d : Número de días del periodo de evaluación (365 o 366)

VII.9.4 Cuantificación de la HHA en módulo Presa de Jales

La cuantificación de la HHA para la presa de jales considera como principal salida la evaporación y también los escurrimientos y las posibles infiltraciones.

$$AA_{jales} = \sum_{i=1}^d E_{T,jales} + \sum_{i=1}^d V_{esc,jales} + \sum_{i=1}^d V_{infil,jales}$$

Ecuación 93

En donde:

AA_{jales} : Volumen de Agua azul del módulo jales(m^3)

$\sum_{i=1}^d E_{T,jales}$: Sumatoria del flujo de evaporación calculado en los jales (m^3)

$\sum_{i=1}^d V_{esc,jales}$: Sumatoria del flujo producido en los posibles escurrimientos (m^3)

$\sum_{i=1}^d V_{infil,jales}$: Sumatoria del flujo de posibles infiltraciones (m^3)

d : Número de días del periodo de evaluación (365 o 366)

La sumatoria anual del volumen de Agua Azul dividida entre la producción total anual dará como resultado la HHA del módulo jales.

$$HHA_{jales} = \frac{AA_{jales}}{\sum_{i=1}^d p_{total}}$$

Ecuación 94



En donde:

$HH A_{jales}$: Huella Hídrica Verde del módulo jales (m^3/t)

AA_{jales} : Volumen de Agua Verde en módulo Jales (m^3)

$\sum_{i=1}^d p_{total}$: Sumatoria de la producción total de material (tepetate + mineral), (t)

d : Número de días del periodo de evaluación (365 o 366)

VII.9.5 Cuantificación de la HHG en módulo Presa de Jales

Este módulo no cuenta con flujos de *agua gris*, considerando que se diseñó bajo un esquema de cero descargas, en donde se busca la recuperación del agua que llega a la presa de jales y no se generen escurrimientos con parámetros por encima de los lineamientos aplicables. Sin embargo, en caso de que los hubiera se debería de cuantificar empleando los mismos criterios del agua de laboreo en la cual se realice una descarga, determinando primeramente el volumen de descarga y posteriormente empleando la Ecuación 18 para determinar el factor de dilución del parámetros y la Ecuación 19 para el volumen de agua gris (Ecuación 95), así se obtendría el volumen de agua gris del módulo y posteriormente se calcula la HHG.

$$W_{G.jales} = W_{G.eflu}$$

Ecuación 95

En donde:

$W_{G.jales}$: Volumen de Agua Gris del módulo Jales(m^3)

$W_{G.eflu}$: Volumen de agua gris resultante del exceso de concentración del parámetro n en el efluente de descarga. (m^3)

Si que durante el periodo de evaluación se generen descargas de agua de la presa de jales con algún parámetro por encima del límite permitido por la normatividad aplicable. En este caso, se empleará la Ecuación 96.

$$AG_{jales} = \sum_{i=0}^d W_{G.jales}$$

Ecuación 96

En donde:

AG_{jales} : Volumen de Agua Gris del módulo Jales(m^3)

$\sum_{i=0}^d AG_{jales}$: Sumatoria del flujo de Agua necesario para diluir el parámetro de mayor concentración hasta su límite permisible o natural (m^3)



d : Número de días del periodo de evaluación (365 o 366).

La sumatoria anual del volumen de Agua Gris dividida entre la producción total anual dará como resultado la HHA del módulo jales.

$$HHG_{jales} = \frac{AG_{jales}}{\sum_{i=1}^n p_{total}}$$

Ecuación 97

En donde:

HHG_{jales} : Huella Hídrica Azul del módulo jales (m³/t)

n : Número de días del periodo de evaluación (365 o 366)

$\sum_{i=1}^n p_{total}$: Sumatoria de la producción total de material (tepetate + mineral), durante el periodo de evaluación (t)

VII.10. Módulo Manejo de Agua

Este módulo se diseñó para facilitar la cuantificación de toda la infraestructura empleada para el manejo y la recirculación del agua en el proceso y que no estuviera limitada a un área física, a la localización dentro del proceso o a cierto tipo de infraestructura en específico. Es por eso que ese módulo puede contemplar de manera flexible toda aquella infraestructura involucrada en el manejo del agua y conceptualizar sus entradas y salidas de forma sencilla, como se muestra en el esquema de la Figura 47.

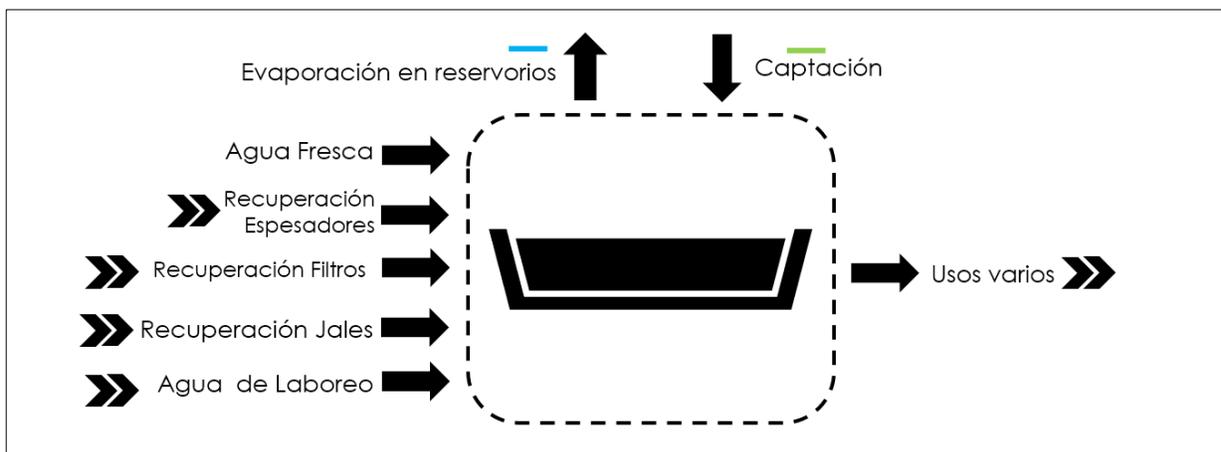


Figura 47. Flujos del módulo Manejo de Agua.



VII.10.1 Flujos de entrada módulo Manejo de Agua

- Agua Fresca – REC-I-001

Este flujo se refiere al agua fresca que es ingresada al proceso proveniente de alguna fuente de uso consuntivo, es decir, extraída del subsuelo de otro lugar fuera de la mina, o algún cuerpo de agua superficial del cual se haya hecho el aprovechamiento. Este flujo será descrito como VR_{fresca} .

Asimismo, a pesar de que este flujo es directamente un flujo de *agua azul* por su naturaleza de ser un volumen consuntivo, según el MEHH se considera que este flujo será cuantificado hasta el momento que haya salido del proceso, ya sea como descarga, en forma de humedad contenida en el concentrado o perdido mediante evaporación en alguna de las etapas del proceso.

Para la determinación de este flujo tiene que realizarse una medición directa, ya sea mediante un medidor a la entrada del proceso o a la salida de la fuente.

- Agua de laboreo REC-I-002

Este flujo corresponde a una transferencia proveniente del flujo MIN-I-001 (VD_{mina}) en el caso que el volumen de agua de laboreo no sea aprovechado dentro de la mina, no se realice ninguna descarga, no se almacene dentro de la mina y sea transferido a otra parte del proceso para su aprovechamiento. Este flujo se puede manejar dentro del módulo Manejo de Agua, ser aprovechado por el proceso y en caso de perderse por evaporación ser cuantificado. Se puede describir mediante la Ecuación 98.

$$VR_{lab} = VD_{mina}$$

Ecuación 98

En donde:

VR_{lab} : Volumen de agua de laboreo para emplearlo en áreas diversas. (m³)

VD_{mina} : Volumen de agua de laboreo que no descarga del sistema y que es aprovechado dentro del proceso (m³).



- Recuperación Espesadores REC-I-003

Este flujo de transferencia corresponde al volumen de agua recuperada en los espesadores, provenientes de flujo FIL-O-003 ($V_{fil,esp}$). Este flujo por ser de transferencia no es cuantificado dentro de ningún componente de la HH.

- Recuperación Filtros REC-I-004

Este flujo de transferencia corresponde al volumen de agua recuperada en los sistemas de filtración, provenientes de flujo FIL-O-002 ($V_{fil,fil}$). Este flujo por ser de transferencia no es cuantificado dentro de ningún componente de la HH.

- Recuperación Presa de Jales REC-I-005

Este es un flujo de transferencia proveniente del módulo *Presa de Jales* del flujo JAL-O-001 ($V_{jales,recu}$). Este flujo generalmente es cuantificado por medidores volumétricos o por flujómetros a la salida del sistema de recuperación de agua en la presa. Este flujo por ser de transferencia no es cuantificado dentro de ningún componente de la HH.

- Captación pluvial - REC-I-006

Este flujo de entrada es similar a la captación en otros módulos. Se deben considerar todas las áreas de captación de toda la infraestructura que se encuentre expuesta a las condiciones climáticas. En el caso de las piletas, reservorios y demás infraestructura considerada dentro de este módulo, se consideró que, al captar el agua proveniente de la precipitación, el agua entra directamente para ser aprovechada en el proceso, por lo que el total de la captación es considerado dentro de la HHV. Para poder determinar el volumen de *agua verde* de captación durante un evento de precipitación es necesario calcular el área del *espejo de agua* y emplear las siguientes ecuaciones.

$$V_{reservorios} = A_{reservorios} \cdot P$$

Ecuación 99

En donde:

$A_{reservorios}$: Área del espejo de agua de los reservorios, o área de captación a cielo abierto(m²)



P : Precipitación pluvial (m/d)

$V_{reservorios}$: Flujo de captación en los reservorios (m³/d)

VII.10.2 Flujos de salida módulo Manejo de Agua

- Usos varios - REC-O-001

Este flujo de salida del módulo representa el flujo más versátil de todo el modelo ya que dependiendo del arreglo operacional y la forma de redistribución de agua dentro del proceso, ese flujo puede ser considerado a conveniencia del evaluador, teniendo la posibilidad de dividirlo, recircularlo, almacenarlo o cualquier otra actividad propia del manejo del agua dentro del proceso. Este flujo de transferencia es identificado como $V_{rec,mu}$ y puede convertirse en cualquier flujo de *usos varios* de los otros módulos.

- Evaporación en Reservorios - REC-O-002

Este flujo de salida representa la principal salida directa del módulo ya que el flujo de usos varios se considera como un flujo de transferencia hacia otros módulos y es cuantificado dentro la HHA.

Para calcular este flujo es necesario tomar en cuenta el dato calculado del espejo de agua de los reservorios para la captación en el flujo REC-I-006 mediante la Ecuación 99 y los datos de evaporación diaria del tanque evaporímetro, ya que se considera de igual forma un espejo de agua sujeto a las mismas condiciones de evaporación como se muestra en la Ecuación 100.

$$E_{reserv} = A_{reserv} \cdot E$$

Ecuación 100

En donde:

A_{reserv} : Área del espejo de agua de los reservorios (m²)

E : Evaporación medida por el tanque evaporímetro (m/d)

E_{reserv} : Flujo de evaporación en los reservorios (m³/d)

Para calcular el área de los reservorios se tendrá que determinar el área individual de cada uno, ya sean de formas regulares o irregulares y una vez obtenida(s), sumar el área de todos los reservorios empleados y así obtener el área total del módulo, para posteriormente emplear la Ecuación 100



VII.10.3 Cuantificación de la HHV en el módulo Manejo de Agua

Para la cuantificación de la HHV únicamente se consideró la captación directa de las áreas de los reservorios. Así el volumen de la HHV del módulo puede ser calculada mediante la Ecuación 101.

$$AV_{rec} = \sum_{i=1}^d V_{reserv}$$

Ecuación 101

En donde:

AV_{rec} : Volumen de Agua Verde del módulo Manejo de Agua(m³)

$\sum_{i=1}^d V_{reserv}$: Sumatoria del flujo de entrada por captación en los reservorios (m³)

d : Número de días del periodo de evaluación (365 o 366)

La sumatoria anual del volumen de Agua Verde dividida entre la producción total anual dará como resultado la HHV del módulo Manejo de Agua.

$$HHV_{rec} = \frac{AV_{rec}}{\sum_{i=1}^d p_{total}}$$

Ecuación 102

En donde:

HHV_{rec} : Huella Hídrica Verde del módulo Manejo de Agua (m³/t)

AV_{rec} : Volumen de Agua Verde del módulo Molienda (m³)

$\sum_{i=1}^d p_{total}$: Sumatoria de la producción total de material (tepetate + mineral), (t)

d : Número de días del periodo de evaluación (365 o 366)

VII.10.4 Cuantificación de la HHA en el módulo Manejo de Agua

La cuantificación de la HHA consiste en la cuantificación de la evaporación en los reservorios, es decir, el flujo REC-O-002 como se muestra en la Ecuación 103.

$$AA_{rec} = \sum_{i=1}^d E_{reservorios}$$

Ecuación 103



En donde:

AA_{rec} : Volumen de Agua Azul del módulo Manejo de Agua (m^3)

$\sum_{i=1}^d E_{reservorios}$: Sumatoria del flujo de salida por evaporación en los reservorios (m^3)

d : Número de días del periodo de evaluación (365 o 366)

La sumatoria anual del volumen de Agua Azul dividida entre la producción total anual dará como resultado la HHA del módulo Manejo de Agua, como se muestra en la Ecuación 104.

$$HHA_{rec} = \frac{AA_{rec}}{\sum_{i=1}^d p_{total}}$$

Ecuación 104

En donde:

HHA_{rec} : Huella Hídrica Azul del módulo Manejo de Agua (m^3/t)

AA_{rec} : Volumen de Agua Azul del módulo Manejo de Agua (m^3)

$\sum_{i=1}^d p_{total}$: Sumatoria de la producción total de material (tepetate + mineral), (t)

d : Número de días del periodo de evaluación (365 o 366)

VII.10.5 Cuantificación de la HHG en el módulo Manejo de Agua

Debido a que el módulo Manejo de Agua se encuentra enfocado a los flujos de transferencia, es decir, hacer propiamente el manejo de los recursos hídricos, no se contempló ningún flujo de descarga que pudiera tener el potencial de generar un flujo de *agua gris* por lo que para este módulo no habría HHG.



VIII. Aplicación Industrial de la herramienta para cálculo de inventario de Huella Hídrica.

La aplicación de la metodología desarrollada fue probada y evaluada en un caso de estudio que permitió aplicar el análisis conceptual y numérico de las actividades mineras en sitio.

Para el desarrollo de la herramienta se empleó el software GoldSim en su versión 12, la cual resulta ser una buena opción para generar y desarrollar el modelo numérico por las capacidades de cálculo que brinda y así obtener la cuantificación de la HH del proceso de beneficio de sulfuros cobre.

La herramienta considera todas las características que anteriormente han sido mencionadas que se contemplaron dentro del análisis de flujos, la determinación del MC y el modelo numérico. Asimismo, la herramienta empleó la misma base de cálculo desarrollada en el modelo numérico, con la particularidad de poder considerar al tiempo como una variable y poder introducir datos diarios en los cálculos, en lugar de datos estáticos o promedios.

Esto lo que permite es que se alimente en un solo paso toda la información que se quiera modelar para el periodo que se pretenda evaluar, generando una simulación de los datos alimentados, con el fin de poder determinar puntos de interés y la estimación de volúmenes en cada uno de los flujos y módulos.

El modelo se comenzó a correr con 5000 iteraciones y se fue ajustando hasta llegar observar que los datos obtenidos eran similares a partir de las 1500 iteraciones.

VIII.1.1 Base Temporal y Resolución de los datos

Dentro de la simulación es importante determinar la resolución temporal (frecuencia con la que los datos son obtenidos) con la que se va a trabajar ya que de eso depende en gran parte la resolución de los datos que se obtienen como resultado. Se sugiere que la resolución temporal de los datos sea con una base temporal diaria ya que comúnmente, tanto los sistemas de producción en las unidades mineras, como los datos climatológicos se miden o se tiene un control de ellos diariamente. Esto permite que la resolución con



que se evalúa el sistema sea muy alta y podamos observar y determinar pequeños cambios en el comportamiento de la operación.

VIII.1.2 Datos de entrada

Los tipos de datos de entrada utilizados para la herramienta pueden ser de 2 tipos principalmente:

- **Determinísticos**

Los datos determinísticos pueden representar valores puntuales medidos o estimados del comportamiento de una variable del proceso a través del tiempo o bien una condición que la mayor parte del tiempo se mantenga constante por las consideraciones de diseño o de operación. Estos datos se pueden predecir o calcular con certeza, ya que no involucran ningún grado de incertidumbre o aleatoriedad.

Un ejemplo de un dato determinístico que cambia respecto al tiempo es la producción de mineral (toneladas diarias), la cual se determina diariamente según los requerimientos operativos, mientras que un dato de entrada de diseño sería el porcentaje de sólidos de la pulpa, ya que este puede ser ajustado según las condiciones operativas en la adición de agua, sin embargo, por cuestiones de ingeniería de operación se busca que continúe en un valor previamente establecido.

- **Estocásticos**

Los datos estocásticos implican cierto grado de incertidumbre o variabilidad y pueden fluctuar en función de factores aleatorios e impredecibles. Estos datos se caracterizan por que es posible describirlos mediante una probabilidad asociada a los factores que los rigen, es decir, dentro de rango dado es posible estimar su comportamiento mediante la descripción de su distribución. Un ejemplo de estos datos estocásticos es el porcentaje de humedad que se encuentra en el mineral, la evaporación medida en el tanque evaporímetro o la humedad con la que se obtiene el concentrado después del filtrado.

VIII.1.3 Datos de salida

Esta calculadora desarrollada permite el ingreso de los datos al modelo de una manera sintetizada para la obtención de cada componente de la HH



y el valor total de la misma, con el beneficio de poder cuantificar además del periodo evaluado, modificaciones o escenarios particulares en los que se necesite considerar algún cambio en específico en alguna de las variables involucradas en el modelo (condiciones operativas o escenarios de variabilidad climática).

Esta herramienta consiste en un modelo en donde es posible alimentar todo el proceso con las variables establecidas en el modelo numérico para calcular la HH de cualquier operación enfocada en el PCSC.

La herramienta es capaz de proyectar escenarios si el modelo es alimentado con datos de comportamiento a futuro con aumentos o reducciones de producción, determinación de la cantidad de agua para el sistema, estimaciones de recuperación de agua en la presa de jales y incluso escenarios en donde las condiciones climáticas sean más extremas.

VIII.1.4 Cuantificación de la HH de un caso de estudio

La herramienta de aplicación industrial para la determinación de la HH fue utilizada para evaluar cómo caso de estudio a la empresa Negociación Minera Santa María de la Paz y Anexas, S.A. de C.V. dentro de los cuales fue posible determinar la HHV y la HHA del proceso. A pesar de que la metodología propuesta es capaz de cuantificar la HHG del proceso, en el caso de estudio el proceso fue diseñado para ser un proceso de cero descargar y por lo tanto no existe información que indique que haya algún parámetro fuera de los que marca la normatividad aplicable. La información que se obtuvo referente a la presa de jales y a este punto son datos de los pozos de monitoreo aguas abajo de la presa de jales en los cuales no se tiene detección de infiltraciones. Por lo que el valor de la HHG y del agua gris fue de 0 L/t y 0 m³ respectivamente.

Se consideraron los posibles escenarios, la variabilidad climática, los cambios operativos por el dinamismo del proceso, así como el cambio de uso de suelo que la actividad genera.

Los resultados por módulos se muestran dentro de la Tabla 9 en donde se obtuvo un valor en total de 428,285.1 m³ de *agua verde* que dieron como resultado 137.4 L/t del componente HHV, al dividir el volumen entre la producción anual. Se puede observar dentro de la Tabla 9 al igual que dentro de la Figura 50 que el módulo de mayor aportación a la HHV es el módulo



Presa de Jales, debido a la extensión de esta infraestructura y por lo tanto a la capacidad de captar en su superficie grandes volúmenes de agua.

Del mismo modo, la HHA obtuvo un valor de 127.4 L/t con 397,083.5 m³ de *agua azul* asociada a este componente, el valor de la HHG y del agua gris fue de 0 L/t y 0 m³ respectivamente.

Tabla 9. Resultados de la cuantificación de cada componente de la HH por módulo

Producción Anual (t)	Volumen de Agua Verde	Volumen de Agua Azul	Huella Hídrica Gris	Volumen total cuantificado
3,117,805	m ³	m ³	m ³	m ³
Mina	0.0	160.5	0.0	160.5
Acarreo	72,716.0	98,287.0	0.0	171,003.0
Acumulamiento	4,521.6	14,642.0	0.0	19,163.6
Reducción de Tamaño	0.0	8,102.7	0.0	8,102.7
Molienda	0.0	0.0	0.0	0.0
Flotación	0.0	768.0	0.0	768.0
Filtración	0.0	9,336.4	0.0	9,336.4
Presa de jales	351,006.9	265,055.5	0.0	616,062.4
Manejo de Agua	40.6	731.4	0.0	772.0
TOTAL	428,285.1	397,083.5	0.0	825,368.6
m ³ /t	HHV	HHA	HHG	HH
	0.137	0.127	0.000	0.265
L/t	137.4	127.4	0.0	264.7

La Figura 48 muestra gráficamente la aportación que tiene cada uno de los módulos a la HH total, expresado en unidades de litros por tonelada en donde es posible observar que los dos módulos de mayor aportación a la HH son el módulo *Acarreo*, principalmente por el agua que se emplea en los caminos y los escurrimientos generados durante los eventos de precipitación y con la presa de jales que, tanto en agua verde, como en agua azul, es el principal módulo de contribución al indicador debido a la pérdida por evaporación y la ganancia de agua por precipitación, ambas condiciones generadas por la extensión de esta infraestructura.

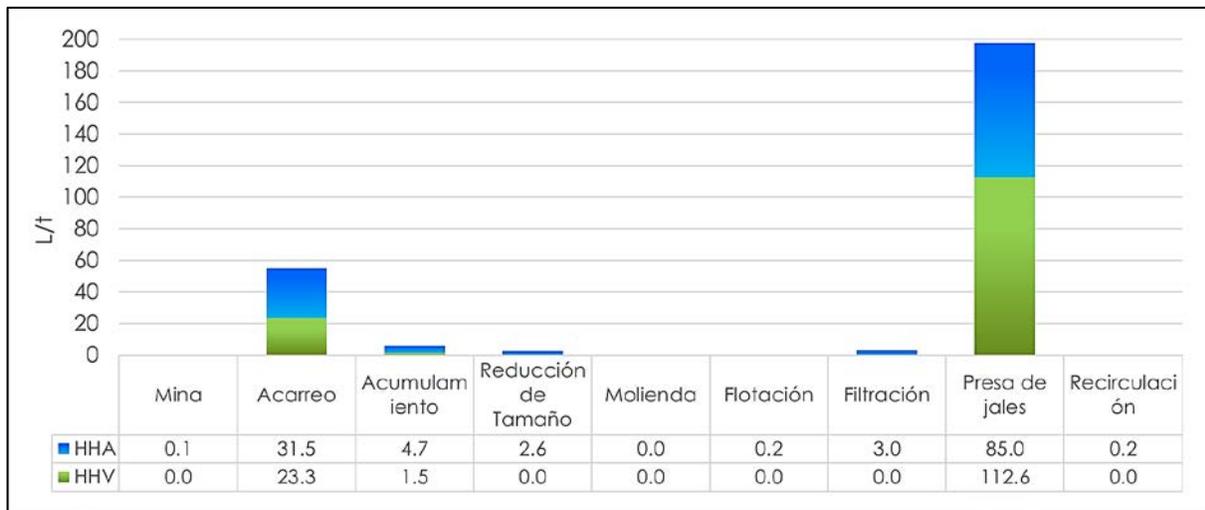


Figura 48. Huella Hídrica del caso de estudio por módulo para le PCSC.

La Figura 49 fue generada usando el Software Goldsim y muestra el comportamiento de la HHV y la HHA en el módulo presa de jales en donde se puede apreciar como la HHV obedece a los pulsos por la captación de la precipitación y en algunos días la cantidad de agua que captada puede llegar hasta los 40,000 m³ en un solo día, lo cual es posible si se consideran eventos meteorológicos de alta intensidad de lluvia en el rango de los 60 mm/h.

Por otra parte, se encuentra la HHA que su crecimiento acumulado es más constante ya que obedece a las pérdidas por evaporación en la presa de jales.

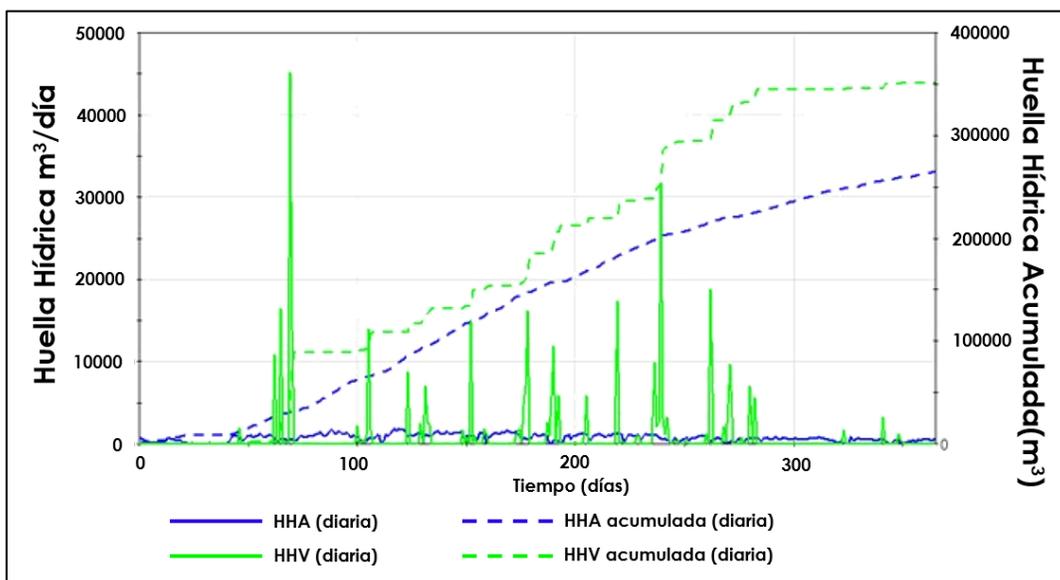


Figura 49. Huella hídrica diaria y acumulada para el módulo Presa de Jales PCSC



La Figura 50 y la Figura 51 muestran mediante un gráfico la aportación en porcentaje de los módulos para cada los componentes azul y verde de la HH, reafirmando lo mencionado anteriormente



Figura 50. Porcentaje de aportación a la HHV por módulo.

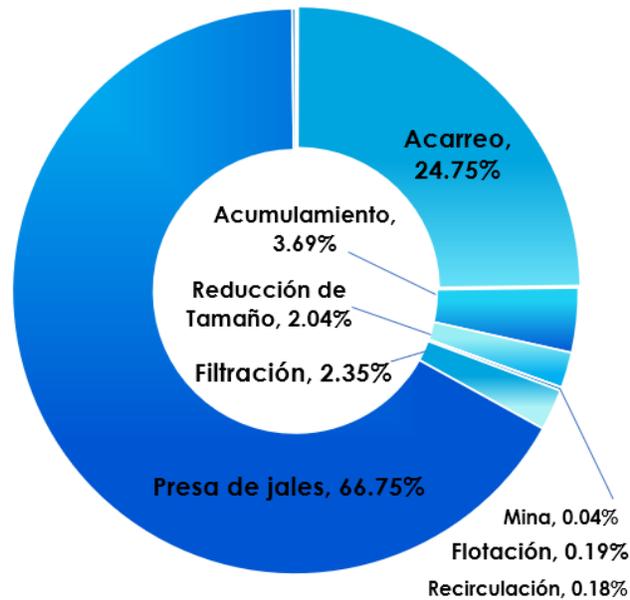


Figura 51. Porcentaje de aportación a la HHA por módulo



La Tabla 10 muestra los resultados obtenidos para la cuantificación de la HH y sus componentes expresados en metros cúbicos por tonelada de material de interés. Primeramente, se encuentra el *material* el cual considera mineral y ganga como se mostró en la Tabla 9, obteniendo un valor de 0.265 m³/t de material movido. En comparativa, se muestra también el valor de la HH expresado en metros cúbicos por tonelada de concentrado obtenido o, al considerar únicamente el producto del proceso que es el concentrado, con un valor de 7.6 m³/t y también se muestran los valores de la HH por cada tonelada de cobre extraída durante el año de evaluación, obteniendo un valor de 29.59 m³/t.

Tabla 10. Resultado de la cuantificación de la HH expresado en toneladas de material, toneladas de concentrado y toneladas de contenido de cobre.

Toneladas de	Producción Anual (t)	Volumen de Agua Verde	Volumen de Agua Azul	Huella Hídrica Gris	HH	UNIDAD
Material (mineral tepetate)	3,117,805.0	0.137	0.127	0.000	0.265	m ³ /t
Concentrado	108,192.3	3.959	3.670	0.000	7.629	m ³ /t
Cobre	27,885.5	15.359	14.240	0.000	29.598	m ³ /t

Al expresar el indicador en términos del concentrado y de la cantidad de cobre contenido puede facilitar su comparación con otras investigaciones realizadas con anterioridad a pesar de que lo propuesto en el presente documento es que se considere el total de la producción anual de mineral junto con el tepetate.

Si bien fueron obtenidos los valores de todos los flujos que le aplicaban a la empresa, existen algunos otros valores que pueden ser calculados por el modelo que no representan un aporte para la HH como indicador, sin embargo, resultan de mucho interés en el entendimiento general del manejo de los recursos hídricos en el proceso. El más importante de estos flujos resulta ser el volumen que queda retenido dentro de la presa de jales o agua intersticial.

El agua intersticial no representa una salida en términos de la evaluación de la HH porque sale del sistema evaluado y al considera que es necesaria esta condición para lograr la saturación de los jales permitiendo la recuperación una fracción del agua. Este volumen para en el caso de estudio resultó de aproximadamente **2,218,205 m³/año** siendo mayor que el volumen de agua recuperado, por lo que gran parte de la reposición de agua que se hace en el proceso es por esta razón. Esto en algunos casos puede ser evaluado según las características geoquímicas de los jales para secarlos antes de que sean depositados a través de filtros y recuperar el agua (Barrera et al., 2015)



Por otra parte, la validación del modelo se fue haciendo de acuerdo con los datos calculados por la empresa y los parámetros que la empresa maneja para corroborar que los datos empleados eran correctos.

La empresa cuenta con una pileta de homogenización en donde el agua que proviene del subsuelo y es extraída se combina con el agua que es recuperada de la presa de jales. Se tienen medidores a la entrada de la pileta de ambos flujos con lo que es posible determinar la cantidad de agua que de manera general se usa en el proceso. De esta pileta la empresa utiliza agua para el acondicionamiento en la molienda y la flotación, que son los módulos con mayor demanda de agua.

La siguiente Tabla 11 muestra la comparación entre el dato calculado del modelo numérico con el dato de consumo de los medidores de la empresa, en donde se encontró un valor muy aproximado con el modelo, con una diferencia de 1.8%.

Tabla 11. Datos calculados del volumen empleado en los módulos de molienda y flotación VS consumo de agua medido en la empresa.

Módulo	Volumen calculado (m ³ /año)	Volumen empresa (m ³ /año)	Diferencia
Molienda	1,284,684	No identificado por separada	
Flotación	2,919,811		
Total	4,302,775	4,382,277	1.81%



IX. Discusión y análisis crítico de los resultados de la aplicación de la metodología desarrollada

Los resultados obtenidos durante la generación de información proporcionaron información relevante en el caso de la evaporación en las celdas de flotación y en los molinos, ya que la falta de precisión en este tema y la dificultad que implica hacer mediciones en los equipos industriales crean la necesidad de generar más información. En la presente investigación se determinó un que el volumen perdido por evaporación en los circuitos de flotación representa un porcentaje muy pequeño respecto al total del volumen empleado en el proceso. Sin embargo, las condiciones a nivel laboratorio en las que fue este efecto no representa la generalidad de condiciones operativas para la etapa de flotación y molienda, o que da la pauta para plantear otras formas de como medir o estimar las pérdidas que se puedan estar generando en estos equipos.

En cuanto a las pruebas de evaporación *in-situ* no se observó que existiera una diferencia significativa entre los tipos diferentes de calidad del agua empleados en el proceso, es decir, la pérdida por evaporación en piletas y la presa de jales puede ser estimada empleando los datos de evaporación del tanque evaporímetro siempre y cuando las mediciones se realicen en las áreas cercanas al cuerpo de agua evaluado.

Las pruebas de infiltración en la presa de jales demostraron que la granulometría del material tiene un efecto importante no solo en cuestiones operativas para recuperar de una manera más eficiente los metales de interés (Cu), sino que también la granulometría juega un papel importante en la respuesta que pueda tener la presa de jales ante eventos climáticos atípicos como las tormentas de diseño con periodos de retorno significativos. Asimismo, dependiendo del lugar y la forma en la que los jales sean depositados la granulometría puede ser un factor relevante para la recuperación de agua.

En cuanto al volumen intersticial y la evaporación en la presa de jales, existen investigaciones en donde coinciden los resultados obtenidos en esta investigación (Gunson et al., 2012b) representando las dos principales razones por las que es necesario reponer agua en el proceso. El volumen de agua intersticial del caso de estudio resultó de 2,218,205 m³/año siendo el mayor volumen cuantificado, pero por las consideraciones de evaluación no representa una salida del sistema.



Se considera que este volumen es necesario para la recuperación de agua dentro de la presa de jales, pero es importante considerar que este volumen puede ser recuperado a través de procesos de filtración de jales previos al depósito en la presa, lo que ayudaría a disminuir la HHA del proceso en general evitando las pérdidas por evaporación en la presa de jales. La evaporación va ligada a la cantidad de agua disponible en la presa de jales y si este volumen disminuye también las pérdidas.

Por otra parte, la implementación de tecnologías de vanguardia como las técnicas de percepción remota a través del uso de RPAS con sensores especializados como lo multiespectrales amplia la forma en la que se puede obtener información en los procesos. La aplicación de esos equipos permitió la determinación de la humedad de una presa de jales y la zonificación superficies que tiene factores de evaporación diferentes, lo cual, resulta ser una herramienta de gran potencial para la determinación más precisa de la evaporación. La aplicación de este tipo de equipos no se encuentra limitada a la presa de jales, se podrían usar para hacer más eficientes el riego de caminos o buscar compuestos o sitios de interés asociados a escurrimientos.

Se calculó de forma global y generalizada la huella hídrica azul de distintos tipos de reservorios de agua según su uso (Hogeboom et al., 2018), en donde se ha estimado el volumen empleado por varios sectores y se observa que la mayor parte de la HHA (57%), corresponde a lugares en donde la escasez de agua es más grande como pasa con algunas regiones en donde se desarrolla la minería.

La competencia por los recurso hídricos y la minera es un tema de relevancia (Northey et al., 2014; Wang et al., 2023), ya que existe una gran preocupación porque estos se ven afectados a largo plazo (Younger, 1997), sin embargo, es necesario continuar con las siguientes etapas de los proceso de evaluación de la HH para poder identificar la vulnerabilidad del sitio en donde se encuentran ubicadas las actividades mineras y evaluar si en verdad existe una competencia de los recursos hídricos en el sitio y si se encuentra relacionada a la cantidad, la disponibilidad, la calidad o algún otro factor (Northey et al., 2017)

Es importante considerar que en el caso de los cuerpos de agua superficiales que abastezcan, tanto a unidades mineras, como a alguna otra actividad productiva o a la población en general si pudiese existir una competencia por los recursos hídricos. Sin embargo, en el caso de que el abastecimiento sea subterráneo o se esté aprovechando el agua de laboreo de las minas es necesario evaluar la calidad del agua extraída en el sitio



porque existe la posibilidad de que tenga la calidad suficiente para ser aprovechada en el proceso, pero tal vez no por otro sector, la concentración de algún parámetro relacionado a los minerales existentes en el subsuelo.

La calidad del agua de laboreo y subterránea es una característica particular de cada sitio, por esa razón resulta necesario considerar la calidad del agua que se emplea en los procesos minero-metalúrgicos y buscar su mayor reutilización, independientemente si existe competencia con algún otro sector, enfocándose en procesos más sustentables.

En estudios anteriores se ha publicado que la HHA de la producción de cátodos de cobre a partir de sulfuros fue de 96 m³/t de cátodos de cobre, considerando etapas adicionales a las presentadas en este trabajo, como la fundiciones, plantas de ácido sulfúrico y electro refinera (Peña y Huijbregts, 2014). Los resultados obtenidos en este trabajo indican que la HHA del concentrado de cobre fue de 3.67 m³/t y 14.24 m³/t de cobre al considerar el contenido de este metal dentro del concentrado. Existen diferencias en los resultados calculados para la etapa denominada "concentración" por Peña y Huijbregts (2014) ya que reportan un valor de 57 m³/t solo para esta etapa, el cual sigue estando por encima del valor obtenido en este trabajo.

Es importante considerar que ese trabajo de investigación fue en un sitio al norte de Chile, en el desierto de Atacama, en donde la tasa de evaporación es más alta por ser una zona desértica lo que podría aumentar significativamente las pérdidas que existen por evaporación. En comparación el volumen obtenido de evaporación en la presa de jales del presente trabajo representa el 8% del volumen que necesita anualmente el proceso, mientras que en el trabajo de Peña y Huijbregts (2014) se menciona que este valor es del 30%.

En comparativa con otros sectores, la WFN (WFN,2024) ha publicado la HH de diversos productos como la HH de los plátanos con 790 l/kg, de la carne de res 15,415 l/kg, del bioetanol con 2,107 l/l, del chocolate con 17,196 l/kg, de la piel de bovino con 17,093 l/kg y una gran cantidad de productos de uso diario. Al tomar el valor obtenido de 14.24 l/kg de cobre contenido en el concentrado del caso de estudio, se obtiene un valor de muy por debajo de los productos que consumimos diariamente. Este enfoque deja observar la importancia de las unidades en el es expresado el indicador y sobre todo que uno tiene que ser consciente de la escala a la cual se está refiriendo el consumo.



Si bien la minería pareciera ser que localmente tiene un mayor impacto por la cantidad de agua requerida para sus operaciones, es importante considerar que esta focalización del consumo también evita una competencia extensiva por los recursos hídricos, en donde, tomando como ejemplo la carne de res se puede pensar que existen más granjas de vacas que unidades mineras y que mundialmente se consume más agua en carne de res anualmente, con 2,422 Gm³/año (Mekonnen y Hoekstra, 2012), que en la producción de cobre con 1 Gm³/año (Gunson, 2013)

En ese trabajo de investigación se obtuvo que el proceso de concentración era la etapa que mayor consumo de agua al igual que otras investigaciones (Gu et al., 2015; Gunson et al., 2012b; Peña y Huijbregts, 2014) considerando que el consumo de agua por etapa únicamente se genera cuando existe una salida del sistema, por lo que es necesario dar seguimiento a todo el proceso productivo y como el agua va trasladándose dentro es importante identificar las salidas del proceso.

El presente trabajo se enfoca en considerar la migración del agua de una etapa a otra y no únicamente evaluar la reposición de agua como parte del indicador, ya que el agua dentro del sistema va teniendo distinta participación dependiendo de la etapa.

En la actualidad la aplicación de la HH como indicador ha tenido limitaciones ya que al enfocarse en la información que es útil para la producción puede llegar a limitar la cuantificación de los 3 componentes (HHA, HHV y HHG) siendo la disponibilidad de información una limitante para la determinación del indicador en general. (Chan et al., 2014; Gunson et al., 2012b; Northey et al., 2014; Peña y Huijbregts, 2014).

Durante la aplicación de la metodología y la herramienta desarrollada para la evaluación a nivel industrial no se cuantificó el valor de la HHG, esto debido principalmente a tres razones. La primera relacionada con el diseño del proceso, ya que el sitio evaluado fue diseñado para no tener descargas de ningún tipo. En el diseño del proceso se contempló que toda el agua de la presa de jales fuera recirculada, así como el agua recuperada de todos los módulos, es decir que una vez que el agua entrara al proceso sus únicas dos salidas planificadas fueran la humedad del concentrado y la pérdida por evaporación, de esta manera solo tendría que reponer dicho volumen.

La segunda, se contextualiza en el agua de laboreo, ya que la unidad minera cuenta con un tiro de donde es extraída el agua subterránea para mantener el nivel del agua por debajo de las labores o sitios en donde se está



extrayendo mineral. Esta agua de laboreo extraída cumple con los límites de la normatividad aplicable y parte del volumen es empleado en el proceso y otra parte entregada al ayuntamiento del municipio. De esta forma y en ese escenario no se consideran descargas por parte del agua de laboreo y por lo tanto este posible flujo no es una aportación de *agua gris* que en otros casos puede ser una aportación para la HHG.

La tercera razón está relacionada con la falta de información de la calidad de los escurrimientos generados en el módulo acumulamiento y los terreros de material estéril. Si bien el residuo minero ha sido catalogado como un residuo lo peligroso, no se tiene información de las escorrentías generadas por estas estructuras durante y posteriores a un evento de lluvia, por lo que no fue posible asociar la captación sobre los montículos de material estéril o tepetate.

A pesar de no contar con las condiciones para cuantificar la HHG en el caso de estudio, el presente trabajo permite que los tres componentes sean identificados, cuantificados y reportados en un indicador que considera implícitamente las prácticas hídricas y el manejo del agua y también el impacto causado por el cambio de uso de suelo al considerar que la unidad de reporte sea reflejada en metros cúbicos por tonelada de material involucrado, considerando tanto el mineral de valor, como el estéril.

La contribución de este trabajo se centra en ampliar la aplicación de la Huella Hídrica como indicador ambiental dentro del sector minero metalúrgico, mediante el desarrollo de una metodología específica para la cuantificación del inventario de agua en el proceso de concentración de sulfuros de cobre.

Mediante el desarrollo y aplicación de un modelo conceptual flexible que permite ajustar el arreglo operativo es posible aplicarlo a cualquier caso de estudio para posteriormente aplicar el modelo numérico que de manera versátil puede ajustarse a las condiciones operativas, ambientales y a la infraestructura empleada para cuantificar los flujos correspondientes a cada componente del indicador.

Del mismo modo, este trabajo contribuye a incluir de forma integral aspectos que anteriormente no se habían tomado en cuenta o la perspectiva de como considerarlos dentro de la cuantificación era limitada. En este sentido, se amplía la perspectiva para las evaluaciones de la HH en el sector minero metalúrgico desde la forma de cómo adaptar los conceptos del MEHH al contexto operativo del PCSC y el considerar que tanto el cambio de uso de



suelo, como los factores climáticos tienen un efecto sobre el manejo de los recursos hídricos en el proceso debido a su interacción dinámica.

Asimismo, la aplicación de la metodología desarrollada permitió aplicar los modelos conceptual y numérico a un caso de estudio para cuantificar la HH del proceso y determinar los módulos y parámetros que representan una aportación significativa al indicador.

En ese sentido resulta trascendente la aportación del presente trabajo ya que a pesar de que el número de investigaciones de la HH en la minería ha ido aumentando, sigue existiendo incertidumbre particularmente en que información se necesita para llevar a cabo la cuantificación y sobre todo que parte de la información disponible hasta la fecha proviene de los reportes de las empresas, algunas hasta de manera regiones que dejando de un lado la información local de cada unidad minero metalúrgica y omitiendo las prácticas y condiciones particulares de cada sitio (Northey et al., 2014). Por lo que resulta relevante que dentro del presente trabajo de investigación se desarrolló una metodología que permite conocer la información necesaria, su resolución temporal y la forma en la que debe de cuantificarse.

De esta forma resulta una ventaja contar con un modelo modular que contempla todos los parámetros establecidos en el MC con la posibilidad de que cualquier unidad minero-metalúrgica que tenga este tipo de proceso pueda cuantificar el volumen del inventario de la HH de su proceso.

Otra ventaja es que al contemplar los factores climáticos con una resolución diaria es posible utilizar datos históricos para modelar comportamientos futuros o bien considerar escenarios atípicos de cambio climático y simular el comportamiento de la operación. Esto es de utilidad si se necesitara proyectar el consumo de agua o provisionar ciertas actividades, al contar con una herramienta de cálculo y simulación se pueden proyectar escenarios no cotidianos en la operación.

En el mismo sentido, el desarrollo de una herramienta que tiene la capacidad de calcular toda la información de entrada y de salida del PCSC es sumamente útil porque permite considerar todo el panorama completo del sitio, tratando de que no se omita información relevante.

De la misma forma, la característica de considerar el cambio de uso de suelo dentro del indicador resulta una manera útil y comparable de las prácticas tanto operativas, como del cuidado del medio ambiente y del agua por parte de las empresas mineras. Al relacionar la totalidad de material extraído y depositado en el exterior, así como la extensión de las presas de



jales, tepetateros, tajos, caminos e instalaciones, se puede empezar a relacionar un mejor manejo respecto al beneficio del proceso, es decir, buscar que las instalaciones minero metalúrgicas requieran el menor cambio de usos de suelo, se reúse la mayor cantidad de agua posible, para obtener la mayor producción, lo que directamente tendrá un efecto positivo en la disminución de consumo del consumo de agua.



X. Conclusiones y recomendaciones

Conclusiones

- La metodología desarrollada en el presente trabajo para cuantificar la Huella Hídrica del PCSC es flexible, aplicable y representativa, ya que su diseño modular permite la conceptualización de la configuración operativa del proceso y que cualquier caso de estudio pueda ser evaluado. Asimismo, a través del desarrollo del modelo matemático se pudo determinar los parámetros relevantes para la cuantificación de la HH y se generó información en los cuales hacía falta. De esta forma se creó una herramienta para cuantificar la Huella Hídrica del PCSC, la cual se aplicó exitosamente en la unidad minera Negociación Minera Santa María de la Paz y Anexas S.A de C.V., permitiendo demostrar que los dos procesos hidrológicos que tiene un mayor efecto para la HH son la precipitación y la evaporación en la presa de jales.
- El efecto de la evaporación en el manejo de los recursos hídricos en el PCSC y particularmente en la presa de jales, es la principal forma en la que se pierde agua del proceso.
- La captación dentro de la presa de jales es la principal aportación de aprovechable de agua verde para el proceso.
- La extensión de las áreas con cambio de uso de suelo afecta la magnitud de la HH debido a la pérdida o ganancia de agua a través de los procesos hidrológicos y su interacción con las superficies de la infraestructura del PCSC.
- El Análisis Modular realizado en el proceso permitió identificar los flujos que contribuyen a cada componente de la HH para posteriormente determinar el volumen usado en todo el proceso
- El proceso metodológico generado podría ser aplicado para el desarrollo de metodologías específicas para otros metales o procesos y no resulta particular de esta metodología.
- En la medición de la evaporación con distintas calidades de agua no se observó diferencia estadística significativa que indicara diferencia debido a la calidad. Para el caso de estudio el efecto de la



evaporación no se encuentra asociado a la calidad del agua y por lo tanto es similar en cualquier cuerpo de agua.

- La granulometría de los taludes de la presa de jales tiene un efecto sobre la infiltración, propiciando que no se generen escurrimientos aun en eventos de tormenta con periodos de retorno de 100 años. Por lo tanto, no existe potencial de aportación a la HHG en esta etapa.
- La aplicación de técnicas de percepción remota permite una estimación más precisa de la evaporación en la presa de jales al generar imágenes multiespectrales de donde se puede cuantificar el área generada por el agua y las zonas con menor cantidad de humedad.
- El volumen intersticial de la presa de jales resulta ser importante en términos de reposición de agua del proceso, sin embargo, no es considerado como una pérdida del sistema ya que de manera limitada sigue dentro proceso y es necesario para seguir recuperando agua en la presa de jales.
- La presa de jales resultó ser el módulo de mayor aporte, tanto en para la HHV, como para la HHA
- La alta compactación en los caminos de acarreo generada por el paso de los camiones y el tipo de material de relleno generan grandes superficies que en eventos de precipitación generan escurrimientos que no son aprovechados y en caso de riego que se pierda el total del volumen por efecto de la evaporación
- Existe una pérdida por evaporación en la etapa de flotación que puede estar asociada a la cantidad de energía interna del sistema por efectos del movimiento de rotación de los equipos o por el burbujeo de la pulpa durante la etapa de flotación, así como el aumento de la temperatura, sin embargo, estas pérdidas resultan despreciables para el caso de estudio.
- Existe una pérdida por evaporación en la etapa de molienda asociada a la cantidad de energía que es transmitida por los molinos hacia el agua, sin embargo, este flujo no fue estimado en la presente investigación por lo que no se consideró dentro de la cuantificación del indicador.



- La metodología puede ser mejorada al generar más información en módulos como la molienda y la flotación en donde pueden ser incluidos los valores de las pérdidas por evaporación en molinos, hidrociclones y algunos otros equipos o ajustando y determinando las pérdidas por evaporación en las celdas de flotación.
- Asimismo, puede ser ampliada considerando nuevos módulos par etapas posteriores con procesos de fundición o de refinación.
- El presente trabajo considero únicamente la cuantificación del agua directa de proceso. Por lo que da pie a que posteriormente pueda ser ampliada la metodología para terminar la metodología para la HH indirecta del PCSC.

Recomendaciones

- El aumentar la resolución temporal de la información puede dar un mejor entendimiento del comportamiento de las variables asociadas a los flujos de entrada y de salida del sistema evaluado.
- Se recomienda que en este tipo de proceso se evalúen los escenarios de maximizar el aprovechamiento hídrico instalando sistemas de recuperación drenajes industriales para reincorporarlos al proceso, así como procurar recircular la mayor cantidad de agua de todas las etapas.
- Se recomienda el uso de productos que maximicen la retención de la humedad en los caminos para reducir el volumen de agua empleado en el control de polvos.
- Evaluar el deposito de jales “secos”, filtrados o con el menor contenido de humedad para tener una mayor recuperación de agua en el proceso y disminuir la HHA por pérdidas por evaporación, siempre y cuando las características físico-químicas de estos residuos lo permitan.
- Reducir el área expuesta de los espejos de agua al mínimo para disminuir las perdidas por evaporación incluyendo las presas de jales, sobre todo en regiones áridas.



- Generar datos hidrológicos de los residuos mineros (presas de jales y tepetateras) relacionados con la infiltración para determinar escurrimientos, retenciones intersticiales y pérdidas por infiltración.
- Se recomienda que al implementar la presente metodología se tenga una clara visión sobre las características particulares del sitio de evaluación y sobre la infraestructura involucrada, para facilitar la cuantificación.
- Contar con una base de cálculo diaria ayuda a la identificación de factores que estén relacionados con el comportamiento de los flujos, que, en el caso de ser operativos, es posible analizar sus puntos de mejora, para tener un mejor control y manejo de los recursos hídricos.
- La aplicación de esta metodología es necesario contar con todos los datos de entrada, procurando tener una resolución temporal alta en la información, sin embargo, la metodología puede aplicarse considerando datos generales o con una resolución temporal menor (semanal, mensual o anual), considerando las modificaciones necesarias para realizar la cuantificación.
- Restaurar en la medida de lo posible las áreas con cambio de uso de suelo que vayan siendo liberadas o se dejen de utilizar para disminuir la HH asociada a la extensión de los proyectos.
- Buscar con un enfoque sustentable la disminución de los tres componentes de la HH, teniendo como objetivo que el valor de la HHG sea de 0 m³/t, el valor de la HHA sea lo más pequeño posible y el consumo del proceso pueda abastecerse del volumen asociado a la HHV.



Referencias Bibliográficas

- AgroDer, 2012. The Water footprint of Mexico in the context of North America 46.
- Ahn, J.S., Song, H., Yim, G.J., Ji, S.W., Kim, J.G., 2011. An engineered cover system for mine tailings using a hardpan layer: A solidification/stabilization method for layer and field performance evaluation. *J. Hazard. Mater.* 197, 153–160. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.09.069>
- Alvarez-Pugliese, C.E., Machuca-Martínez, F., Perez-Rincon, M., 2021. Water footprint in gold extraction: A case-study in Suarez, Cauca, Colombia. *Heliyon* 7. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e07949>
- Azadi, M., Northey, S.A., Ali, S.H., Edraki, M., 2020. Transparency on greenhouse gas emissions from mining to enable climate change mitigation. *Nat. Geosci.* 13, 100–104. <https://doi.org/10.1038/s41561-020-0531-3>
- BAAR, 2008. Water Balance Tailings Basin-Mitigation Design.
- Barrera, S., Cacciuttolo, C., Caldwell, J., 2015. Reassessment of best available tailings management practices. *Proc. Tailings Mine Waste*.
- Bebbington, A.J., Bury, J.T., 2010. Minería, instituciones y sostenibilidad: desencuentros y desafíos. (Spanish). *Antropológica* (02549212) 53–84.
- Bhanbhro, R., 2014. Mechanical Properties of Tailings: Basic Description of a Tailings Material from Sweden, Unpublished. <https://doi.org/10.13140/2.1.1338.2082>
- Bleiwas, D.I., 2012a. Estimated Water Requirements for the Conventional Flotation of Copper Ores, USGS Open-File Report.
- Bleiwas, D.I., 2012b. Estimated water requirements for gold heap-leach operations. USGS Open File Rep. 2012-1085 22.
- Bouchard, J., LeBlanc, G., Germain, Y., Levesque, M., Tremblay, N., Légaré, B., Dallaire, B., Radziszewski, P., 2016. The CMIC / CanmetMINES comminution energy recovery potential initiative – the agnico eagle goldex division case. IMPC 2016 - 28th Int. Miner. Process. Congr. 2016-Septe.
- Cacciuttolo, C., Valenzuela, F., 2022. Efficient Use of Water in Tailings Management: New Technologies and Environmental Strategies for the Future of Mining. *Water (Switzerland)* 14. <https://doi.org/10.3390/w14111741>
- CAMIMEX, 2017. Informe Anual 2017 Cámara Minera de México.
- CEFIM, 2015. Villa de la paz, s.l.p.
- Chan, B.K.C., Xiong, M.Y., Chen, C., Zhang, G.P., Franke, N., 2014. A preliminary water footprint assessment of copper production in China. *Water Sci. Technol. Water Supply* 14, 1018–1025. <https://doi.org/10.2166/ws.2014.059>



- CONAGUA, 2020. Datos de la Estación Climatológica 24040 Inventario de Registros por Década Año.
- Corredor, G., Ph, D., Lizeth, G., Gonz, V., Granados, M.V., Guti, L., P, E.H., Ph, D., 2021. Use of the gray water footprint as an indicator of contamination caused by artisanal mining in Colombia 73. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2021.102197>
- Crowson, P.C.F., 2011. Mineral reserves and future minerals availability. *Miner. Econ.* 24, 1–6. <https://doi.org/10.1007/s13563-011-0002-9>
- Davenport, W.G., 2001. Copper Production, in: *Encyclopedia of Materials: Science and Technology*. pp. 1671–1680. <https://doi.org/10.1016/b0-08-043152-6/00294-1>
- Davenport, W.G., King, M., Schlesinger, M., Biswas, A.K., 2002. Concentrating Copper Ores. *Extr. Metall. Copp.* 31–55. <https://doi.org/10.1016/b978-008044029-3/50006-x>
- Fang, K., Heijungs, R., De Snoo, G.R., 2014. Theoretical exploration for the combination of the ecological, energy, carbon, and water footprints: Overview of a footprint family. *Ecol. Indic.* 36, 508–518. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2013.08.017>
- FAO, 2018. Evapotranspiración del cultivo en condiciones estándar Introducción a la Evapotranspiración del Cultivo (ET c).
- Favas, P.J. de C., Martino, L.E., Prasad, M.N.V., 2018. Abandoned Mine Land Reclamation-Challenges and Opportunities (Holistic Approach), *Bio-Geotechnologies for Mine Site Rehabilitation*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812986-9.00001-4>
- Fonseca, A., Louise, M., Fitzpatrick, P., 2014. Sustainability reporting among mining corporations : a constructive critique of the GRI approach. *J. Clean. Prod.* 84, 70–83. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.11.050>
- Gu, Y., Xu, J., Keller, A.A., Yuan, D., Li, Y., Zhang, B., Weng, Q., Zhang, X., Deng, P., Wang, H., Li, F., 2015. Calculation of water footprint of the iron and steel industry: A case study in Eastern China. *J. Clean. Prod.* 92, 274–281. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.12.094>
- Gunson, A.J., 2013. Quantifying, Reducing and improving mine water use. University of British Columbia.
- Gunson, A.J., Klein, B., Veiga, M., Dunbar, S., 2012a. Reducing mine water requirements. *J. Clean. Prod.* 21, 71–82. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.08.020>
- Gunson, A.J., Klein, B., Veiga, M., Dunbar, S., 2012b. Reducing mine water requirements. *J. Clean. Prod.* 21, 71–82. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.08.020>
- Guo, Q., Yu, C., Xu, Z., Yang, Y., Wang, X., 2023. Impacts of climate and land-use changes on water yields: Similarities and differences among typical watersheds



- distributed throughout China. *J. Hydrol. Reg. Stud.* 45, 101294. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2022.101294>
- Haldar, S.K., 2018. Chapter 13 - Mineral Processing, in: *Mineral Exploration*. Elsevier, pp. 259–290. <https://doi.org/978-0-12-814022-2>
- Harris, F., Moss, C., Joy, E.J.M., Quinn, R., Scheelbeek, P.F.D., Dangour, A.D., Green, R., 2019. The Water Footprint of Diets : A Global Systematic Review and Meta-analysis C, 1–12.
- Hocking, M.B., 2005. Ore Enrichment and Smelting of Copper. *Handb. Chem. Technol. Pollut. Control* 391–420. <https://doi.org/10.1016/b978-012088796-5/50016-8>
- Hoekstra, A.Y., 2015. The water footprint of industry, Assessing and Measuring Environmental Impact and Sustainability. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-799968-5.00007-5>
- Hoekstra, A.Y., 2003. Virtual water trade: Proceedings of the International Expert Meeting on Virtual Water Trade, Value of Water Research Report Series. The Netherlands.
- Hoekstra, A.Y., Chapagain, A.K., Aldaya, M.M., Mekonnen, M.M., 2011. The Water Footprint Assessment Manual, Febrero 2011. <https://doi.org/978-1-84971-279-8>
- Hoekstra, A.Y., Hung, P.Q., 2002. Virtual water trade: A quantification of virtual water flows, Value of Water Research Report Series No.11.
- Hogeboom, R.J., Knook, L., Hoekstra, A.Y., 2018. The blue water footprint of the world's artificial reservoirs for hydroelectricity, irrigation, residential and industrial water supply, flood protection, fishing and recreation. *Adv. Water Resour.* 113, 285–294. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2018.01.028>
- Hong, S., Candelone, J.P., Soutif, M., Boutron, C.F., 1996. A reconstruction of changes in copper production and copper emissions to the atmosphere during the past 7000 years. *Sci. Total Environ.* 188, 183–193. [https://doi.org/10.1016/0048-9697\(96\)05171-6](https://doi.org/10.1016/0048-9697(96)05171-6)
- Hosseini, P., Beersaerts, G., Dufloy, J., Pontikes, Y., 2024. Optimization of Ball Milling Parameters for Efficient Copper Slag Valorization. *Procedia CIRP* 122, 235–240. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2024.01.034>
- ICMM, 2017. A practical guide to consistent water reporting 72.
- IFC, W.B.G., 2014. *Water , Mining and Communities :*, International Finance Corporation.
- IIED, 2002. *Mínería, Minerales y Desarrollo Sostenible*.
- International Council in Mining and Metals, 2012. *Water management in mining: a selection of case studies*.
- ISO, 2014. ISO 14046 INTERNATIONAL STANDARD Environmental management — Water footprint — Principles , requirements.



- Iwasaki, I., Riemer, S.C., Orlich, J.N., 1985. Effects of Percent Solids and Mill Loading on Ball Wear in Laboratory Taconite Grinding. *Trans. Am. Inst. Mining, Metall. Pet. Eng. Soc.* 278, 185–192.
- Jeswiet, J., Szekeres, A., 2016. Energy Consumption in Mining Comminution. *Procedia CIRP* 48, 140–145. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.03.250>
- Karbasi, M., Ali, M., Bateni, S.M., Jun, C., Jamei, M., Yaseen, Z.M., 2024. Boruta extra tree-bidirectional long short-term memory model development for Pan evaporation forecasting: Investigation of arid climate condition. *Alexandria Eng. J.* 86, 425–442. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2023.11.061>
- Kessell, F., 2002. Dust control methods in tunnels and underground mines. *J. Mine Vent. Soc. South Africa* 55, 129–137.
- Khare, Y.P., Martinez, C.J., 2012. Water Quality and Land Use Changes in the Alafia and. *J. Am. water Resour. Assoc.* 33598, 1–18.
- Leja, J., 1982. *Surface Chemistry of Froth Rotation*.
- Liebbrandt, A., 2001. *Civilization and copper*. Codelco Int. Copp. Assoc.
- Lillesand, Kiefer, Chipman, 2016. *Remote Sensing and Image Interpretation*, 7th ed. Wiley.
- Lottermoser, B.G., 2010. *Mine Wastes*, 3rd ed. Springer Berlin, Heidelberg. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-642-12419-8>
- Lowe, L.D., Webb, J.A., Nathan, R.J., Etchells, T., Malano, H.M., 2009. Evaporation from water supply reservoirs: An assessment of uncertainty. *J. Hydrol.* 376, 261–274. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.07.037>
- Lu, Z., Cai, M., 2012. Disposal Methods on Solid Wastes from Mines in Transition from Open-Pit to Underground Mining. *Procedia Environ. Sci.* 16, 715–721. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2012.10.098>
- Mekonnen, M.M., 2020. The Water Footprint of Global Food Production. *Water* 12. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/w12102696>
- Mekonnen, M.M., Hoekstra, A.Y., 2012. A Global Assessment of the Water Footprint of Farm Animal Products. *Ecosystems* 15, 401–415. <https://doi.org/10.1007/s10021-011-9517-8>
- Morcillo, L., Turrión, D., Fuentes, D., Vilagrosa, A., 2023. Drone-based assessment of microsite-scale hydrological processes promoted by restoration actions in early post-mining ecological restoration stages. *J. Environ. Manage.* 348. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119468>
- Mular, A., Halbe, D.N., Barratt, D.J., 2002. *Mineral Processing Plant Design, Practice, and Control*. Proceedings, 1st ed, Mineral Processing Plant Design, Practice, and Control. Proceedings.
- Murakami, S., Takasu, T., Islam, K., Yamasue, E., Adachi, T., 2020. *Ecological*



- footprint and total material requirement as environmental indicators of mining activities: Case studies of copper mines. *Environ. Sustain. Indic.* 8, 100082. <https://doi.org/10.1016/j.indic.2020.100082>
- Muzenda, E., 2010. An Investigation into the Effect of Water Quality on Flotation Performance 4, 562–566.
- Norgate, T.E., Lovel, R.R., 2004. Water Use in Metal Production: A Life Cycle Perspective 44.
- Northey, S., Haque, N., 2013. Life Cycle Based Water Footprints of Selected Mineral and Metal Processing Routes. *Water Min. Conf.* 35–50.
- Northey, S.A., Haque, N., Lovel, R., Cooksey, M.A., 2014. Evaluating the application of water footprint methods to primary metal production systems. *Miner. Eng.* 69, 65–80. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2014.07.006>
- Northey, S.A., Mudd, G.M., Saarivuori, E., Wessman-Jääskeläinen, H., Haque, N., 2016. Water footprinting and mining: Where are the limitations and opportunities? *J. Clean. Prod.* 135, 1098–1116. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.024>
- Northey, S.A., Mudd, G.M., Werner, T.T., Haque, N., Yellishetty, M., 2019. Sustainable water management and improved corporate reporting in mining. *Water Resour. Ind.* 21, 100104. <https://doi.org/10.1016/j.wri.2018.100104>
- Northey, S.A., Mudd, G.M., Werner, T.T., Jowitt, S.M., Haque, N., Yellishetty, M., Weng, Z., 2017. The exposure of global base metal resources to water criticality, scarcity and climate change. *Glob. Environ. Chang.* 44, 109–124. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2017.04.004>
- Ogden, C.B., van Es, H.M., Schindelbeck, R.R., 1997. Miniature Rain Simulator for Field Measurement of Soil Infiltration. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61, 1041–1043. <https://doi.org/10.2136/sssaj1997.03615995006100040008x>
- Ossa-Moreno, J., McIntyre, N., Ali, S., Smart, J.C.R., Rivera, D., Lall, U., Keir, G., 2018. The Hydro-economics of Mining. *Ecol. Econ.* 145, 368–379. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2017.11.010>
- Peña, C.A., Huijbregts, M.A.J., 2014. The blue water footprint of primary copper production in Northern Chile. *J. Ind. Ecol.* 18, 49–58. <https://doi.org/10.1111/jiec.12036>
- Radetzki, M., 2009. Seven thousand years in the service of humanity-the history of copper, the red metal. *Resour. Policy* 34, 176–184. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2009.03.003>
- Ranchod, N., Sheridan, C.M., Pint, N., Slatter, K., Harding, K.G., 2015. Assessing the blue-water footprint of an opencast platinum mine in South Africa. *Water SA* 41, 287–293. <https://doi.org/10.4314/wsa.v41i2.15>
- Rankine, R., Pacheco, M., Sivakugan, N., 2007. Underground mining with backfills. *Soils and Rocks* 30, 93–101. <https://doi.org/10.28927/sr.302093>



- Rao, S.R., 2006. Chapter 11 - Recycling of Water and Reagents, in: Waste Management Series. pp. 459–481. [https://doi.org/10.1016/S0713-2743\(06\)80096-6](https://doi.org/10.1016/S0713-2743(06)80096-6)
- Rao, S.R., 2004. Surface chemistry of froth flotation, 2a ed. Kluwer Academic / Plenum Publishers, Nueva York.
- Rees, W.E., 1992. Ecological footprints and appropriated carrying capacity: what urban economics leaves out. *Environ. Urban.* 4, 121–130.
- Richards, J., Jia, X., 2002. Remote Sensing and Image Analysis, Geomorphology. [https://doi.org/10.1016/s0169-555x\(01\)00164-7](https://doi.org/10.1016/s0169-555x(01)00164-7)
- Ridoutt, B.G., Pfister, S., 2013. A new water footprint calculation method integrating consumptive and degradative water use into a single stand-alone weighted indicator. *Int. J. Life Cycle Assess.* 18, 204–207. <https://doi.org/10.1007/s11367-012-0458-z>
- Rodríguez, J.E., 2016. DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DE LA HUELLA HÍDRICA DE SISTEMAS DE MINADO A TAJO ABIERTO Y PROCESOS DE LIXIVIACIÓN EN MONTONES PARA LA OBTENCIÓN DE ORO Y PLATA. Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- Schlesinger, M.E., Sole, K.C., Davenport, W.G., Alvear Flores, G.R.F., 2021. Extractive Metallurgy of Copper, Sixth Edition, Extractive Metallurgy of Copper, Sixth Edition. <https://doi.org/10.1016/C2019-0-03265-7>
- Shean, B.J., Cilliers, J.J., 2011. A review of froth flotation control. *Int. J. Miner. Process.* 100, 57–71. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2011.05.002>
- Singh, A.K., Mahato, M.K., Neogi, B., Singh, K.K., 2010. Quality Assessment of Mine Water in the Raniganj Coalfield Area, India. *Mine Water Environ.* 29, 248–262. <https://doi.org/10.1007/s10230-010-0108-2>
- Singh, M.M., 2010. Water Consumption at Copper Mines in Arizona. State Arizona Dep. Mines Miner. Resour. Spec. Rep. 29.
- Tejado-Ramos, J.J., Chocarro-León, M., Barrero-Béjar, I., Valverde-Calvo, A., Ferreras-Moreno, M., Giraldo-Pavón, F., Tarragona-Pérez, C., 2021. Enhancement of the sustainability of wolfram mining using drone remote sensing technology. *Remote Sens. Appl. Soc. Environ.* 23. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2021.100542>
- Thompson, R.J., Visser, A.T., 2007. Art_2007_Thompson_DustPerformance.pdf. *J. Southern African Inst. Min. Metall.* 107, 435–450.
- Ulrich, S., Trench, A., Hagemann, S., 2020. Greenhouse gas emissions and production cost footprints in Australian gold mines. *J. Clean. Prod.* 267, 122118. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122118>
- Wackernagel, M., Lewan, L., Hansson, C.B., 1999. Evaluation the use of Natural Capital with the Ecological Footprint: Application in Sweden and Subregions .



Ambio 28, 604–612.

- Wang, B., Zhang, J., Wang, X., Zhang, X., 2023. Assessing the impact of changing environment on coal mining water use in China. *Water-Energy Nexus* 6, 177–186. <https://doi.org/10.1016/j.wen.2023.10.005>
- Wels, C., Robertson, A.M., 2003. Conceptual model for estimating water recovery in tailings impoundments. *Tailings Mine Waste* 87–94.
- Wiedmann, T., Minx, J., 2007. A Definition of ‘ Carbon Footprint. *Science* (80-.). 1, 1–11. <https://doi.org/10.1088/978-0-750-31040-6>
- Wills, B.A., Napier-Munn, T., 2006. *Mineral Processing Technology*, 7a ed.
- Younger, P.L., 1997. The longevity of minewater pollution: A basis for decision-making. *Sci. Total Environ.* 194–195, 457–466. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(96\)05383-1](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(96)05383-1)
- Younger, P.L., Banwart, S.A., Hedin, R.S., 2002. *Mine Water Hydrology, Pollution, Remediation*. Springer, The Netherlands.
- Zhu, K., Cheng, Y., Zhou, Q., Kápolnai, Z., Dávid, L.D., 2023. The contributions of climate and land use/cover changes to water yield services considering geographic scale. *Heliyon* 9, e20115. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e20115>





Anexos

A.1 – Memoria de la Herramienta Desarrollada en GoldSim Software Versión 12

La herramienta desarrollada para el modelo numérico en el software GoldSim software cuenta con bloques de cálculo independientes que pueden ser seleccionadas para su cuantificación por separado, la siguiente ilustración muestra el esquema general de los módulos teniendo como guía del MC desarrollado para el PCSC.

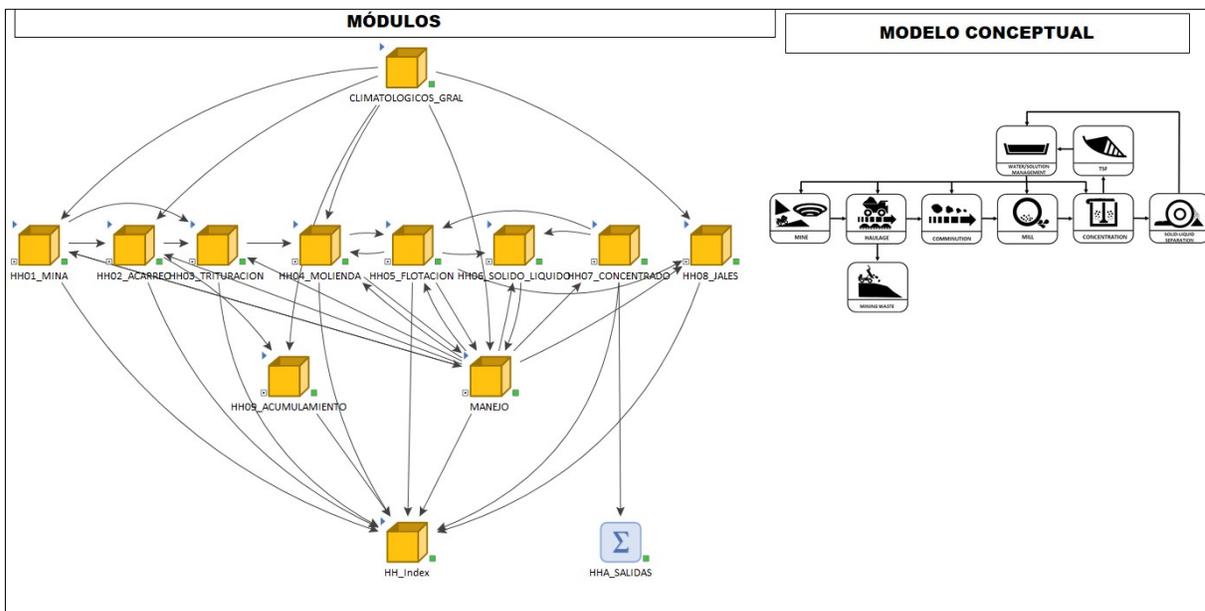


Ilustración 1. Modelo general de la herramienta desarrollada en GoldSim Software

En la herramienta de calculo desarrollada fue necesario separar los datos climatológicos de los módulos ya que estos se requerían en casi todos de ellos por lo que se decidió dejar una forma que estuvieran disponibles para todos como se muestra en la Ilustración 2.

Posteriormente se Desarrollo el módulo mina que contempla todos los datos de entrada y salida establecidos en la lista de flujos, las ecuaciones en son empleados y calculados estos datos se encuentran señalados en color azul. Y los resultados se muestran del lado derecho de la Ilustración 3. Los recuadros azules y verdes que se muestran en la imagen son los cálculos de la HHV y HHA para el este módulo.

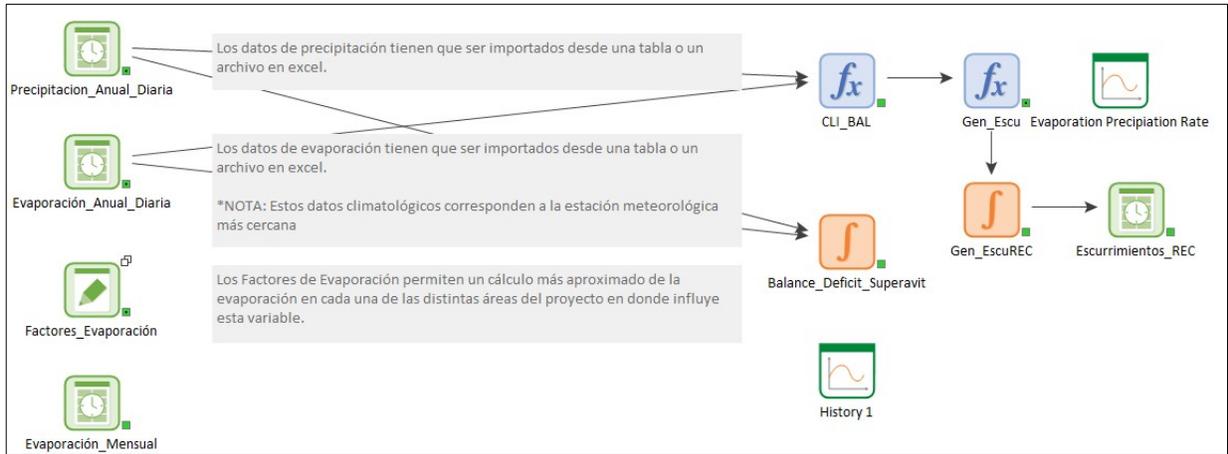


Ilustración 2. Datos de entrada para los datos meteorológicos.

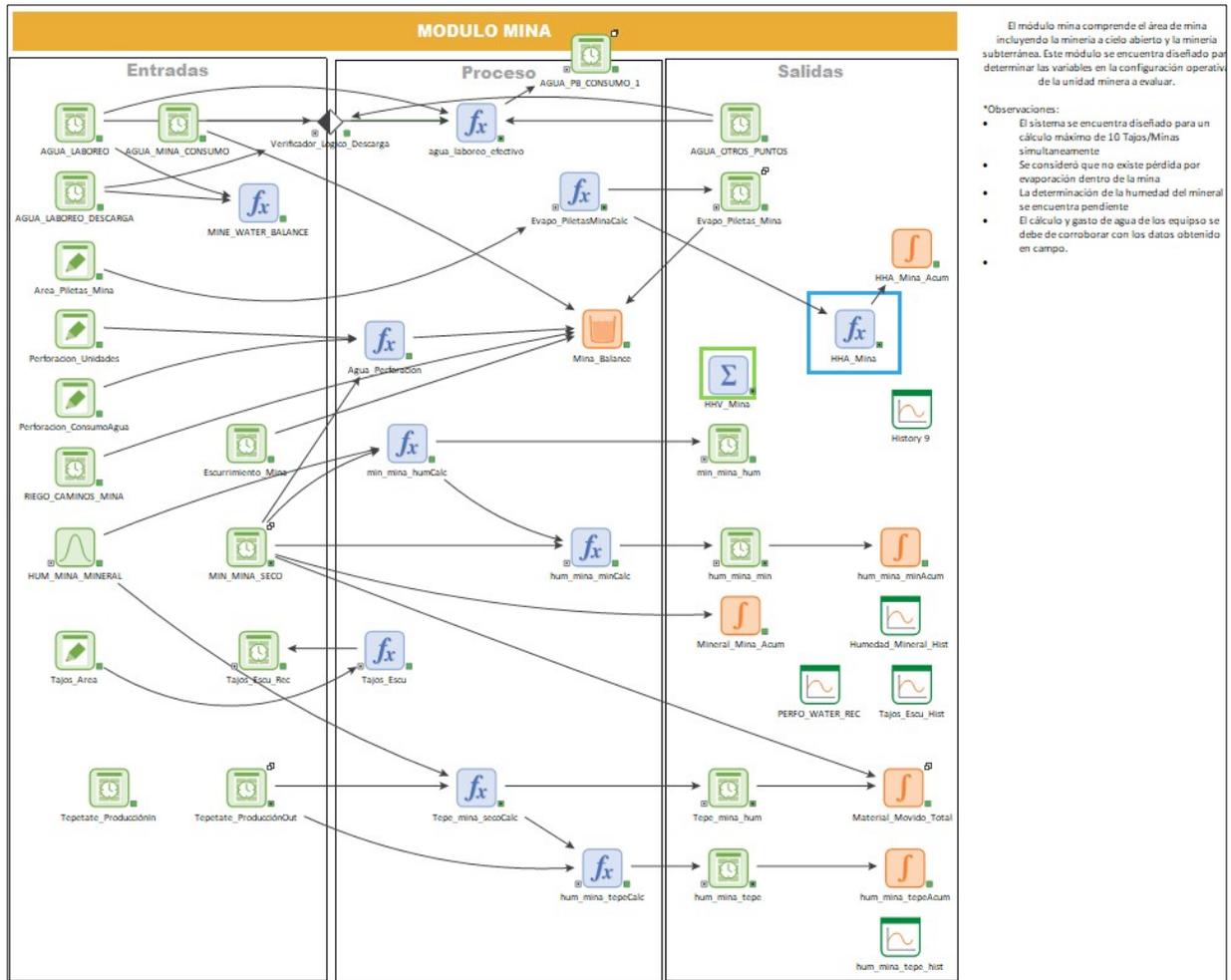


Ilustración 3. Módulo mina de la herramienta.



El módulo acarreo se encuentra diseñado para que calcule de manera separada la HHA y HHV del mineral, de los caminos y del tepetate, de esta forma es posible conocer el aporte a la Huella Hídrica independiente de cada uno de estos flujos y con ello la identificación de su aportación al indicador.

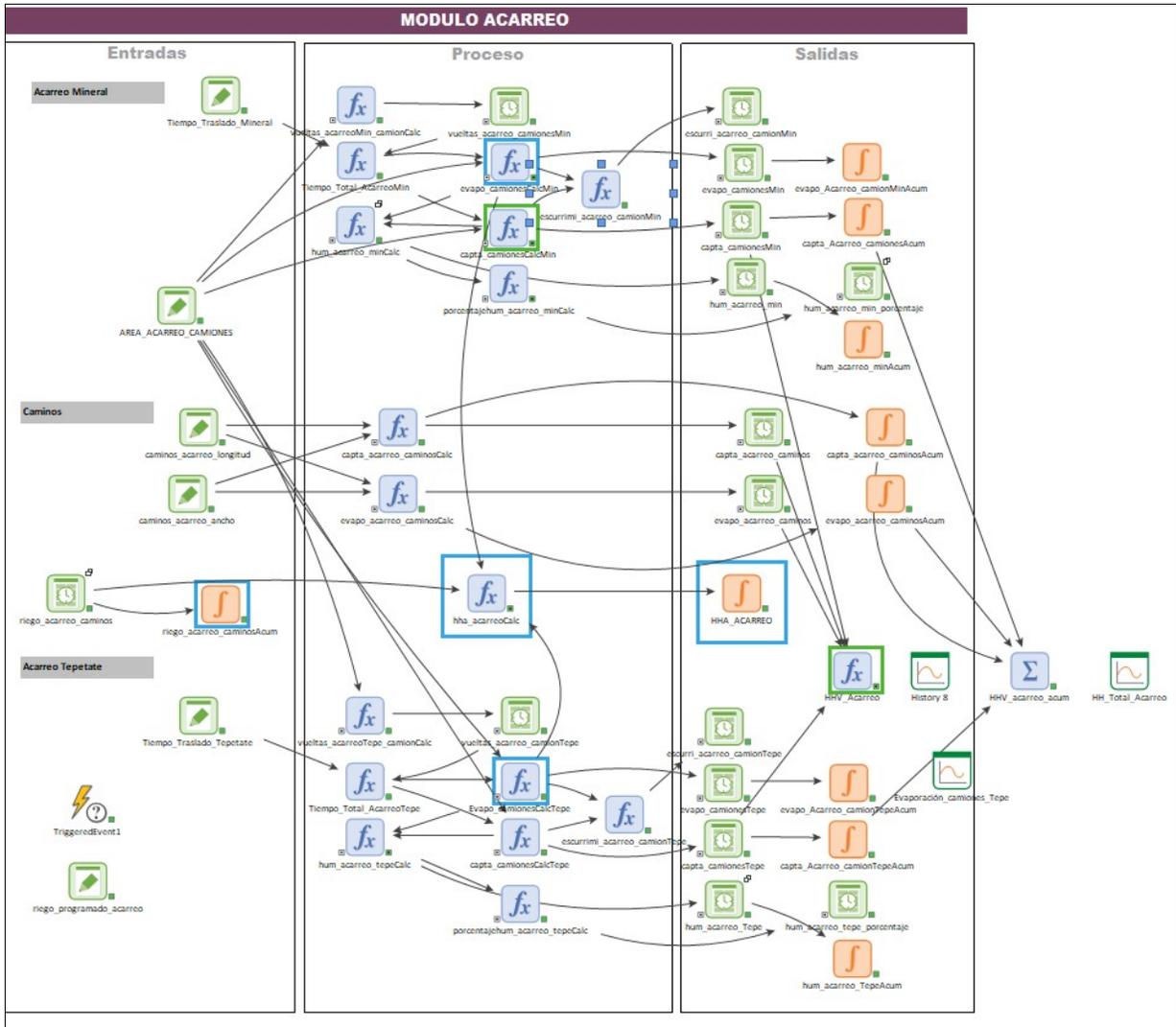


Ilustración 4. Módulo Acarreo

En cada módulo la HH y sus componentes son calculados de manera separada por lo que se puede obtener los valores diarios de cada uno de ellos por separado.



El siguiente módulo es el módulo trituración que contempla la adición de agua y los flujos de transferencia del módulo acarreo, para ir añadiendo el volumen correspondiente de agua azul y verde si se requiriera. De igual forma la Ilustración 7 muestra el módulo molienda en donde se encuentra contemplado la adición de agua para acondicionamiento.

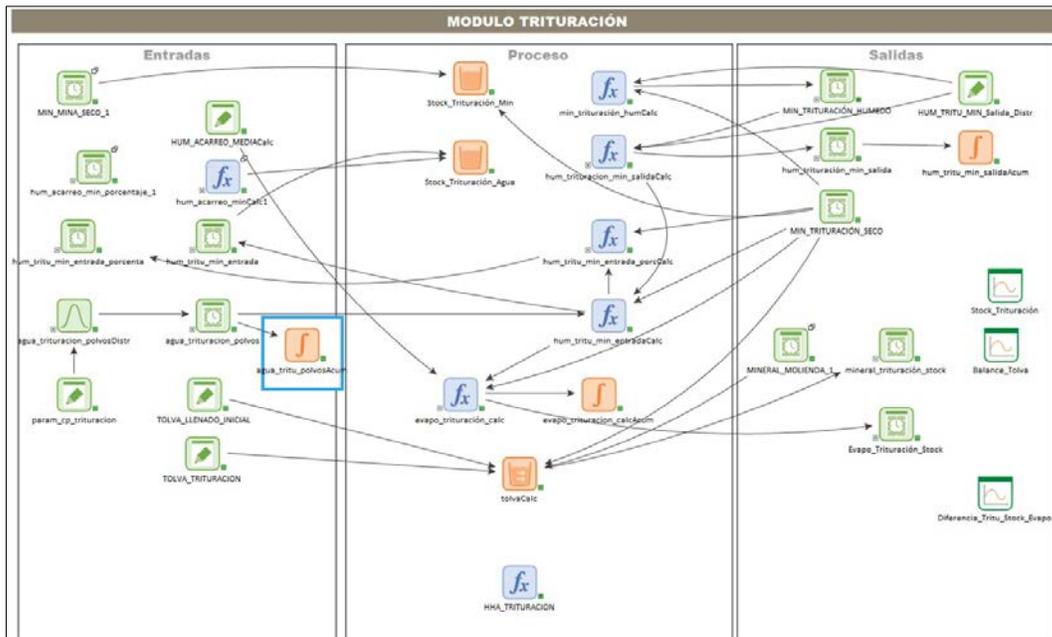


Ilustración 5. módulo trituración.

El módulo acumulación está diseñado para que en uno de sus datos de entrada se especifiquen todos los parámetros de forma de los terreros y la cantidad adicionada. Esta cantidad adicionada puede ser proporcionada de manera calendarizada o se puede establecer como un dato continuo con cierta variación. Este tipo de información de entrada es uno de los motivos por los cuales se eligió el software Goldsim, por su versatilidad de poder utilizar datos estocásticos o determinísticos como en este caso en particular con el tepetate.

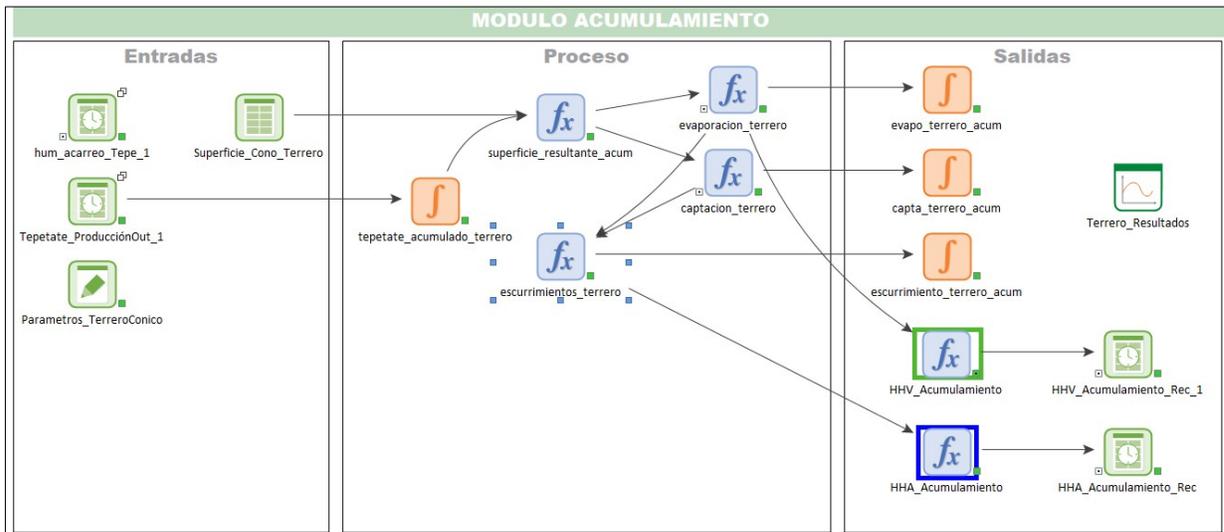


Ilustración 6. Módulo Acumulamiento

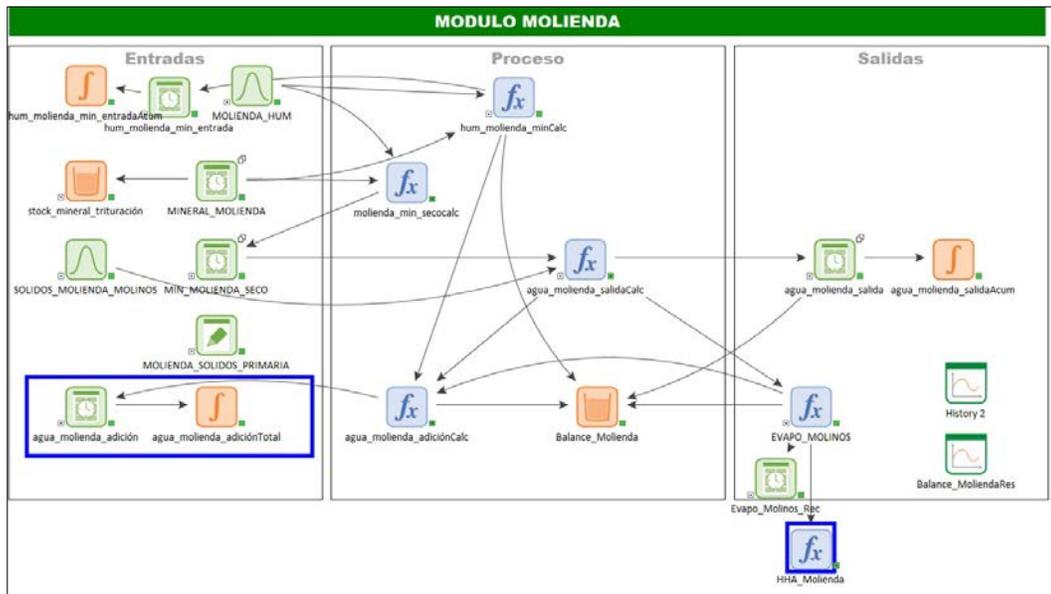


Ilustración 7. Módulo molienda.

El módulo flotación está diseñado dentro de la herramienta para poder cuantificar la pulpa, el porcentaje de sólidos y el número que se requiera de celdas de flotación ya que dentro de sus variables de entrada se pueden especificar estos parámetros de diseño y ser modificados en cualquier momento.

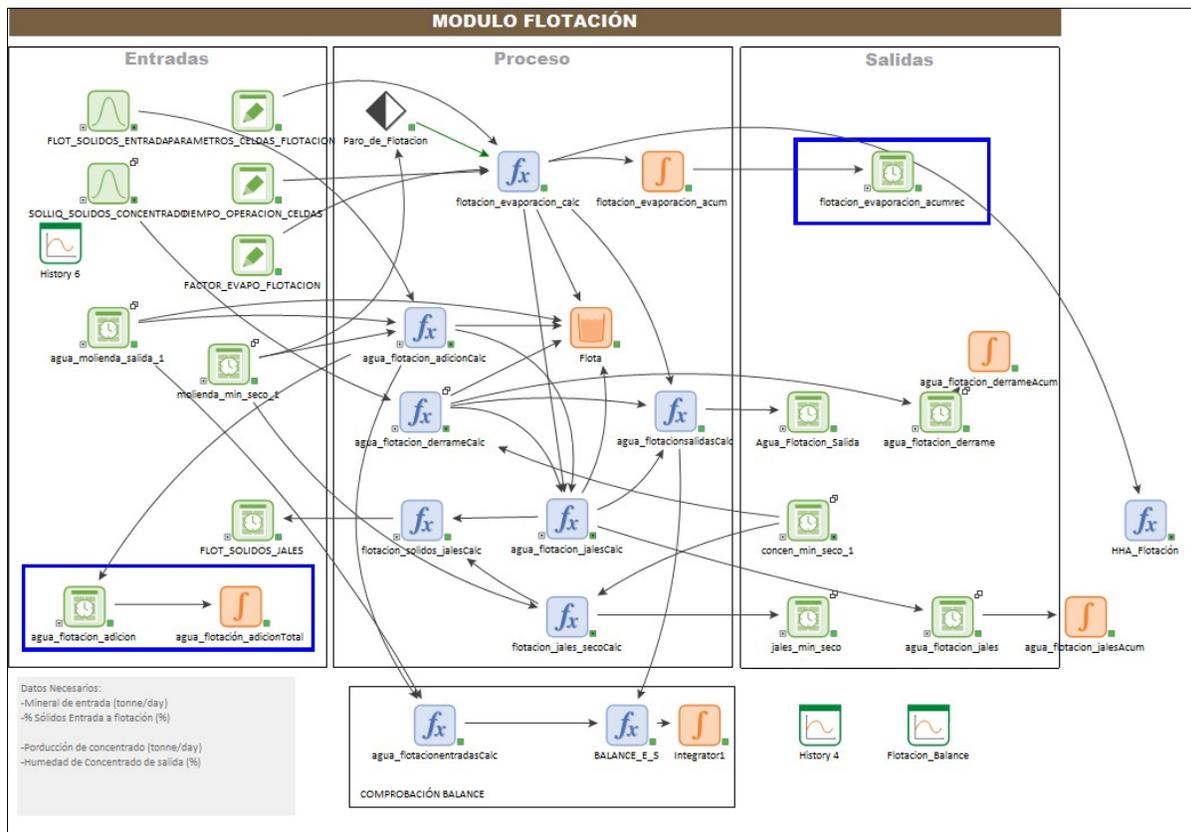


Ilustración 8. Módulo flotación

El módulo separación sólido líquido es el módulo más pequeño en cuanto a número de variables de entrada o salida ya que para este módulo se puede obtener los valores de diseño de los equipos y el tiempo de operación y posteriormente estimar la producción continua de concentrado. Si fuese necesario, es posible añadir otro sistema de filtrado siempre y cuando se tengan las capacidades operativas de los equipos y el tiempo de funcionamiento.

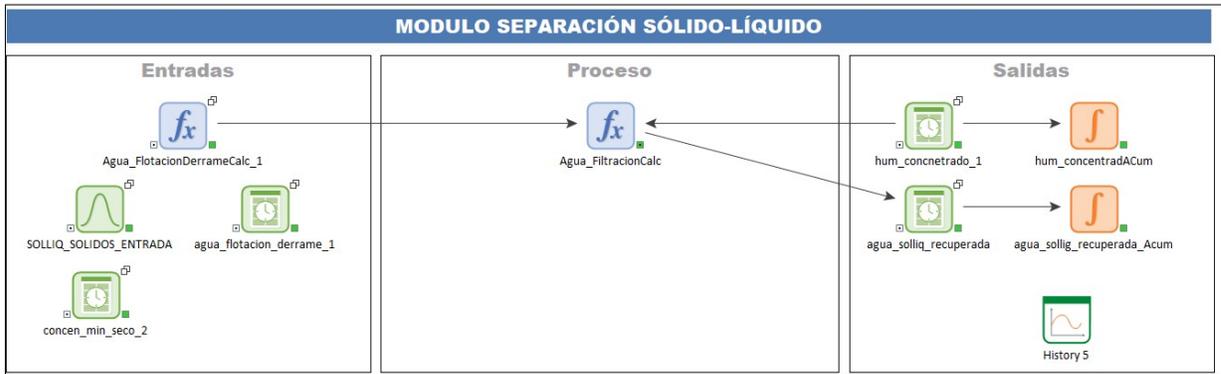


Ilustración 9. Módulo separación sólido-líquido

Para el modelo numérico no existe un módulo que contemple el concentrado, y la única razón de integrarlo en la herramienta fue con el fin de separar la información de la producción de concentrado y los cálculos del manejo de los recursos hídricos, es decir, es una forma de organizar la información necesaria para el cálculo de los flujos, pero conceptualmente no aporta a la cuantificación de la HH, ni representa una actividad por separado

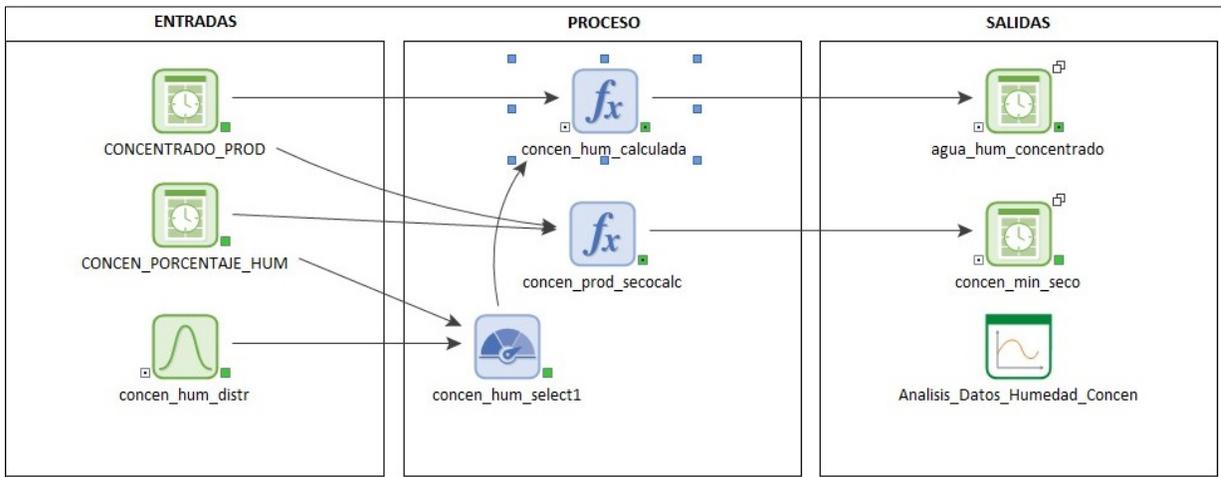


Ilustración 10. Manejo de la información relacionada al concentrado.



El módulo Presa de jales es el módulo esta diseñado para considerar los factores de evaporación de las distintas áreas, así como la zonificación de su superficie, sin embargo, si no se tuviera información acerca de la zonificación el módulo puede seguir operando, estableciéndolos valores generales para la superficie de evaporación que uno establezca, estime o mida de forma indirecta.

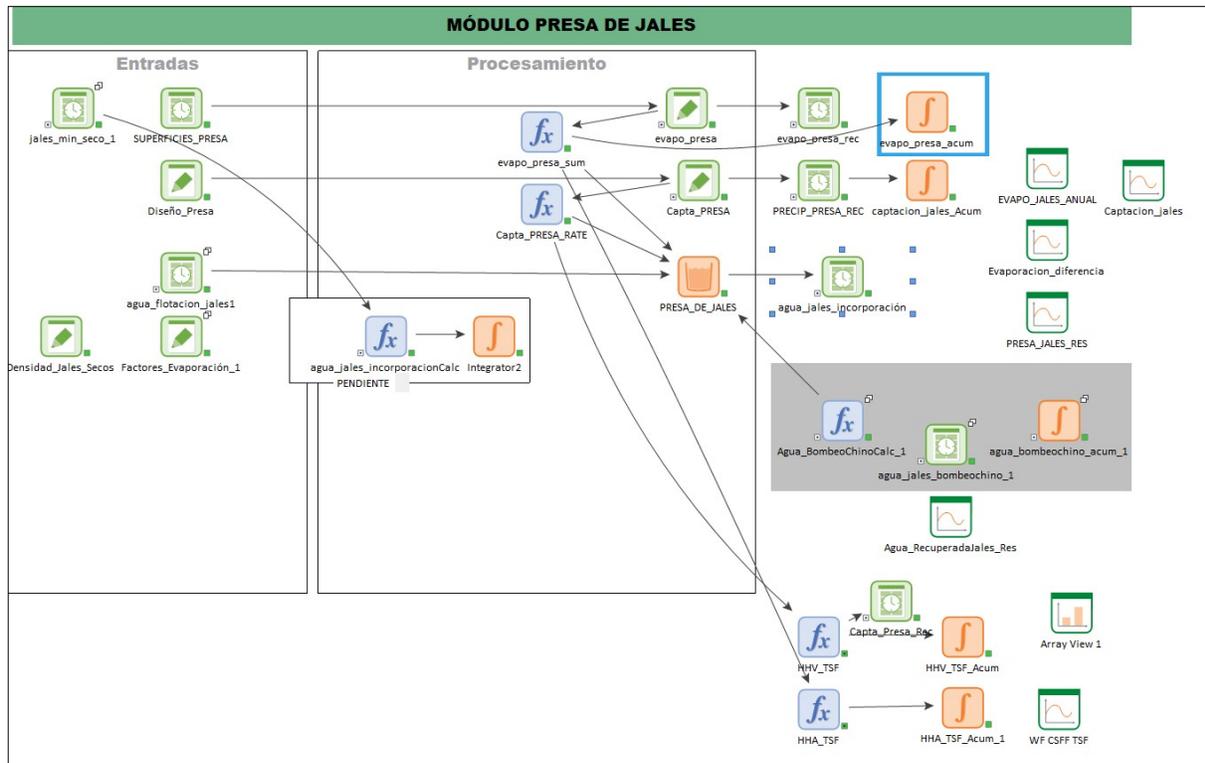


Ilustración 11. Módulo Presa de jales

Por último, se encuentra el módulo *Manejo de Agua* que permite distribuir el agua que se recupera a cualquier parte del proceso que lo demande. Es necesario que para que el módulo *Manejo de Agua* sea de útil, se debe de tener bien identificada la cantidad recuperada y el destino de esta. Ya que se puede dar el caso de que el agua recuperada no es cuantificada ni medida y por lo tanto no se tendría una noción real en términos de la HH la cantidad exacta que pudiera estar perdiéndose de cada componente de la HH.

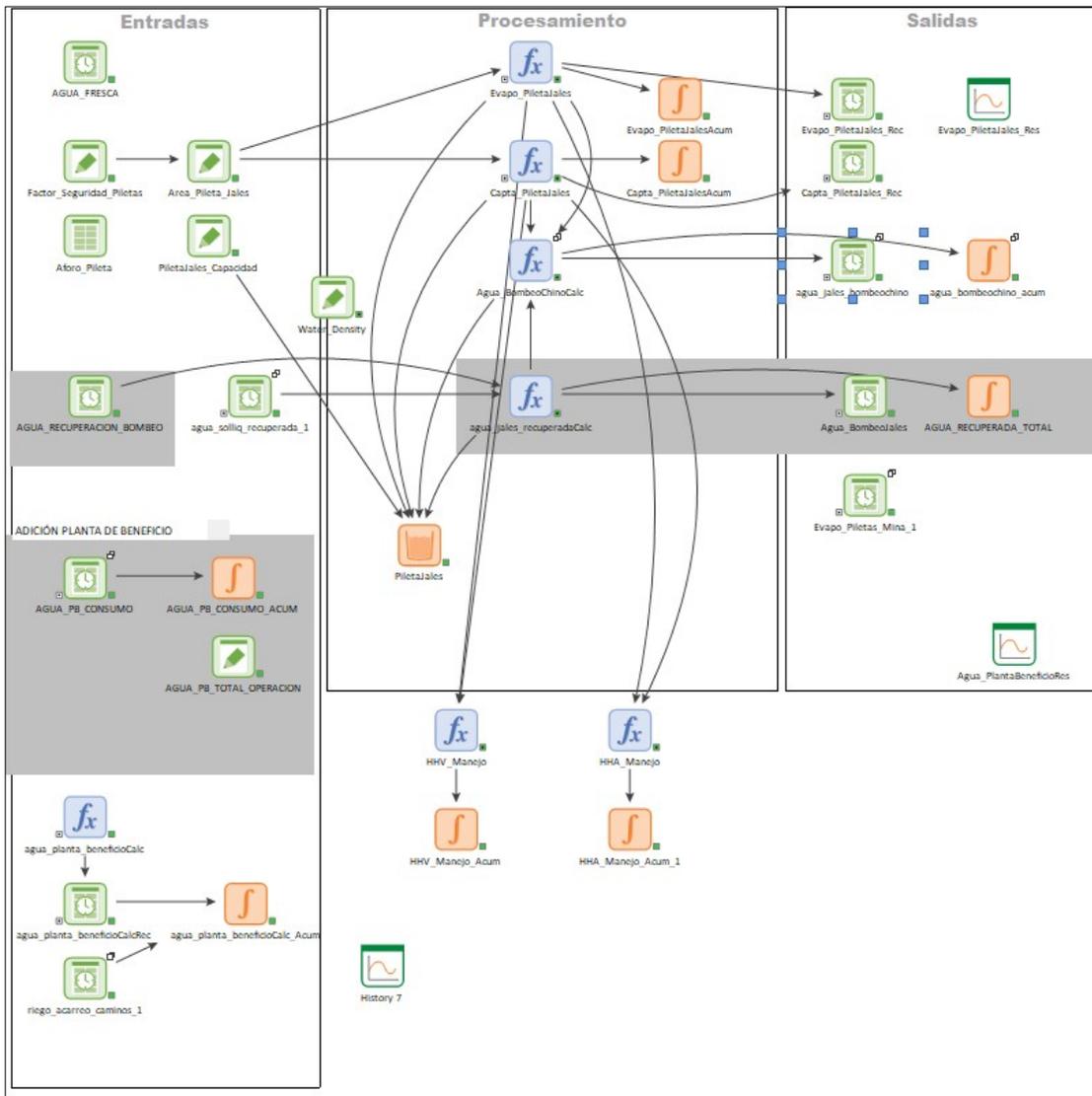


Ilustración 12. Módulo Manejo de Agua

