



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

**RENDIMIENTO DE NANOFILTRACIÓN PARA EL TRATAMIENTO DE
AGUAS DE CUBETAS DE TRANQUES DE RELAVES DE MINERÍA DE
COBRE EN CHILE**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL DE MINAS

JORGE AGUSTÍN SALVO MARÍN

PROFESORA GUÍA:
ANDREÍNA GARCÍA GONZÁLEZ

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
HUMBERTO ESTAY CUENCA
JACQUES VINCENT GEORGES WIERTZ

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por:
Advanced Mining Technology Center y Proyecto Sequía

SANTIAGO DE CHILE

2022

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL DE MINAS
POR: JORGE AGUSTÍN SALVO MARÍN
FECHA: 2022
PROF. GUÍA: ANDREÍNA GARCÍA GONZÁLEZ

Rendimiento de nanofiltración para el tratamiento de aguas de cubetas de Tranques de Relaves de Minería de Cobre en Chile

La creciente crisis hídrica ha obligado a la industria minera a repensar las rutas tradicionales del proceso, como por ejemplo, el uso de agua. Por la masividad y huella ambiental de la concentración de minerales sulfurados, este trabajo pone foco en una alternativa de gestión del recurso para dicha operación. El objetivo es evaluar un sistema de tratamiento de aguas mediante nanofiltración, mediante pruebas en una planta piloto, circulando agua recuperada de dos tranques de relaves de la empresa Codelco (Tranque Ovejería y Talabre) para alcanzar estándares de calidad de agua con fines de reuso, con foco en reuso agrícola. Para poder implementar el sistema, se hace necesario estudiar el proceso minero detrás de la formación y composición de relaves, relacionando sus factores determinantes y el impacto que tienen sobre la composición del agua. Estas, en general presentan problemas con la presencia de sulfatos, de arsénico, molibdeno y otros metales, por la formación de oxianiones en las aguas alcalinas a partir de minerales primarios y remanentes en el agua del proceso.

La metodología consiste, en primer lugar, de una amplia revisión bibliográfica en donde se identifican los factores relevantes en la composición de las aguas de relaves. Se cuentan con dos aguas de relaves como casos de estudio usados en las pruebas experimentales que pretenden evidenciar cómo interactúan los factores mencionados en ambos relaves en específico. Y en segundo lugar, efectuar pruebas en una planta piloto con dichas aguas bajo distintas condiciones de presión, evaluando los resultados en función de la Norma Chilena 1333.

Del análisis del estado del arte indicado, se concluye que el dominio de la actividad minera se concentra en el “Cinturón Volcánico del Pacífico” y es donde se produce la mayor cantidad de relaves, con la minería del cobre la principal responsable de ello. Las aguas de estos relaves contienen una gran cantidad de iones y oxianiones tales como As o Mo, así como gran concentración de sulfatos. En cuanto al rendimiento del proceso propuesto, NF, se concluye que el método es efectivo en cuanto a la eliminación de iones de las aguas, pero insuficiente para reuso agrícola, la eliminación de sulfatos en Ovejería y Talabre alcanza modestos resultados (60-70 % de rechazo y 90 %, respectivamente) y el arsénico en Talabre, si bien alcanza sobre el 95 % de rechazo, no logra bajar la concentración a la estipulada por la norma. El pH y la conductividad logran valores aceptables en Ovejería, pero en Talabre está en el límite la norma. Se sugiere complementar este proceso con otros sistemas tratamientos integrados que ayuden a la eliminación de estos iones conflictivos.

*Somos un nicho ecológico, seres vivos que generamos lenguaje y que podemos reflexionar
(...) El nicho ecológico hace posible vivir, implica un modo de vivir como ciudadanos en la
colaboración y es un acto de elección que sólo podemos hacer los humanos.*

-Humberto Maturana

Agradecimientos

Una gran memoria, conlleva grandes agradecimientos. Poder ordenar en mi cabeza todas las cosas y las personas que permitieron que el sueño de terminar mi carrera se volviera realidad, es difícil, hay personas que vivieron solo una parte del proceso, y otras que estuvieron del principio al final, pero finalmente, cada una forma parte de la perspectiva absoluta de los anhelos y ejecución de este ideal.

A mi mamá y mi papá, por su apoyo incondicional en todo momento, por su disposición, entrega, sacrificios e historia, que me inspiraron e inspiran día a día, porque mis triunfos son más de ustedes.

A la Paulita, la cual merece un párrafo aparte, por tan solo ser mi hermana, una bendición en mi vida, si existe alguien o algo que pone personas que guíen, acompañen o cuiden a otras en su vida, creo que te puso a ti, por estar en momentos difíciles, en momentos loables e incluso en los momentos que no hubiera querido, gracias por esperarme para egresar.

A Los Plomeros, Cabezas de Tele y el Chino por darme los momentos mas memorables y entretenidos de mi etapa universitaria, por enseñarme que se pueden imaginar cosas increíbles, que suceden cosas inimaginables y que somos capaces de todo. Al Vixó por ser compañero, amigo, pana, pareja de baile, pareja de rap, profesor, roommate, gymbro, hermano, colega y un incansable aventurero. Al carecaca, algo más que un juego, una definición, una filosofía, un pasatiempo y una forma de vivir, algo que no podría faltar, inclusive si faltaban las cartas, un trabajo que tiene la dedicación de un grupo increíble de personas que dejaron, como dice el Manual, su legado en el, y que no me canso de disfrutar.

A los cajafuerinos (wks inc) panas mineros quienes fueron mis mejores profesores y a quienes les esperan grandes futuros y grandes carreras, el mundo es de ustedes.

A los y las amigos/as del basquetbol, futbol, natación y todos los deportes que he hecho, por enseñarme el valor del trabajo en equipo, y el valor del compañerismo. A las personas con quienes compartí en cualquier aula o fuera de ella, con quienes abrí mi corazón y lograron sacarme una sonrisa, una carcajada y más, gracias por hacer más ameno este viaje.

A las chiquillas del lab que tuvieron que aguantar 2 meses de ruidos molestos, a Rodrigo, Hugo y Giovanni por su profesionalismo, a Andreína por incorporarme en esta investigación y ofrecerme esta oportunidad y por supuesto a Yesid por su necesaria e incondicional ayuda.

Y finalente, y no por eso menos cliché, gracias a mí, si se puso burro, si se pudo.

Tabla de Contenido

1. Introducción	1
1.1. Contexto y Motivación	1
1.2. Objetivos	3
1.2.1. Objetivo general	3
1.2.2. Objetivos específicos	3
1.3. Alcances	3
1.4. Estructura de la memoria	4
2. Marco Teórico	5
2.1. Contexto chileno de aguas en minería	5
2.2. Relaves	5
2.2.1. Definición de relave	6
2.2.2. Depósito de relaves (TSF) y tipos	8
2.3. Composición de los relaves	10
2.3.1. Tipos de yacimientos	10
2.4. Química de los fluidos de relaves	12
2.4.1. Tipo de flotación	12
2.4.2. Reactivos de floación	13
2.4.2.1. Espumante	13
2.4.2.2. Colector	13
2.4.2.3. Modificadores	14
2.4.3. Reacciones en depósitos	16
2.4.3.1. Pirita	17
2.4.3.2. Pirrotita	17
2.4.3.3. Arsenopirita (FeAsS)	18
2.4.3.4. Fases secundarias	18
2.5. Aguas de relaves	19
2.6. Recuperación de agua en tranques de relaves	21
2.7. Tratamiento de aguas residuales de minería	23
2.7.1. Técnicas de membrana	24
2.7.2. Nanofiltración	25
2.7.3. Fouling o ensuciamiento en membranas porosas	27
2.8. Calidad de aguas para diferentes usos	29
2.8.1. Decreto Supremo 90 (2000): Descarga de riles a aguas marinas y continentales superficiales	29
2.8.2. Decreto Supremo 80 (2006): Emisión de molibdeno y sulfatos desde Estero Carén	31

2.8.3.	Norma Chilena 1333: Para riego agrícola	31
3.	Metodología Experimental	33
3.1.	Pruebas de desempeño del sistema de tratamiento propuesto: Nanofiltración	34
3.1.1.	Materiales y Planta Piloto	34
3.1.2.	Metodología de pruebas de desempeño de nanofiltración	37
3.1.3.	Fuljo de Permeado	38
3.1.4.	Permeabilidad Hidráulica	39
3.1.5.	Norma ASTM para Nanofiltración	39
3.1.6.	Presión Osmótica	40
4.	Resultados y Discusión	41
4.1.	Depósitos de relaves en Chile	46
4.2.	Casos de Estudio	52
4.2.1.	Composición de aguas de relaves en estudio	53
4.2.2.	Tranque de Relaves Ovejería	55
4.2.3.	Embalse de Relaves Talabre	61
4.2.3.1.	Faena División Chuquicamata	63
4.2.3.2.	Faena División Radomiro Tomic	65
4.2.3.3.	Faena División Ministro Hales	67
4.2.3.4.	Sistema de aguas del tranque	68
4.3.	Elementos comunes en aguas de relaves	71
4.3.1.	Sulfatos en aguas de relaves	71
4.3.2.	Arsénico en aguas de relaves	73
4.3.3.	Molibdeno en aguas de relaves	74
4.4.	Resumen composición aguas con norma chilena	77
4.5.	Resultados de las pruebas en el tiempo	78
4.5.1.	Resultados: Estabilización de Flujos y Presión Osmótica	78
4.5.1.1.	Agua relave Ovejería a 300 psi por 3.25 horas	78
4.5.1.2.	Agua relave Ovejería a 400 psi por 3.25 horas	78
4.5.1.3.	Agua relave Talabre a 300 psi por 3.25 horas	79
4.5.1.4.	Agua relave Talabre a 400 psi por 3.25 horas	79
4.5.1.5.	Agua relave Talabre a 400 psi por 5 horas	80
4.5.2.	Resultados: Conductividad	82
4.5.2.1.	Agua relave Ovejería a 300 psi por 3.25 horas	82
4.5.2.2.	Agua relave Ovejería a 400 psi por 3.25 horas	82
4.5.2.3.	Agua relave Talabre a 300 psi por 3.25 horas	83
4.5.2.4.	Agua relave Talabre a 400 psi por 3.25 horas	83
4.5.2.5.	Agua relave Talabre a 400 psi por 5 horas	84
4.5.3.	Resultados: Temperatura	87
4.5.3.1.	Agua relave Ovejería a 300 y 400 psi por 3.25 horas	88
4.5.3.2.	Agua relave Talabre a 300 y 400 psi por 3.25 y 5 horas	88
4.5.4.	Resultados: pH y ORP	88
4.6.	Resultados calidad de agua	90
5.	Conclusiones	91
	Bibliografía	94

Anexos	102
A. Especiación de aguas de relaves	102
A.1. Ovejería Límite Bajo	102
A.2. Ovejería Límite Alto	104
A.3. Especiación Ovejería Límite Alto y Bajo	105
A.4. Talabre Límite Bajo	106
A.5. Talabre Límite Alto	107
A.6. Especiación Talabre Límite Alto y Bajo	108
B. Metodología de preparación de disoluciones	109
C. Equipamiento de Planta Piloto de Nanofiltración	112
C.1. Bomba Hydra-Cell M03-S	112
C.2. Conductivímetro de mesa EC/TDS/TEMP	112
C.3. pH-metro	113
D. Protocolos de uso de planta piloto	114
E. Pruebas de calibración	116
F. Premeabilidad Hidráulica	117
F.1. Celda CF016	117
G. Elementos en trazas en relaves	118
G.1. Tranque Ovejería	118
H. Resultados parámetros operativos	119
I. Errores en las pruebas	119

Índice de Tablas

2.1.	Factores controladores de elementos químicos en aguas de relaves. Elementos con *: factor no comprobado totalmente (Ortega, 2020).	19
2.2.	Clasificación de membranas (Ayoob et al., 2008).	24
2.3.	Tabla resumen de membranas (Ayoob et al., 2008).	25
2.4.	Especificaciones técnicas de membranas comerciales de nanofiltración (Mohammad et al., 2015).	27
2.5.	Límites máximos permitidos de contaminantes para la descarga de residuos líquidos a cuerpos de aguas fluviales (Biblioteca del Congreso Nacional)	30
2.6.	Límites Máximos Permitidos para Descargas de Residuos Líquidos desde Tranques de Relaves al Estero Carén (Biblioteca del Congreso Nacional)	31
2.7.	Concentraciones máximas de elementos en agua para riego (NCh 1333, 1987).	32
4.1.	Principales productores (Toneladas) de la minería en el mundo en el año 2017 (Reichl & Schatz, 2019)	41
4.2.	Países líderes de reservas mineras (2012) (Datasur, GFMS, es.statista)	41
4.3.	Tabla de cuantificación de depósitos de relave (World Tailing Portafolio, 2020).	42
4.4.	Compilado mundial de relaves (WMTF, 2020).	43
4.5.	Depósitos de relaves chilenos (Sernageomin, 2019).	46
4.6.	Depósitos con mayores dimensiones (Sernageomin, 2019).	46
4.7.	Contenido de azufre promedio en relaves por tipo de mina (Sernageomin, 2020)	49
4.8.	Concentraciones de elementos en yacimientos de cobre (Sernageomin, 2020).	50
4.9.	Resultados de análisis de aniones en aguas de relave.	53
4.10.	Resultados de análisis de cationes trazas en aguas de relave.	54
4.11.	Composición mineralógica de la fracción sólida de relaves descargados en Tranque Ovejería (Anteproyecto AMTC, 2021).	56
4.12.	Litología del sector Río Blanco de la División Andina (Estudio de Prefactibilidad de Procesamiento de Minerales Sulfurados de Baja Ley, 2008).	58
4.13.	Litología del sector Don Luis de la División Andina (Estudio de Prefactibilidad de Procesamiento de Minerales Sulfurados de Baja Ley, 2008).	58
4.14.	Litología del sector Sur-Sur de la División Andina (Estudio de Prefactibilidad de Procesamiento de Minerales Sulfurados de Baja Ley, 2008).	59
4.15.	Reactivos de flotación colectiva Cu-Mo de la Planta Concentradora Codelco División Andina (Manríquez, 2019).	59
4.16.	Reactivos de flotación selectiva de Mo de la Planta de Molibdeno y Filtrado de Cobre Codelco División Andina (Manríquez, 2019).	60
4.17.	Minerales de sulfuro y ganga presentes en yacimiento Chuquicamata (Aburto, 2017).	63
4.18.	Condiciones Operacionales Flotación Estándar ST-1 Chuquicamata (Aburto, 2017)	64
4.19.	Reactivos de Flotación Estándar Chuquicamata (Aburto, 2017)	64

4.20.	Concentraciones de elementos en relaves frescos (Ortega, 2020)	65
4.21.	Reactivos en la Flotación de Planta Radomiro Tomic	66
4.22.	Parámetros Operacionales de Flotación Radomiro Tomic	66
4.23.	Parámetros operacionales de Flotación de Ministro Hales (Codelco, 2013)	67
4.24.	Resultados de análisis ICP a las aguas de relave Ovejería y Talabre, comparadas con la Norma Chilena (1333)	77
4.25.	Tabla de conductividades y rechazo (%) de pruebas a 3.25 horas en aguas de relave Ovejería	84
4.26.	Tabla de conductividades y rechazo (%) de pruebas a 5 horas en aguas de relave Ovejería	84
4.27.	Tabla de conductividades y rechazo (%) de pruebas a 3.25 horas en aguas de relave Talabre	85
4.28.	Tabla de conductividades y rechazo (%) de pruebas a 5 horas en aguas de relave Talabre	85
4.29.	Valores de ORP y pH en aguas de rechazo	89
4.30.	Tabla de calidad de pruebas a 3.25 horas en aguas de relave Ovejería	90
4.31.	Tabla de calidad de pruebas a 3.25 horas en aguas de relave Talabre	90
A.1.	Especiación de Ovejería Límite Bajo exportada de <i>Visual Media</i>	102
A.2.	Especiación de Ovejería Límite Alto exportada de <i>Visual Media</i>	104
A.3.	Especiación de Talabre Límite Alto exportada de <i>Visual Media</i>	107
A.4.	Especiación de Talabre Límite Alto exportada de <i>Visual Media</i>	108
E.1.	Condiciones de operación de pruebas de calibración	116
E.2.	Tabla del rechazo porcentual en función del tiempo de las pruebas de calibración	116
F.1.	Resultados de Permeabilidad Hidráulica	117
F.2.	Promedios de Permeabilidad Hidráulica	117
H.1.	Tabla operativa de resultados para pruebas a 3.25 horas en aguas de relave Ovejería	119
H.2.	Tabla operativa de resultados para pruebas a 3.25 horas en aguas de relave Talabre	119

Índice de Ilustraciones

2.1.	Co-ocurrencia de palabras en compilado de artículos mineros (Ojeda-Pereira y Campos-Medina, 2021)	6
2.2.	Flowsheet del proceso.	7
2.3.	Diagrama de celda flotación, los relaves corresponden a lo denominado como colas en el diagrama (Correa, 2019).	7
2.4.	Tranque de relave convencional (Elaboración propia).	8
2.5.	Hidrciclón (Valenzuela, 2016).	9
2.6.	Almacenamiento de relaves (Franks et al., 2021).	10
2.7.	Modelo de Lowell y Guilbert (1970) de un pórfido cuprífero, con zonas y mineralización (Valencia et al., 2006).	11
2.8.	Zona de trabajo colectores catiónicos (Correa, 2019).	14
2.9.	Modelo estratificado esquemático propuesto por Novoselov & Kelm (2015).	20
2.10.	Diagrama de flujo de la flotación convencional incluyendo recuperaciones de agua (Ihle & Kratch, 2018).	21
2.11.	Recuperación de agua vs C_p del underflow (Ihle & Kratch, 2018).	22
2.12.	Recuperación de agua vs Humedad del underflow (Ihle & Kratch, 2018).	22
2.13.	Esquema de fouling o ensuciamiento (Jadhav et al., 2016).	28
3.1.	Diagrama planta piloto (Elaboración Propia)	35
3.2.	Fotografía de la planta piloto.	35
3.3.	Diagrama: Corte transversal de módulo de membrana, sistema de filtración de flujo cruzado (Elaboración Propia).	36
3.4.	Celda CF042SS (STERLITECH).	37
4.1.	Mapa de instalaciones de relaves activas por región (grida.no).	42
4.2.	Mapa del número de relaves documentados en el mundo. En rojo, países con producción mineral importante pero sin base de datos.	44
4.3.	Minas de cobre más productivas del mundo (S&P Global, Market Intelligence, 2017).	45
4.4.	Distribución global de grandes depósitos de pórfido Cu-Au (Sun et al., 2010).	45
4.5.	Depósitos por región (Ojeda & Campos-Medina, 2021)	47
4.6.	Mapa cuadrantes (modificado de Campos-Medina, 2021).	48
4.7.	Composición mineralógica de relaves en Chile, subdivididos por recurso extraído (Sernageomin, 2020).	49
4.8.	Composición química de las aguas de relave del tranque Ovejería (Codelco) y acuíferos superficiales (Río Loa) en el entorno del embalse Talabre (División Ministro Hales de Codelco) con las normas chilenas de aguas para diferentes usos (NCh1333) y aguas para descarga de residuos líquidos a aguas superficiales marinas y continentales (DS90).	52
4.9.	Esquema de Koppen: Climas de Chile (Inzunza, 2019).	53

4.10.	Vista satelital de Tranque de Relaves Ovejería (relaves.org).	55
4.11.	Composición mineralógica de Tranque de Relaves Ovejería (Sernageomin, 2020).	56
4.12.	Composición de elementos con una concentración >100 ppm del Tranque de Relaves Ovejería (Sernageomin, 2020).	57
4.13.	Vista del yacimiento Río Blanco - Los Bronces y sus sectores (Briones, 2012). .	57
4.14.	Tranque de Relaves Talabre, Referencia Geográfica (Dirección de Aguas y Relaves Codelco, 2019).	61
4.15.	Composición mineralógica del Tranque de Relaves Talabre (Sernageomin, 2020).	62
4.16.	Composición de elementos con una concentración >100 ppm del Tranque de Relaves Talabre (Sernageomin, 2020).	63
4.17.	Mapa de proceso de Tranque de Relaves Talabre (Dirección de Aguas y Relaves Codelco, 2019).	68
4.18.	Arsénico en aguas naturales de ríos del norte de Chile (Herrera et al., 2020). .	70
4.19.	Diagrama de Pourbaix para un sistema S-O-H. $\sum S = 10^{-10}$, 298.15K, 10^5 Pa (Takeno, 2005)	72
4.20.	Diagrama de Pourbaix del sistema As-O-H. $\sum As = 10^{-10}$, 298.15K, 10^5 Pa (Takeno, 2005).	73
4.21.	Diagrama de Pourbaix del sistema Mo-O-H. $\sum Mo = 10^{-10}$, 298.15K, 10^5 Pa (Takeno, 2005).	75
4.22.	Diagrama de relaciones entre los minerales que contienen Mo y la formación de estos (Frascoli, 2018).	76
4.23.	Caudales de permeado y presión osmótica en el tiempo para las pruebas con agua de Ovejería a 300 psi.	78
4.24.	Caudales de permeado y presión osmótica en el tiempo para las pruebas con agua de Ovejería a 400 psi.	78
4.25.	Caudales de permeado y presión osmótica en el tiempo para las pruebas con agua de Talabre a 300 psi.	79
4.26.	Caudales de permeado y presión osmótica en el tiempo para las pruebas con agua de Talabre a 400 psi a 3.25 horas.	79
4.27.	Caudales de permeado y presión osmótica en el tiempo para las pruebas con agua de Talabre a 400 psi a 5 horas.	80
4.28.	Conductividad en el tiempo para las pruebas con agua de Ovejería a 300 psi. .	82
4.29.	Conductividad en el tiempo para las pruebas con agua de Ovejería a 400 psi. .	82
4.30.	Conductividad en el tiempo para las pruebas con agua de Talabre a 300. . . .	83
4.31.	Conductividad en el tiempo para las pruebas con agua de Talabre a 400 psi a 3.25 horas.	83
4.32.	Conductividad en el tiempo para las pruebas con agua de Talabre a 400 psi a 5 horas.	84
4.33.	Porcentaje de rechazo.	86
4.34.	Temperatura en el tiempo para las pruebas con agua de Ovejería.	88
4.35.	Temperatura en el tiempo para las pruebas con agua de Talabre.	88
A.1.	Inputs usados en <i>Visual Media</i> para cálculos de Ovejería Límite Bajo	103
A.2.	Inputs usados en iteración <i>Visual Media</i> para cálculos de Ovejería Límite Bajo	103
A.3.	Inputs usados en <i>Visual Media</i> para cálculos de Ovejería Límite Alto	104
A.4.	Inputs usados en iteración <i>Visual Media</i> para cálculos de Ovejería Límite Alto	105
A.5.	Gráfica de la composición porcentual de los iones metálicos disueltos en el agua de relave Ovejería.	105

A.6.	Gráfica de la composición porcentual de los aniones disueltos en el agua de relaves Ovejería.	106
A.7.	Inputs usados en <i>Visual Media</i> para cálculos de Talabre Límite Alto	106
A.8.	Inputs usados en <i>Visual Media</i> para cálculos de Talabre Límite Alto	107
A.9.	Grafica de barras de la composición porcentual de los iones metálicos disueltos en el “tailing liquid” Talabre en las condiciones de límite de concentración bajo y alto.	108
A.10.	Grafica de barras de la composición porcentual de los aniones disueltos en el “tailing liquid” Talabre en las condiciones de límite de concentración bajo y alto.	109
C.1.	Conductímetro de mesa EC/TDS/TEMP (Oakton Instruments).	112
C.2.	Medidor Digital multiparámetro: Phmetro, TDS, EC y Temperatura para Calidad De Agua.	113
F.1.	Celda CF016 (STERLITECH).	117
G.1.	Composición de elementos con una concentración <100 ppm (trazas) del Tranque de Relaves Ovejería (Sernageomin, 2020).	118
G.2.	Composición de elementos con una concentración <100 ppm (trazas) del Tranque de Relaves Talabre (Sernageomin, 2020).	118

Capítulo 1

Introducción

1.1. Contexto y Motivación

La Organización de Naciones Unidas (2021) catalogó el contexto hídrico actual, a nivel global, como Crisis Hídrica. En Chile, según la organización, las zonas centro norte y centro sur del país presentan déficits de precipitaciones de hasta un 80% en relación al promedio histórico y se proyectan mínimos históricos en el caudal de muchos ríos, siendo las principales causas asociadas a efectos del cambio climático, actividades productivas y extractivas intensas, falta de infraestructura adecuada, un marco legal deficiente, dispersión institucional, disponibilidad y uso limitado de datos para la toma de decisiones y una **gestión no integrada de los recursos hídricos**. Lo anterior se relaciona, por ejemplo, en que en muchos sectores mineros existe una competencia por dicho recurso y, con los inminentes cambios en materia legislativa, esta se convierte en una de las mayores problemáticas que enfrenta la industria minera en el corto y mediano plazo.

En términos económicos, la minería resalta como el sector más importante en Chile, según cifras del Banco Central (2018), entre 2008 - 2017 representó el 11,9% del PIB como promedio nacional, siendo el agua un recurso crítico para esta actividad. La Dirección General de Aguas (2017) sitúa el consumo de agua de la minería en un 3,9% del total nacional, el sector agrícola es el principal consumidor con un 72%, en segundo lugar el agua potable (11,9%), el sector industrial en tercer lugar (6,8%) y la minería en cuarto (le sigue el sector pecuario y eléctrico). El consumo total de agua por la minería en Chile, durante el 2020, asciende a 11,5 m³/seg, de los cuales, el 79,2% es demandado por la gran minería del cobre, luego, la minería de otros metales y no metálica con un 9,0%, la mediana minería del cobre con un 8,3%, y finalmente, las fundiciones y refinerías con un 3,6% del recurso (SONAMI, 2021).

La operación minera que conlleva un mayor consumo porcentual de agua es el proceso de concentración del mineral, en efecto, el consumo de agua por área de proceso minero con su respectivo porcentaje se enumera a continuación:

1. Área Planta Concentradora (59 %): procesamiento de minerales, conminución del mineral, flotación, clasificación y espesamiento.
2. Área Planta Hidrometalurgia (11 %): procesos de lixiviación en pilas, extracción por solventes y electro obtención. Consumo de agua como consecuencia de la evaporación de las pilas de lixiviación y agua con ácido sulfúrico en la superficie de las pilas.
3. Área mina (4 %): incluye la mina y el transporte, donde el agua es utilizada para la supresión de polvo en caminos, y en la extracción y bombeo desde labores subterráneas.
4. Fundición y Refinería (3 %): concentrado seco se somete a un proceso de pirometalurgia, donde el proceso de refinación se lleva a cabo en las celdas electrolíticas en una solución de ácido sulfúrico.
5. Aguas adquiridas a terceros (3 %): flujos de agua obtenida mediante contratos con terceros.
6. Otros (19 %): actividades con volúmenes de consumo de agua poco significativos frente al total. Principalmente para abastecer los servicios (bebida, cocción, lavado, riego, baños en los campamentos y otros consumos menores).

Considerando que la gran minería del cobre avanza hacia yacimientos más profundos y sulfurados, por el agotamiento de óxidos, el tratamiento de mineral por flotación aumenta y por consiguiente el consumo de agua. Si bien, en este proceso hay una importante recuperación de agua (alrededor del 70 % del agua es recirculada), la mayor parte corresponde a la recuperada solo de espesadores, la recuperación de agua desde los depósitos de relaves se considera secundaria, sin embargo, en ellos se pierde mucha agua, ya sea atrapada en la cubeta o muro debido a la saturación de los relaves, o debido a la evaporación en la playa activa y laguna de aguas claras.

La recuperación desde el tranque no siempre es viable por la cantidad, distancia y energía de bombeo necesaria para recircularla a la planta, que la hace una operación no rentable, o bien, porque las características químicas del agua recuperada no son óptimas para la flotación. Por ello, a lo largo de los años surgieron variadas soluciones que integran las necesidades de las comunidades y de las actividades económicas en la zona, entre ellas, implementar un tratamiento de las aguas claras para riego de plantaciones agrícolas o consumo ganadero, sin embargo, el desafío ha sido idear un proceso que sea económico y logre una calidad del agua que no signifique un perjuicio en el ecosistema donde sea liberada.

La presente memoria se desarrolla bajo el proyecto Programa Fondo de Investigación Estratégica en Sequía 2021, ANID, FSEQ210023 "Technology and advanced modelling for increased water recovery and remediation in tailing storage facilities for sustainable reuse".

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Evaluar el desempeño de membranas de nanofiltración en el tratamiento de aguas claras de relave recuperadas desde tranques de relaves activos Ovejería (Codelco Andina) y Talabre (Codelco Chuquicamata), para su posible reuso, enfocado en el riego agrícola.

1.2.2. Objetivos específicos

1. Estudiar el proceso minero detrás de la formación y composición de relaves, relacionando sus factores determinantes y el impacto que tienen sobre la composición del agua, mediante una revisión de Divisiones Andina, Chuquicamata, Ministro Hales y Radomiro Tomic de Codelco.
2. Caracterizar fisicoquímicamente (pH y conductividad) y químicamente (concentraciones elementales) las aguas de relaves de dos casos de estudio: Tranque de Relaves Ovejería (Codelco Andina) y Talabre (Codelco Chuquicamata), para entender su posterior comportamiento en un sistema de membranas.
3. Evaluar el desempeño, bajo diferentes condiciones de operación, de membranas de nanofiltración industrial en una planta piloto, usando aguas claras de los Tranques de Relaves Ovejería (Codelco Andina) y Talabre (Codelco Chuquicamata) para su reuso, enfocado en el riego agrícola.

1.3. Alcances

- El estudio de los relaves realizado en este trabajo se centra en los pasivos producidos mediante el proceso de flotación, dejando fuera otros procesos de separación de mena - ganga que producen residuos o colas consideradas relaves en la literatura.
- Se medirá el desempeño de una membrana comercial de nanofiltración variando la presión de operación del sistema y la procedencia del agua de relaves. No se estudia el efecto de la composición de la membrana ni se evaluará mejoras en la tecnología.
- Los elementos presentes en las aguas se comparan con la Norma Chilena 1333, dado que se enfoca en el riego agrícola, analizando sólo sulfatos, cloruros y arsénico en las muestras de permeado y rechazo, sin analizar los otros parámetros de la norma dadas las capacidades técnicas y tiempos de análisis de los laboratorios.
- No se realiza un modelamiento matemático de los resultados en el tiempo y la conclusión de estos se enfoca en el cumplimiento, o no, de la norma en la muestra acumulada final.

1.4. Estructura de la memoria

El presente trabajo se introduce en el t3pico de sustentabilidad en miner3a, en particular del desaf3o a nivel macro del uso de agua. Se llevan a cabo pruebas experimentales de membrana en el Laboratorio de Sustentabilidad del Departamento de Ingenier3a Civil de Minas de la Facultad de Ciencias F3sicas y Matem3ticas de la Universidad de Chile, a cargo de la profesora y Ph.D. Andre3na Garc3a Gonz3lez, usando una planta piloto de Osmosis Inversa, bajo la supervisi3n del PhD Hugo Giraldo, en conjunto con Ph.D Yesid Tapiero, entre los meses de marzo, abril, mayo y junio de 2022.

El documento est3 organizado en seis secciones:

- El Cap3tulo 1 expone los objetivos, alcances y estructura del trabajo realizado.
- El Cap3tulo 2; expone una Revisi3n Bibliogr3fica, en ella, se contextualiza el panorama que motiva el presente trabajo, mencionando aspectos relacionados con el consumo de agua en miner3a, oportunidades de recuperaci3n, tratamiento y par3metros importantes de las membranas. En esta secci3n se presentan los factores y procesos relacionados a la composici3n de los relaves.
- El Cap3tulo 3, Metodolog3a; enumera las actividades experimentales realizadas en la planta piloto de membranas y la metodolog3a de an3lisis usada.
- El Cap3tulo 4, Resultados y Discusi3n; se expone la data preexistente respecto a los relaves en el mundo y caracter3sticas fundamentales de los casos de estudio, los resultados de las pruebas realizadas, seccionado por presi3n, procedencia del relave y tiempo total de la prueba, y un an3lisis de dichas pruebas, d3ndole sentido f3sico a los resultados.
- Y el Cap3tulo 5, Conclusi3n; resume la contribuci3n del presente trabajo en la industria minera y que futuros pasos.

Capítulo 2

Marco Teórico

2.1. Contexto chileno de aguas en minería

La minería se abastece de agua principalmente mediante tres fuentes (Cochilco, 2020):

1. Agua continental: Cuerpos de agua en el interior del continente y alejados de las zonas costeras, agua extraída de fuentes subterráneas, la extraída de fuentes superficiales, y finalmente el agua abastecida de terceros.
2. Agua de origen oceánico: Cuerpos de agua provenientes del mar con un alto contenido salobre, siendo utilizada directamente luego de su extracción o pasando previamente por un proceso de tratamiento desalinizador, esta fuente ha sentido un exponencial aumento en los últimos años (SONAMI, 2016).
3. Aguas recirculadas del proceso minero: Flujos reinyectados al sistema desde el proceso mismo, aproximadamente el 70 % del agua que se utiliza en el procesamiento de minerales corresponde a recirculación (Sonami, 2016).

Según proyecciones de Cochilco, la variación del consumo de agua respecto a la producción mineral no es lineal, dado que por la tendencia al agotamiento de los yacimientos (leyes más bajas) se requerirá un mayor procesamiento de mineral para obtener la misma cantidad de cobre fino, traducido en mayor consumo de agua (Cochilco, 2022). Estimaciones basadas en proyecciones de leyes futuras y en proyectos nuevos en desarrollo, calculan un aumento sostenido en el consumo de agua por concentración y una baja sostenida en hidrometalurgia.

2.2. Relaves

En el estudio bibliográfico de Ojeda-Pereira y Campos-Medina (2021), se estudian las tendencias en los tópicos de artículos relacionados a minería y la co-ocurrencia de palabras clave en estos. En dicho estudio **relaves mineros**, minería y metales pesados, constituyen el núcleo de la red y son también las palabras más repetidas (Figura 2.1), lo cual evidencia la creciente preocupación de la industria y la academia en el estudio de los relaves.

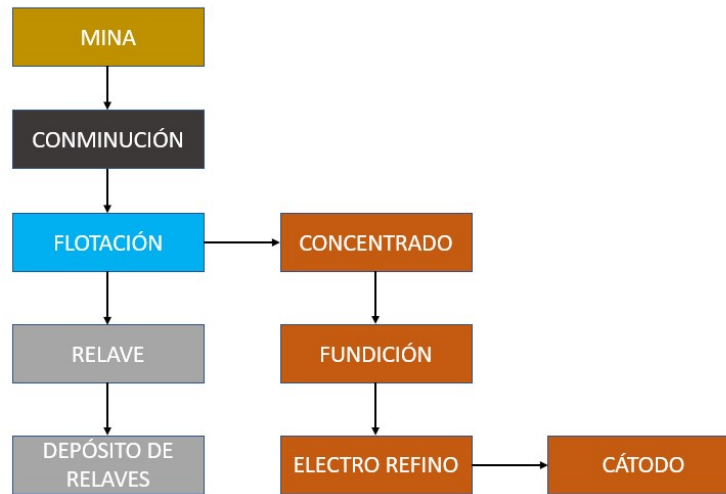


Figura 2.2: Flowsheet del proceso.

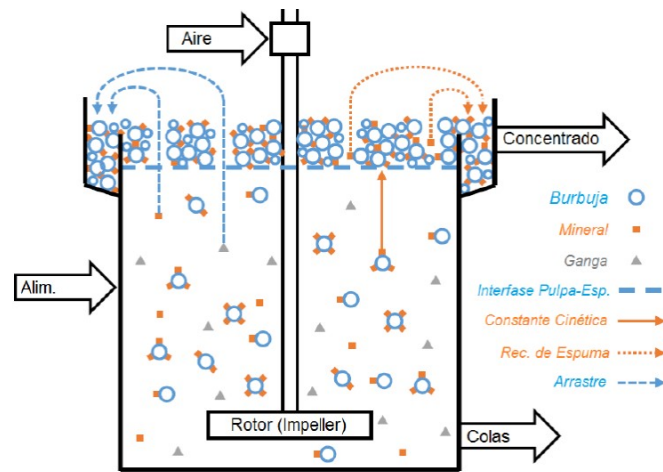


Figura 2.3: Diagrama de celda flotación, los relaves corresponden a lo denominado como colas en el diagrama (Correa, 2019).

Numerosos estudios bibliográficos señalan que el volumen de relaves generados en una operación minera es de alrededor del 95-99 % del mineral total procesado por la planta (Adiansyah et al., 2015 y Araya et al., 2020), cifra que va al alza por la disminución de leyes. Por ejemplo, en Australia, la ley promedio de Cu fue de 10 % en 1885 pero cayó al 1 % en 2005, en Canadá la ley promedio de Ni fue de 5 % en 1885 y cayó a 1,5 % en 2005, en cuanto al oro entre 1830 y 1900, fue de alrededor de 20 g/t, mostrando una evidente tendencia que indica que la ley podría caer a 2 g/t para el año 2050 (Kossoff et al., 2014).

2.2.2. Depósito de relaves (TSF) y tipos

En términos físicos, los depósitos de relaves o "*Tailing Storage Facilities* (TSF)" son estructuras diseñadas para contener relaves provenientes desde la planta concentradora. Existen distintos tipos de depósitos, dependiendo del lugar donde se depositan o el porcentaje de agua en ellos, pero los más comunes son los tranques de relaves y los embalses de relaves. Los tranques son el tipo de depósitos más común en Chile y se diferencian de los embalses en que estos últimos están ubicados en depresiones topográficas sin salida de agua o en valles y no separa la arena de los finos, como si lo hace el tranque.

Las secciones del tranque de relaves convencional se muestran en la Figura 2.4 y constan de (Cortés, 2019):

1. Spigots: Cañerías de transporte de la pulpa de relave desde la planta concentradora hasta el depósito.
2. Muro: Se compone partir de la fracción gruesa de este.
3. Cubeta: Zona donde se deposita todo el material y se divide en dos, la zona próxima al muro donde se encuentra el material más grueso (arenas) y la más alejada donde se encuentra el material más fino (lamas), lo cual ocurre por segregación en la sedimentación que precipita el material grueso más cerca del punto de descarga.
4. Laguna de aguas claras: Agua liberada luego del proceso de sedimentación de la fracción sólida del relave.
5. Mecanismos de recuperación de aguas: Existen dos mecanismos principales, por un lado, el sistema de balsas consiste en balsas que bombean el agua, este sistema es dinámico, pero requiere una cota constante de profundidad de la laguna. Y el sistema de torre, que realiza el bombeo desde la superficie, permitiendo mayor recuperación, pero necesita que la laguna no sufra mayores desplazamientos y puede quedar tapado bajo las lamas depositadas.

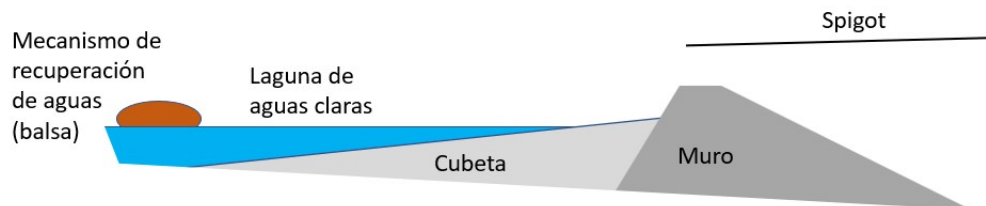


Figura 2.4: Tranque de relave convencional (Elaboración propia).

En general, existe una fracción de relave espesado que se separa y se deposita inmediatamente en la cubeta del tranque, el resto, un porcentaje variable dependiendo de la faena, es separado, mediante hidrociclones (Figura 2.5), depositando la fracción más fina (underflow) junto con el resto del relave en la cubeta, y la fracción más gruesa (overflow) en el muro (Cortés, 2019).

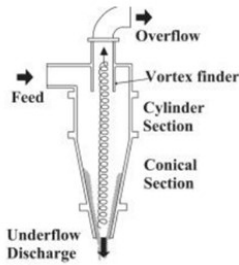


Figura 2.5: Hidrociclón (Valenzuela, 2016).

Según establece Sernageomin, los relaves se pueden depositar de diferentes formas:

1. **Relave Espesado:** Relaves previamente sometidos a un proceso de sedimentación en espesadores, hasta alcanzar una concentración de sólidos en peso (C_p) por sobre el 50 %. Con pendientes de 2 % para un C_p de 50 %, a 6 % para uno de 65 %.
2. **Relave en pasta:** Presentan una humedad del orden de 10 al 25 % y un contenido de finos superior al 15 %. Este tipo de relaves es compatible con un transporte por tuberías y luego de depositados se pueden acopiar permitiendo minimizar la superficie de suelo utilizado.
3. **Relave Filtrado:** Corresponden a relaves espesados que pasan por una posterior etapa de filtración usando equipos de prensa o vacío hasta alcanzar una humedad menor a 20 %. Bombear estas pulpas por tuberías es muy costoso por lo que en general se realiza mediante correas transportadoras o camiones mineros (Cortés, 2019).

Dependiendo la secuencia de construcción del muro de los tranques de relave, existen diferentes tipos (Cortés, 2019).

1. **Crecimiento aguas arriba (prohibido):** Consta de un Muro Inicial de empréstito en donde se va depositando la cubeta sobre el talud interno, una vez que alcanza la capacidad final para el muro inicial, se realiza una elevación del muro, el cual se deposita, en parte, sobre la cubeta. Este método fue prohibido el año 1970 por el desastre del tranque El Cobre N°1 en 1965.
2. **Crecimiento de eje central:** Comienza con un Muro Inicial de empréstito y una vez que finaliza la descarga de lamas y arenas, se depositan siguiendo un mismo eje hacia arriba. El método permite la depositación hidráulica y correcta compactación de las arenas y taludes más empinados aguas arriba.
3. **Crecimiento aguas abajo:** Comienza con un Muro Inicial de empréstito y sobre este, pero hacia afuera, va depositándose el muro creciente, dejando una pared fija. Debido a su diseño, se garantiza su estabilidad del muro y se reduce la zona saturada dentro del cuerpo del muro previniendo el riesgo de licuación o falla de flujo (Valenzuela, 2016).
4. **Otros tipos** Existen otros tipos de depósitos de relaves, como por ejemplo los depósitos en minas subterráneas, en rajos abandonados, entre otros.

2.3. Composición de los relaves

Como se reporta, la composición de los relaves tiene estrecha relación con la composición mineralógica de los yacimientos, los cuales se transforman casi en su totalidad (>95 %) en relaves. Si bien los elementos principales de los relaves típicamente no aparecen en la literatura, ya que los focos de la mayoría de los estudios están en los metales traza, metaloides potencialmente tóxicos o elementos valiosos, se puede deducir la composición de estos mediante el estudio de los componentes de los yacimientos mineros que generan relaves.

2.3.1. Tipos de yacimientos

El proceso de flotación es el método más económico, y el más usado, para concentrar minerales de sulfuros, y es por ello que la minería de sulfuros es la principal productora de relaves. La Figura 2.6 muestra el aumento porcentual de los depósitos de relaves por mineral, donde (A) muestra el aumento del volumen de almacenamiento de relaves por año durante el período 2019-2023 para una variedad de productos básicos según lo informado en el conjunto de datos y extrapolado a la producción mundial, (B) el número de instalaciones reportadas construidas por década por tipo de construcción y (C) las instalaciones de relaves informadas por tipo de construcción. El sombreado indica el volumen de las instalaciones activas.

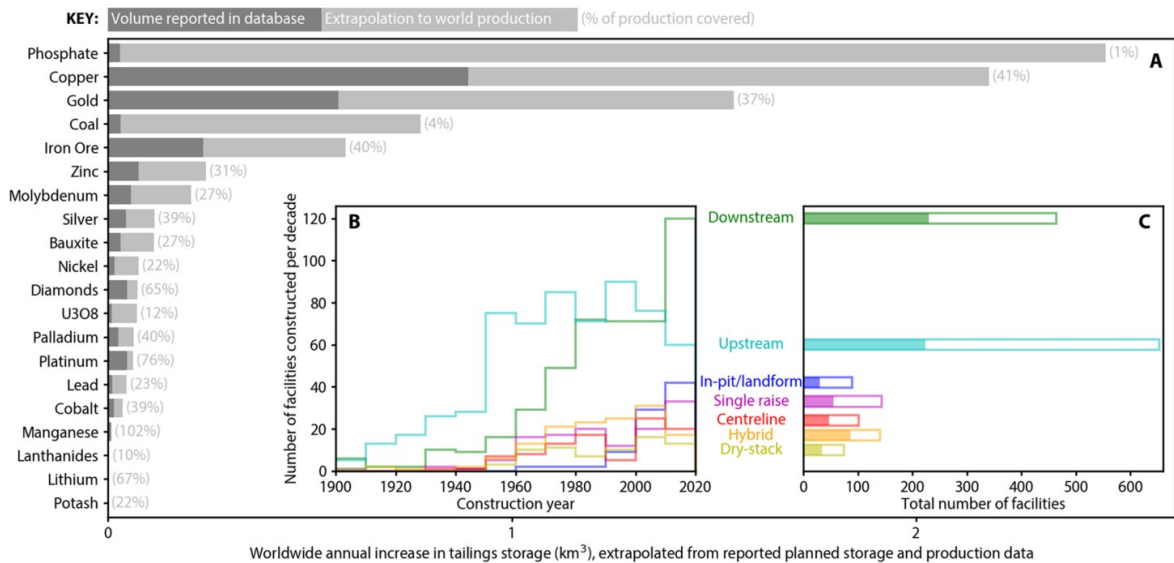


Figura 2.6: Almacenamiento de relaves (Franks et al., 2021).

Dado que la minería del cobre es el que presenta mayor masividad en el volumen actual y proyectado de los relaves, el énfasis de este trabajo está en su análisis, revisando los tipos de yacimientos que se explotan y su procesamiento. Existen tres categorías principales de depósitos desde donde se extrae el cobre: depósitos de tipo pórfido, depósitos unidos a estratos y depósitos masivos de sulfuro.

Los depósitos de pórfido son los más comunes, representan entre el 45-60 % de las reservas totales de cobre del mundo (Sun et al., 2010). Tienen características litológicas muy variadas, y cada yacimiento presenta su propia complejidad. Sin embargo, en la literatura se proponen

modelos simplificados caracterizados por un zoneamiento concéntrico de la mineralización disseminada y de la alteración, el cual está centrado en un intrusivo con vetillas tipo *stockwork*, emplazada en varios tipos de roca encajonante alteradas por soluciones hidrotermales. (Figura 2.7). Los depósitos típicos en Chile y Perú contienen de 0.4-2% de ley de cobre y de 500 a 1,000 millones de toneladas de mineral, aunque los depósitos más grandes pueden llegar a contener 5,000 millones de toneladas.

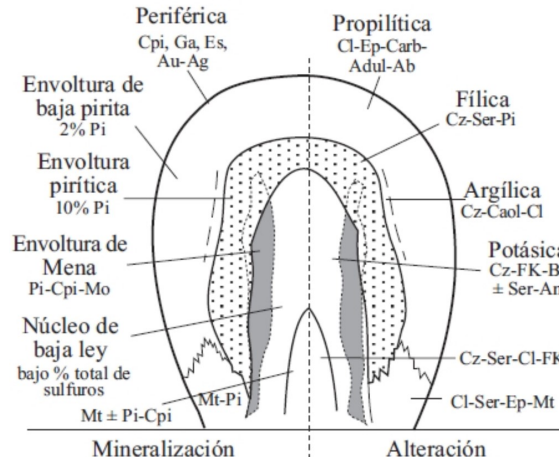


Figura 2.7: Modelo de Lowell y Guilbert (1970) de un pórfido cuprífero, con zonas y mineralización (Valencia et al., 2006).

Los depósitos ligados a estratos, los segundos más importantes en términos de reservas de metales, son menos comunes y más pequeños que los depósitos de pórfido. Los silicatos, carbonatos y sulfuros que contienen cobre se encuentran en antiguos sedimentos marinos, como esquistos y areniscas. Y finalmente, los depósitos masivos de sulfuros son grandes concentraciones de minerales de sulfuros mixtos (cobre, níquel, plomo o zinc) que se presentan como vetas y depósitos masivos, y a menudo se produce como un subproducto valioso de los otros minerales en estos depósitos.

Los minerales contenidos en yacimientos porfídicos se pueden dividir en tres categorías (Kossoff et al., 2014):

1. Fracción de ganga

En los relaves que quedan de la extracción de metales base y preciosos en yacimientos de pórfidos cupríferos, la fracción de ganga está dominada por cuarzo (SiO_2), y también puede comprender feldespato potásico (KAlSi_3O_8), feldespato sódico ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$) y feldespato cálcico ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$), sericita ($(\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{F},\text{OH})_2)$), clorita ($(\text{Mg},\text{Fe})_3(\text{Si},\text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2(\text{OH})_6$), calcita (CaCO_3) y dolomita ($\text{Ca},\text{Mg}(\text{CO}_3)_2$).

2. Fracción de óxido / sulfuro no económica residual

Dentro de esta, la pirita (FeS_2) es casi omnipresente, mientras que la pirrotita (Fe_{1-n}S donde n varía de 0 a 0,2), la arsenopirita (FeAsS), la marcasita (FeS_2), la magnetita (Fe_3O_4), esfalerita (ZnS), calcopirita (CuFeS_2) y galena (PbS), también son comunes dependiendo de la mineralogía del yacimiento original.

3. Fracción de mineral secundario

Los relaves expuestos a condiciones óxicas forman minerales oxidados secundarios. Dependiendo de la interacción entre la mineralogía de origen y las condiciones locales, como el pH, el clima y el estado redox, se pueden formar minerales secundarios particulares. Algunos ejemplos comunes incluyen goethita (α -FeOOH), yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), anglesita (PbSO_4), melanterita ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$), jarosita ($\text{KFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$), escorodita ($\text{FeAsO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) y caolinita ($(\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$).

2.4. Química de los fluidos de relaves

Aparte del tipo de yacimiento explotado, la composición química de los relaves depende de las reacciones ocurridas en los procesos mineralúrgicos con los productos químicos de la flotación (reactivos) que pueden modificar las propiedades fisicoquímicas del relave (Smuda et al., 2014). Por ello, los tipos de flotación existentes, y sus características, se abordan a continuación, y posteriormente se explican las principales reacciones que dominan la composición química de los relaves.

2.4.1. Tipo de flotación

Existen dos maneras en que un mineral es flotado, asociado al medio que tienen las partículas de llegar desde la zona de colección (al interior de la celda de flotación) a la zona de espuma o limpieza (donde se acumula el concentrado):

- Flotación verdadera: Producto de la adherencia directa de partículas de mineral a la espuma por las propiedades hidrofóbicas de sus superficie.
- Flotación de arrastre: Partículas de ganga no adheridas a burbujas son arrastradas a la fase de espuma y se reduce la ley de concentrado, pero a su vez tienen dos medios de transporte:
 - Arrastre mecánico: Por turbulencia cerca de la interfase pulpa espuma (rougher).
 - Arrastre hidráulico: Agua asociada a las burbujas (film) es arrastrada hasta la espuma, o bien, arrastrada/empujada con las burbujas en su ascenso.

Por otro lado, Ortega (2020) identifica, según el contenido de arcillas del material de entrada y el pH, tres tipos de flotación:

- **Flotación alcalina:** Usada en sulfuros de cobre y molibdeno con bajo contenido de arcillas y pH superiores a 7.
- **Flotación ácida:** Usada en menas con alto contenido de arcilla a pH menores a 7.
- Chacón et al., (2005) menciona el caso particular de la flotación de oro, realizada a pH neutro.

En términos generales, la importancia del pH radica en la eficiencia de los reactivos y reacciones ocurridas en la zona de colección, traducidas en la recuperación del proceso, donde se ha reportado que para determinadas características del mineral de alimentación existe un pH que optimiza la recuperación (Correa, 2019). En estas reacciones los iones H^+ y OH^- compiten con otros iones en alcanzar las superficies de los minerales, y su concentración influye

en la disociación de las sales y en los intercambios iónicos, por otro lado, al modificar el pH de la pulpa, se modifica el potencial zeta y el punto isoeléctrico, que permite la interacción de los minerales hidrofóbicos.

Se reconoce, que el circuito alcalino es más empleado que el ácido, entre otros motivos, porque los reactivos suelen ser más estables y las sales de los iones pesados precipitan en forma de hidróxidos metálicos (como Cu^{2+} , Zn^{2+} , Cr^{3+} , Pb^{2+} , etc.).

2.4.2. Reactivos de floación

Para entender la importancia adicional que tiene el pH se deben asimilar los otros reactivos que actúan en la flotación y los rangos operativos que la optimizan, estos son:

2.4.2.1. Espumante

Los espumantes se utilizan para generar una espuma estable y un tamaño de burbuja apropiado, evitando la coalescencia (unión de partículas coloidales de interés). Estos son agentes tensoactivos, es decir disminuyen la tensión superficial del agua, así, es posible estabilizar las burbujas y su formación, permitiendo que mantengan su forma sin deshacerse por efecto de las presiones, poder pasar por todo el colchón de espuma y llegar a la superficie, para la adherencia y levantamiento de la partícula. Su actividad se favorece en pulpas **alcalinas** ya que de este modo se favorece la formación de jabones en la superficie mineral. Dentro de los espumantes más usados se encuentra “*Pinnacle 9891*”.

2.4.2.2. Colector

La función principal de los colectores es la de proporcionar propiedades hidrofóbicas a las superficies de los minerales. Estos reactivos pueden ser iónicos y no iónicos, los primeros son compuestos heteropolares que se ionizan en agua y están formados por un grupo apolar (hidrocarburo) que se orienta hacia la fase líquida, sin interactuar con ésta, y un grupo polar que reacciona con la superficie del mineral por medio de una fisiorción o quimisorción (Cayunao, 2014). Los colectores del tipo no iónicos no son solubles en agua, pero cumplen el mismo rol que los iónicos, son más comunes, en particular los catiónicos, es decir, colectores en que su parte polar posee una carga positiva la cual se adsorbe en una superficie con carga negativa. Estos colectores son menos selectivos que los aniónicos y no quedan adsorbidos indefinidamente en un mineral determinado, es por ello que se añaden más reactivos, para potenciar la selectividad. Finalmente, su área de trabajo de pH es superior a 7, como se observa en la Figura 2.8.

Dentro de los más usados se encuentran:

- Matcol-D50

Este es un colector débil para sulfuros de cobre, a diferencia de los demás colectores, se utiliza en dosis mayores como colector primario.

- Xantato

Este colector se caracteriza por ser un colector sulfhídrico, el cual posee una cabeza polar y una cola apolar, donde la partícula queda cubierta por el colector que se adhiere a su

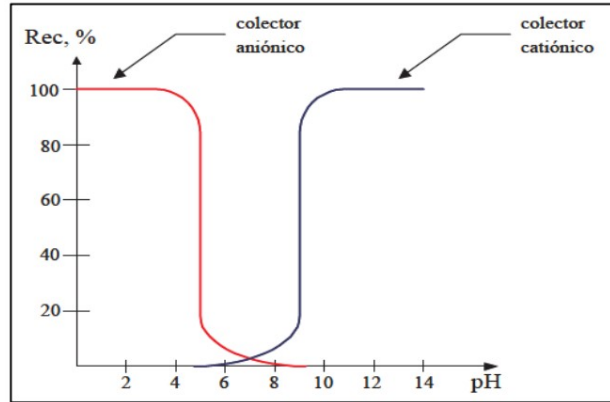


Figura 2.8: Zona de trabajo colectores catiónicos (Correa, 2019).

superficie por medio de su parte polar, proporcionándole con la parte polar propiedades hidrofóbicas. Los Xantatos son relativamente inestables a bajo pH, por lo que **no son adecuados en flotación de circuitos ácidos**.

- MX-8522

Es una solución acuosa alcalina de sus componentes activos, basado en la química de los tiofosfatos, es un colector fuerte de sulfuros de cobre, presentando una buena selectividad frente a la pirita. Es efectivo en la flotación de minerales sulfurados en **circuitos ácidos** y ha sido utilizado con éxito en el reemplazo de otros colectores, como el Xantato, en flotación de Cobre-Oro.

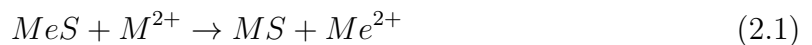
2.4.2.3. Modificadores

Son reactivos utilizados cuando se necesita mejorar las condiciones de colección y/o cuando se necesita mejorar la selectividad del proceso. Se incluyen:

- Activadores

La activación es el proceso por medio del cual se produce la adsorción o precipitación de especies metálicas en la superficie del mineral, creando sitios de afinidad con el colector que permiten la recuperación de los minerales a través de flotación verdadera (Cayunao, 2014). Estos reactivos sirven para aumentar la adsorción de los colectores sobre la superficie de los minerales o para fortalecer el enlace entre la superficie y el colector. Hay distintas maneras de activar una superficie, por ejemplo, limpiando la superficie del mineral afectado por un proceso secundario de oxidación con algún ácido que disuelva las capas oxidadas.

Bajo condiciones operacionales específicas, partículas de ganga flotan selectivamente mediante lo que se conoce como “activación accidental de ganga”, por intercambio iónico y/o adsorción de iones metálicos en la superficie, este fenómeno se da en minerales como la blenda (ZnS), pirrotita ($Fe_{1-x}S$, $x=0-0.2$), piroxeno ((Ca, Mg, Fe, Mn, Na, Li)(Al, Mg, Fe, Mn, Cr, Sc, Ti)(Si, Al)₂O₆) y la pirita (FeS₂). La reacción de activación de muestra en la Fórmula 2.1 (Cayunao, 2014).



Donde MeS representa el mineral sulfurado, M^{2+} el ion metálico activador, MS la nueva superficie resultante de la activación y Me^{2+} el ión libre.

- Depresantes
Disminuyen la flotabilidad de un mineral haciendo su superficie más hidrofílica o impidiendo la adsorción de colectores que puedan hidrofobizarla. Este efecto se puede lograr introduciendo en la pulpa un ión que compite con el ión del colector por la superficie del mineral o un reactivo que genere condiciones desfavorables para la adsorción de colector.
- Regulador de pH
Habitualmente son: Cal ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), Hidróxido de sodio ($\text{Na}(\text{OH})$), carbonato de sodio (Na_2CO_3) y Acido sulfúrico H_2SO_4 .

Luego de la flotación, gran cantidad de estos reactivos quedan remanentes en las aguas, por lo cual se buscan alternativas o para degradarlos, o bien, para aprovecharlos.

La degradación de reactivos orgánicos ocurre mediante una oxidación avanzada mediante tratamientos, o bien, una oxidación aniónica producida por radicales hidroxilos formados de la oxidación del agua (Ecuación 2.2 y 2.3) que generan un alto potencial de oxidación el cual provoca el rompimiento de enlaces químicos en la materia orgánica disuelta obteniendo una transformación de la materia orgánica inicial a dióxido de carbono (CO_2) y agua o en productos intermedios no tóxicos (Cifuentes et al., 2012).



A pesar de lo anterior, varias investigaciones demuestran que los xantatos no son compuestos estables, generando disulfuro de carbono (CS_2) tóxico e inflamable en su descomposición (Elizondo-Álvarez et al., 2021).

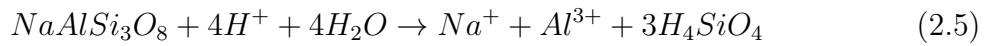
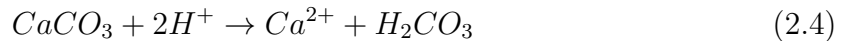
Elizondo-Álvarez et al. (2021) reportan resultados de estabilidad química de tres xantatos de diferente grupo alquílico (etílico, isopropílico y amílico) y dos hidroxamatos (ácido benzo-hidroxiámico y ácido octano-hidroxiámico) en función del tiempo (0-112 horas) y del pH (6, 8 y 10). En el, mostraron que aumenta su degradación conforme se incrementa el tiempo y disminuye el pH. Un menor pH resulta en la formación de disulfuro de carbono (CS_2), producto de la degradación del xantato.

Por ende, el xantato logra degradarse a medida que en los tranques la fase líquida comienza a oxidarse. Sin embargo, el potencial de oxidación de la de pirita es menor que el de oxidación de xantato a dixantógeno, especie responsable de inducir hidrofobicidad de las partículas y degradación del xantato a pH alcalinos.

2.4.3. Reacciones en depósitos

Existen reacciones ocurridas en el tranque poco después de su descarga, Ceniceros-Gómez et al. (2018) recopila algunos ejemplos:

- La meteorización de minerales de aluminosilicato.
- Oxidación de minerales de sulfuro tanto por O_2 molecular disuelto (Equilibrio de la Ley de Henry entre soluciones acuosas y gases intersticiales de relaves) como por Fe(III). Este proceso puede resultar en la generación de protones, aumentando la acidez de las aguas intersticiales y disolución de carbonatos y oxidación de Fe(II) acuoso como procesos controlados cinéticamente lentos y especiación acuosa.
- Hidrólisis.
- Disolución/precipitación de minerales secundarios como procesos controlados de equilibrio rápido en relaves.
- Sorción, donde la composición mineralógica de los relaves puede cambiar según las tasas de disolución de sulfuros, carbonatos y, en menor medida, silicatos.
- Disolución de calcita (Ecuación 2.4) y albita (Ecuación 2.5), reacción común que contribuye a la neutralización de pH.



El conjunto de minerales secundarios a menudo alberga los principales metales y metaloides contaminantes, esos sumideros funcionan mientras los minerales secundarios permanezcan estables, por ejemplo, el sulfato está en solución a un pH más alto y los metaloides como el arsénico, que forman oxianiones, permanecen en solución en condiciones alcalinas y oxidantes. Sin embargo, el As^{5+} puede precipitar más fácilmente que el As^{3+} . Por ende, los átomos de oxígeno en minerales secundarios como sulfatos, carbonatos, fosfatos y arseniatos pueden ser sitios de sorción significativos (Kossoff et al., 2014).

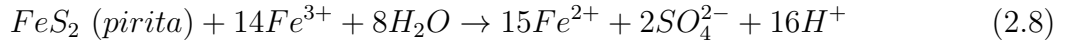
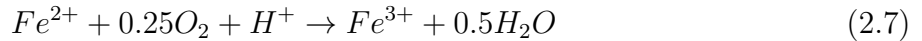
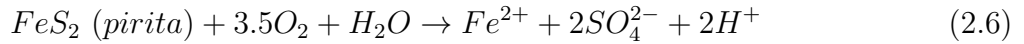
Abdellatif et al. (2019) indican que en condiciones climáticas húmedas, los diseños de los TSF generalmente buscan mantener altos grados de saturación para controlar la difusión de oxígeno en los relaves y así reducir la oxidación de sulfuros. Los tranques se pueden considerar como sistemas alcalinos que mutan a condiciones ácidas, después de un largo tiempo sobre todo en depósitos de mayor altura (del orden de 30 años para alcanzar la neutralidad), debido a su exposición a la atmósfera, y oxidación de sulfuros, los cuales, a su vez consiguen liberar altas concentraciones de sulfatos, hierro y otros metales. Hay cuatro mecanismos por los cuales los sulfuros pueden oxidarse: oxidación química, electroquímica, oxidación bacteriana y una combinación de productos químicos, electroquímicos y oxidación bacteriana (Ortega, 2020), numerosos autores sugieren que es la principal responsable de la oxidación de sulfuros (Dold, 2014). Microorganismos como “*Acidithiobacillus Ferrooxidans*” obtienen energía al oxidar Fe^{2+} a Fe^{3+} , aumentando la velocidad de reacción de sulfuros hasta en un factor de 10^5 sobre la oxidación abiótica.

A continuación, se explica el mecanismo de los minerales de sulfuro productores de ácido más comunes en la minería sulfurada.

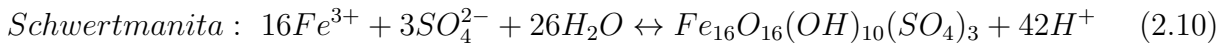
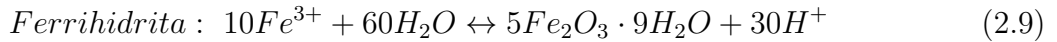
2.4.3.1. Pirita

La pirita (FeS_2), producto de su oxidación, cambia naturalmente el pH de la pulpa, obligando a usar una mayor concentración de neutralizadores posterior a la molienda. Pero debido a que su oxidación es una reacción muy exotérmica, no se pretende depresarla por completo, ya que en el proceso posterior de fundición se logra alcanzar temperaturas altas gracias a la presencia de esta en el concentrado.

La oxidación de pirita es la reacción más común al ser el segundo mineral de sulfuro más abundante en los yacimientos de pórfido de cobre, y en ella se libera una gran cantidad de protones (H^+) y sulfato (SO_4^{2-}) mediante las reacciones 2.6, 2.7 y 2.8. De hecho, en algunos relaves activos de depósitos de pórfido de cobre hay un fuerte aumento en las concentraciones de sulfato (entre 1,500 y 2,000 mg/L) con una tendencia anual a aumentar hacia el final del verano (Dold, 2014). Sin embargo, no es una regla general y varía caso a caso. Otras fuentes de sulfato son la disolución de yeso y anhidrita y el aumento de la concentración de este ocurre por recirculación de aguas del proceso.

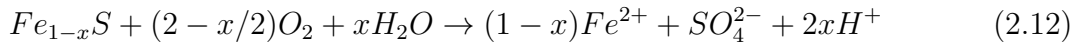


Otros autores sugieren que en realidad la oxidación de la pirita incluye la formación de los productos secundarios metaestables ferrihidrita, schwertmanita y goethita, así como jarosita secundaria, y hematita dependiendo de las condiciones geoquímicas.



2.4.3.2. Pirrotita

A menudo contenida en relaves y asociada a la pirita, la oxidación de pirrotita ($Fe_{1-x}S$, x entre 0-0.2) sigue la Ecuación 2.12 afectando la producción relativa de ácido, similar a la pirita, pero es muy importante en las primeras etapas de meteorización, dado que su velocidad de oxidación es de 20 a 100 veces mayor que la de la pirita en condiciones atmosféricas de 2 y a 22 °C (Dold, 2014).



La pirrotita, como se mencionó con anterioridad, es susceptible a activación por iones Cu(II), mediante la adsorción del catión en la superficie del mineral. La activación de piro-

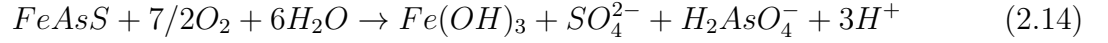
xeno por iones Cu (II) y Ni (II) en la flotación selectiva de pentlandita ((Ni,Fe)₉S₈) es una de las principales causas de reducción de valor de concentrados de níquel.

2.4.3.3. Arsenopirita (FeAsS)

La arsenopirita (FeAsS) puede oxidarse mediante la siguiente ruta de reacción:

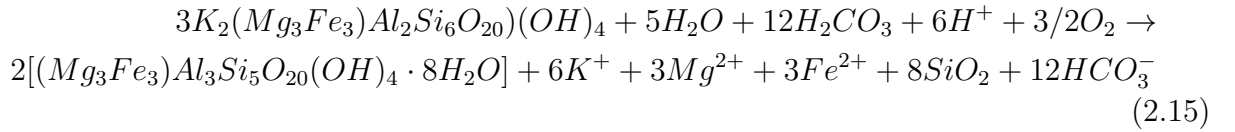


Si el hierro férrico es el oxidante, la tasa de oxidación de la arsenopirita es similar a la tasa de oxidación de la pirita, si es el oxígeno, la tasa de oxidación de la arsenopirita es algo menor que la de la pirita.



2.4.3.4. Fases secundarias

Los protones producidos pueden reaccionar con minerales neutralizantes como carbonatos y silicatos. Estas reacciones de neutralización controlan el pH, la liberación de cationes como K⁺, Na⁺, Mg²⁺, y la formación de minerales secundarios como minerales de tipo yeso y vermiculita. Como ejemplo, la Ecuación 2.15, muestra la reacción de neutralización de la biotita que da como resultado la formación de vermiculita.



2.5. Aguas de relaves

Los relaves están compuestos por una fase sólida (mineral) y una líquida (agua), la cual producto de la sedimentación de la fracción sólida del relave, es liberada en la superficie del depósito y presenta concentraciones variables de elementos disueltos, esta concentración se ve influenciada o controlada por factores climáticos y la presencia de ciertos minerales en la fase sólida, dadas dichas condiciones, la concentración de los elementos en las aguas son mayores. En la Tabla 2.1 se resumen los factores principales que controlan el contenido de elementos químicos en aguas de relave y los minerales asociados a estos.

Tabla 2.1: Factores controladores de elementos químicos en aguas de relaves. Elementos con *: factor no comprobado totalmente (Ortega, 2020).

Elemento	Mineral asociado	Fórmula Química	Factores controladores
Cl			Evaporación
Na	Albita	NaAlSi ₃ O ₈ formula	
	Analcima	NaAlSi ₂ O ₆ ·H ₂ O	
K, Rb, Li*, B* y Mo*			
SO ₄	Anhidrita	CaSO ₄	Precipitación de yeso
Ca	y Yeso	CaSO ₄ ·2H ₂ O	
	Calcita	CaCO ₃	
Sr			
Mg	Biotita	K(Mg,Fe) ₃ AlSi ₃ O ₁₀ (OH,F) ₂	Disolución de clorita y biotita
	Clorita	(Mg,Fe) ₃ (Si,Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₂ ·(Mg,Fe) ₃ (OH) ₆	
Al	Clorita	(Mg,Fe) ₃ (Si,Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₂ ·(Mg,Fe) ₃ (OH) ₆	Precipitación de arcillas
	Biotita	K(Mg,Fe) ₃ AlSi ₃ O ₁₀ (OH,F) ₂	
	Albita	NaAlSi ₃ O ₈	
	Montmorillonita / Caolinita	Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	
Fe	Biotita	K(Mg,Fe) ₃ AlSi ₃ O ₁₀ (OH,F) ₂	Precipitación de ferrihidrita y otros hidróxidos y óxidos de hierro
	Ferrihidrita	Fe(OH) ₃	
	Goethita	FeO(OH)	
	Siderita	FeCO ₃	
	Magnetita	Fe ₂ O ₃	
	Schwertamita	Fe ³⁺ ₁₆ O ₁₆ (OH) ₁₂ (SO ₄) ₂	
	Fougerita	(Fe,Mg) ₆ Fe ³⁺ ₂ (OH) ₁₈ ·4(H ₂ O)	
Ni	Trevorita y vaesita	NiFe ³⁺ ₂ O ₄ y NiS ₂	Disolución de pirita
Cu	Tenorita	CuO	Precipitación de brocantita
	Brocantita	Cu ₄ SO ₄ (OH) ₆	
Ba*	Baritina, witherita y calcita	BaSO ₄	Baritina
As	Oropimente y rejalgar	As ₂ S ₃ y AsS	Disolución de pirita, biotita y clorita
	Pirita, biotita y clorita		
Sb	Hidróxido de antimonio	Sb(OH) ₃	Precipitación de Sb(OH) ₃
Si			Disolución de cuarzo y precipitación de calcedonia
Ti*	Titanita	CaTiSiO ₅	Disolución evaporación de titanita Y evaporación
	Ilmenita	FeTiO ₃	
	Titanomagnetita	Fe ²⁺ (Fe ³⁺ ,Ti) ₂ O ₄	
	Biotita	K(Mg,Fe) ₃ AlSi ₃ O ₁₀ (OH,F) ₂	
Cr		BaCrO ₄	Asociado a fragmentos de acero cromado de maquinarias que compactan relaves
Co	Espinela de cobalto	“Espinela-Co” y Co ₂ SiO ₄	

Ortega (2020) señala que los elementos con mayor concentración en aguas de relaves en Chile son Na, Cl, SO₄, K, Ca, Mg y HCO³⁻, en general son aguas sulfatadas y cloruradas que pueden ser comparadas con aguas subterráneas (en el caso de las menos mineralizadas) y agua de mar (más mineralizadas). Según el análisis de componentes principales, hay 6 factores que pueden explicar más del 75 % de variación en las concentraciones, los primeros son los parámetros físicoquímicos pH, alcalinidad, temperatura y el resto el contenido de elementos. A continuación, muestran los parámetros físicoquímicos asociados:

- pH

Parámetro físicoquímico adimensional que cuantifica la acidez/basicidad de sustancias, y se calcula con la concentración de iones de hidrógeno o “protones”, como lo indica la siguiente Fórmula 2.16.

$$pH = -\log[H^+] \quad (2.16)$$

El pH depende fuertemente de las condiciones del proceso, este se ajusta en el proceso de flotación y en Chile van de neutro a alcalino. La alcalinidad se determina por titulación y se expresa como contenido total de carbonatos, bicarbonatos e hidróxidos.

- Eh

El Eh o potencial de oxidación cuantifica el potencial redox. Se mide en terreno o puede ser calculado con la Ecuación de Nernst (Fórmula 2.17).

$$E_h [mV] = E^\circ - \frac{RT}{nF} \ln(Q) \quad (2.17)$$

Donde E_h es el potencial de oxidación, E° el potencial en condiciones estándar, R la constante de los gases en J/K mol, T la temperatura absoluta (Kelvin), n la cantidad de mol de electrones que participan en la reacción, F la constante de Faraday y Q el cociente de reacción correspondiente. Las condiciones oxidantes de un sistema son indicadas por potenciales mucho mayores a cero, mientras que los valores más bajos muestran condiciones reductoras.

- Temperatura

Los relaves pueden ser considerados como depósitos sedimentarios artificiales y así, caracterizarse mediante estratificación vertical (Novoselov & Kelm, 2015), la temperatura puede ser obtenida desde mediciones o modelamiento del clima y la profundidad como proponen Novoselov & Kelm (2015) a partir de simulaciones de distribución de temperatura y contenido de agua en la Figura 2.9 (Ortega, 2020).

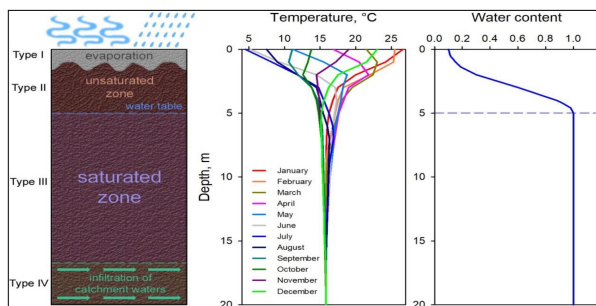


Figura 2.9: Modelo estratificado esquemático propuesto por Novoselov & Kelm (2015).

2.6. Recuperación de agua en tranques de relaves

Dentro del proceso minero más de un 70 % del agua utilizada es recirculada y el resto califica como pérdida. En la Figura 2.10 se observa un diagrama de flujos con las oportunidades de recirculación de aguas que existen en una planta concentradora convencional.

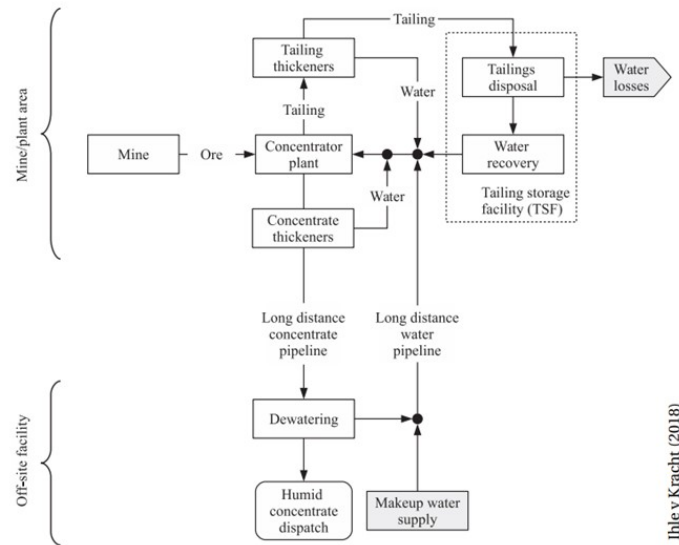


Figura 2.10: Diagrama de flujo de la flotación convencional incluyendo recuperaciones de agua (Ihle & Kracht, 2018).

Los relaves convencionales tienen un contenido de agua de alrededor de un 60 % y se reconocen tres maneras de recuperar esta agua, previas al depósito de relaves:

1. **Espesamiento – clarificación:** Mediante espesadores, consistentes en recipientes donde llega el relave y una turbina al interior que induce a los sólidos sedimentados en la parte inferior a salir como un relave espesado, y al agua de la parte superior a ser clarificada (filtros) o recirculada inmediatamente a la flotación. Este método es el más económico y dependiendo de la concentración de sólidos del relave espesado es posible recuperar cierta cantidad de agua, la Figura 2.11 muestra la relación entre el agua recuperada y el agua que ingresa a un sistema de espesamiento (R), considerando una concentración en peso en la alimentación del espesador del 28 %, para concentraciones en peso en la descarga del espesador (C_{pU}) de entre el 40 % y el 70 %. En estas condiciones, el agua recuperada de los espesadores puede corresponder entre el 35 % y el 65 % del agua de entrada.

Las concentraciones de sólidos oscilan entre el 40 %, correspondientes a relaves que salen de una etapa de ciclón para el uso de material grueso en la construcción del muro del embalse, al 55 %.

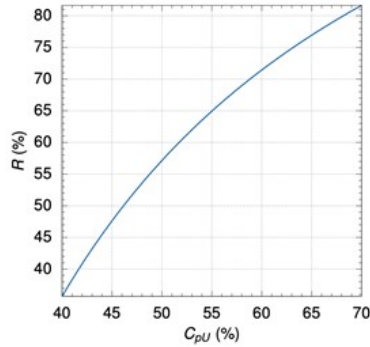


Figura 2.11: Recuperación de agua vs C_p del underflow (Ihle & Kratch, 2018).

2. Filtración: Cuando se quiere reducir el contenido de agua a humedad (menor a 20 %), este opera por presión positiva o vacío, requiere de espesadores aguas arriba para funcionar correctamente, aunque el producto del proceso no se puede transportar hidráulicamente. La recuperación se grafica en la Figura 2.12 (Ihle & Kracht, 2018).

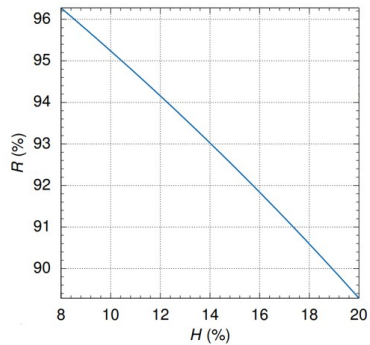


Figura 2.12: Recuperación de agua vs Humedad del underflow (Ihle & Kratch, 2018).

3. Separación centrífuga: Función similar a los filtros pero con baja aplicación, dado que resulta un producto con menores concentraciones de sólidos de salida que los filtros.

La recirculación desde los tranques no provee agua en condiciones óptimas para la flotación, y no siempre resulta factible económicamente. Shengo et al. (2014) aseguran que el agua recirculada del proceso de flotación del mineral interfiere en la eficiencia de los reactivos y cambia la recuperación metalúrgica. Pacheco & Domínguez (2007) mencionan que dada la alta cantidad de especies disueltas en el agua, algunas causan depresión o activación indeseada. Dado que el resultado de la flotación está determinado por las interacciones dinámicas de variables químicas, físicas y operativas, lo óptimo es asegurar una calidad de agua constante para flotación, es decir, un suministro de agua fresca o pre-tratada. Ceniceros-Gómez et al. (2018) incluso afirman que la calidad del agua de proceso puede producir una corrosión y formación de incrustaciones en cañerías.

Por otro lado, en el aspecto económico, Cortés (2019) explica que es poco rentable bombear el agua del tranque a la planta por el Trade-Off entre: el costo de bombeo y tratamiento, y el costo de comprar agua para suplir el *make-up*.

2.7. Tratamiento de aguas residuales de minería

Una mayor recuperación de agua de los tranques de relaves cumple con 3 objetivos complementarios. En primer lugar, permite una reducción del consumo de agua dulce, por otro lado asegura una mayor estabilidad física y química de los depósitos, y finalmente, prolonga el ciclo de vida de los depósitos al disminuir los volúmenes de pulpa depositada (Adiansyah et al., 2015). Dadas las problemáticas asociadas a la recirculación de aguas, la industria ha incursionado en proyectos de reutilización de agua para diversos usos. El Proyecto Embalse Ovejera incluyó la forestación de 520 ha con eucalipto para evapotranspiración de las aguas claras (Véliz, 2011), proyecto que no prosperó debido al no cumplimiento de la normativa vigente de aguas de riego. Cada proyecto requiere estudios y seguimiento de los impactos generados, donde se evalúan también medios de tratamientos de las aguas. Algunos ejemplos aplicados, de técnicas de tratamiento encontrados en la literatura (Pacheco & Domínguez, 2007), son:

- Adsorción en la interfase líquido-gas: Remoción de sustancias orgánicas tensoactivas, lo cual es una operación sencilla y el concentrado puede ser recirculado, pero requiere equipo de grandes dimensiones.
- Adsorción con carbón activado: Remueve de casi todos los compuestos orgánicos en una sola etapa de remoción y los adsorbentes pueden ser recuperados, pero requiere unidades especiales para la regeneración del carbón activado.
- Adsorción con lodo mineral: Remoción de los iones metálicos y algunos compuestos orgánicos dependiendo en la composición del lodo. En general las cantidades removidas no son suficientes.
- Precipitación química: Remoción de metales alcalinos y metales pesados en una operación rápida con un control cuidadoso de los reactivos.
- Oxidación biológica: Remoción de materia orgánica biodegradable, potencialmente barato, pero lenta y con acondicionamiento posterior requerido.
- Oxidación química: Transformación de las moléculas de alto peso molecular a bajo peso molecular. La mayoría de los compuestos orgánicos son oxidados y no tiene problemas de manejo, pero el costo de capital es alto.
- Resinas de intercambio iónico: Remoción de las especies iónicas con resinas que pueden regenerarse, pero el costo de capital es alto.
- Ósmosis inversa: Remoción de todas las especies catiónicas y aniónicas en una sola etapa, pero tiene problemas de mantenimiento y es necesaria una remoción previa de compuestos orgánicos.
- Congelamiento atmosférico: Remoción total de electrolitos y compuestos orgánicos sin adición de reactivos químicos, pero depende de las condiciones climáticas y existen dificultades en el diseño.

2.7.1. Técnicas de membrana

La necesidad de producir mayores flujos a menores costos de operación, ha llevado a un constante avance en el diseño y fabricación de las membranas, las cuales presentan una evolución y aplicación general en las últimas décadas. Una membrana consiste en una interfase entre dos fases adyacentes que actúa como barrera selectiva y controla el transporte entre ellas. La fuerza impulsora que permite el transporte pasivo selectivo de las membranas puede ser: la diferencia de potencial químico creado debido a un gradiente de concentración, la diferencia de presión a través de la membrana, o un campo eléctrico.

Según las estructuras de barrera y los gradientes utilizados, existen diferentes procesos de membrana, las cuales se indican en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2: Clasificación de membranas (Ayoob et al., 2008).

Estructura barrera de membrana	Gradiente Transmembrana		
	Concentración	Presión	Campo Eléctrico
No porosa		Ósmosis Reversa (RO)	Electrodiálisis (ED)
Microporo (Poro diámetro $\leq 2\text{nm}$)	Diálisis (D)	Nanofiltración (NF)	
Mesoporo (Poro diámetro 2-50 nm)	Diálisis (D)	Ultrafiltración (UF)	Electrodiálisis (ED)
Macroporo (Poro diámetro 50-500 nm)		Microfiltración (MF)	

El mecanismo de las membranas no porosas se describe mediante el modelo de solución-difusión que supone que el disolvente y los solutos, cuando llegan a la pared de la membrana se disuelven en ella para luego difundir, siendo las interacciones entre el permeando y el material de la membrana las que dominan la tasa de transporte y selectividad (Armijo & Condorhuamán, 2012).

Para las membranas porosas, la permeabilidad y tasa de transporte está definida por el tamaño de poro, aunque igual las interacciones de soluto-superficie afectan el rendimiento de la membrana debido a polarización por aumento iónico en la fase que se va concentrando, y el *fouling* o ensuciamiento por acumulación de partículas en los poros de la membrana (Ayoob et al., 2008).

Por otro lado, una membrana de intercambio iónico, basa su funcionamiento en que los iones se intercambian entre una solución y los grupos iónicos adheridos a la membrana, es decir, es la composición química de la membrana la que controla la hidrofiliidad/hidrofobicidad. Este sistema de membrana de intercambio iónico es más eficiente energéticamente y sostenible, pero la baja selectividad para iones con la misma valencia, es su mayor inconveniente.

Si bien las ventajas y desventajas de cada una de las tecnologías de membranas existentes (Ósmosis inversa, electrodiálisis, ultrafiltración, etc) es materia de estudio constante, esta memoria se enmarca en el Proyecto Sequía el cual contempla medios de tratamiento de aguas de relave, uno de los cuales corresponde al uso de membranas de nanofiltración comerciales, la

elección de ella escapa de los alcances y objetivos de esta memoria, la cual se limita a exponer los beneficios de la tecnología y las limitantes de ella. En la Tabla 2.3 se muestra un resumen de ventajas y desventajas de la nanofiltración frente a otras tecnologías de membrana.

Tabla 2.3: Tabla resumen de membranas (Ayoob et al., 2008).

Membrana	Ventajas	Desventajas
Ósmosis inversa	Tecnología ampliamente estudiada y aplicada en especial en países en desarrollo. Amplias aplicaciones comerciales. Remueve tanto sales como compuestos orgánicos.	Alto consumo energético por presión requerida (de 20 a 100 bar) y sensibilidad a la polarización. Posible ensuciamiento mineral y biológico. Baja recuperación de agua.
Nanofiltración	Puede operar a temperatura ambiente y de forma continua. El consumo de energía no es tan elevado y no requiere el uso de reactivos químicos. Plantas muy compactas que requieren poco espacio físico. Remoción aceptable.	No elimina el contaminante, solo lo concentra. Coste de las membranas y su durabilidad baja. Problemas de degradación, ensuciamiento o polarización de la membrana. Más sensible que RO al pH y fuerza iónica.
Electrodiálisis	Inducido por diferencia de potencial eléctrico. Resistente al ensuciamiento. Más económica que RO.	Requiere de un alto grado de pretratamiento. No es efectivo para compuestos de baja masa molecular.

2.7.2. Nanofiltración

Estas membranas eliminan especies sin carga a nanoescala por exclusión de tamaño y, en cierta medida, por efectos de carga. La carga de la membrana se origina a partir de la disociación de grupos ionizables en la superficie de la membrana y dentro de la estructura del poro de la membrana, la disociación de ellos está fuertemente influenciada por el pH de la solución de contacto, la membrana puede exhibir un punto isoeléctrico (IEP) a un pH específico y bajo dicho punto, la carga se vuelve positiva, y viceversa (aumentando con su distancia del IEP). Fuera del IEP, los coiones son rechazados con mayor fuerza, mientras que la electroneutralidad obliga a los contraiones a hacerlo también, brindando flujos de agua altos a presiones más bajas, en comparación con otras tecnologías (Mullett et al., 2014 y Ayoob et al., 2008). Además de los grupos superficiales ionizables, las membranas NF tienen una capacidad de intercambio iónico débil y, en algunos casos, los iones de la solución de contacto pueden adsorberse en la superficie de la membrana provocando una ligera modificación de la carga de la membrana, la repulsión o atracción electrostática se produce en función de la valencia iónica y de la carga fija de la membrana.

Los solutos que se mueven en solución libre experimentan fuerzas de arrastre ejercidas por el solvente que fluye a través de la estructura de poros confinados. El flujo de iones es convectivo por gradiente de presión, y difusivo por diferencia de concentración.

Las operaciones de separación mediante membrana son ampliamente utilizadas y su uso es superior a los métodos convencionales por la capacidad de producir separaciones de forma muy eficiente a temperatura ambiente y por la relación coste/eficiencia. Poseen aplicaciones industriales muy variadas, tanto aplicaciones ambientales, como el tratamiento de agua subterráneas, superficiales y residuales, desalinización, aplicación farmacéutica y biotecnológica, aplicación en la industria alimentaria, e incluso aplicaciones sin agua (Mohammad et al., 2015).

En lo que interesa a esta memoria, sobre la aplicación ambiental, la excelente capacidad de eliminación de contaminantes, especialmente sales divalentes y compuestos orgánicos pequeños, la disminución de los precios de las membranas, el menor consumo de energía y la mejora de la vida útil de las membranas en comparación con RO han llevado a la amplia aceptación y popularidad de NF en todo el mundo, probándose en residuos industriales farmacéuticos, lácteos, textiles, etc. (Mohammad et al., 2015).

La tecnología de membranas para desalinización ha sido ampliamente reconocida como uno de los mejores candidatos para resolver la escasez de agua, particularmente la Ósmosis Inversa. Sin embargo, dos de los principales impedimentos de esta tecnología son el ensuciamiento (*fouling*) y el consumo de energía. El ensuciamiento afectará y reducirá la productividad de la planta y el alto consumo de energía debido a la presión de operación, que representa alrededor del 44 % del costo del agua producida. En ese contexto, NF ha demostrado su utilidad como pretratamiento para la desalinización de agua de mar en el proceso de RO.

Según Mohammad et al. (2015) el pretratamiento con NF lleva a mayor producción de agua (alrededor del 60 %) y a una reducción de costos de alrededor del 30 % para las plantas de RO, debido además, a la eliminación de partículas coloidales y escamas inorgánicas. Sin embargo, el problema del ensuciamiento de la membrana se ha observado incluso después de que se llevó a cabo la limpieza química. Por lo tanto, se deben realizar más estudios para mejorar este sistema y reducir la propensión al ensuciamiento de las membranas, persistiendo problemas en el control y la mitigación de las incrustaciones.

Algunas de las membranas comerciales más usadas en nanofiltración con sus especificaciones se muestran en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4: Especificaciones técnicas de membranas comerciales de nanofiltración (Mohammad et al., 2015).

Membrana	Marca	MWCO (Da)	Temperatura máxima (°C)	Rango de pH	Rechazo de sales (%)	Compisición
NF270	Dow Filmtec	200-400	45	2-11	>97 %	Poliamida thin-film composite
NF200	Dow Filmtec	200-400	45	3-10	50-65 % CaCl ₂ 3 % MgO ₄ 5 % Altrazina	Poliamida thin-film composite
NF90	Dow Filmtec	200-400	45	3-10	85-95 % NaCl >97 % CaCl ₂	Poliamida thin-film composite
TSS80	TriSep	150	45	2-11	99 %	Poliamida
TS40	TriSep	200	50	3-10	99 %	Polypiperazineamide
XN45	TriSep	500	45	2-11	95 %	Poliamida
UTC20	Toray	400	35	3-10	60 %	Polypiperazineamide
TR60	Toray	400	35	3-8	55 %	Cross-linked polyamide composite
CK	GE Osmonics	2000	30	5-6,5	94 % MgSO ₄	Cellulose acetate
DK	GE Osmonics	200	50	3-9	98 % MgSO ₄	Polyamide
DL	GE Osmonics	150-300	90	1-11	96 % MgSO ₄	Cross-linked aromatic polyamide
HL	GE Osmonics	150-300	50	3-9	98 % MgSO ₄	Cross-linked aromatic polyamide
NFX	Synder	150-300	50	3-10.5	99 % MgSO ₄ 40 % NaCl	Proprietary polyamide thin-film composite
NFW	Synder	300-500	50	3-10.5	97 % MgSO ₄ 40 % NaCl	Proprietary polyamide thin-film composite
NFG	Synder	600-800	50	4-10	50 % MgSO ₄ 10 % NaCl	Proprietary polyamide thin-film composite
TFC SR100	Koch	200	50	4-10	>99 %	Proprietary thin-film composite polyamide
SR3D	Koch	200	50	4-10	>99 %	Proprietary thin-film composite polyamide
SPIRAPRO	Koch	200	50	3-10	99 %	Proprietary thin-film composite polyamide
ESNA1	Nitto-Denko	100-300	45	2-10	89 %	Composite polyamide
NTR7450	Nitto-Denko	600-800	40	2-14	50 %	Sulfonated polyethersulfone

2.7.3. Fouling o ensuciamiento en membranas porosas

Aunque el rendimiento de los procesos de membrana era mejor o al menos competitivo con respecto a los procesos convencionales, el ensuciamiento de la membrana sigue siendo un gran obstáculo para las aplicaciones basadas en membrana, incluida la NF. Afecta directamente al desempeño de las membranas, y es inherente a la tecnología, es el *fouling* o ensuciamiento. Existen distintos tipos de ensuciamiento en función del mecanismo de ensuciamiento, este se puede producir por:

1. Adsorción:

Interacción específica entre la membrana y los solutos. Puede ocurrir en la superficie de la membrana o en los poros.

2. Bloqueo de poros:

Los solutos bloquean y obstruyen los poros de la membrana. El tamaño de las partículas decidirá si los poros de la membrana se bloquearán parcial o totalmente.

3. Formación de capa de torta:

Deposición de partículas que crece capa por capa sobre la superficie de la membrana.

Generalmente causado por partículas con un tamaño mayor que el tamaño del poro de la membrana.

4. **Formación de una capa de gel:** la polarización de la concentración conduce a la formación de una capa de gel en las inmediaciones de la superficie de la membrana, esta capa se desarrolla muy rápidamente (alrededor de un segundo) y se acumula con el tiempo presentando una resistencia adicional al flujo. La obstrucción de los poros de la membrana puede ser debido a materia orgánica (ensuciamiento biológico) y por el exceso de producto de solubilidad de sales en el recirculado (ensuciamiento mineral).

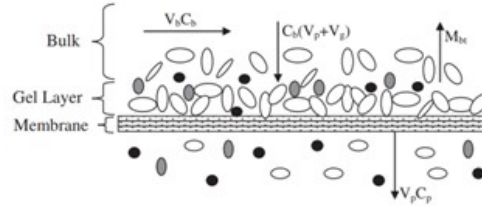


Figura 2.13: Esquema de fouling o ensuciamiento (Jadhav et al., 2016).

El ensuciamiento es un fenómeno complejo y, aunque se han llevado a cabo estudios de los mecanismos de ensuciamiento, hasta ahora sigue siendo difícil predecir qué mecanismo implica el funcionamiento de una membrana, dado que se involucra la interacción entre la solución de alimentación, propiedades de la membrana y las condiciones de operación. Sin embargo, los mecanismos de ensuciamiento están estrechamente relacionados con la polarización y la presión osmótica. La polarización de concentración es un proceso de acumulación de solutos retenidos en el límite de la membrana del lado de la alimentación, esta acumulación de inorgánicos u orgánicos aumentará la presión osmótica de la solución y conducirá a la reducción del flujo de permeado (Mohammad et al., 2015).

Los parámetros estudiados más importantes que influyen en el *fouling* son la rugosidad de la membrana, que aumenta la probabilidad de bloqueo de los poros; el tamaño de poro; la hidrofobicidad que determina su grado de humectabilidad, las membranas más hidrofóbicas muestran mayor estabilidad, pero mayor ensuciamiento; la carga de la membrana, la cual depende del material polimérico utilizado; los grupos funcionales; el método de fabricación; las propiedades de la solución de alimentación y concentración de soluto en la alimentación; pH de la alimentación; tipo de módulo; y condiciones hidrodinámicas a diferentes presiones transmembrana (Pino et al., 2018).

2.8. Calidad de aguas para diferentes usos

El tratamiento de las aguas de relaves en este trabajo persigue la reutilización de estas para diferentes usos, estos pueden ser ya sea la recirculación en el proceso, reutilización en riego agrícola, y como último objeto la descarga del agua al medio.

Es importante señalar que en Chile la tendencia de los tranques de relaves es a recircular sus aguas claras hacia la respectiva planta de procesos, con los estándares particulares que ella tenga. Por otro lado, para la descarga del agua, existen normas primarias de emisión que corresponden a:

- **D.S. MINSEGPRES N°90/00** que regula los contaminantes asociados a las descargas de residuos líquidos a aguas marinas y continentales superficiales.
- **D.S. MINSEGPRES N°46/02** que regula las descargas de los Residuos líquidos a Aguas Subterráneas.
- **D.S. MOP N°609/98** que regula los contaminantes descargados en los residuos industriales líquidos a sistemas de alcantarillado.

Además, existen resoluciones ambientales que marcan precedentes ambientales y normativos o guías para evaluaciones posteriores tal como el Decreto 80 (2006) que establece la norma de emisión para molibdeno y sulfatos de efluentes descargados desde tranques de relaves al Estero Carén.

Y finalmente las normas de riego agrícola (para los objetivos específicos del proyecto que se enfoca en el riego agrícola) expertos del área sugieren utilizar los parámetros de la Norma Chilena 1333 (NCh 1333) como comparativa.

2.8.1. Decreto Supremo 90 (2000): Descarga de riles a aguas marinas y continentales superficiales

El Decreto Supremo N° 90 del año 2000 establece la Norma de Emisión para la Regulación de Contaminantes Asociados a las Descargas de Residuos Líquidos a Aguas Marinas y Continentales Superficiales y tiene por objeto regular la descarga de contaminantes hacia cursos de aguas marinas y continentales superficiales mediante la fijación de límites máximos permisibles para la descarga de residuos líquidos, previniendo así de la contaminación de dichos cuerpos de agua. Establece que toda fuente que descargue sus residuos líquidos a uno o más cuerpos de agua, deberá caracterizar sus residuos líquidos a modo de evaluar si califica como fuente emisora y si queda sujeta al cumplimiento de la norma de emisión. Se aplica a Fuentes Emisoras Fijas, no contempla las difusas.

En la Tabla 2.5 se muestran los límites máximos permitidos para la descarga de residuos líquidos a cuerpos de aguas fluviales. Sin embargo, Las fuentes emisoras podrán aprovechar la capacidad de dilución del cuerpo receptor, incrementando las concentraciones límites establecidas en las tablas de acuerdo a la Fórmula 2.18.

$$C_i = T1_i \cdot (1 + d) \quad (2.18)$$

Tabla 2.5: Límites máximos permitidos de contaminantes para la descarga de residuos líquidos a cuerpos de aguas fluviales (Biblioteca del Congreso Nacional)

Contaminantes (Expresión)	Unidad	Limite Máximo Permitido
Aceites y Grasas (A y G)	mg/L	20
Aluminio (Al)	mg/L	5
Arsénico (As)	mg/L	0,5
Boro (B)	mg/L	0,75
Cadmio (Cd)	mg/L	0,01
Cianuro (CN ⁻)	mg/L	0,20
Cloruro (Cl ⁻)	mg/L	400
Cobre Total (Cu)	mg/L	1
Coliformes Fecales o Termotolerantes	NMP/100 ml	1.000
Índice de Fenol (Fenoles)	mg/L	0,5
Cromo Hexavalente (Cr ⁶⁺)	mg/L	0,05
DBO5	mg O ₂ /L	35
Sólidos Suspendidos Totales (SS)	mg/L	80
Sulfatos (SO ₄ ²⁻)	mg/L	1.000
Sulfuros (S ²⁻)	mg/L	1
Temperatura (T°)	C°	35
Tetracloroetano (C ₂ Cl ₄)	mg/L	0,04
Tolueno (C ₆ H ₅ CH ₃)	mg/L	0,7
Triclorometano (CHCl ₃)	mg/L	0,2
Xileno (C ₆ H ₄ C ₂ H ₆)	mg/L	0,5
Zinc (Zn)	mg/L	3
Fósforo (P)	mg/L	10
Fluoruro (F ⁻)	mg/L	1,5
Hidrocarburos Fijos (HF)	mg/L	10
Hierro Disuelto (Fe)	mg/L	5
Manganeso (Mn)	mg/L	0,3
Mercurio (Hg)	mg/L	0,001
Molibdeno (Mo)	mg/L	1
Níquel (Ni)	mg/L	0,2
Nitrógeno Total Kjeldahl (NKT)	mg/L	50
Pentaclorofenol (C ₆ OHCl ₅)	mg/L	0,009
PH	—	6.0 - 8,5
Plomo (Pb)	mg/L	0,05
Poder Espumógeno (PE)	mm	7
Selenio (Se)	mg/L	0,01

en que:

- C_i = Límite máximo permitido para el contaminante i.
- $T1_i$ = Límite máximo permitido establecido en la Tabla 2.5 para el contaminante i.
- d = Tasa de dilución del efluente vertido.

2.8.2. Decreto Supremo 80 (2006): Emisión de molibdeno y sulfatos desde Estero Carén

El Consejo Directivo de CONAMA, en el año 1998, aprobó el "Proyecto Definitivo de Norma de Emisión para la Regulación de Contaminantes Asociados a las Descargas de Residuos Líquidos a Aguas Marinas y Continentales Superficiales", que incluye normas especiales para regular el sulfato y el molibdeno en la zona del estero Carén, cuyas concentraciones máximas permitidas fueron aumentadas a los valores de la Tabla 2.6.

Tabla 2.6: Límites Máximos Permitidos para Descargas de Residuos Líquidos desde Tranques de Relaves al Estero Carén (Biblioteca del Congreso Nacional)

Elementos	Unidad	Limite Máximo Permitido
Molibdeno	mg/L	1,6
Sulfatos	mg/L	2.000

2.8.3. Norma Chilena 1333: Para riego agrícola

La norma NCh1333 (1987) ha sido preparada por la División de Normas del Instituto Nacional de Normalización y se estudió para fijar criterios de calidad de aguas de acuerdo a requerimientos científicos referidos a aspectos físicos, químicos y biológicos según su uso contribuyendo así a proteger y preservar la calidad de las aguas de contaminaciones con residuos de cualquier tipo y evitar la degradación del medio en que se usan. Está destinada a: Agua para consumo humano (Norma Chilena 409), agua para la bebida de animales (Norma Chilena 409 y casos especiales determinados por Autoridad competente), riego (Abordado en mas detalle posteriormente), recreación y estética y vida acuática.

En el caso del agua para riego, la norma establece los siguientes requisitos:

- Debe tener un pH comprendido entre 5.5 y 9.0.
- Valores máximos permisibles de concentración de elementos en la Tabla 2.7, sin embargo el Ministerio de Obras Públicas puede autorizar valores mayores o menores para dichos valores mediante Resolución fundada en casos calificados.
- Una Razón de adsorción de sodio (RAS) determinado por la Autoridad Competente.
- Valores de conductividad específica y Sólidos disueltos totales (TDS).
 - Conductividad menor a 750 [$\mu\text{S}/\text{cm}$] a 25°C o TDS menor a 500 [mg/l] a 105°C: Agua con la cual generalmente no se obserarán efectos perjudiciales.
 - Conductividad entre 750 y 1.500 [$\mu\text{S}/\text{cm}$] a 25°C o TDS entre 500 y 1.000 [mg/l] a 105°C: Agua que puede tener efectos perjudiciales en cultivos sensible.
 - Conductividad entre 1.500 y 3.000 [$\mu\text{S}/\text{cm}$] a 25°C o TDS entre 1.000 y 2.000 [mg/l] a 105°C: Agua que puede tener efectos adversos en muchos cultivos y necesita de métodos de manejo cuidadoso.

- Conductividad entre 3.000 y 7.500 [$\mu\text{S}/\text{cm}$] a 25°C o TDS entre 2.000 y 5.000 [mg/l] a 105°C: Agua que puede ser usada para plantas tolerantes en suelos permeables con métodos de manejo cuidadoso.
- Pesticidas: Herbicidas regidos por límites fijados por la Autoridad Competente e Insecticidas no se consideran para efectos de la norma.
- Finalmente, requisitos bacteriológicos, los cuales deben mantenerse menor o igual a 1,000 coliformes fecales / 100 ml.

Tabla 2.7: Concentraciones máximas de elementos en agua para riego (NCh 1333, 1987).

Elemento	Límite máximo [mg/l]
Aluminio (Al)	5.00
Arsénico (As)	0.10
Bario (Ba)	4.00
Berilio (Be)	0.10
Boro (B)	0.75
Cadmio (Cd)	0.01
Cianuro (CN^-)	0.20
Cloruro (Cl^-)	200.00
Cobalto (Co)	0.05
Cobre (Cu)	0.20
Cromo (Cr)	0.10
Fluoruro (F^-)	1.00
Hierro (Fe)	5.00
Litio (Li)	2.50
Litio cítricos (Li)	0.075
Manganeso (Mn)	0.20
Mercurio (Hg)	0.001
Molibdeno (Mo)	0.01
Níquel (Ni)	0.20
Plata (Ag)	0.20
Plomo (Pb)	5.00
Selenio (Se)	0.02
Sodio porcentual (Na)	35 %
Sulfato (SO_4^{2-})	250.00
Vanadio (V)	0.10
Zinc (Zn)	2.00

Capítulo 3

Metodología Experimental

En esta sección se detalla la metodología usada en las pruebas de desempeño del sistema de nanofiltración. La propuesta del método de nanofiltración para el tratamiento de las aguas claras de relaves responde a la caracterización de estas y sus componentes.

En primer lugar se realiza un análisis fisicoquímico de las aguas, con ello, y las concentraciones resultantes de dichos análisis, se concluye que las características del tratamiento para mejorar la calidad del agua debe priorizar un producto que posea un gran flujo y eficiente eliminación de iones, principalmente sulfatos, arsénico y otros aniones en solución. Según la sección Nanofiltración 2.7.2, el tratamiento mediante membranas de nanofiltración se ha probado en aguas con concentraciones variables de los elementos que componen estas aguas y consiguen su eliminación parcial a un menor costo de operación que otras como RO.

El estudio que se expone en este trabajo se enmarca en la investigación llevada a cabo en el Proyecto Sequía que busca alternativas viables al tratamiento de aguas claras de relave, explorando la viabilidad del tratamiento con NF como una de ellas.

Se cuenta con membranas de película fina o membranas de capa fina (TFC, de su sigla en inglés *Thin Film Composite*) de nanofiltración previamente usadas. Estas son un tipo de membrana compuesta por una capa densa y delgada de poliamida sobre un soporte asimétrico de polisulfona, constituidas por diferentes polímeros, la capa expuesta al fluido (capa activa) es la encargada de rechazar sales y proporcionar el rango de flujo deseado, mientras que la capa soporte le otorga la máxima resistencia de compresión y presión del fluido. Se caracterizan por una mayor capacidad para flujo de agua, separación de sales, resistencia a presión, rangos de operación para temperatura y pH, y estabilidad frente a ataques biológicos que las membranas de otro tipo, pero con baja resistencia a incrustaciones de partículas contenidas en el flujo de alimentación en la superficie, que disminuyen el flujo de permeado (Vicencio, 2015). Las membranas NF de material compuesto de película fina (TFC) contienen grupos ionizables (carboxilo, sulfónico y amina) que disocian fácilmente en presencia de ácidos o bases y esta disociación afecta la repulsión electrostática entre iones y la superficie de la membrana.

En la sección Materiales y Planta Piloto 3.1.1 se ofrecen las especificaciones técnicas de la membrana usada en particular.

3.1. Pruebas de desempeño del sistema de tratamiento propuesto: Nanofiltración

El objetivo 3 indica la realización de pruebas de tratamiento mediante procesos de separación por membranas de nanofiltración sobre aguas de relaves en una planta piloto, cuyas características se ofrecen en esta sección.

Para ello, el trabajo se divide en dos partes, o tipos de pruebas:

1. Pruebas de membrana en aguas sintéticas.

Elaboradas con contenidos de sulfato correspondiente a Ovejería (Límite alto y bajo), calculados según especiación de las aguas, como se detalla en Anexo A. Con el objetivo de obtener resultados preliminares que indiquen, primero, valores coherentes con estudios reportados anteriormente, segundo, tendencias coherentes con lo reportado, y finalmente, una suerte de calibración operativa requerida para futuras pruebas por parte de los ejecutores de ella.

2. Pruebas de membranas en Aguas de Relaves:

a) Aguas de Relave Ovejería.

b) Aguas de Relave Talabre.

3.1.1. Materiales y Planta Piloto

Se prueba una membrana comercial de Nanofiltration utilizando un sistema universal de filtración de flujo cruzado a escala de laboratorio, el equipo de investigación en donde se inserta este trabajo tiene experiencia en pruebas de membranas de Osmosis Inversa (RO), y la planta usada corresponde a este tipo.

En la Figura 3.1 se muestra el diagrama de la planta piloto adaptada para esta investigación el cual consiste en tanques de alimentación (Tanque 1 y 2) conectados a una bomba principal (Pump) que bombea el agua hacia el módulo de membrana, esta celda, y su correspondiente membrana, funciona a presiones entre 200-400 psi, presión que es regulada mediante una válvula (Válvula 3) que regula el flujo de recirculación al tanque de alimentación, midiéndose la presión de operación con el Barómetro 1. El sistema produce un flujo de permeado que pasa a través de la membrana, recolectado en el Tanque 4, y un flujo de rechazo, con agua concentrada (salmuera) recolectado en el Tanque 3.

La Figura 3.2 es una fotografía tomada de la planta en funcionamiento, en la cual se aprecian números asociados a cada componente, donde:

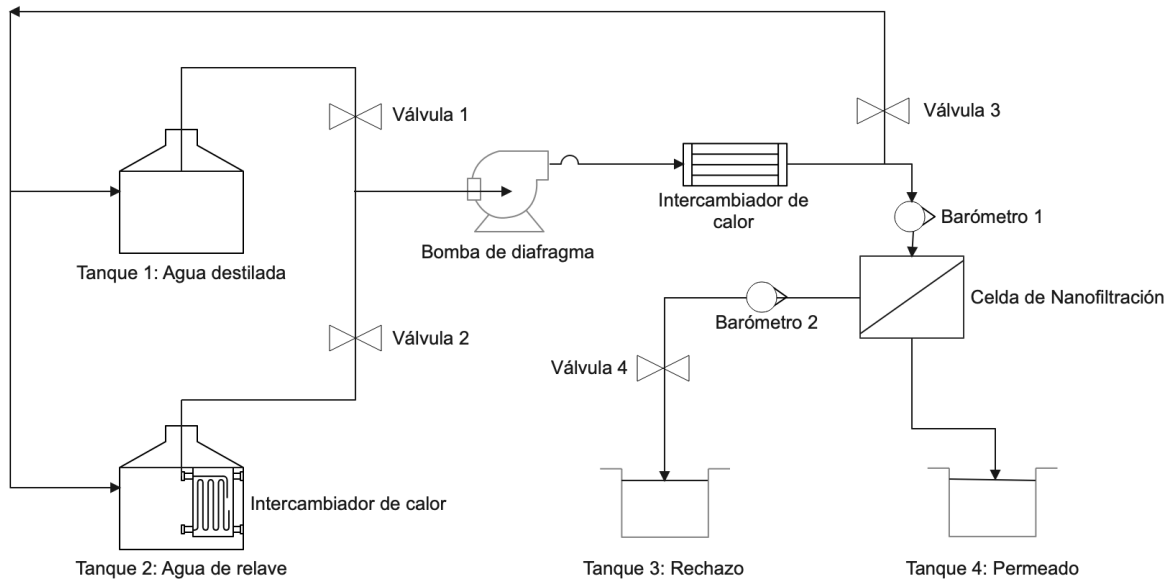


Figura 3.1: Diagrama planta piloto (Elaboración Propia)

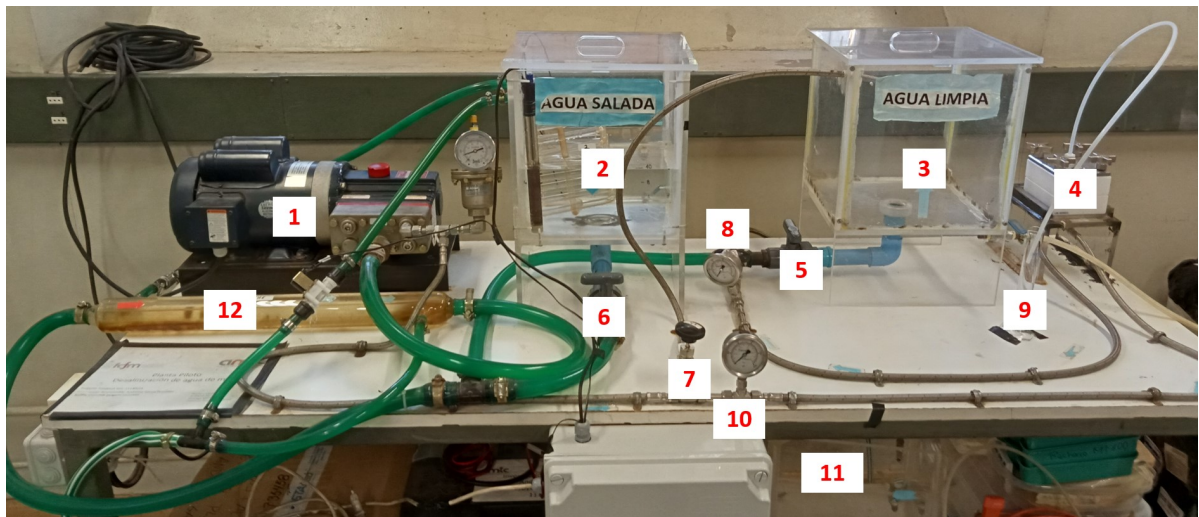


Figura 3.2: Fotografía de la planta piloto.

1. Bomba principal.
2. Tanque 1: Agua Ionizada.
3. Tanque 2: Agua Destilada.
4. Módulo de membrana.
5. Válvula 1 (control tanque de agua destilada).
6. Válvula 2 (control tanque de agua salada).
7. Válvula 3 (control de presión principal y recirculación).
8. Válvula 4 (control de presión del rechazo) y barómetro del rechazo (Barómetro 2).

9. Probeta de permeado.
10. Barómetro de presión principal (Barómetro 1).
11. Tanque de rechazo (Tanque 3).
12. Intercambiador de calor.

La membrana comercial, del proveedor "*Synder Filtration*", Modelo NDX, es una membrana polimérica compuesta de capa fina (TFC), con un límite de peso molecular de aproximadamente 500-700 Da. El fabricante proporciona el rechazo nominal de su membrana a 25°C, con una presión operacional de 110 psi de una alimentación de 2000 ppm de $MgSO_4$ y NaCl en 95 y 40 %, respectivamente.

El módulo usado consiste en la celda *Sterlitech* CF016 con un área efectiva de 20.6 cm², se indica una presión máxima de operación de 600 psi a una temperatura inferior a 35°C y de 435 psi para una mayor a dicho valor, sin embargo el límite está definido para un elemento compacto en espiral, y las pruebas experimentales se lleva a cabo en una celda sin el soporte de poliéster, solo con un separador (Spacer) y en una configuración de placa plana, en este sistema de filtración de flujo cruzado, las corrientes de alimentación fluyen tangencialmente sobre la superficie de membrana (como se muestra en la Figura 3.3), por lo anterior, las presiones de deformación de la membrana son menores, según recomendaciones de expertos de *Sterlitech* el rango seguro de trabajo para estas membranas en las celdas usadas varía de 400-500 psi, sin causar deformación en la membrana por falta de soporte. El rango de pH para la membrana está entre 4 - 10, la temperatura máxima es de 50°C.

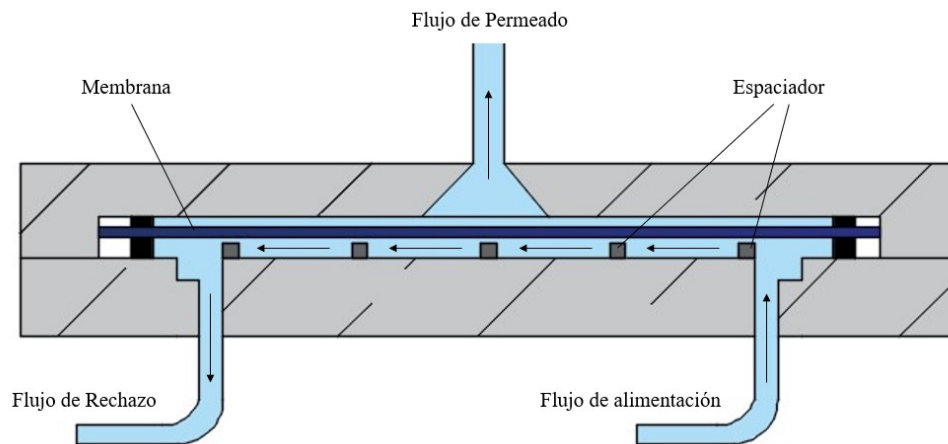


Figura 3.3: Diagrama: Corte transversal de módulo de membrana, sistema de filtración de flujo cruzado (Elaboración Propia).

En la Figura 3.3 se observa un diagrama de un corte transversal a el módulo, en el, parte de la corriente de alimentación penetrará a través de la membrana, lo que se conoce como permeado, mientras que el resto continuará fluyendo a través del sistema como concentrado o rechazo. En la Figura 3.4 se muestra una imagen real de la celda.

El resto del equipamiento (bomba, conductivímetro y pH-metro) se muestran en el Anexo C.



Figura 3.4: Celda CF042SS (STERLITECH).

3.1.2. Metodología de pruebas de desempeño de nanofiltración

Para las pruebas de desempeño del sistema de tratamiento de nanofiltración, se usa el protocolo descrito detalladamente en el Anexo D.

El set de pruebas que se realizará en tiempos de 3 horas, dada la experiencia previa del equipo de trabajo de membranas quienes proporcionaron la información de que en dicho período de tiempo se logra una estabilización de los parámetros de flujo y calidad de permeado, llegando a realizar pruebas de 5 horas que aseguren dicha estabilización, variando presiones entre 300 y 400 *psi*, dadas las recomendaciones del fabricante para la membrana utilizada.

Las pruebas fueron realizadas sobre las soluciones que se enumeran a continuación:

1. **Nanofiltración con aguas sintéticas.** Tiempo de prueba: 3 horas con 15 minutos.
 - a) Aguas sintéticas **Ovejería Límite Bajo.**
Preparando aguas sintéticas con sulfato de magnesio para obtener una salinidad de 2,000 ppm de sulfato disuelto, correspondiente al límite bajo de las aguas del Tanque Ovejería.
 - i. 300 *psi*, con duplicado.
 - ii. 400 *psi*, con duplicado.
 - b) Aguas sintéticas **Ovejería Límite Alto.**
Preparando aguas sintéticas con sulfato de magnesio para obtener una salinidad de 4,000 ppm de sulfato disuelto, correspondiente al límite alto de las aguas del Tanque Ovejería.
 - i. 300 *psi*.
 - ii. 400 *psi*.

En el documento "*Methods for preparing synthetic freshwaters*" de Schmith et al. (2002), establecen criterios y pautas de preparación de soluciones sintéticas a partir de reactivos base y agua fresca, en el Anexo B se resumen los ítems de mayor utilidad para el trabajo desarrollado.

En función de resultados preliminares de concentración de iones y pH realizado por la académica de la Facultad de Ciencias Agronómicas Yasna Tapia Fernández (Figura 4.8)

y la especiación de obtenida en *Visual Media* (Anexo A), se prepararon las soluciones sintéticas usando cantidades variables de sulfato de magnesio (MgSO_4), para cada agua. Las aguas generadas se preparan un día antes de la prueba y se almacenan en un recipiente sellado en un lugar fresco fuera de la luz solar directa.

2. **Nanofiltración con aguas de relave.** Tiempo de prueba: 3 horas con 15 minutos.

a) Aguas de **Tranque Ovejería.**

i. 300 psi, con duplicado.

ii. 400 psi, con duplicado.

b) Aguas de **Tranque Talabre.**

i. 300 psi, con duplicado.

ii. 400 psi, con duplicado.

3. **Nanofiltración con aguas de relave.** Tiempo de prueba: 5 horas.

a) Aguas de **Tranque Talabre.**

i. 400 psi, con duplicado.

De cada prueba se mide:

- Permeabilidad hidráulica de la membrana con agua limpia.
- Volumen de agua, conductividad y Temperatura de permeado y rechazo cada 15 minutos por 3.25 y 5 horas, usando probetas separadas por tiempo, para el rechazo se mide el pH y ORP también.
- Para las pruebas de calibración se mide el Volumen, pH, salinidad, conductividad y temperatura del acumulado de permeado y rechazo en las 3.25 horas.
- Cada 15 minutos, usando un conductímetro, se obtiene la conductividad y temperatura del tanque de alimentación.
- Las muestras se envían a laboratorio que mide pH y concentraciones iónicas de sulfato y As en el agua obtenida.

Posteriormente, con los datos de las mediciones se van obteniendo otros parámetros como el 3.1.3 Flujo de Permeado y 3.1.4 Permeabilidad Hidráulica que se explican a continuación y se sigue la 3.1.5 Norma ASTM para Nanofiltración, para los cálculos del desempeño de membranas.

3.1.3. Fuljo de Permeado

El flujo de permeado se define como el caudal, por unidad de área que pasa por la membrana en función del tiempo, y se calcula con la Fórmula 3.1.

$$J_v = \frac{V_p}{A_m \cdot t} \quad (3.1)$$

donde, V_p es el volumen de permeado que pasó en un tiempo determinado, t es el tiempo y A_m es el área efectiva de la membrana.

3.1.4. Permeabilidad Hidráulica

La permeabilidad hidráulica es una característica particular de cada membrana (dependiente principalmente del tamaño de poro) que determina la capacidad de la membrana de permitir el paso de agua, el cual se calcula pasando agua pura por la membrana a una presión. El coeficiente de permeabilidad hidráulica se calcula con la Fórmula 3.2.

$$k_w = \frac{J_w}{\Delta P} \quad (3.2)$$

Con ΔP igual a la presión aplicada sobre la membrana.

3.1.5. Norma ASTM para Nanofiltración

Basados en el "Standard Test Methods of Operating Characteristics of reverse Osmosis and Nanofiltration Devices" se calculan los parámetros de análisis a partir de la medición de flujos de permeado y rechazo y sus respectivas temperaturas y conductividades a determinados tiempos acumulados.

Según menciona la norma, para el cálculo del flujo de alimentación se usa la Fórmula 3.3.

$$Q_f = Q_p + Q_c \quad (3.3)$$

Donde

- Q_f = Flujo de alimentación.
- Q_p = Flujo de permeado.
- Q_c = Flujo de rechazo.

El flujo de permeado (Q_p) debe ser corregido usando un factor de corrección para llevarlo al estándar de temperatura de 25°C, este factor está tabulado y se puede aproximar a una corrección de 3% por grado de diferencia en caso de no tener dicho factor.

Luego, se calcula la Conversión con la Fórmula 3.4.

$$Conversion \% = \frac{Q_p \text{ corregido}}{Q_f} \cdot 100 \quad (3.4)$$

El paso de sales al permeado (*Salt Passage*) se puede calcular con la Fórmula 3.5.

$$Salt Passage \% = \frac{K_p}{K_f} \cdot 100 = \left(1 - \left(\frac{(K_f + K_c)}{2 \cdot K_f} \right) \right) \cdot 100 \quad (3.5)$$

Donde

- K_p = Concentración (Conductividad) del permeado.
- K_f = Concentración (Conductividad) de la alimentación.
- K_c = Conductividad del rechazo.

El uso de relaciones de conductividad para calcular el paso de sal da resultados ligeramente distintos en comparación con el uso de relaciones de análisis de iones de cloruro, sin embargo, para los rangos de concentración involucrados en el método, el error resultante no es significativo.

Por otro lado, el rechazo se calcula mediante la Fórmula 3.6.

$$Rechazo \% = \left(1 - \left(\frac{K_p}{K_f} \right) \right) \cdot 100 \quad (3.6)$$

3.1.6. Presión Osmótica

Luo y Wan (2013) proponen la Fórmula 3.7 de la presión osmótica ($\Delta\pi$) para incorporar la resistencia inducida por la capa polarizada y el ensuciamiento:

$$\Delta\pi = \sum_{i=0}^n (C_{bi} - C_{pi}) R \cdot T \quad (3.7)$$

donde C_{bi} y C_{pi} son las concentraciones de soluto i en la alimentación y el concentrado, respectivamente, R es la constante universal de los gases y T es la temperatura.

Capítulo 4

Resultados y Discusión

La composición de las aguas de relaves es producto de la composición del relave, o la mineralogía del yacimiento en su defecto, y los factores más relevantes de su procesamiento, tal como fue descrito en este documento. Por lo cual, se puede realizar un seguimiento de estas variables con el fin de encontrar relaciones significativas entre ellas.

Con una mirada global de la minería, basada en el análisis de producción de minerales y relaves de los países, se puede señalar que existe una relación entre la magnitud de la producción de *commodities* mineros, mostrado en la Tabla 4.1 y la producción de relaves de la Tabla 4.4, en particular si estos *commodities* pertenecen al grupo del cobre, oro e hierro de la Tabla 4.2, dado que se demostró que son tres de los elementos que más volumen de relaves han generado comparados con el resto de la minería metálica (Figura 2.6).

Tabla 4.1: Principales productores (Toneladas) de la minería en el mundo en el año 2017 (Reichl & Schatz, 2019)

ton/año País	Total (incl. Bauxita)	Metales Férricos	Metales No Ferrosos	Metales Preciosos	Minerales Industriales	Minerales Hidrocarburos
China	4.107.911.005	336.034.420	42.037.634	3.928.192	251.700	3.468.566.323
United States	2.013.644.488	30.121.340	3.093.279	1.271	91.394.000	1.888.682.498
Russia	1.610.817.380	59.885.306	4.758.067	1.684	32.035.383	1.508.036.940
Australia	1.271.899.033	552.248.614	3.728.548	1.415	17.868.765	608.631.102
India	984.418.011	127.260.800	4.376.355	560	47.683.319	782.784.296

Tabla 4.2: Países líderes de reservas mineras (2012) (Datasur, GFMS, es.statista)

Cobre		Oro		Hierro	
País	Mt/año (2019)	País	t/año (2018)	País	Mt/año (2020)
Chile	5.600	China	399,7	Australia	900
Perú	2.400	Australia	312,2	Brasil	380
China	1.600	Rusia	281,5	China	360
Estados Unidos	1.300	Estador Unidos	253,2	India	240
Rep. Democrática del Congo	1.300	Canadá	193,0	Rusia	100,0

Ahora, la data acerca de relaves es reciente, a partir del derrumbe del tranque de relaves en Brumadinho, Brasil, el cual dejó al menos a 259 personas fallecidas el 25 de enero de 2019 se ha

ido recopilando información, luego de que un grupo importante de inversionistas mineros gestó la Iniciativa de Seguridad de Minería y Relaves para Inversores, solicitando a 727 empresas mineras que cotizan en la bolsa, información detallada sobre sus depósitos de relaves. A diciembre de 2019, habrían respondido 332 empresas, de las cuales aproximadamente 100 tienen TSF y enviaron la información que se incorporó al "Global Tailing Report", los datos se ven representados en el mapa de la Figura 4.1.

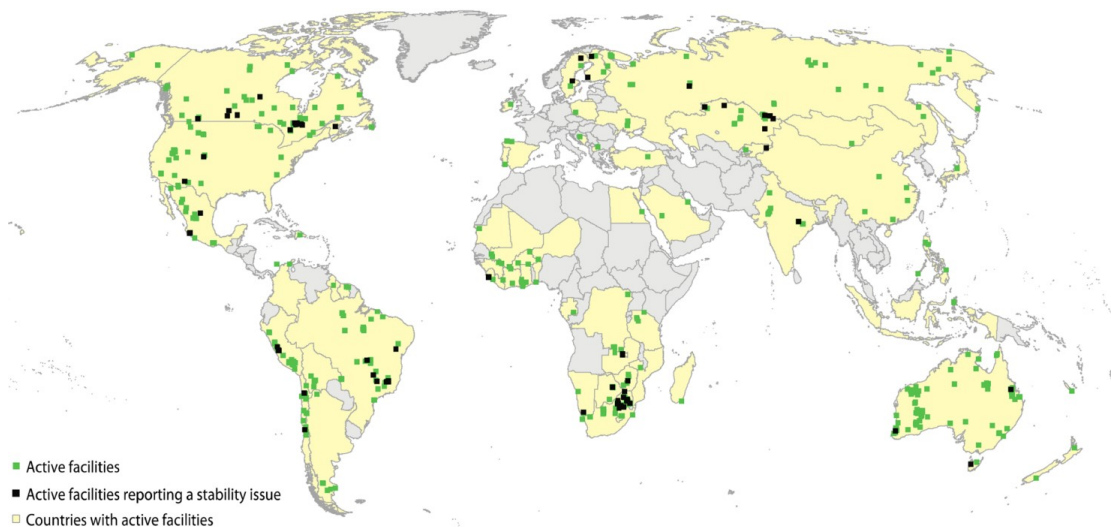


Figura 4.1: Mapa de instalaciones de relaves activas por región (grida.no).

En la figura se observa que existe una subrepresentación de las instalaciones en países como China, India, Chile o Rusia, donde una mayor proporción de empresas no cotizan en bolsa o no presentan registros de sus TSF. Al 2022, la base de datos informó sobre 1,743 TSF en todo el mundo, 725 de los cuales están activos, lo que es significativamente menor al número real de TSF en el mundo. Según la misma fuente, realmente existen entre los 3.500 y 30.000 relaves en el mundo, situando la encuesta en un 36 % de la producción global de productos básicos, además, el portal tampoco contiene información sobre el tipo de productos principales procesados que generaron los relaves en las TSF. Por ello, el *'World Mine Tailing Failature'* (WMTF, 2020) presentó una estimación con mayor precisión, dado que sus datos pertenecen a una documentación directa y citada, procedente de conteos oficiales reales por nación, que representan casi 3.000 estructuras, alrededor del 14 % de la cartera mundial total, se estima que entre el 50-60 % de los depósitos (14.500-17.500) están activos. La cuantificación del número de relaves por países, según datos oficiales, se muestra en la Tabla 4.4.

Tabla 4.3: Tabla de cuantificación de depósitos de relave (World Tailing Portfolio, 2020).

Total TSF por documentación acreditada	19.214
Estimación del porcentaje de la producción total en estudio	60 %
Ajuste del estimado total	32.023
Rango de error	29.000-35.000

Según esta documentación, el número de TSF asciende a 19.214 lo que representa el 60 % del total basado en datos de producción mundial de minerales y un total estimado entre 29.000-35.000 (Tabla 4.3).

Tabla 4.4: Compilado mundial de relaves (WMTF, 2020).

País	TSF	Fuente
Armenia	12	Laraurri 1986 World Collection
Brasi	769	agencia Nacional de Minería (ANM) 2019
Bulgaria	20	https://wwf.panda.org/
Canadá Brit. Columbia	130	Mine Tailings Dams: When Things Go Wrong. Tailings Dams 2000, Association of State Dam Safety Officials.
Chile	740	Sernageomin
China	12.566	We et. al., 2008
W. Australia	800	www.infomine.com/library/publications/
S. Australia	18	
India	-	
Kazakhstan	121	UNECE and Beyond Online-Seminar 12/01/20
Francia	109	www.geopolis.fr/EDYTEM/Coloque
México	-	
Filipinas	44	
Perú	115	Laraurri 1986 World Collection
Rusia	-	
Sudáfrica	400	Mine Tailings Dams: When Things Go Wrong. Tailings Dams 2000, Association of State Dam Safety Officials.
España	610	
Suecia	8	
Tayikistán	11	UNECE and Beyond Online-Seminar 12/01/20
Zimbawe	500	Mine Tailings Dams: When Things Go Wrong. Tailings Dams 2000, Association of State Dam Safety Officials.
Ucrania	475	UNECE and Beyond Online-Seminar 12/01/20
USA	1.635	Army Corps of Engineers NID 2019

La Figura 4.2 muestra los principales países productores de relaves catastrados. Haciendo el paralelo con la Tabla 4.1, lógicamente los principales productores mineros son también los principales productores de relaves, dado que alrededor del 95-99 % del material procesado se descarta como tal.

China es el principal productor de oro, el tercer principal productor de cobre y plata, es el único país que se encuentra en el top 5 mundial de productores de cobre, oro y hierro, más aún, China es el principal productor de más de 31 *commodities*, y segundo principal productor de 6 elementos, ubicándose como el productor minero y de relaves predominante en el mundo. Es por mucho el líder en este aspecto, a pesar de eso, no se ha cuantificado con claridad, ni se cuenta con una base de datos de relaves. De hecho, un estudio de Li et al.

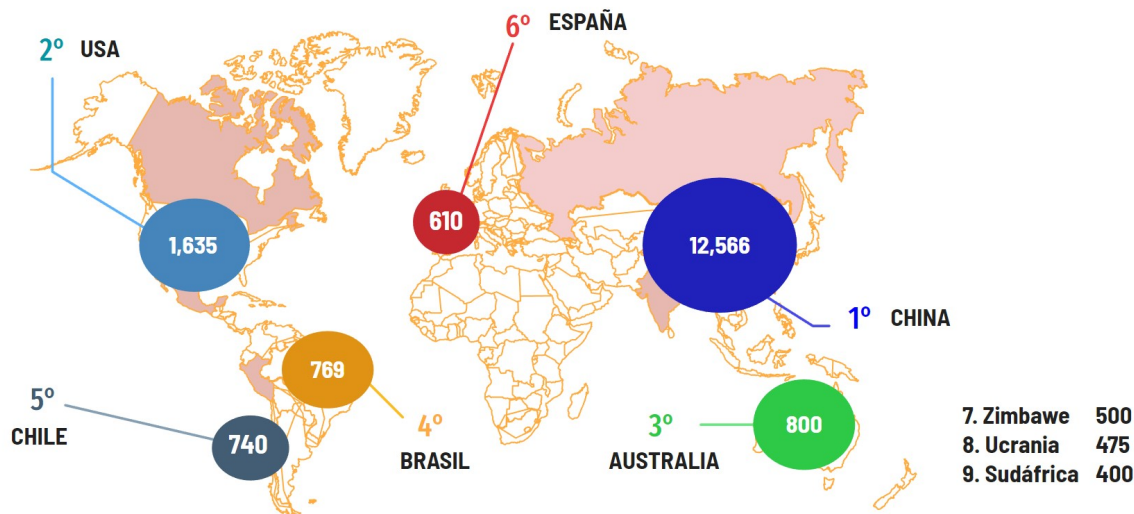


Figura 4.2: Mapa del número de relaves documentados en el mundo. En rojo, países con producción mineral importante pero sin base de datos.

(2020) encontró 2.221 represas de relaves solo en la región de Jing-Jin-Ji en el norte de China y Franks et al. (2021) menciona citas con estimaciones de 12.000 instalaciones solo en China, pero son inciertas metodológicamente dado que consideran relaves de minería no metálica.

Por otro lado, Chile se presentaría como uno de los países productores de relaves más importantes por la magnitud de su producción de cobre y oro, el número de TSF no necesariamente se condice con el volumen de relaves producidos, en donde Chile sacaría ventajas. Sun et al. (2010) afirma que la región circunpácífica es la provincia de mineralización de pórfidos de Cu más grande. El aumento de la producción de cobre es liderado por las 20 operaciones mineras de cobre más grandes del mundo, en el año 2016 la producción mundial de cobre extraído creció aproximadamente un 5,4% en relación al año anterior llegando a casi 19,92 Mt de cobre, aumento debido casi exclusivamente al aumento de la producción de 13 de estas minas líderes, lo que elevó la participación de las 20 principales al 40% de la producción mundial. Chile alberga ocho de las 20 minas principales con una producción combinada de 3,6 Mt, en la Figura 4.3 se muestran cuáles son y la ubicación que tienen.

Lo anterior tiene una gran relación con depósitos tipo pórfidos, los cuales ya fueron estudiados en detalle en la sección Tipos de yacimientos 2.3.1. Estos depósitos tienden a ocurrir en cinturones discontinuos, el más conocido es el cinturón que se extiende desde Canadá hasta el suroeste de los Estados Unidos, el norte de México, América Central y América del Sur a través de Perú, Chile y el oeste de Argentina. Otro cinturón de pórfido atraviesa Papua Nueva Guinea, Indonesia y Filipinas y continúa hasta China y partes de Siberia; y un tercero a través del sureste de Europa, Irán y Pakistán, en la Figura 4.4, A, B, C son regiones dominadas por depósitos de Cu; D, E son regiones dominadas por depósitos de Au. A, provincia de Chile central (El Teniente, Río Blanco-Los Bronces, Los Pelambres); B, provincia del norte de Chile (Chuquicamata, La Escondida, Radomiro Tomic, Rosario, El Salvador, El Abra); C, suroeste de la provincia de Arizona-Sonora (Cananea, Lone Star, Morenci-Metcalf, Pima, Ray); D, provincia de Papua Nueva Guinea-Irian Jaya (Grasberg, Ok Tedi, Panguna, Frieda River); E, provincia de Filipinas (Extremo Sudeste-Lepanto, Tampakan, Atlas, Sipalay).

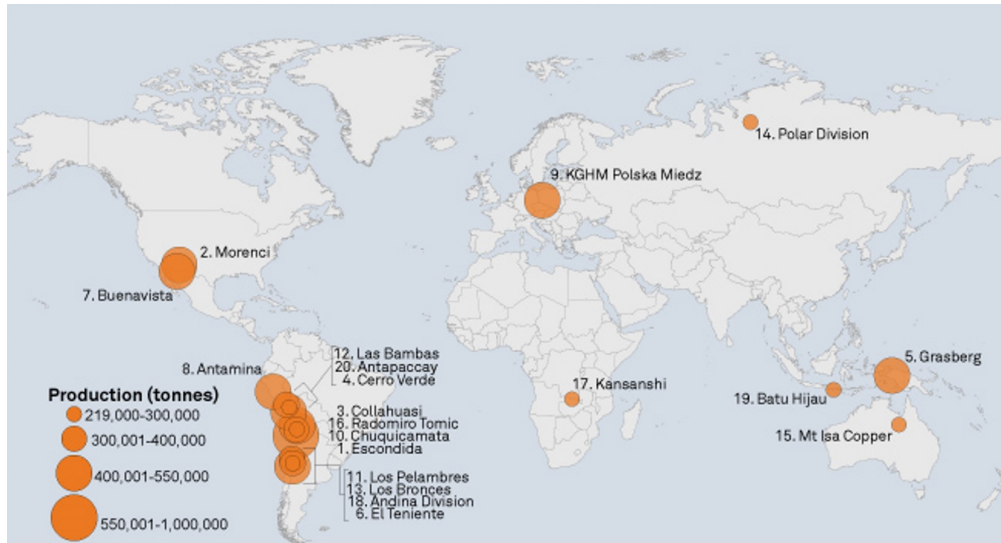


Figura 4.3: Minas de cobre más productivas del mundo (S&P Global, Market Intelligence, 2017).

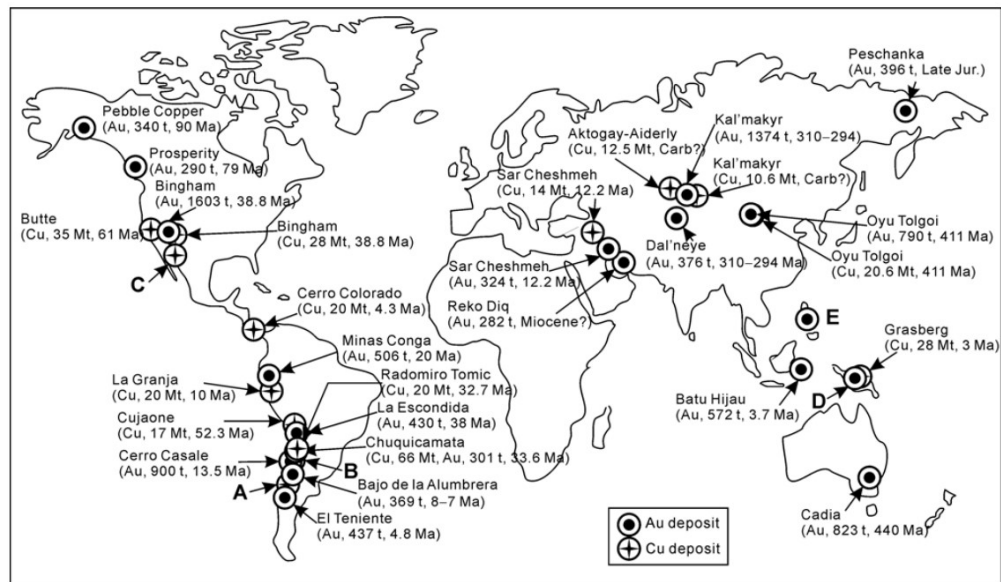


Figura 4.4: Distribución global de grandes depósitos de pórfido Cu-Au (Sun et al., 2010).

Lo anterior da cuenta de que la distribución de minas masivas se da en este tipo de regiones particularmente y, por ende, la producción de relaves tiende a dichos países como principales responsables. El número de instalaciones de relaves se duplicó entre 1955 y 1969 (14 años), se duplicó nuevamente entre 1969 y 1989 (20 años) y nuevamente entre 1989 y 2020 (31 años) (Franks et al., 2021). Extrapolando proporcionalmente los datos de las divulgaciones de la producción mundial de materias primas estimada por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), se producirían 10.000 millones de m³ de relaves adicionales por año planificadas durante 2019-2023 (Araya et al., 2020 y Franks et al., 2021).

4.1. Depósitos de relaves en Chile

Chile es el primer productor mundial de cobre y segundo de molibdeno (Sernageomin, 2020), produce cerca de 1,400,000 toneladas diarias de relaves mineros y existen 740 depósitos de relaves a lo largo del territorio, de los cuales en la Tabla 4.5 se encuentra el desglose de los activos, inactivos y abandonados catastrados por Sernageomin, de ellos, los depósitos tipo tranque y embalse son los más numerosos.

Tabla 4.5: Depósitos de relaves chilenos (Sernageomin, 2019).

Depósitos Convencionales				Depósitos No Convencionales			
Estado Actual	Embalses	Tranques	Pretilos	Pasta	Espesado	Filtrado	Dreim
Activos	41	44	0	4	6	6	0
Inactivos	71	392	1	0	1	3	1
Abandonados	6	164	0	0	0	0	0
Total	118	600	1	4	7	9	1

La mayor parte de la actividad minera está en el desierto de Atacama, la región de Antofagasta representa el 47 % del aporte a la actividad minera chilena al 2019. Hay 408 depósitos con tonelaje aprobado de más de 50.000 toneladas, destacando Laguna Seca de minera Escondida, Embalse Carén, y embalse Talabre de Codelco. En la Tabla 4.6 se muestran las dimensiones de cada uno.

Tabla 4.6: Depósitos con mayores dimensiones (Sernageomin, 2019).

Relave/Faena	Estado	Capacidad 2019 [Mt]	Capacidad Final [Mt]
Laguna Seca, Minera Escondida	Embalse Activo	1.180	4.500
Carén, D. El Teniente	Embalse Activo	1.843	3.288
Talabre, D. Chuquicamata	Tranque Activo	1.711	2.060

Según evidencia Ojeda & Campos-Medina (2021), se prevé que para el 2026 se producirán más de 915 millones de toneladas al año, 74 % más que en 2014, situando a Chile como el tercer país con más depósitos de ese tipo en el mundo, después de China y Estados Unidos (recordar que no todos los países llevan registro actualizado, ni consideran un estándar). Los depósitos se encuentran en 10 de las 16 regiones del país, siendo las regiones de Atacama, Coquimbo y Valparaíso, donde se concentra el 85 % del total (Figura 4.5), lo cual no considera los volúmenes de dichas instalaciones.

Los investigadores del Laboratorio de Sociología Territorial (LST) de la Universidad de Chile, identificaron la existencia de cuatro conglomerados de cuadrantes comprobando que, a nivel global o general, no solo existen densidades, sino que también patrones socioterritoriales de ubicación, según los investigadores, se puede estudiar conjuntos de depósitos de relaves agrupados según su influencia directa en los territorios.

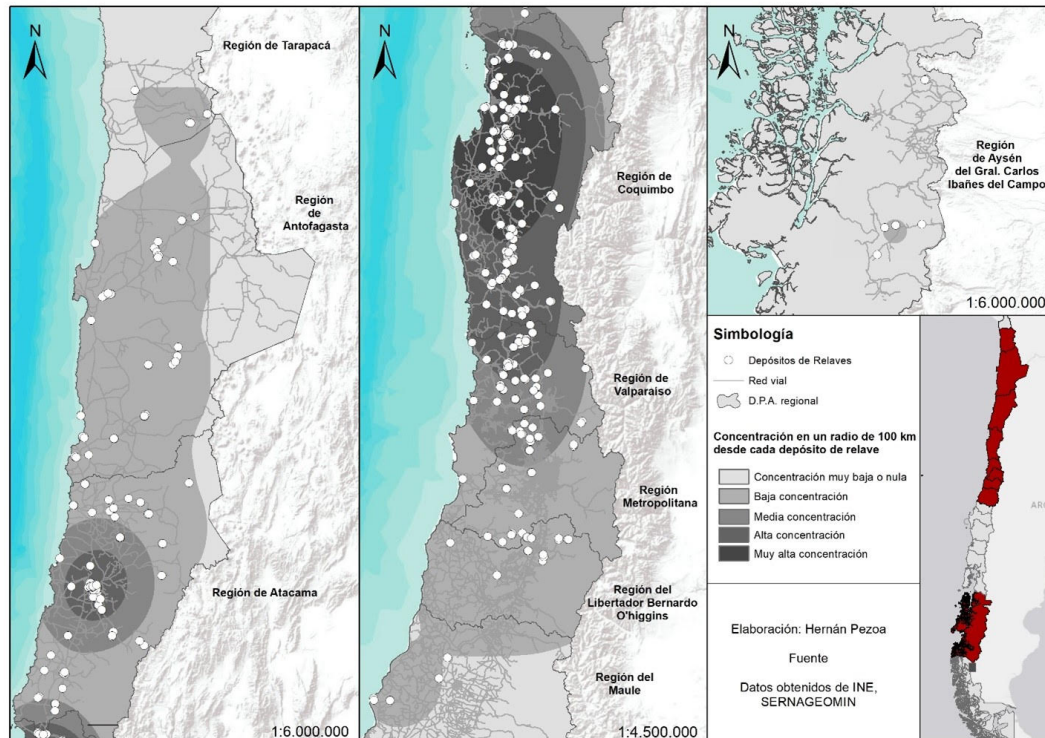


Figura 4.5: Depósitos por región (Ojeda & Campos-Medina, 2021)

Se considera atinente para el estudio analizar las composiciones mineralógicas y químicas de los relaves chilenos para caracterizar a nivel general su formación y con ello predecir aquellos elementos que en su presencia puedan generar daños ambientales tras su depositación y luego, poder establecer regiones o cuadrantes, donde exista una acumulación de relaves en un espacio, tales que ellos puedan compartir características geoquímicas y poder poner foco en dichos elementos al realizar una evaluación ambiental del tranque de relaves. Como se muestra en la Figura 4.6, los cuadrantes que se definen, y los criterios de elección, quedan como:

- I Cuadrante: Mayor actividad minera (47% de los aportes de la minería).
- II Cuadrante: Región de Atacama donde se observa otro clúster.
- III Cuadrante: Regiones de Coquimbo y Valparaíso (85% de los relaves), con presencia de lluvia.
- IV Cuadrante: Metropolitana y O´Higgins, sector andino con precipitaciones y presencia de lluvias e hielo.
- V Cuadrante: Aysén, comprende 3 faenas en el extremo sur de Chile (fuera de estudio).

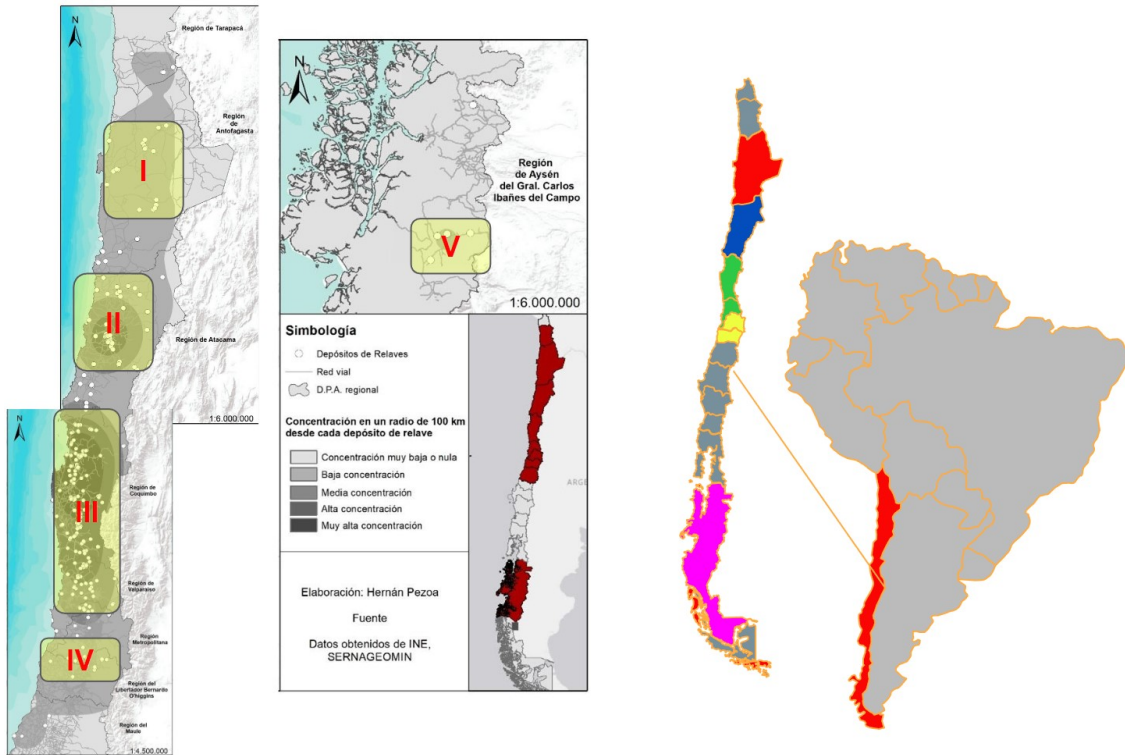


Figura 4.6: Mapa cuadrantes (modificado de Campos-Medina, 2021).

La composición química de los relaves está disponible en la página web del Servicio Nacional de Geología y Minería de Chile, base de datos que contiene información de:

- 12 elementos mayores, formadores de los minerales expresados como:
 - Óxidos de silicio (SiO_2), Aluminio (Al_2O_3), Titanio (TiO_2), Hierro (Fe_2O_3), Calcio (CaO), Magnesio (MgO), Manganeseo (MnO), Sodio (Na_2O), Potasio (K_2O), Fósforo (P_2O_5), Azufre (SO_3), compuestos perdidos por calcinación (PPC, como carbonatos, por ejemplo).
- Contenido porcentual de azufre (S).
- 30 elementos comunes en trazas (debajo de 1 %): cobre (Cu), Vanadio (V), cromo (Cr), cobalto (Co), Niquel (Ni), Zinc (Zn), Rubidio (Rb), estroncio (Sr), circonio (Zr), niobio (Nb), bario (Ba), plomo (Pb), cesio (Cs), hafnio (Hf), tantalio (Ta), arsénido (As), escandio (Sc), itrio (Y), molibdeno (Mo), antimonio (Sb), estaño (Sn), torio (Th), plata (Ag), cadmio (Cd), bismuto (Bi), wolframio (W), uranio (U), oro (Au) y mercurio (Hg).
- 14 tierras raras elementales: Lantano (La), cerio (Ce), prasedimio (Pr), neodimio (Nd), sanario (Sm), europio (Eu), gadolinio (Gd), terbio (Tb), disprosio (Dy), holmio (Ho), erbio (Er), tulio (Tm), iterbio (Yb) y lutecio (Lu).
- Se agrega además el total de elementos mayores por simple suma.

Según Sernageomin, al promediar la suma de los elementos mayores formadores de los minerales que constituyen las rocas, dan cuenta del 99,01% de la masa total de las muestras

de los relaves depositados. Los elementos mayores son inocuos en términos ambientales, pero el resto (1 % aproximadamente) podrían generar una concentración peligrosa desde el punto de vista de los ecosistemas y la salud humana. Este 1 %, se puede contabilizar al sumar los promedios de los metales, metloides, no metales, y los promedios de las tierras raras (se totalizan en 0,01 % aproximadamente). Sin embargo, estos valores deben tomarse solo como indicaciones generales, especialmente porque la mineralogía de los materiales no se conoce y la adición directa de concentraciones de óxidos podría sufrir errores si se observa una mineralogía particular.

En los datos clasificados por Sernageomin se encuentran formas de minería de cobre (Cobre, Cobre-oro, Cobre-Molibdeno, Cobre-Oro-Plata, Cobre-Plata-Oro y Cobre-Oro-Fierro) y de Oro (Oro, Oro-Cobre, Oro-Cobre-Plata, Oro-Plata y Oro-Zinc), además, existen registros de otras formas de minería (Hierro, Zinc y Zinc-Cobre). Subdividiendo los datos por dichos grupos, las distribuciones porcentuales de estos minerales se encuentran en la Figura 4.7, en ella se observa una predominancia en la sílice presente en general, seguido de Fe_2O_3 (con significativa concentración en relaves de hierro) y Al_2O_3 debido al tipo de minerales procesados.

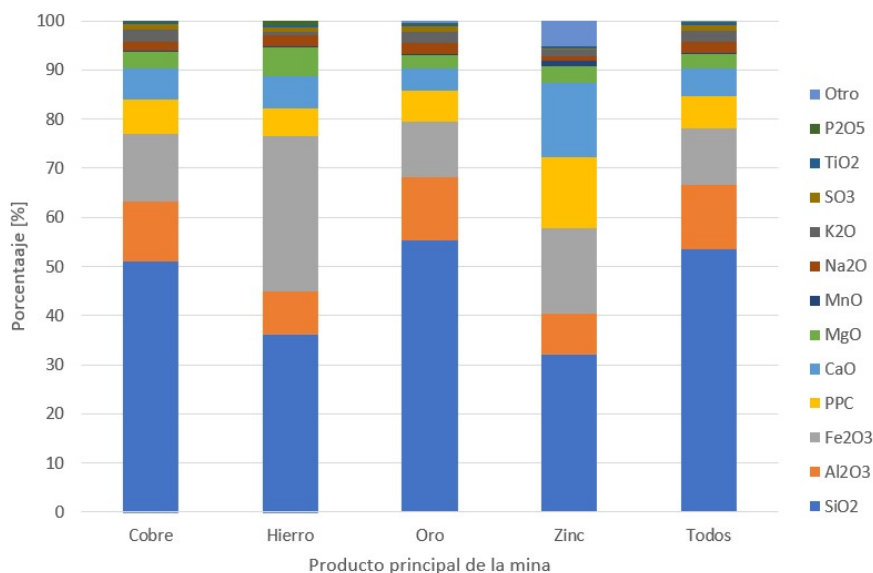


Figura 4.7: Composición mineralógica de relaves en Chile, subdivididos por recurso extraído (Sernageomin, 2020).

Tabla 4.7: Contenido de azufre promedio en relaves por tipo de mina (Sernageomin, 2020)

Recurso de la mina	S Total(%)	
	Media	Desviación
Cobre	0.86	1.46
Hierro	1.83	2.10
Oro	0.80	1.12
Zinc	1.87	1.87
Todos	0.80	1.20

Además, Senrageomin entrega el contenido de azufre presente en los relaves depositados (Tabla 4.7), el cual está contenido, según se explica, en los sulfuros presentes en el, de los cuales la mayoría es atribuido a la pirita.

A continuación, en la Tabla 4.8 se muestran los promedios y C.V. por cuadrante de cada elemento para relaves de yacimiento de cobre.

Tabla 4.8: Concentraciones de elementos en yacimientos de cobre (Senrageomin, 2020).

	Grupo									
	Total		1		2		3		4	
	Promedio	C.V.	Promedio	C.V.	Promedio	C.V.	Promedio	C.V.	Promedio	C.V.
Cu	2631.0	1.1	3367.7	0.8	2350.9	1.2	2614.5	1.0	2511.7	1.6
V	138.1	0.6	127.0	0.5	110.6	0.5	147.1	0.6	152.9	0.4
Cr	332.8	16.3	126.8	1.2	1235.8	9.6	87.0	1.4	106.5	0.6
Co	38.4	1.9	27.7	0.7	85.2	1.6	26.9	1.3	14.7	0.5
Ni	51.4	0.7	52.4	0.8	42.5	1.1	53.4	0.6	58.4	0.6
Zn	1145.4	3.1	4054.0	2.0	440.6	2.7	856.6	3.1	1985.7	2.6
Rb	70.1	0.8	70.9	1.0	58.0	0.8	67.9	0.8	123.6	0.5
Sr	177.9	1.3	225.6	0.8	108.4	1.0	200.1	1.3	144.2	0.6
Y	50.3	3.9	43.7	0.4	127.0	3.8	33.6	0.5	43.3	0.3
Zr	187.3	0.6	262.7	0.5	177.1	0.6	174.9	0.6	224.0	0.5
Nb	14.2	0.7	16.4	0.8	14.2	0.7	13.4	0.6	17.8	0.4
Ba	2538.0	3.9	1764.4	1.7	477.2	1.3	3570.9	3.5	435.1	0.9
Pb	460.9	2.4	1395.4	2.2	428.1	1.2	324.7	2.0	594.7	1.3
Sc	18.4	0.4	19.8	0.3	17.4	0.4	18.1	0.4	21.8	0.4
Cs	3.8	2.0	2.1	0.8	2.1	1.0	4.4	2.1	5.3	0.5
Hf	3.1	0.5	3.6	0.4	2.9	0.6	3.1	0.5	3.5	0.4
Ta	2.2	4.4	1.1	1.3	1.2	2.5	2.9	4.4	2.2	1.6
Th	3.5	1.0	6.2	1.3	2.8	0.7	3.2	0.8	4.3	0.6
U	1.9	1.2	2.6	1.3	2.1	1.4	1.7	1.1	1.6	0.4
As	652.3	1.6	1926.3	1.1	377.9	1.2	534.7	1.5	481.5	1.0
Mo	53.5	2.6	200.7	1.7	50.8	2.8	29.8	2.3	79.8	0.8
Sb	100.0	3.1	489.4	1.7	61.4	1.6	69.5	3.1	39.8	1.3
Sn	48.6	0.5	56.3	0.5	47.9	0.4	48.3	0.5	42.1	0.6
Ag	14.4	2.5	15.5	0.6	22.4	3.7	12.7	0.9	8.8	1.0
Cd	5.5	0.9	6.0	0.8	4.4	0.6	5.3	0.8	10.1	1.2
Bi	71.0	1.3	185.6	1.3	132.9	1.1	35.2	1.1	60.2	0.2
W	63.5	2.8	42.1	0.6	60.3	1.7	70.0	3.1	52.2	0.6
La	21.3	2.3	36.8	2.6	15.3	1.3	22.3	2.1	12.3	0.4
Ce	33.1	1.3	58.7	1.8	30.5	1.1	31.4	1.0	25.1	0.3
Pr	4.0	1.0	6.1	1.2	3.6	0.9	3.9	1.0	3.2	0.4
Nd	15.7	0.9	23.2	0.9	13.7	0.8	15.7	0.9	13.2	0.4
Sm	3.2	0.8	4.2	0.6	2.7	0.8	3.3	0.8	2.8	0.4
Eu	1.0	1.0	1.1	0.5	0.7	0.8	1.1	1.1	0.8	0.5
Gd	3.0	0.8	3.9	0.5	2.6	1.0	3.1	0.8	2.4	0.4
Tb	0.4	0.8	0.5	0.5	0.4	1.3	0.4	0.7	0.3	0.4
Dy	2.3	0.9	2.7	0.5	2.1	1.4	2.4	0.7	1.6	0.5
Ho	0.5	0.9	0.6	0.5	0.4	1.4	0.5	0.7	0.4	1.1
Er	1.3	0.8	1.7	0.5	1.3	1.3	1.4	0.7	0.9	0.5
Tm	0.2	0.8	0.2	0.5	0.2	1.2	0.2	0.7	0.1	0.6
Yb	1.2	0.8	1.5	0.5	1.2	1.1	1.2	0.7	0.8	0.6
Lu	0.2	0.8	0.2	0.5	0.2	1.0	0.2	0.7	0.1	0.7
Au	0.0	0.7	0.0	0.4	0.0	0.5	0.0	0.7	0.0	0.0
Hg	1.6	2.7	0.3	1.2	0.9	1.9	2.0	2.5	0.3	1.5

Se centra el análisis en los datos de los relaves producidos por la minería del cobre, con 311 relaves catastrados. De la composición mineral de la cubeta de relaves (Figura 4.7) se observa que los relaves de la minería del cobre y oro, la composición mineralógica porcentual es similar, con altos contenidos de sílice seguidos de hematita y alunita (casi en la misma proporción), esto se da por el tipo de formaciones predominantes en Chile del tipo pórfido cuprífero.

En su mayoría, las concentraciones elementales son mayores en los tranques activos. Sin embargo, destaca el arsénico como un elemento que supera la concentración en relaves inactivos y abandonados. Los contenidos de azufre porcentual se mantienen en alrededor de 0.8 %, lo cual se atribuye en su mayoría a la pirita, que como se aborda a lo largo del documento varía su contenido entre 1-3 % en peso en los yacimientos y ~54 % de S en su composición, lo cual se condice con el valor.

Existe una relación geológica de los yacimientos del norte de Chile con el contenido de arsénico promedio, con concentraciones en algunas faenas que representan problemas ambientales. Como se observa en la Tabla 4.8, los relaves que comprenden el primer cuadrante definido (Antofagasta) presentan concentraciones mucho más grandes que el resto.

El coeficiente de correlación permite comparar la variabilidad de distintos conjuntos de datos con distintas medias, y mientras menor sea, la media es más representativa de la distribución. Aquellos elementos que presentan mayor variabilidad son el cromo, el cual presenta un C.V. de 18,4, en segundo lugar el As con 10,5, el zinc y el tántalo con 7,7 y 7,4, respectivamente. En general, se suele asumir que para un C.V. mayor a 1, los datos tienen una variabilidad considerable, los elementos que tienen un C.V. de dos cifras están fuera de toda distribución, e indica que, independiente de su media, estos elementos presentan una concentración de elementos particular asociada a cada yacimiento, así como que su media no es representativa de la población. En particular, el arsénico, como se analizó ya, presenta concentraciones muy altas en el norte de Chile, en regiones como la de Antofagasta, donde la mayoría de los yacimientos están asociados a este elemento.

Cuando se analiza por cuadrantes, los C.V. asociados cada elemento disminuyen respecto del total, lo que quiere decir que la distribución geográfica de los yacimientos podría dominar (en cierta escala) la composición elemental de los relaves. La mayor fuente de variabilidad se encuentra en el segundo cuadrante, donde los valores de C.V. son muy cercanos al total para algunos elementos.

4.2. Casos de Estudio

Tal como se enuncia previamente, el objetivo de esta sección es caracterizar fisicoquímicamente las aguas claras de los Tranque de Relaves Ovejería y Embalse de relaves Talabre. Como antecedente de esto, evaluado en el anteproyecto, se cuenta con una caracterización preliminar mostrada en la tabla de la Figura 4.8. Para entender la composición de las aguas de cada tranque, se revisa el yacimiento del cual se extraen los minerales procesados, el procesamiento, la zona del tranque, y finalmente las reacciones que pueden estar ocurriendo en el.

	Tailing water Ovejeria (CODELCO DAND)¹	Tailing water Talabre (CODELCO, Ministro Hales)²	NCh 1333 1987	DS90 2001
pH	7.8-9.1	6.2-10.2	5.5-9.0	6.0-8.5
EC (mS cm⁻¹)	3.32-3.39	-	0.75-7.5	-
TDS (mg L⁻¹)	3120-3628	-	2000	-
Al (mg L⁻¹)	0.57-0.24	0.01-23.3	5.0	5.0
As (mg L⁻¹)	0.0106-0.0129	0.014-98.13	0.10	0.50
B (mg L⁻¹)	0.33-0.71	3.58-147.6	0.75	0.75
Cd (mg L⁻¹)	0.0010-0.0115	nd-1.0	0.010	0.010
Cl (mg L⁻¹)	67-134	309-10281	200	400
Cr (mg L⁻¹)	nd-0.00093	0.004-40.2	0.10	0.05
Cu (mg L⁻¹)	nd-0.016	0.005-177	0.20	1.00
Fe (mg L⁻¹)	<0.02-0.23	1.27-376	5.00	5.00
Hg (mg L⁻¹)	<0.00013	-	0.001	0.001
Mn (mg L⁻¹)	<0.016	0.003-349	0.20	0.30
Mo (mg L⁻¹)	0.765-0.815	0.08-16.0	0.010	1.0
Na (%)	13-18	69-70	35	-
SO₄²⁻(mg L⁻¹)	1985-3130	356-7260	250	1000
Pb (mg L⁻¹)	nd-0.0009	-	5.00	0.05
Zn (mg L⁻¹)	<0.022	0.013-108	2.00	3.0

Figura 4.8: Composición química de las aguas de relave del tranque Ovejería (Codelco) y acuíferos superficiales (Río Loa) en el entorno del embalse Talabre (División Ministro Hales de Codelco) con las normas chilenas de aguas para diferentes usos (NCh1333) y aguas para descarga de residuos líquidos a aguas superficiales marinas y continentales (DS90).

Dependiendo de las zonas en que estos se encuentren, los minerales reaccionan de manera distintas a climas áridos y desérticos, como a climas lluviosos y húmedos, por ello, en la Figura 4.9 se identifican zonas climáticas de Chile.

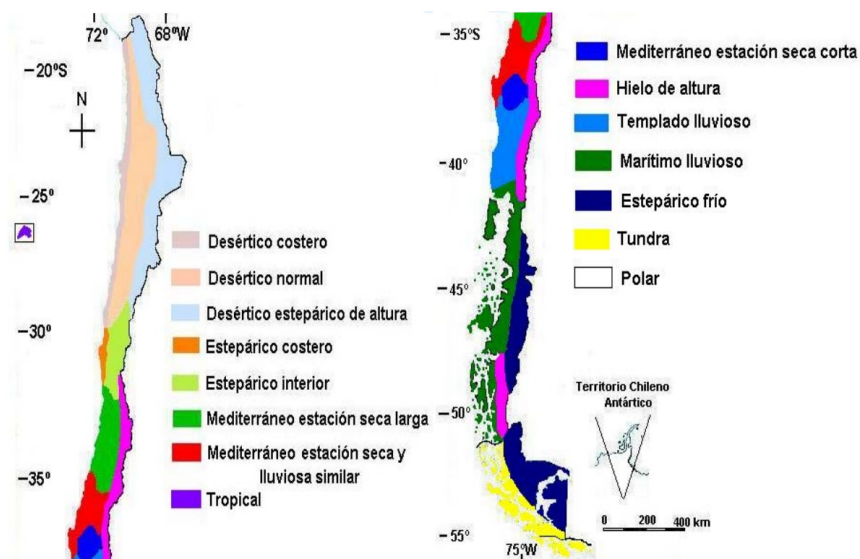


Figura 4.9: Esquema de Köppen: Climas de Chile (Inzunza, 2019).

4.2.1. Composición de aguas de relaves en estudio

Para caracterizar las aguas recuperadas de los relaves de los casos de estudio (Talabre y Ovejería), en primera instancia, se realiza un análisis de aniones por cromatografía iónica para obtener resultados preliminares de los valores de sulfato, los cuales arrojaron:

- Talabre: 3.064 [mg/L].
- Ovejería: 2.112 [mg/L].

Luego, se enviaron muestras a análisis ICP de aniones y trazas al Laboratorio de Geoquímica de Fluidos del Centro de Excelencia en Geoteria de los Andes (CEGA). Para el análisis de aniones se usó un Cromatógrafo Iónico Thermo Scientific Dionex ICS-2100 con columna Dionex IonPacTM AS11-HC RFICTM analytical 4 x 250 mm, pre-columna Dionex IonPacTM AG11-HC RFICTM 4 x 50 mm y detector de conductividad. Para el análisis de trazas, espectrometría de masas cuadrupolo con fuente de plasma de acoplamiento inductivo y celda de colisión, Thermo Scientific ICP-MS Q iCAP Q. Los resultados respectivos se encuentran en las Tablas 4.9 y 4.10.

Tabla 4.9: Resultados de análisis de aniones en aguas de relave.

Muestra	Fluoruro [mg/L]	Cloruro [mg/L]	Sulfato [mg/L]	Bromuro [mg/L]	Nitrato [mg/L]	Fosfato [mg/L]
Talabre	3,44	2.147,68	3.057,64	< 0,02	93,39	3,91
Ovejería	1,43	133,69	2.119,69	< 0,02	2,92	< 0,085
Multi-Anión	10,04 (10,0)	9,56 (10,0)	9,21 (10,0)	9,24 (10,0)	9,29 (10,0)	8,29 (10,0)
LOD	0,005	0,015	0,015	0,005	0,01	0,03
LOQ	0,02	0,04	0,05	0,02	0,25	0,085

Tabla 4.10: Resultados de análisis de cationes trazas en aguas de relave.

Muestra	Talabre	Ovejería	Solución de Referencia* Multi-Anión	LOD	LOQ
Li [ug/L]	3.583,8	4,4	0.4779 (0.4066)	0,02	0,06
Be [ug/L]	<0,05	<0,05	2,890 (3,026)	0,002	0,01
B [ug/L]	20.321,2	387,8	293,6 (303,1)	0,07	0,25
Al [ug/L]	< 1	< 1	51,2 (53,0)	0,06	0,2
V [ug/L]	38,8	< 3	14,19 (15,05)	0,2	0,6
Cr [ug/L]	<0,35	< 0,35	38,59 (40,54)	0,02	0,07
Fe [ug/L]	25	< 15	49,31 (36,80)	1	3
Mn [ug/L]	5,5	< 0,05	38,71 (40,39)	0,004	0,01
Co [ug/L]	4,21	3,41	19,38 (20,24)	0,005	0,02
Ni [ug/L]	50,7	42,75	23,90 (25,32)	0,03	0,1
Cu [ug/L]	40,17	6,18	81,27 (85,25)	0,05	0,2
Zn [ug/L]	<3,5	<3,5	51,08 (55,64)	0,2	0,7
As [ug/L]	31.406	10,5	7,584 (8,075)	0,02	0,06
Se [ug/L]	40,49	<1,5	18,11 (20,13)	0,08	0,3
Rb [ug/L]	234,13	138,62	1,239 (1,198)	0,001	0,004
Sr [ug/L]	8.100,47	3.564,7	124,51 (126,03)	0,001	0,004
Zr [ug/L]	92,51	< 0,05	n.r.	0,002	0,01
Mo [ug/L]	4.574,84	687,35	45,21 (45,60)	0,002	0,01
Ag [ug/L]	< 0,015	< 0,015	7,738 (8,081)	0,001	0,003
Cd [ug/L]	11,59	1,72	3,952 (3,992)	0,001	0,004
Sn [ug/L]	< 0,05	< 0,05	n.r.	0,004	0,01
Sb [ug/L]	540,73	11,82	5,015 (5,105)	0,003	0,01
Cs [ug/L]	37,667	3,361	n.r.	0,0004	0,001
Ba [ug/L]	51,41	66,14	151,88 (151,80)	0,01	0,02
W [ug/L]	222,59	12	n.r.	0,004	0,01
Pb [ug/L]	< 0,05	0,9	12,209 (12,101)	0,002	0,01
U [ug/L]	1,487	3,34	26,21 (25,35)	0,0002	0,001

Siendo

- * Soluciones estándares o de referencias leídas como muestra, Valor entre paréntesis corresponde al valor esperado.
- LOD = límite de detección.
- LOQ = límite de cuantificación.
- n.r.= no reportado.

Finalmente, las soluciones de alimentación, provenientes de las aguas de los relaves de Talabre fueron medidas también por método colorimétrico, para obtener el contenido de arsénico, donde se obtiene una concentración promedio de **24.000 ppb de As total**.

4.2.2. Tranque de Relaves Ovejería

Este depósito de relaves ubicado en la Comuna de Til Til, Región Metropolitana, cercano al poblado de Huechún, a unos 3 km de la Granja Ovina, la cual desarrolla actividad agrícola a través del cultivo de nueces, granadas, ciruelas y viñedos. El depósito se encuentra a una altura de aproximadamente 600 msnm, recibiendo relaves desde la planta concentradora de la División Andina Codelco a 2.500 msnm aproximadamente. El clima en la zona del tranque se caracteriza por ser húmedo o mediterráneo con altas precipitaciones, por lo cual, la dirección de movilización de los elementos en el tranque es hacia abajo y como resultado la mineralogía secundaria está dominada por la hidrólisis (principal proceso generador de protones).

Corresponde a un tranque de relaves Convencional, contruido por el método de aguas abajo, cuenta con un muro Principal y Muro Este separados por el cerro El Chivato (Figura 4.10). El depósito inició operaciones en Diciembre de 1999 y su vida útil se proyecta hasta 2054, cubre actualmente cerca de 850 hectáreas de superficie, acumulando 533 millones de toneladas secas, correspondiente al 28% de la capacidad total según informa la Plataforma de Relaves del Consejo Minero (consejominero.cl/comunicaciones/plataforma-de-relaves/).



Figura 4.10: Vista satelital de Tranque de Relaves Ovejería (relaves.org).

El Tranque de Relaves de Ovejería recibe alrededor de 1,100 l/s (200,000 tpd) de relaves con un C_p del 40% desde la División Andina, cuya composición de la fracción sólida se muestran en la Tabla 4.11. Pero Senrageomin también entrega valores de porcentajes de ciertas rocas que componen este relave, las cuales se muestran en la Figura 4.11 y difieren tanto en porcentajes como en minerales de la data anterior. Esto se da ya que Sernageomin

Tabla 4.11: Composición mineralógica de la fracción sólida de relaves descargados en Tranque Ovejería (Anteproyecto AMTC, 2021).

Cuarzo	SiO ₂	51 %
Moscovita	KAl ₂ (Al Si ₂ O ₁₀)OH ₂	19 %
Albita	NaAlSi ₃ O ₈	16 %
Ortoclasa	KAlSi ₃ O ₈	13 %
Pirita	FeS ₂	0.77 %

mide elementos en relaves que asocia a minerales específicos arrojando porcentajes mayores a los que efectivamente tienen, por ende, la medición no es precisa ni confiable, aunque se puede estudiar la abundancia relativa entre dichas rocas.

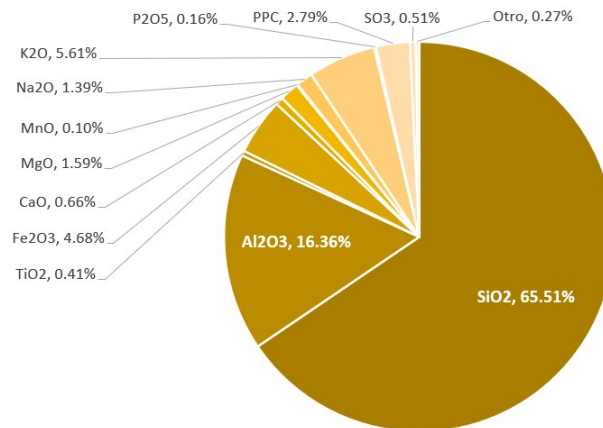


Figura 4.11: Composición mineralógica de Tranque de Relaves Ovejería (Sernageomin, 2020).

En función de los datos del catastro de relaves de Sernageomin (2020), también se obtienen los valores de concentraciones de elementos en el tranque. En la Figura 4.12 se muestran los elementos con concentraciones mayores a 100 ppm y en la Figura G.1 del Anexo G los que tienen concentraciones menores. Destacan concentraciones elevadas de bario, seguido de cobre y zinc. Sin embargo, estos datos no presentan correlación con los elementos presentes en las aguas de relaves por dos motivos, lo primero es la solubilidad de estos elementos en las condiciones en que se encuentran y en segundo lugar no se incluyen las asociaciones de estos elementos con los demás (en la composición de la roca) teniendo probablemente una mayor estabilidad química en su formación.

La operación que produce los relaves corresponde a la explotación del yacimiento Río Blanco - Los Bronces, del tipo pórfido de cobre y molibdeno, ubicado en el sector de las nacientes de los ríos Blanco y San Francisco. En este yacimiento se identifican tres cuerpos mineralizados principales denominados Río Blanco, Don Luis y Sur Sur (Figura 4.13), cuya mena no presenta pirita en abundancia, presenta un bajo o nulo contenido en carbonatos, y minerales de la arcilla hidrotermales en abundancia.

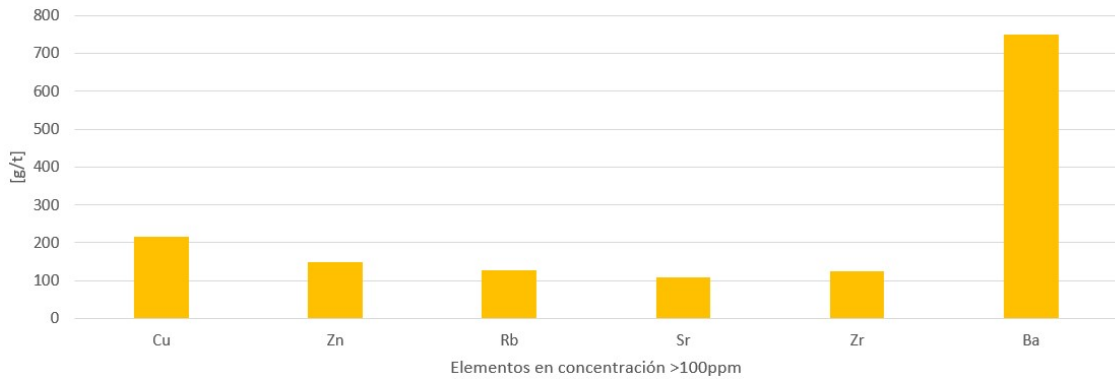


Figura 4.12: Composición de elementos con una concentración >100 ppm del Tranque de Relaves Ovejería (Sernageomin, 2020).

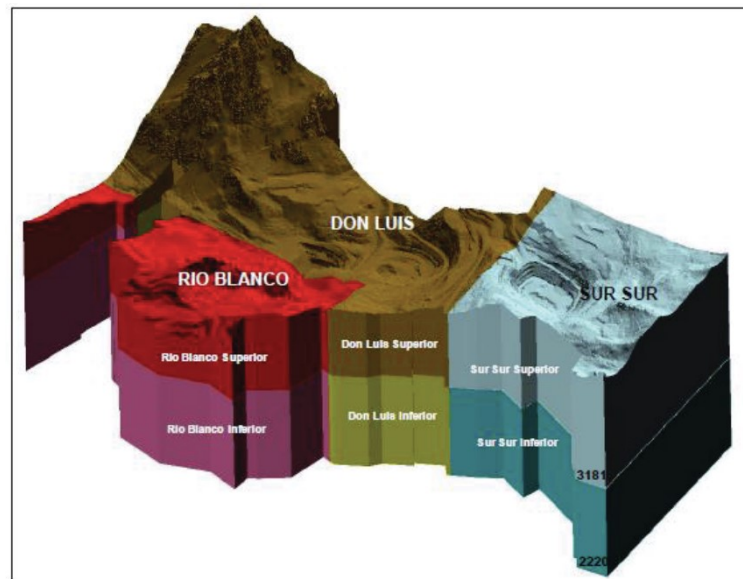


Figura 4.13: Vista del yacimiento Río Blanco - Los Bronces y sus sectores (Briones, 2012).

En general, las mineralogías principales de los sectores contienen una asociación pirita – calcopirita (en razones de 3:7 a 2:8) y molibdenita en menor concentración. Sin embargo, el contenido en carbonatos es bajo o nulo, lo cual debería disminuir el potencial de neutralización de las aguas, aunque presenta minerales de la arcilla hidrotermales en abundancia, las cuales pueden contener trazas de elementos tóxicos, y potencialmente solubles por lixiviación de ácido, además de aportar elementos como Si, Al, Ca, K y Fe al sistema.

Según explica Briones (2012), el Sector Río Blanco comprende la faena de explotación subterránea de la División Andina (término el 2022). Las mineralogías principales del sector son la asociación pirita - calcopirita, nula presencia de calcosina - covelina y trazas de sulfosales de cobre (tetrahedrita - tenantita). Las litologías se muestran en la Tabla 4.12.

Tabla 4.12: Litología del sector Río Blanco de la División Andina (Estudio de Prefactibilidad de Procesamiento de Minerales Sulfurados de Baja Ley, 2008).

Sector Río Blanco	
Litología	Características
Granodioritas (54 %)	Relación calcopirita/pirita es 7/3. Mineralización diseminada en vetillas. Fuerte alteración potásica. Las alteraciones presentan sobreimposición cuarzo-sericítica.
Andesita (20 %)	Razon calcopirita/pirita es 8/2. Presenta alteración potásica y cuarzo-sericítica.
Pórfidos (22 %)	Bajo grado de alteración, de características potásicas en profundidad por la presencia de ortoclasa y de propilitización hacia niveles superiores (asociación clorita - epidota)
Brechas (6 %)	Dominio de alteración potásica. Razón de calcopirita/-pirita entre 8/2 y 7/2. Alteración cuarzo-sericítica

Luego, el Sector Don Luis realiza su explotación a cielo abierto. Este sector comprende una extensa zona que abarca 2,000 m de longitud con un ancho variable entre 600 a 800 m con una altura superior a 1,300 m. Su litología se muestra en la Tabla 4.13.

Tabla 4.13: Litología del sector Don Luis de la División Andina (Estudio de Prefactibilidad de Procesamiento de Minerales Sulfurados de Baja Ley, 2008).

Sector Don Luis	
Litología	Características
Granodioritas (39 %)	Brechizaciones, diseminaciones y vetillas de calcopirita. Alteración cuarzo-sericítica y potásica de biotita. Razón calcopirita/pirita es 7/3. No presenta mineralización importante (0,72 % CuT)
Andesita (7 %)	Razon calcopirita/pirita es 5/5. Presenta alteración potásica y cuarzo-sericítica.
Pórfidos (48 %)	Leyes de Cu y Mo irregulares alcanzando 0,49 y 0,51 % de CuT y 0,0015 y 0,0013 % de Mo.
Brechas (6 %)	

Y finalmente, el Sector Sur Sur que comprende una extensa área elongada de 1,000 m y ancho promedio de 600 m con una altura de columna mineralizada de 1,500 m. En este sector se desarrolló una explotación a cielo abierto y las litologías se muestran en la Tabla 4.14.

La presencia de silicatos y rocas con alteraciones potásicas (en particular arcillas) neutralizan las aguas de relaves al ser lixiviados, manteniendo un pH alto de las aguas, pero la escasa o nula presencia de carbonatos en la zona hacen que este potencial de neutralización sea bajo y la disminución del pH sea marcada (el pH medido del agua se encuentra entre 7,8 - 9,1).

El procesamiento de mineral comprende una planta concentradora de flotación colectiva, cuyos productos son los relaves depositados al Tranque Ovejería y un concentrado mixto de

Tabla 4.14: Litología del sector Sur-Sur de la División Andina (Estudio de Prefactibilidad de Procesamiento de Minerales Sulfurados de Baja Ley, 2008).

Sector Sur-Sur	
Litología	Características
Granodiorita Cascada	Alteración tipo clorita-epídota diseminada en vetillas.
Pórfido Don Luis	Mineralización económicamente de interés. Alteración potásica y en ocasiones se sobrepone una alteración cuarzo-sericita
Brecha Turmalina	La calcopirita es el sulfuro mas abundante, con cantidades menores de pirita, bornita y molibdenita.
Brecha Magmática	La alteración de esta unidad se caracteriza por una intensa biotización que define para dicha unidad una alteración potásica.
Brecha de Polvo de roca	Tiene un grado de mineralización inferior a 0,5 % de Cu. Su alteración es asociada a la presencia de cuarzo - sericita afectando a los fragmentos y matriz con igual intensidad y en forma pervasiva.
Brecha Monolito	Constituye un tipo de roca relativamente estéril en concentraciones de cobre y molibdeno.
Brecha de Polvo de Roca y Turmalina	Contiene proporciones muy inferiores de sulfuros de cobre y hierro, cuarzo, magnetita, con tazas de clorita y siderita, predomina sobre el polvo de roca. Las asociaciones de menas presentes son calcopirita - pirita y nula presencia de bornita, calcosina - covelina y sulfosales de cobre (tetrahedrita - tenantita).

Cu-Mo enviado a al segundo proceso de flotación selectiva que produce un concentrado final de cobre para espesamiento y filtrado (cola o relave del proceso de flotación selectiva) y un concentrado de molibdeno. La Tabla 4.15 muestra los reactivos para el proceso de flotación colectiva de Cu-Mo de la Planta Concentradora de Codelco División Andina.

Tabla 4.15: Reactivos de flotación colectiva Cu-Mo de la Planta Concentradora Codelco División Andina (Manríquez, 2019).

Reactivo	Tipo	Dosis [g/TMS]	Descripción
Hostafлот X-23	Colector de Cobre (tianocarbanato)	23	Dosificado en molienda
Petróleo Diésel	Colector de molibdeno	10	Dosificado en molienda
MIBC	Espumante	13	Dosificado etapa Rougher
Cal (Ca(OH) ₂)	Regulador de pH	940	pH de flotación de 12

El flujo de concentrado a la Planta de Molibdeno y Filtrado de Cobre de Codelco División Andina es de 2 [m³/min] con un porcentaje de sólido en un rango de 40 % al 57 % a un pH estándar de 10,5 a 11,5, el cual es acondicionado con ácido sulfúrico que eliminan los restos de Ca(OH)₂, la ley de cobre del dicho concentrado es de 28.5 % y de 0.7 % de molibdeno, estos metales se separan en la primera flotación selectiva de molibdenita, utilizando sulfhidrato de sodio (NaHS) como agente depresante para sulfuros de cobre, y alcanzando una recuperación metalúrgica del 88,7 % de Mo y una ley en el concentrado final de alto cobre (AC) de 47 % de Mo y 4 % de Cu (Manriquez, 2019). La dosificación de ácido busca un valor de 8, finalmente

el concentrado ingresa a un cajón sellado donde se adiciona la primera dosis de depresante para ingresar al circuito de flotación. La Tabla 4.16 muestra los reactivos para el proceso de flotación selectiva de Mo de la Planta Concentradora de Codelco División Andina.

Tabla 4.16: Reactivos de flotación selectiva de Mo de la Planta de Molibdeno y Filtrado de Cobre Codelco División Andina (Manríquez, 2019).

Reactivo	Tipo	Dosis [kg/TMS]	Descripción
Ácido Sulfúrico	Regulador de pH	1.2	Dosificado en etapa de acondicionamiento de pulpa a pH 8
Petróleo Diésel	Colector de molibdeno	0.08	Dosificado en etapa Rougher
Dióxido de carbono	Regulador de pH	0.3	Dosificado en etapa Rougher y columna de segunda limpieza para disminuir el pH a 10
Sulfhidrato de sodio	Depresante	4.5	Depresa sulfuros de cobre

Según Smuda et al. (2014) durante y después de la descarga de relaves, una fracción de agua de aproximadamente un 20 % se reutiliza en la flotación, la otra fracción se recircula a los procesos internos del tranque y unos 8 millones de m³/año se pierden por evaporación.

El agua utilizada en el proceso puede ser el parámetro más importante en la composición posterior de las aguas de relaves. El agua fresca que se abastece al proceso es de alrededor de 1.000 l/s, provenientes de cuencas del Río Blanco, esteros y quebradas. Según mediciones de Acosta & Nahir (2018), la conductividad en el agua del Río Blanco posee una media muy elevada ($2.105,33 \pm 22,46 \mu\text{S}/\text{cm}$), mientras que el pH tiene una media de 7,57, con mínimos de 7,19 y máximos de 7,73. Los autores midieron también ciertos elementos en el agua como Cu (63 ppm), Zn (310 ppb), Fe (200 ppb), Ba (50 ppb), Pb (no detectado en la cuenca), Ag (0,24 ppb), As (120 ppb), Mn (1,6 ppb), Tl (no se detecta en la cuenca). As y B superan los límites para uso público, domiciliario y agricultura (Acosta & Nahir, 2018).

Las aguas de Tranque de Relaves Ovejería también sobrepasan los límites de la Norma Chilena 1333 levemente en el fluoruro y con creces en para el sulfato y el molibdeno con alrededor de 2.200 y 687 mg/l, respectivamente. Las altas concentraciones de molibdeno se atribuyen a la liberación de este por la oxidación de minerales sulfurados, principalmente calcopirita y piritita (donde el molibdeno se encuentra como traza) y la alta solubilidad del elemento bajo condiciones de flotación y molienda ya descritos en la sección 4.3.3. El molibdeno metálico es estable en condiciones reductoras, disminuyendo se estabilidad a medida que aumenta el pH, la molibdenita no recuperada en la flotación, por otro lado, presenta un mayor campo de disolución en condiciones alcalinas debido a su disolución oxidativa en condiciones atmosféricas con liberación de molibdato oxianión (MoO_4^{2-}), altas cantidades de sulfato (SO_4^{2-}) y protones (H^+) acidificando la solución.

Por otro lado, la presencia de sulfatos, está dada por los procesos que se describen ampliamente en este documento, una oxidación tanto de piritita, como de otros minerales sulfurados presentes en el yacimiento, tales como la galena, la esfalerita, etc. La oxidación de los sulfuros está asociada a las precipitaciones, y en conjunto con la disolución de los sulfatos primarios produce la liberación de cationes como Fe^{2+} , Cu^{2+} , Zn^{2+} , Mn^{2+} , y de oxianiones como HMoO_4^- , H_2AsO_4^- y SO_4^{2-} ; así como de protones (H^+). La piritita presente en la fracción sólida (0,77 %), es potencial generadora de estos iones Fe^{2+} y Fe^{3+} intercambiables que van

generando una disminución del pH en la solución, a la vez que aumenta la concentración de sulfatos, el cation Fe^{3+} puede actuar como oxidante principal de los sulfuros o bien hidrolizarse y formar fases secundarias (jarosita, la schwertmannita, la ferrihidrita, la goetita, u otros hidróxidos de Fe(III)). Por otro lado, el uso de cal en la flotación puede precipitar el sulfato de las aguas por los iones disueltos (Ca^{2+}), disminuyendo su contenido.

En las aguas de este tranque, los metales Cu, Fe, Mn y Zn del Relave Ovejería, se encuentran en bajas concentraciones en fracciones solubles e intercambiables mientras que en fracciones de baja solubilidad o insolubles se encuentran en mayor porcentaje porcentual y, por lo tanto, el potencial de transferencia de metales desde los relaves mineros a la vegetación, suelos y aguas, es bajo (AMTC, 2021).

4.2.3. Embalse de Relaves Talabre

Este depósito de relaves está localizado a 9 km al Sureste de Chuquicamata, en la Comuna de Calama, Región de Antofagasta (Figura 4.14), a una altitud de 2.482 msnm, con temperaturas que varían entre los -5°C a los 30°C y una humedad relativa de 21 %, precipitaciones de 5 mm/año. La comunidad más cercana es Chiu-Chiu, que a menudo ha manifestado su descontento y desaprobación a los proyectos debido a los elementos tóxicos que almacena el tranque, con potenciales perjuicios a las personas, el medio ambiente y patrimonios arqueológicos. Es, actualmente, el tercer tranque de relaves mas grande de Chile y está compuesto por muro es mixto (arenas / empréstimo) y una zanja cortafuga en la fundación muro. El embalse se encuentra al 95 % de su capacidad total, con aproximadamente 1.946 MTMS al año 2020.

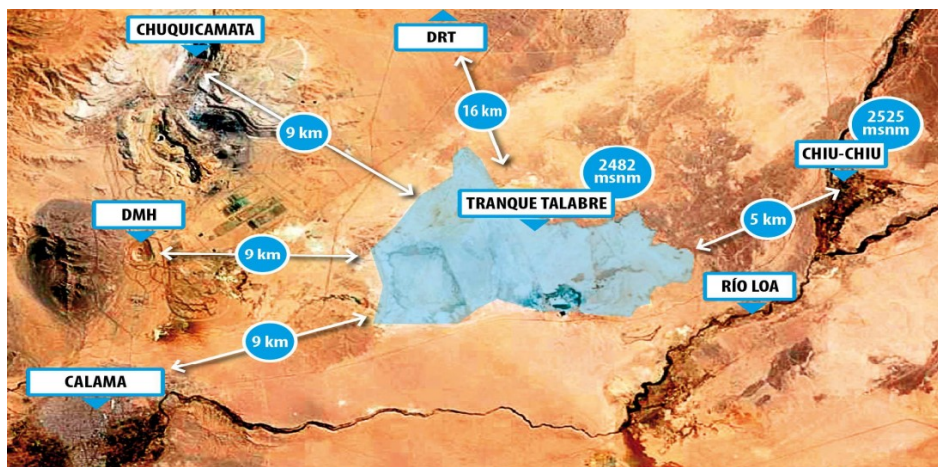


Figura 4.14: Tranque de Relaves Talabre, Referencia Geográfica (Dirección de Aguas y Relaves Codelco, 2019).

Se categoriza como un Embalse de Relaves Convencional, inició sus operaciones en 1981 y se proyecta a 2027, en él se depositan los relaves provenientes desde las divisiones Chuquicamata (CH), Ministro Hales (MH) y Radomiro Tomic (RT) de Codelco, el emplazamiento de estas faenas están asociados a la intrusión del Complejo Porfídico Chuquicamata. Aburto (2017) cataloga a la Falla Oeste como el principal rasgo estructural de la zona, la cual, dadas sus características, se divide en dos bloques: uno oriental y otro occidental. El bloque oriental está constituido por rocas paleozoicas intrusivas y rocas triásicas intrusivas y

volcánicas. Mientras que el bloque occidental está constituido por la cobertura mesozoica e intrusivos cenozoicos. En el tranque, el clima es árido y desértico. Por ello, hay un aumento de la influencia de la evaporación, ocasionando una migración ascendente y, en consecuencia, la mineralogía secundaria está dominada por sulfatos solubles en agua debido al creciente potencial redox.

Los relaves generados por las plantas concentradoras de las tres divisiones son conducidos gravitacionalmente hasta estaciones de bombeo a partir de las cuales son impulsados mecánicamente hacia la Planta de Espesadores de Alta Densidad (PEAD). En el tranque se depositan en sentido norte a sur, con una pendiente de 0,3 %, que permite acumulación de aguas claras a través de la Laguna de Captación ubicada en el sector sur, frente al Sector 4 del Tranque, su capacidad es de 1,2 millones de m³ y tiene una evaporación de la bandeja que oscila entre 9 y 15 mm/día.

En este embalse, a diferencia de Ovejería, recibe relaves de tres minas distintas y, si bien los yacimientos presentan mineralogías similares (pertenecientes al Distrito Chuquicamata). En general la geología de Chuquicamata está dominada por cuarzo, feldespatos K, plagioclasa, biotita, clorita, moscovita y yeso, todos con potencial de neutralización. Aparte presenta minerales traza de apatita ($\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH},\text{F},\text{Cl})_2$), rutilo (TiO_2), magnetita, hematita y goetita, con potencial de generación de minerales secundarios y potencial de oxidación por formación de Fe^{3+} . Por otro lado, no presenta carbonatos en consideración (bajo el límite de detección 0.1 % en peso), tiene una concentración total de sulfuros de 1,75 % en peso equivalente de pirita (mayor que los 0.77 % de Ovejería), con fracciones menores de bornita, enargita, covelita, calcocita y esfalerita. Para Ministro Hales, la geología y mineralogía es fundamentalmente la misma, con la característica diferencia de que este yacimiento presenta altos contenidos de enargita y arsenopirita. Finalmente, Radomiro Tomic al igual que Ministro Hales y Chuquicamata, presenta alta cantidad de sílice y feldespatos, dominados por una alteración potásica. De la misma forma que el análisis de Ovejería, se muestra en la Figura 4.15 la composición mineralógica del Tranque Talabre entregada por Sernageomin, la cual no es exacta y entrega un porcentaje relativo.

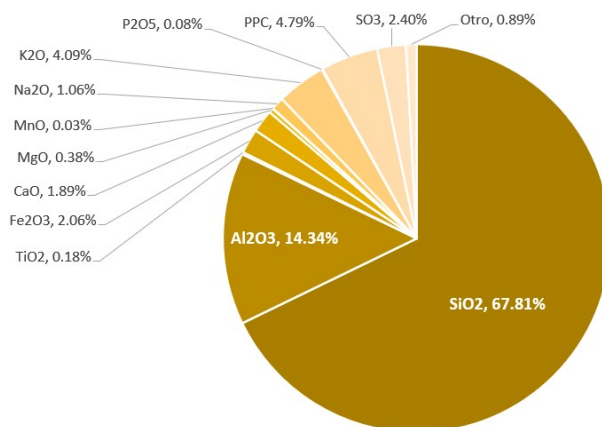


Figura 4.15: Composición mineralógica del Tranque de Relaves Talabre (Sernageomin, 2020).

En función de los datos del catastro de relaves de Sernageomin (2020), se obtienen las concentraciones de elementos en los relaves del Embalse Talabre, la Figura 4.16 muestra los valores con concentraciones sobre 100 ppm (y en la Figura G.2 del Anexo G los elementos con concentraciones menores a 100 ppm), donde se detectan altas cantidades de cobre, destacando sobre el resto con cerca de 2.300 ppm, y seguido de arsénico y plomo, con alrededor de 700 ppm para ambos, los cuales son potenciales generadores de oxianiones en solución. El alto contenido de cobre puede estar asociado a la antigüedad del tranque, el cual opera desde 1981.

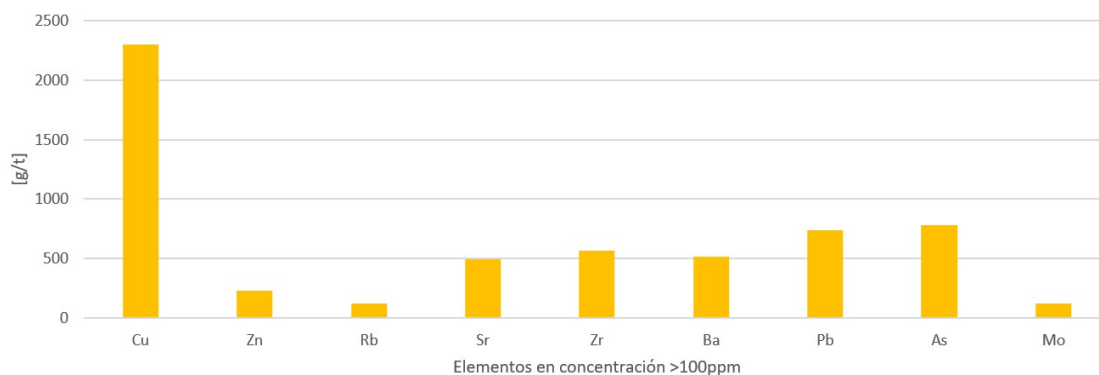


Figura 4.16: Composición de elementos con una concentración >100 ppm del Tranque de Relaves Talabre (Sernageomin, 2020).

4.2.3.1. Faena División Chuquicamata

El depósito de pórfido de cobre Chuquicamata, con reservas aproximadas de 90 Mt Cu, es el rajo de producción de cobre más grande, en dimensiones, del mundo, y uno de los más importantes de Codelco en cuanto a su producción. Inicialmente explotando óxidos mediante rajo, la faena pasa a su extracción casi completamente vía subterránea, cambiando su mineralización a especies sulfuradas de cobre. Los principales minerales de sulfuro y ganga identificados en Chuquicamata se presentan en la Tabla 4.17.

Tabla 4.17: Minerales de sulfuro y ganga presentes en yacimiento Chuquicamata (Aburto, 2017).

Sulfuros	Ganga
Pirita (FeS_2)	K-feldespato (KAlSi_3O_8)
Bornita (Cu_5FeS_4)	Cuarzo (SiO_2)
Calcopirita (CuFeS_2)	Biotita ($\text{K}(\text{Mg},\text{Fe})_3(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{F},\text{OH})_2$)
Digenita (Cu_9S_5)	Clorita ($(\text{Mg},\text{Fe})_3(\text{Si},\text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$)
$(\text{Mg},\text{Fe})_3(\text{OH})_6$	Anhidrita (CaSO_4) o yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)
Covelita (CuS)	Hematita accesoria (Fe_2O_3)
Molibdenita (MoS_2)	Titanita (CaTiSiO_5)
Enargita (Cu_3AsS_4)	Magnetita (Fe_3O_4)
Esfalerita (ZnS), localmente	

El procesamiento de minerales se lleva a cabo en la planta concentradora de Chuquicamata A-0 y A-1. El concentrado colectivo o “Bulk”, de Cu-Mo se genera cuando la molibdenita se

presenta en cantidades de importancia económica en los pórfidos cupríferos, y es flotada junto a los sulfuros de cobre (Aburto, 2017). Los circuitos de este proceso generalmente consideran cuatro conjuntos de celdas de flotación:

1. Flotación Primaria o “*Rougher*”: la pulpa mineral se flota en condiciones que hacen eficiente la recuperación de Cu, con un grado razonable de concentración (15-20 % Cu).
2. Flotación de Limpieza o “*Cleaner*”: los minerales estériles (pirita, silicatos, etc.) provenientes del concentrado de la etapa *Rougher*, son fuertemente deprimidos en esta etapa para dar un concentrado de Cu-Mo de alta ley.
3. Flotación de 2ª Limpieza o “*Re – cleaner*”: reutilización de las celdas *Cleaner* para maximizar la calidad del concentrado y deprimir por última vez las especies estériles.
4. Flotación de barrido o “*Scavenger*”: tiene por misión hacer un repaso colectivo de las especies de interés descartadas en etapas anteriores (flotación de relaves de las primeras celdas).

Las condiciones operacionales que utiliza la planta concentradora de Chuquicamata para la flotación se encuentran en la Tabla 4.18.

Tabla 4.18: Condiciones Operacionales Flotación Estándar ST-1 Chuquicamata (Aburto, 2017)

Grando de molienda	P ₈₉ de 300 μm
C _p de alimentación	38 %
pH de flotación	10.8-10-9 (Alcalina)
Tiempo de flotación global	7.5 min
Tiempo acondicionamineto	1 min

Los reactivos utilizados para la flotación se muestran en la Tabla 4.19. El agua utilizada es suministrada por el Río Loa (80 %) y recuperada de los relaves (20 %)

Tabla 4.19: Reactivos de Flotación Estándar Chuquicamata (Aburto, 2017)

Reactivo	Tipo	Concentración [g/t]
Xantato AX-343	Colector Primario	25
P-40 (Molycop)	Colector Secundario	8
Diesel	Colector de Molibdeno	5
Espumante	Espumante	20
cal (Ca(OH) ₂)	Ajuste de pH	-
Na(OH)	Ajuste de pH	-
NaHS	Depresor de cobre	-
H ₂ SO ₄	ajuste de pH	-

Los relaves producidos tienen una concentración de aproximadamente 45 % en peso de sólidos y un pH de 9 en el punto de descarga. (Ortega, 2020) y Aburto (2017) establecen que la mineralogía de estos está dominada por cuarzo, feldespatos K, plagioclasa, biotita, clorita, moscovita y yeso. La apatita (Ca₁₀(PO₄)₆(OH,F,Cl)₂), el rutilo (TiO₂), la magnetita, la hematita y la goetita se encuentran como minerales traza de ganga. Poseen además, un contenido de carbonato total bajo del límite de detección (0.1 % en peso equivalente de

CaCO₃), una concentración total de SO₄ en relaves frescos de 4.08 % en peso de CaSO₄ equivalente. La concentración total de sulfuro fue de 1.75 % en peso de equivalente principalmente a pirita, con fracciones menores de sulfuro de enargita, covelita, calcocita y esfalerita. Las concentraciones de elementos en relaves frescos se muestran en la Tabla 4.20.

Tabla 4.20: Concentraciones de elementos en relaves frescos (Ortega, 2020)

Elemento	Concentración en peso
Si	31.79 %
Al	7.44 %
K	5.39 %
Ca	1.81 %
Fe	0.69 %
S	1.89 %
Cu	1,390 mg/kg
Zn	130 mg/kg
Mo	260 mg/kg
As	120 mg/kg

4.2.3.2. Faena División Radomiro Tomic

Esta faena, adyacente hacia el norte del Yacimiento Chuquicamata, ubicada sobre los 3.000 msnm, inicialmente parte explotando sus óxidos de cobre mediante pilas dinámicas de lixiviación, botadero de ripios, zona de OBL y zona de mixtos. Sin embargo, el agotamiento de estos obligan a comenzar la extracción de sulfuros mediante planta concentradora (flotación) en el denominado “Proyecto Radomiro Tomic Sulfuros”, proyecto minero que se proyecta hasta 2044, y que produciría relaves espesados al Tranque de Relaves Talabre entre 2023 - 2057. El proyecto contempla una planta concentradora de aproximadamente de 756 mil toneladas por año de concentrado de cobre y de 7 mil toneladas por año de concentrado de molibdeno, y reúne:

1. Planta de Flotación Colectiva y Remolienda:

- Flotación primaria (*Rougher*).
- Remolienda.
- Flotación primera limpieza (*Cleaner*).
- Flotación barrido (*Scavenger*).
- Flotación segunda limpieza (*Re – Cleaner*).

2. Planta de Flotación Selectiva.

Considera dos líneas en donde se procesan los concentrados colectivos de Cu-Mo provenientes de la flotación de segunda limpieza de la planta de flotación colectiva, este es espesado a 65 % de sólidos, y el agua recuperada en este proceso se envía al sistema de agua de procesos. La planta de flotación selectiva dispone de cinco etapas de flotación en un circuito contracorriente, de lo cual se tiene como producto el concentrado de molibdeno y como cola del proceso es el concentrado de cobre.

3. Reservorio de Agua de Reproceso.

4. Conducción de Relaves.

La descarga de los relaves espesados (57 % de agua) es conducida a través de una canaleta hasta el tranque Talabre.

El yacimiento corresponde a un deposito tipo pórfido cuprífero que alberga la mineralización en el Complejo Porfídico Chuquicamata limitado por importantes fallas: la Falla Oeste, la Zona de Deformación Este y la Falla Portezuelo por el sur. En cuanto a las alteraciones se muestran a continuación:

- Potásico de Fondo: Alteración de mayor distribución, reemplazo selectivo de máficos por biotita secundaria y las plagioclasas. Mineralización diseinada en vetillas. Leyes primarias <0.35 %.
- Clorítico Marginal: Alteración Propilítica.
- Early Dark Micaceous: Vetillas con bordes irregulares y sutura de cuarzo, feldespato potásico, biotita y sericita subordinada. Ley media de cuT 0.34 %.
- Sericita Verde Calcopirita: Vetas y vetillas compuestas principalmente de sericita, ilinita y cuarzo.
- Cuarzo-Sericita Penetrativa: Agregados de sericita, cuarzo y caolín. Ley media CuT 0.7-0.8 %.
- Sericita Selectiva: Reemplazo de sericita a feldespatos.
- Argílica Avanzada: Presencia de arcillas (caolín, pirofilita, otros).

Los reactivos usados en la flotación colectiva y selectiva se muestran en la Tabla 4.21 y el estándar de flotación colectiva en la Tabla 4.22.

Tabla 4.21: Reactivos en la Flotación de Planta Radomiro Tomic

Reactivo	Proceso	Uso	Consumo anual
Aero MX7017C Promoter	Flotación Colectiva	Colector Primario	1,441 t
MC-CIBXS	Flotación	Colector	720 t
Isobutil Xantato de Sodio	Colectiva	Secundario	—
Aerofroth 70 Frother	Flotación Colectiva	Espumante	1,801 t
Cal viva	Flotación Colectiva	Control pH	45,00 t
Diesel Oil	Flotación Colectiva y Selectiva	Colector Molibdeno	1,450 t
Sulfidrato de Sodio (NaSH)	Flotación Selectiva	Depresante de Cobre	5,718 t
Ácido Sulfúrico (H ₂ SO ₄)	Flotación Selectiva	Modificador de pH	3,640 t
Polyglycol P-4000	Flotación Selectiva	Antiespumante	20.6 t
Policrilamida no-iónico	Espesamiento y Filtrado de Concentrado de cobre	Floculante de Concentrado	5.1 t
Policrilamida aniónico	Espesamiento de Relaves	Floculante	720 t

Tabla 4.22: Parámetros Operacionales de Flotación Radomiro Tomic

Grado de molienda	P ₈₀ de 212 μm
C _p de alimentación	32 %
pH de Flotación	9
Tiempo de FLOTACIÓN Cinética	10 min
Tiempo de acondicionamiento	1 min

4.2.3.3. Faena División Ministro Hales

El yacimiento Mina Ministro Hales, se localiza a casi 10 kilómetros al norte de Calama a 2.600 msnm, se encuentra en operaciones desde 2010 con uno de los desarrollos a rajo abierto más extensos de la gran minería, desarrollando el prestripping más grande de la historia al remover 228 millones de toneladas de estéril. El proyecto es una continuación productiva del yacimiento Mansa Mina y se caracteriza por contener grandes cantidades de Enargita (Cu_3AsS_4), por el contenido de arsénico en este mineral, se construyó una planta de tostación, con el tostador vertical más grande del mundo, produciendo calcina, un concentrado de alta pureza con altos porcentajes de cobre y plata. Actualmente, la división presenta reservas estimadas en 194 millones de toneladas y con una ley de cobre total de 1,02 %, sin embargo, su mineralización representa grandes desafíos en términos del procesamiento de los minerales explotados por la presencia de elementos complejos como el arsénico, antimonio o bismuto (González 2020), es un depósito de tipo pórfido cuprífero que evolucionó a un sistema de alta sulfidación con la formación de brechas hidrotermales con mineralización de Cu, Ag y As, las relaciones de contacto y texturales indican que el yacimiento se formó en sucesivas etapas de alteración-mineralización.

La mina se explota a un ritmo de aproximadamente 325.000 toneladas por día que se procesan en la Planta Concentradora Ministro Hales, una planta concentradora independiente (*stand alone*) con una capacidad de entre 55 a 57 mil toneladas por día de mineral, dando lugar a una producción aproximada a 183.000 toneladas de cobre fino y 300 toneladas de plata por año en promedio según informa su sitio oficial. La planta considera:

- Molienda (SAG y bolas), planta de pebbles.

- Flotación primaria.

El circuito esta conformado por una etapa de flotación primaria convencional, una etapa de remolienda de concentrado, una primera etapa de limpieza convencional, una flotación de barrido de la primera limpieza convencional, una segunda etapa de limpieza convencional y una flotación de tercera limpieza en celdas de columnas.

El relave del circuito primario será colectado junto al relave del circuito de barrido en otro cajón, constituyendo el relave final de todo el sistema de flotación.

Algunos parámetros operacionales de esta planta se encuentran en la Tabla 4.23.

Tabla 4.23: Parámetros operacionales de Flotación de Ministro Hales (Codelco, 2013)

Reactivo colector primario	25 (g/t)
pH de la Flotación	10.5
Agua del proceso	Cuenca subterránea Pampa Puno

- Remolienda y flotación de limpieza

La remolienda es alimentada con el concentrado primario y el concentrado del circuito de barrido, el concentrado de segunda limpieza se enviará a una tercera etapa de limpieza. El objetivo global es obtener un concentrado de cobre final con una ley media de 35 a 38 % Cu, con una recuperación de cobre de 90 % aproximadamente. El relave final lo constituirá el relave de la **flotación primaria** y el de la etapa de **barrido de la primera limpieza**.

- **Espesamiento.**
Realizado en dos espesadores convencionales, obteniendo una pulpa con 60 % de sólidos, que será bombeada a la planta de filtros.
- **Planta de filtros.**
Ubicada en el sector de la planta concentradora *stand alone*, producen un queque filtrado con una humedad de 8-10 %.
- **Conducción de relaves a canaleta que alimenta al tranque.**
El relave espesado a 60 % de sólidos es descargado a un cajón de traspaso, desde donde un tren de bombas lo impulsarán a través de una cañería hasta el canal de relaves, llegando finalmente el producto al tranque Talabre, a un ritmo de aproximadamente 49.000 ton/día.
- **Piscina de emergencia de relaves y concentrados.**

4.2.3.4. Sistema de aguas del tranque

El embalse posee un sistema de manejo de aguas claras mediante sistemas de bombeos móviles y canalizaciones, desde donde el agua se deriva a los procesos industriales (Figura 4.17). En el sureste del embalse, el agua de drenaje se recolecta en un estanque de decantación y se recicla en la mina. En la base del dique oeste, el agua de infiltración es recolectada y reutilizada en las instalaciones de la mina.

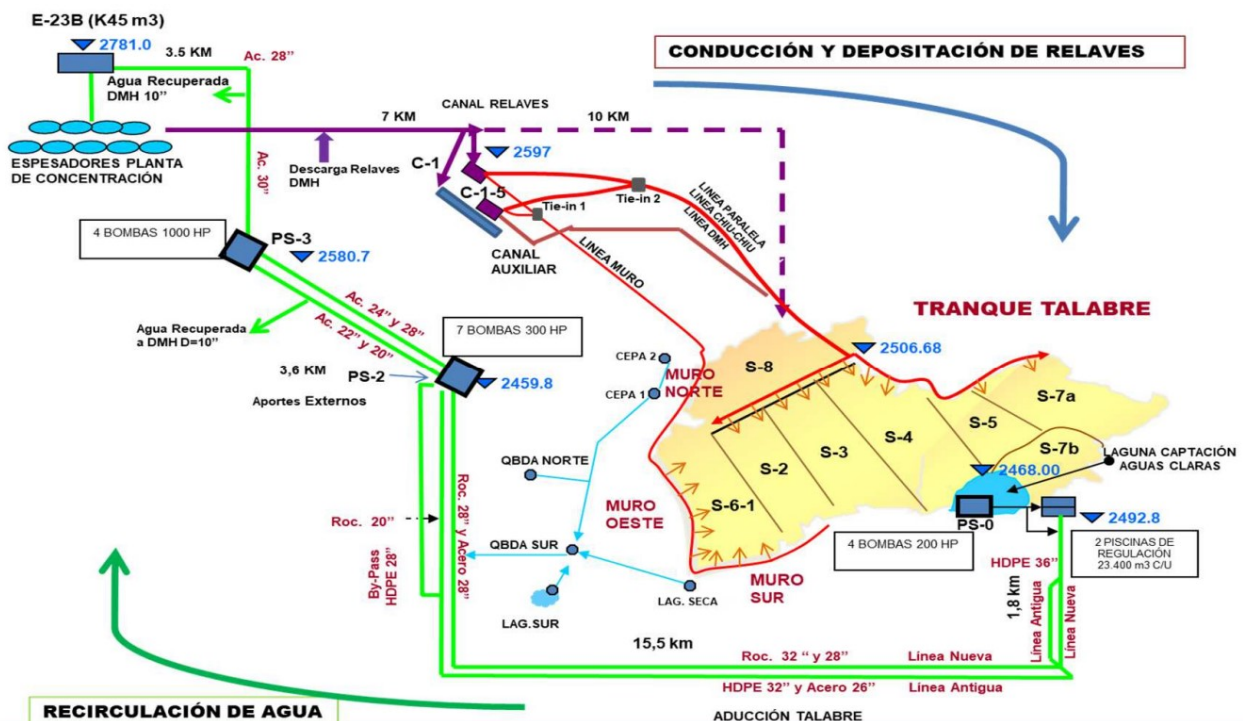


Figura 4.17: Mapa de proceso de Tranque de Relaves Talabre (Dirección de Aguas y Relaves Codelco, 2019).

De los 12.000 litros por segundo que necesitan los procesos productivos de Chuquicamata y Radomiro Tomic, 10.500 provienen de la reutilización o reciclaje y sólo cerca de 1.500 litros desde diferentes puntos de captación de agua fresca. El caudal de reciclaje considera fundamentalmente la recuperación de las aguas de enfriamiento de la fundición, donde se recuperan 8.200 l/s, en tanto en las plantas de ácido se recirculan en torno a los 3.000 l/s.

La composición del agua de relaves (Tabla 4.24) demuestra altos contenidos de cloruros, sulfatos, boro, arsénico y molibdeno, los cuales superan ampliamente las normas descritas, y otros elementos altos como litio, selenio y cadmio, que superan apenas el límite de la norma para riego agrícola.

El primer parámetro a analizar son las aguas de proceso. La planta de procesamiento Chuquicamata utiliza agua de las cuencas del Río Loa, el cual se caracteriza por un pH de neutral a alcalino. Herrera et al. (2020) mide parámetros fisicoquímicos del cauce, tomando en promedio una conductividad de 25,7 mS/cm, un E_h de -105 mV, un pH entre 9,59 y 9,56, y aparte, se reportan concentraciones entre los 190 a 21.800 $\mu\text{g/L}$ de As en aguas superficiales, donde también se favorece la solución de elementos como B, F, V, Mo, Se y U. Fe y Mn (óxidos e hidróxidos).

Las altas concentraciones de cloruro pueden resultar de la recirculación del agua de relaves y de la alta concentración en el agua de proceso proveniente del Río Loa, así como del agua desalada usada en RT, cuyos estándares permiten a hasta 300 mg/L de cloruro.

Los principales cationes y aniones muestran una tendencia creciente de enriquecimiento hacia la superficie de los relaves, debido al transporte capilar en el clima hiperárido y la evaporación, con una precipitación rápida de halita, yeso y Na-K-Mg-Ca sulfatos y cloruros en la superficie (principalmente sales blancas eflorescentes). La disolución de los sulfatos primarios produce la liberación de cationes bivalentes como Fe^{2+} , Cu^{2+} , Zn^{2+} , Mn^{2+} , de oxianiones como HMoO_4^- , H_2AsO_4^- y SO_4^{2-} , así como de protones (H^+).

El distrito minero, y en particular MH, históricamente ha tenido complejos con la presencia de arsénico en el concentrado por la asociación del cobre con arsénico en la enargita (posteriormente eliminado por tostación), sin embargo, la enargita residual, así como la arsenopirita y el arsénico en trazas de minerales férricos, llega a los relaves, inclusive en solución como oxianiones, en altas concentraciones, lo cual tiene más aristas de análisis.

La primera arista tiene que ver con la recuperación de arsénico de mena, para la flotación en RT, donde se usa agua desalada, o incluso para las otras faenas que usan agua recuperada con iones disueltos, González (2020) estudia la recuperación de enargita utilizando agua con Ca, Mg, Na y K disueltos, a distintos pH y potencial de pulpa, y concluye que la flotación natural de enargita no fue favorecida por la formación de hidroxicomplejos ($\text{Ca}(\text{OH})$ y $\text{Mg}(\text{OH})$) en la superficie del sulfato, disminuyendo la recuperación de enargita y aumentando el contenido de As en los relaves.

Las concentraciones altas de arsénico en los acuíferos no se restringen a determinadas condiciones. Sin embargo, la mayor parte de los acuíferos con contenidos altos de arsénico tienen un origen ligado a procesos geoquímicos naturales relacionados con ambientes geo-

lógicos muy diferentes: metasedimentos con filones mineralizados, formaciones volcánicas, formaciones volcano-sedimentarias, distritos mineros, sistemas hidrotermales actuales, cuencas aluviales terciarias y cuaternarias, etc. De manera que en este caso podría estar asociada no sólo a yacimientos metálicos si no también a su geología volcánica (Lillo, 2003).

El agua usada para el proceso de flotación aporta de un importante suma de elementos pesados, y en particular del As, como se muestra en la Figura 4.18. El As es móvil en pH de agua dulce (6,5-8,5), condiciones oxidantes y reductoras, es decir, diferentes estados de oxidación (-3, 0, +3, +5), comúnmente es encontrado como As trivalente o arsenito [As(III)] o As pentavalente o arseniato [As(V)], y la actividad microbiológica es capaz de movilizar y especiar este metaloide, en efecto, estudios señalan que bacterias epilíticas naturalmente presentes en las cuencas de los ríos al norte de Chile podrían aumentar la movilidad del As bajo pH circum-neutral (Tapia, 2014). Los ambientes oxidantes de clima árido son los dominantes en Chile y Argentina, donde la especie dominante es la pentavalente [As(V)], existe un aumento de movilidad ante el aumento de pH (Herrera et al., 2020).

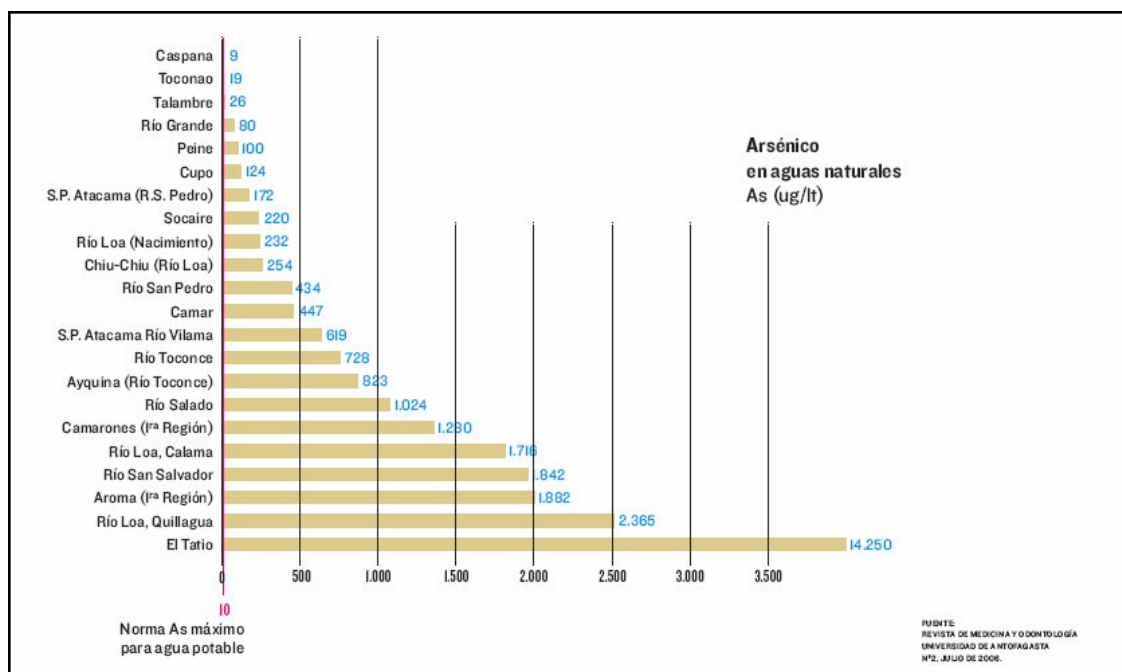


Figura 4.18: Arsénico en aguas naturales de ríos del norte de Chile (Herrera et al., 2020).

Finalmente, la última arista tiene que ver con la disolución de las fases de As y la desorción de óxidos de Fe y arcillas que contienen As durante la flotación alcalina, como se explica en la sección 4.3.2. El Tranque de Relaves Talabre recibe relaves de yacimientos con altos contenidos de minerales con arsénico, pero además una mena relativamente rica en piritita y magnetita, por una moderada abundancia de los minerales de la arcilla y presencia de calcita como mineral de ganga importante.

Por otro lado, los altos contenidos de SO_4 son controlados por el uso de $Ca(OH)_2$. La concentración en Talabre es especialmente mayor debido a la recirculación del agua del proceso que va concentrando los sulfatos y otros compuestos en ella. Y los otros fenómenos explicados

en este documento acerca de la naturaleza del proceso y su relación con las aguas sulfatadas.

La presencia de Mo se atribuye a la desorción de minerales arcillosos y óxidos de Fe o disolución de fases secundarias de Mo como la ferrimolibdita ($\text{Fe}_2(\text{MoO}_4)_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$), recordando que tanto el arsénico, como el molibdenato son estables como oxianiones en solución y se presentan en altas concentraciones en el agua intersticial debido a las condiciones alcalinas al comienzo de la meteorización.

En el tranque el punto de depósito se cambia periódicamente en la superficie de los relaves del embalse, en el, algunos sitios pueden llegar a tener 5 años de exposición sin que ingrese un flujo de relve fresco aún, produciéndose una oxidación de sulfuros por hierro férrico, en dicho período los parámetros pH y Eh evolucionan de alcalinos (relaves frescos pH 9,1) a ácidos y de condiciones reductoras a oxidantes. Después de tres años de oxidación, Dold (1999) señala que el pH todavía estaba en el rango circumneutral (pH 6,4 - 7,5), mientras que después de cuatro años se observó una caída a condiciones ácidas (pH 4,7), a un pH de 3,9 después de cinco años. Además, Dold (1999) señala que debido a la baja movilidad de los elementos a pH alto, las concentraciones de Cu y Zn, después de cinco años de oxidación, por la caída del pH en la superficie.

4.3. Elementos comunes en aguas de relaves

Un elemento común en relaves, dada su gran presencia en minerales silicatados, son las tierras raras, estas son lixiviadas por el ácido, sin embargo la solubilidad de estos elementos es compleja, las concentraciones de equilibrio están muy influenciadas por aniones proporcionados por diferentes ácidos, en general, el ácido sulfúrico ofrece concentraciones de equilibrio más altas de RREE, y los ácidos nítrico y clorhídrico más bajas. Han (2019) señala que a medida que aumenta la concentración de aniones suministrados por los tres ácidos, la concentración total de RREE disueltos aumenta drásticamente.

Empresas y entes fiscalizadores centran su estudio principalmente en metales pesados (elementos de alta densidad entre 4-7 g/ml con alta toxicidad), cobre, sulfatos y cloruros en aguas de relaves, los cuales tienen una presencia similar y en forma generalizada en los tranques, y además, porque son de interés por su toxicidad y su solubilidad.

En particular, por lo significativo de su concentración en los casos de estudio analizados (Ovejería y Talabre), su relevancia en los diferentes usos que se le puede dar al agua, y su reconocimiento como agentes contaminantes, se estudia la presencia de: Sulfatos, Arsénico y Molibdeno.

4.3.1. Sulfatos en aguas de relaves

En cuanto a la flotación, en su mayoría alcalina, se puede señalar que los relaves de flotación de los depósitos de pórfido de cobre tienen un alto potencial para la producción de ácido, como resultado de los contenidos de sulfuros y un potencial de neutralización muy bajo, lo que conlleva a una disminución del pH en el tiempo en un medio relativamente oxidante y

mayor presencia de sulfatos asociados a contenido porcentual de sulfuros, cal y yeso/anhidrita. Lo anterior, y la presencia de metales y metaloides cuando se tiene oxianiones asociados generalmente con minerales de óxido de hierro, en conjunto con un circuito de flotación alcalina, conlleva que estos puedan desorberse durante flotación, lo que explica la mayoría de los elementos contaminantes en las aguas.

En la Figura 4.19 se muestra un diagrama Eh vs pH, o Diagrama de Pourbaix, con las especies más estables en condiciones de pH y oxidación para el sistema S-O-H. Como se conoce, los relaves tienen un pH alcalino, superior a 7, el cual no cambia notablemente en los primeros 2-3 años, y un potencial de oxidación en aumento (positivo), lo cual, según el diagrama, corresponde a la zona en donde el sulfato disuelto, es más estable.

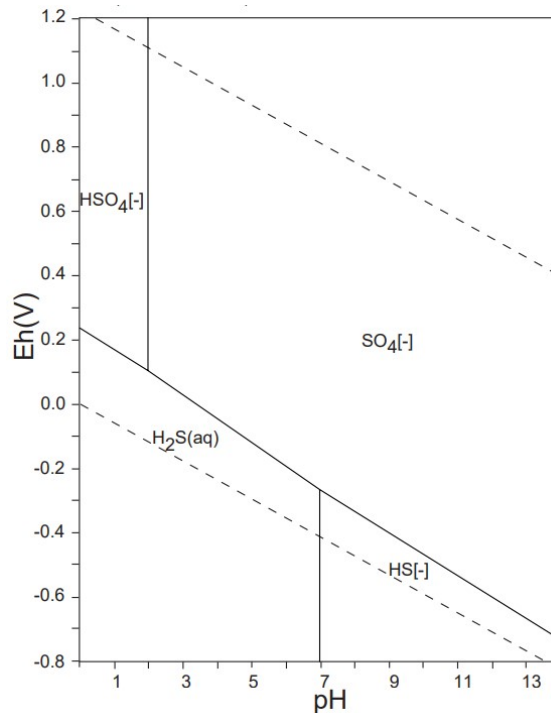


Figura 4.19: Diagrama de Pourbaix para un sistema S-O-H. $\sum S = 10^{-10}$, 298.15K, 10^5 Pa (Takeno, 2005)

Tal como se estudia en la Revisión Bibliográfica, los sulfatos presentes en el agua de relaves están asociados en gran parte a la oxidación de sulfuros ocurrida ya sea en la flotación o contacto superficial con el aire disuelto (Ley de Henry) en menor escala, con una interferencia del oxígeno disuelto (8-10 mg/L). Sin embargo, en muchos yacimientos la presencia de yeso aporta la gran parte del sulfato disuelto, y por otro lado el sulfato presente en las aguas de proceso recirculadas, como en el caso de Talabre.

La pirita y la pirrotina, no tienen una flotabilidad natural en condiciones alcalinas y, por ende, son los sulfuros de mayor concentración en relaves, por lo cual son las fuentes preferentes de sulfatos. En condiciones abióticas, la tasa de oxidación de la pirita por el hierro férrico está controlada por la tasa de oxidación del hierro ferroso, que disminuye rápidamente al disminuir el pH, aunque la lixiviación por $KClO_3$, HCl, HN_3 también puede atacar los bordes de silicatos como la biotita y liberar hierro adicional (Bold, 2018). Las concentraciones

de sulfato también están controladas por la solubilidad del yeso o anhidrita y los procesos de meteorización, dada la liberación de cationes que forman complejos con el sulfato en solución.

La forma por defecto que se tiene en los tranques para evitar esta oxidación es mantener el material saturado, sin embargo, esto ha provocado a lo largo de la historia lamentables accidentes debido a la pérdida de estabilidad de las estructuras húmedas, más aún, la labor de mantenerlo saturados implica un buen sistema para evitar la evaporación.

4.3.2. Arsénico en aguas de relaves

El arsénico puede hallarse en aguas naturales como especie disuelta, comúnmente como oxianiones con arsénico en dos estados de oxidación: trivalente [As(III)] y pentavalente [As(V)], y con menos frecuencia como As(0), As(-I) y As(-II). As(V) aparece como H_3AsO_4 y sus correspondientes productos de disociación (H_2AsO_4^- , HAsO_4^{2-} y AsO_4^{3-}). As(III) aparece como H_3AsO_3 y sus correspondientes productos de disociación (H_4AsO_3^+ , H_2AsO_3^- , HAsO_3^{2-} y AsO_3^{3-}). La movilidad del arsénico está controlada por las condiciones redox, como se observa en el diagrama de la Figura 4.20, en condiciones oxidantes, a medida que el pH está más alcalino, ocurre la formación de óxidos de arsénico (oxianiones) de alta solubilidad, a medida que el pH se vuelve más ácido, puede precipitar, por ejemplo, con el cobre. En general, el estado As(V) predomina sobre As(III), encontrándose fundamentalmente como H_2AsO_4^- a valores de pH bajos, mientras que a pH más alto, la especie dominante es HAsO_4^{2-} (en condiciones de extrema acidez, la especie dominante será H_3AsO_4^0). Los oxianiones se adsorben principalmente en los minerales férricos secundarios, pero las condiciones menos oxidantes pueden aumentar su movilidad.

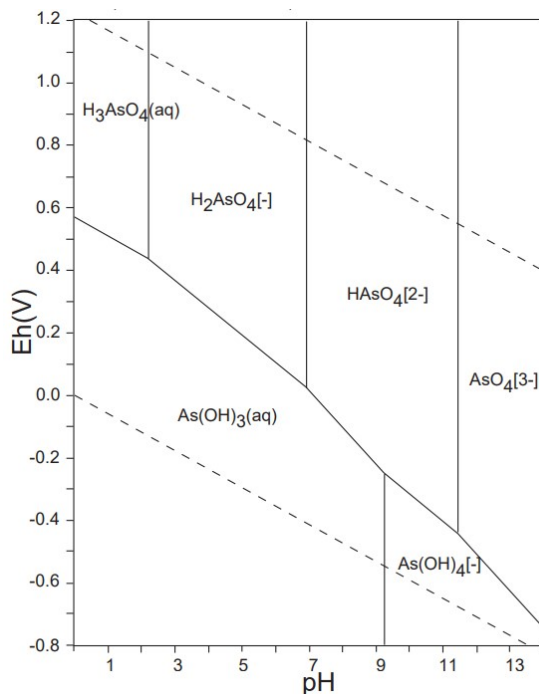


Figura 4.20: Diagrama de Pourbaix del sistema As-O-H. $\sum\text{As} = 10^{-10}$, 298.15K, 10^5 Pa (Takeno, 2005).

Se podrían definir dos tipos de minerales que correspondan a fuentes de arsénico, el primero son los minerales sulfurados en donde se encuentra en la estructura química del mineral (por ejemplo la Arsenopirita (FeAsS) y Enargita (Cu_3AsS_4)) y aquellos en que se encuentra asociado a otros minerales como traza. En el caso de los primeros, tratándose de enargita, este es un mineral de valor económico, por lo cual la fracción flotada, o concentrada, lleva la mayor parte de arsénico de estos yacimientos, y una fracción menor se queda en los relaves, los cuales, junto con las trazas presentes en otros minerales, se convierte en un problema por su alta toxicidad incluso en concentraciones bajas, aunque en algunos relaves, esta puede llegar a estar dentro del mismo orden de magnitud que la del cobre (Falcon-Hernandez & Herrera-Zeppelin, 2018).

La Arsenopirita y Enargita tienen una íntima relación con los porfidos cupríferos por asociaciones geológicas en común. La enargita puede presentarse en fracturas de rocas o vetas, diseminada con otros sulfuros y asociada comúnmente a minerales como el cuarzo, bornita, galena, esfalerita, tennantita, calcosina, calcopirita, covelita y piritita (González, 2020). La recuperación de enargita en flotación es fuertemente dependiente del pH, y en ausencia de colector, resulta muy pobre bajo condiciones alcalinas (González, 2020).

Debido a la oxidación de trazas de enargita (Cu_3AsS_4), tennantita ($\text{Cu}_{12}\text{As}_4\text{S}_{13}$) y/o arsenopirita (FeAsS), el arsénico se agota en la fracción de sulfuro de la zona de oxidación de los tranques. En particular, se informa que la arsenopirita es oxidada por acción bacteriana bajo la producción de arseniato y arsenito y enargita con la liberación de cúprico y arseniato.

4.3.3. Molibdeno en aguas de relaves

Como se aprecia en la Figura 4.21, el molibdeno metálico es estable en condiciones reductoras, pero su estabilidad disminuye en la medida que se aumenta el pH, solo en condiciones de alta acidez se observa molibdeno disuelto como molibdeno catiónico (Mo^{3+}), y en disoluciones débiles y fuertemente alcalinas, el molibdeno se pasiva con formación del compuesto molibdato (MoO_4^{2-}).

El molibdeno está ampliamente distribuido en la naturaleza formando tanto minerales oxidados, como sulfurados. En su mayoría, es un producto secundario de la minería del cobre, el cual, mediante un segundo circuito de flotación, se separa del cobre. En desechos mineros se han encontrado principalmente ferridrita ($(\text{Fe}^{3+})_2\text{O}_3 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$), ferrimolibdenita ($\text{Fe}_2(\text{MoO}_4)_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$), molibdenita (MoS_2), molibdita (MoO_3), Níquel (II) molibdato (NiMoO_4), powelita (CaMo_4), tugarinovita (MoO_2) y wolfranita (PbMoO_4), y encontrándose como trazas en hidróxidos de hierro (FeOOH), piritita (FeS_2), calcopirita (CuFeS_2), jarosita ($\text{KFe}_3(\text{OH})_6(\text{SO}_4)_2$) y shwertmanita ($\text{Fe}_8\text{O}_8(\text{OH})_6(\text{SO}_4) \cdot n\text{H}_2\text{O}$).

De estos, el que se presenta con más frecuencia es la molibdenita, componente importante en depósitos de pórfido de Cu-Mo y epitermales de Au-Ag-(Te), y en ocasiones, es el segundo sulfuro más abundante después de la piritita. La molibdenita presenta un mayor campo de disolución en condiciones alcalinas y es estable en ambientes ácidos, requiriéndose condiciones altamente oxidantes para su disolución, pero sufre disolución oxidativa en condiciones atmosféricas y pH neutro a alcalino con liberación de molibdato (oxianión) de la siguiente manera:

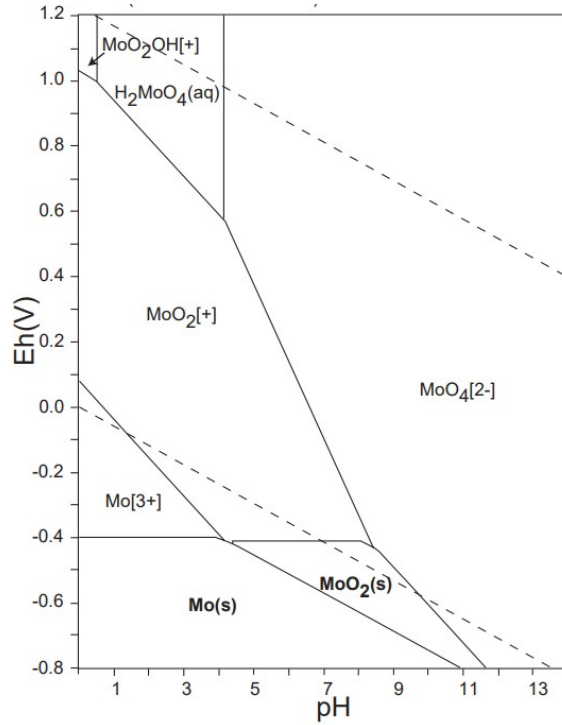
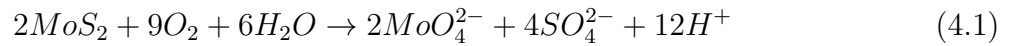


Figura 4.21: Diagrama de Pourbaix del sistema Mo-O-H. $\Sigma\text{Mo} = 10^{-10}$, 298.15K, 10^5 Pa (Takeno, 2005).



La molibdenita presenta gran resistencia a la biooxidación dado que la oxidación de molibdenita es letal para *Thiobacillus ferrooxidans* (bacteria catalizadora) y puede limitar la cinética de la reacción, siendo entonces el Fe^{3+} puede asumir el papel del principal oxidante o hidrolizarse a fases secundarias (jarosita, schwertmannita, ferrihidrita, goethita). En la Figura 4.22) se ilustran las relaciones entre los minerales que contienen Mo y la formación de estos en los relaves, los minerales sólidos se muestran en recuadros y las relaciones entre ellos que involucran especies acuosas se muestran con flechas, las condiciones de pH se indican en la parte inferior.

Las concentraciones de molibdeno en relaves son variables, Frascoli (2018) señala que las concentraciones son altas en los relaves de depósitos de minas de pórfido de cobre y Co-Mo, con concentraciones entre 100-300 mg/kg, de hecho, las concentraciones de Mo más altas registradas corresponden a los desechos del procesamiento de minerales polimetálicos de Cu, lo cual atribuye a la alta solubilidad del Mo en agua y a concentraciones de oxígeno muy bajas.

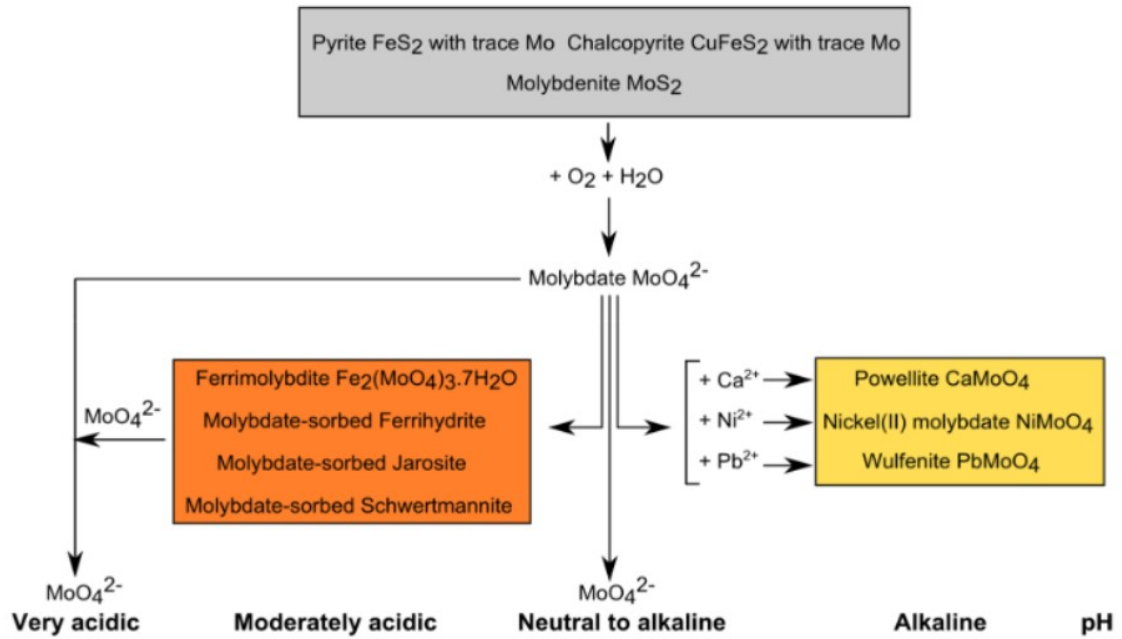


Figura 4.22: Diagrama de relaciones entre los minerales que contienen Mo y la formación de estos (Frascoli, 2018).

4.4. Resumen composición aguas con norma chilena

Tabla 4.24: Resultados de análisis ICP a las aguas de relave Ovejería y Talabre, comparadas con la Norma Chilena (1333)

	Norma 1.333	D.S. 90	Ovejería		Talabre	
			Valor	¿Cumple?	Valor	¿Cumple?
Conductividad [$\mu\text{S}/\text{cm}^2$]	750	-	3.491,43	NO	10.394,29	NO
Fluoruro [mg/L]	1	1,5	1,43	D.S. 90	3,44	NO
Cloruro [mg/L]	200	400	133,69	SI	2.147,68	NO
Sulfato ICP [mg/L]	250	1.000	2.119,69	NO	3.057,64	NO
Sulfato Cromatografía [mg/L]	250	1.000	2.112	NO	3.064	NO
Li [ug/L]	2.500	-	4,4	SI	3.583,80	NO
Be [ug/L]	100	-	< 0,05	SI	< 0,05	SI
B [ug/L]	750	750	387,8	SI	20.321,20	NO
Al [ug/L]	5.000	5.000	< 1	SI	< 1	SI
V [ug/L]	100	-	< 3	SI	38,8	SI
Cr [ug/L]	100	500	< 0,35	SI	< 0,35	SI
Fe [ug/L]	5.000	5.000	< 15	SI	25	SI
Mn [ug/L]	200	300	< 0,05	SI	5,5	SI
Co [ug/L]	50	-	3,41	SI	4,21	SI
Ni [ug/L]	200	200	42,75	SI	50,7	SI
Cu [ug/L]	200	1.000	6,18	SI	40,17	SI
Zn [ug/L]	2.000	3.000	< 3,5	SI	< 3,5	SI
As ICP [ug/L]	100	500	10,5	SI	31.406,00	NO
As Colorimétrico [ug/L]	100	500	-	-	24.000	NO
Se [ug/L]	20	10	< 1,5	SI	40,49	NO
Mo [ug/L]	10	1.000	687,35	D.S. 90	4.574,84	NO
Ag [ug/L]	200	-	< 0,015	SI	< 0,015	SI
Cd [ug/L]	10	10	1,72	SI	11,59	NO
Ba [ug/L]	4.000	-	66,14	SI	51,41	SI
Pb [ug/L]	5.000	50	0,9	SI	< 0.05	SI

4.5. Resultados de las pruebas en el tiempo

A continuación se presentan los resultados de caudales volumétricos, presión osmótica, conversión, conductividad y temperatura en el tiempo para las distintas presiones.

Como toda prueba experimental esta presenta errores asociados expuestos en el Anexo I.

Los resultados se analizan y se discuten a continuación.

4.5.1. Resultados: Estabilización de Flujos y Presión Osmótica

4.5.1.1. Agua relave Ovejería a 300 psi por 3.25 horas

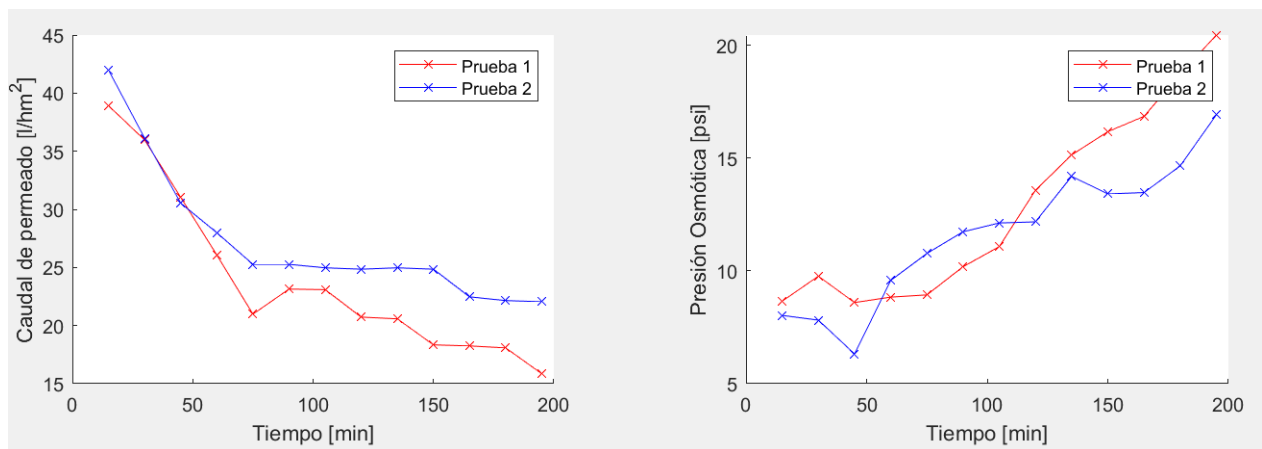


Figura 4.23: Caudales de permeado y presión osmótica en el tiempo para las pruebas con agua de Ovejería a 300 psi.

4.5.1.2. Agua relave Ovejería a 400 psi por 3.25 horas

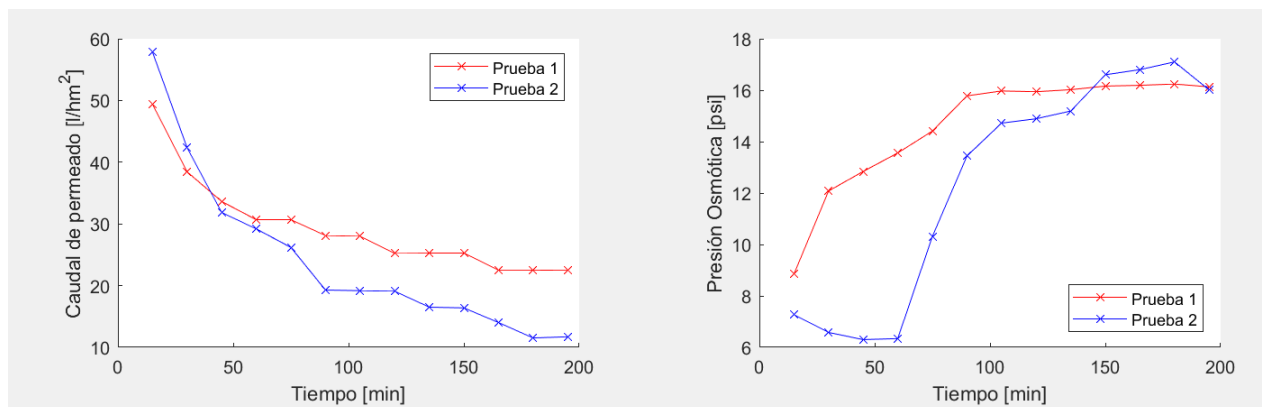


Figura 4.24: Caudales de permeado y presión osmótica en el tiempo para las pruebas con agua de Ovejería a 400 psi.

4.5.1.3. Agua relave Talabre a 300 psi por 3.25 horas

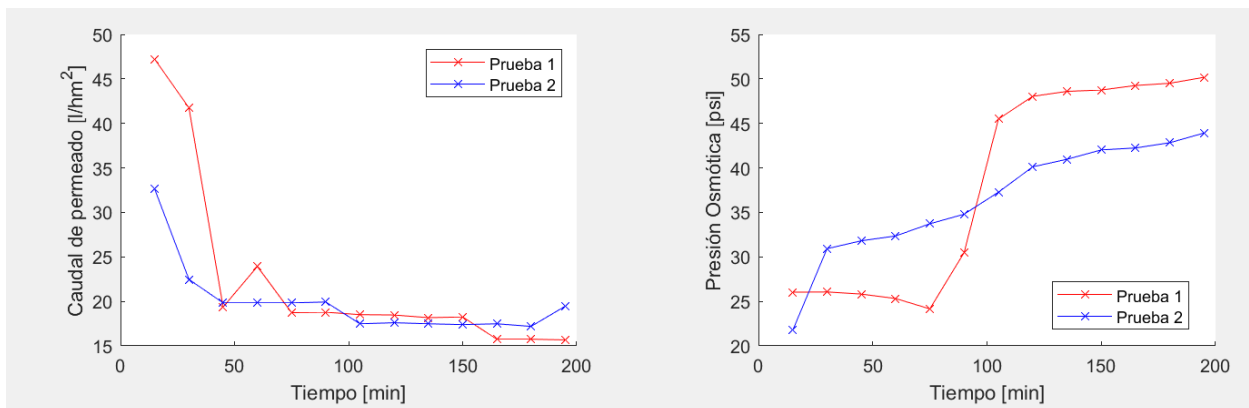


Figura 4.25: Caudales de permeado y presión osmótica en el tiempo para las pruebas con agua de Talabre a 300 psi.

4.5.1.4. Agua relave Talabre a 400 psi por 3.25 horas

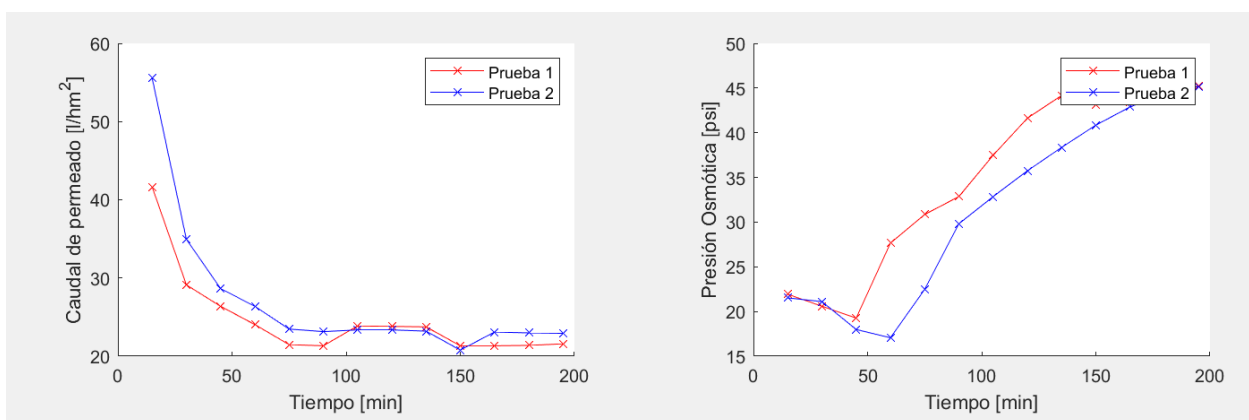


Figura 4.26: Caudales de permeado y presión osmótica en el tiempo para las pruebas con agua de Talabre a 400 psi a 3.25 horas.

Estos resultados calculan el flujo estándar de permeado, de manera análoga a la conversión, este parámetro es importante debido a que es escalable. La recuperación o conversión de agua debe tenerse en cuenta para concluir la factibilidad del método y las expectativas de una planta real para el tratamiento de este tipo de aguas. Sin embargo, esta es variable en el tiempo lo cual tiene una explicación asociada a los errores de medición (Anexo I), al requerir un constante ajuste de la válvula del rechazo, hay un multivalente flujo de rechazo. Esto se ratifica observando los gráficos de la sección anterior, en donde se observa que ocurre una estabilización del flujo en el permeado, no así en el rechazo.

Por ende, se usa el flujo estándar de permeado que mide el paso de líquido por metro cuadrado en un tiempo determinado, siendo escalable con el área usada en una planta industrial.

Cada una de las pruebas presenta un período, de entre 90-105 min, en que el flujo de permeado y rechazo decrecen en el tiempo, hasta que luego de dicho período, se estabiliza en

un valor mas o menos fijo. Esto puede suceder por tres motivos:

1. Existe un período de compactación de las capas de la membrana luego del cambio de válvulas del paso de agua limpia al agua salada, dicho cambio provoca una pequeña variación de la presión en un delta de tiempo que requiere de un ajuste de la válvula de presión en la celda. Cuando las capas no estan compactadas, la serie de capas que componen la membrana estan mas separadas una vez que se compactan, el flujo es menor.
2. Polarización inmediata de la membrana cuando empieza a fluir agua salada sobre ella, y empiezan a quedar iones atrapados en sus poros, obstruyéndolos. Se manifiesta una vez que el agua limpia, aun atrapada en el sistema, termine de fluir a través de la membrana,

4.5.1.5. Agua relave Talabre a 400 psi por 5 horas

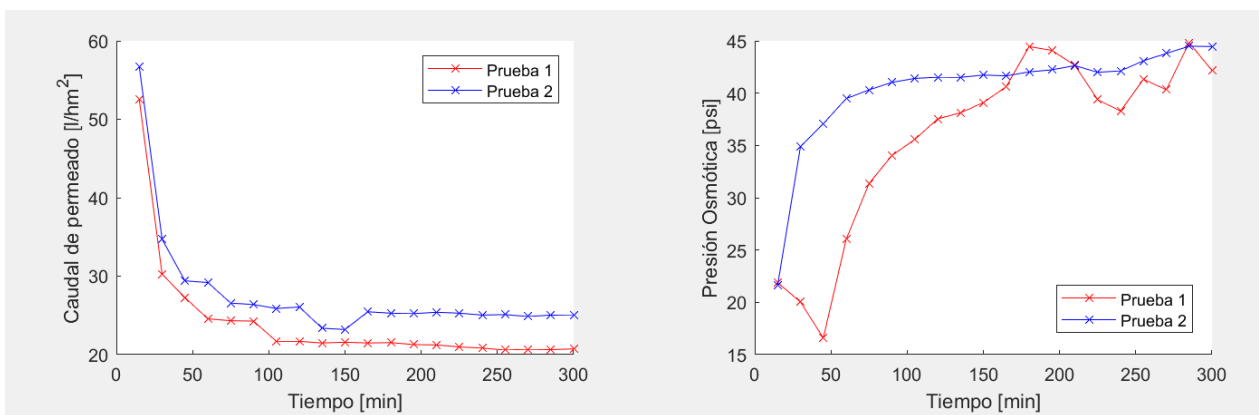


Figura 4.27: Caudales de permeado y presión osmótica en el tiempo para las pruebas con agua de Talabre a 400 psi a 5 horas.

esto explica de mejor manera el corto período de tiempo en que se está estabilizando el flujo.

3. Estudios previos indican que existe una disminución posterior del flujo de permeado debido al *fouling* o ensuciamiento de la membrana. Una hipótesis sugiere la colmatación de la membrana por efecto de la precipitación de yeso en específico, dadas las características minerales. Sin embargo, no se cuenta con la especiación de la solución y los índices de saturación para determinar la saturación debido a que no se analizaron todos los iones principales (bicarbonato, el calcio, el magnesio, el potasio y el sodio). De todas maneras, la solución se espera que se estuviera saturada respecto al yeso y que la aumentar aún las concentraciones en la nanofiltración, precipita yeso. Habría que proponer un tratamiento previo a la nanofiltración.

Según las Tablas H.1 y H.2 del Anexo H, donde se muestran los valores promedio de flujos asociados al período después de la estabilización de ellos, con sus respectivas desviaciones estándar, se observa que los flujos estándar de permeado oscilan entre los 15 a 23 l/hm² para Ovejería y entre 18 a 22 l/hm² para Talabre, lo cual se encuentra por debajo de los flujos nominales de 57,82 a 76,53 l/hm² (35-45 GFD a 110 psi) pero mayor a estudios citados previos de 3 a 4 l/hm² con flujos nominales de 25 a 26 L/m²h (Simon et al. 2013). Por ende,

el flujo obtenido en las pruebas se considera alto.

En el análisis de los valores de flujo obtenidos en la estabilización se distinguen diferencias entre las pruebas medidas a 300 y 400 psi, lo cual se condice con literatura previa que afirma que a mayor presión en la membrana, el flujo de permeado es mayor (en las siguientes secciones se aborda las implicancias de la presión).

En el caso del permeado, todos los duplicados de cada prueba consiguen un flujo similar, sin embargo, el rechazo presenta pruebas con variaciones pronunciadas. Esto sucede porque, uno de los errores sistemáticos (Anexo I) de este sistema es que se iba regulando el caudal de rechazo manipulando la válvula, lo cual, debido al golpe de presión, aumenta significativamente el flujo los primeros 2 minutos después de mover la válvula, haciendo que la muestra tomada en ese período tuviera un mayor volumen de agua.

El fenómeno de los flujos a través de la membrana se estudia junto a la Presión Osmótica, la cual, en las pruebas, tiene una tendencia al aumento en el tiempo. La presión osmótica es la presión que se debe aplicar a una solución para detener el flujo neto de disolvente a través de una membrana semipermeable, es una propiedad coligativa de las soluciones (dependen del número de partículas en disolución, sin importar su naturaleza). Esta presión surge cuando se colocan soluciones de distinta concentración, separadas por una membrana semipermeable, las moléculas de disolvente, pasan habitualmente desde la solución con menor concentración de solutos a la de mayor concentración, la diferencia de presión en ambos lados de la membrana semipermeable recibe el nombre de presión osmótica.

La presión osmótica de la solución que se procesará, la cual dependerá de la concentración y temperatura, así como la resistencia que ejerce la membrana al paso del flujo del agua, no se puede conocer de antemano el efecto que tendrá el incremento de la concentración de la solución sobre la presión osmótica de la solución, a menos que se realicen pruebas experimentales específicas para su determinación. Sin embargo, este parámetro es estimado a partir de las concentraciones de permeado y alimentación, aumentando en el tiempo debido a la concentración del rechazo que sale de la celda, en el tiempo, lo cual hace que las diferencias de concentraciones entre las soluciones de ambos lados de la membrana sea mayor y el paso del permeado a través de la membrana sea más dificultoso que conlleva a un mayor consumo energético para lograrlo.

4.5.2. Resultados: Conductividad

4.5.2.1. Agua relave Ovejería a 300 psi por 3.25 horas

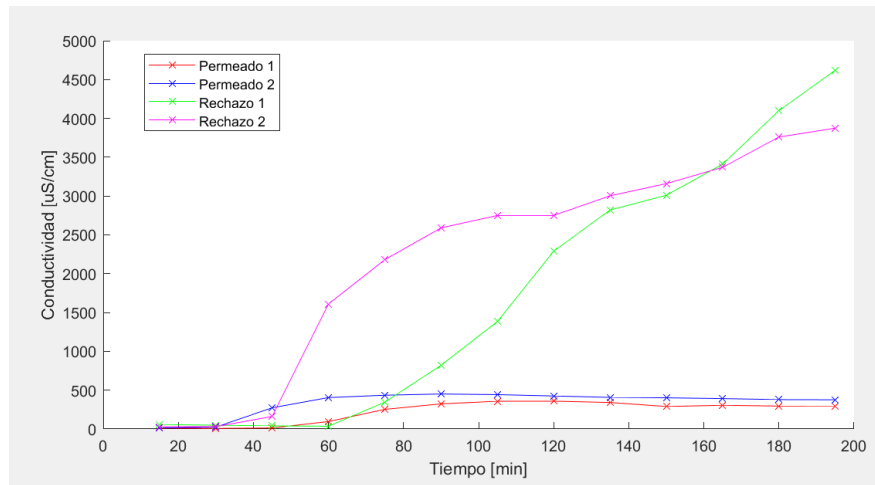


Figura 4.28: Conductividad en el tiempo para las pruebas con agua de Ovejería a 300 psi.

4.5.2.2. Agua relave Ovejería a 400 psi por 3.25 horas

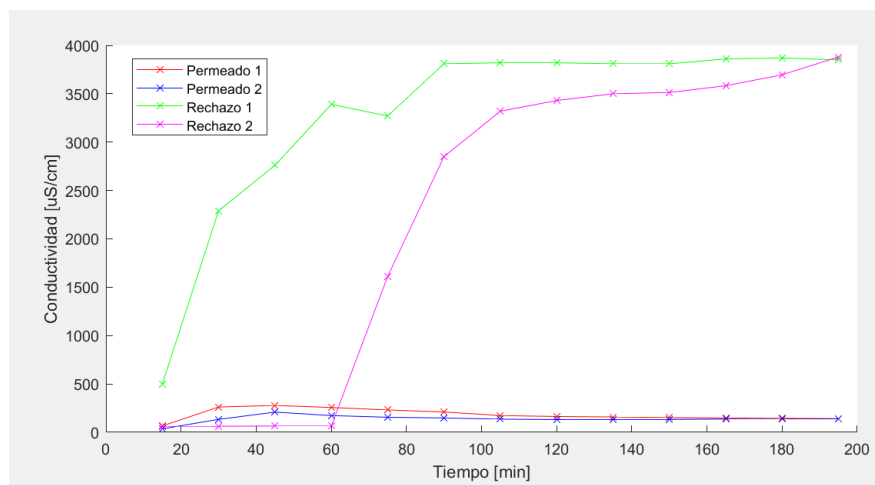


Figura 4.29: Conductividad en el tiempo para las pruebas con agua de Ovejería a 400 psi.

4.5.2.3. Agua relave Talabre a 300 psi por 3.25 horas

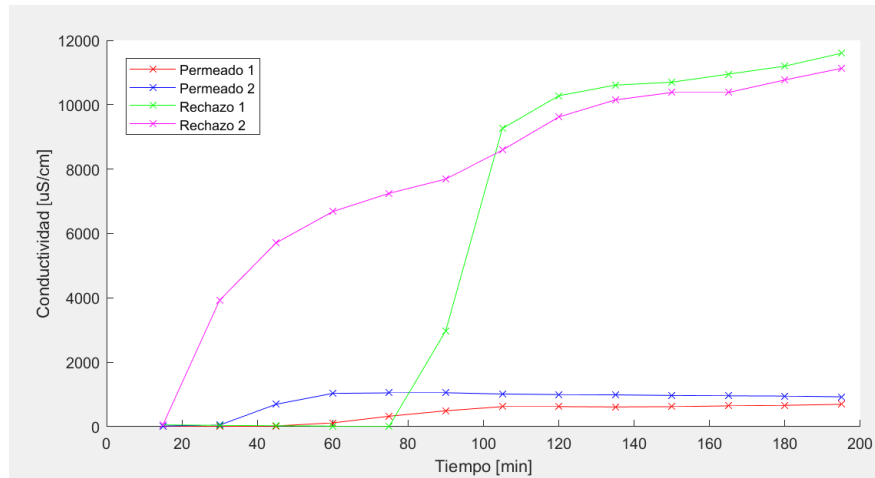


Figura 4.30: Conductividad en el tiempo para las pruebas con agua de Talabre a 300.

4.5.2.4. Agua relave Talabre a 400 psi por 3.25 horas

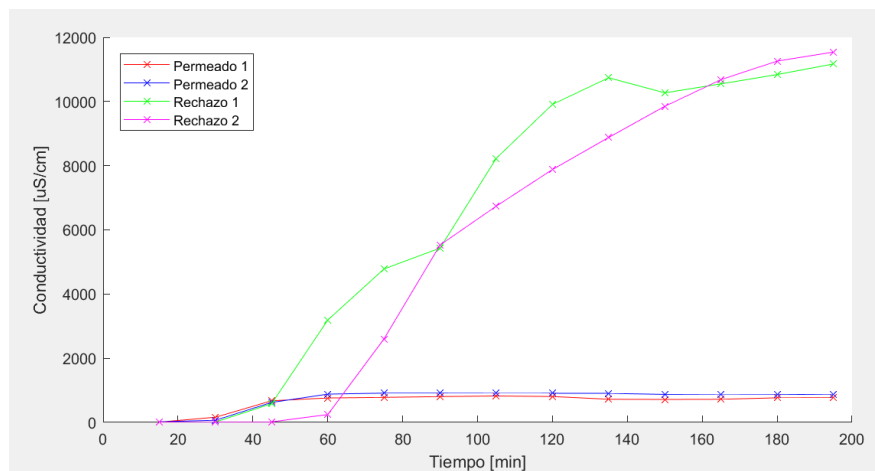


Figura 4.31: Conductividad en el tiempo para las pruebas con agua de Talabre a 400 psi a 3.25 horas.

4.5.2.5. Agua relave Talabre a 400 psi por 5 horas

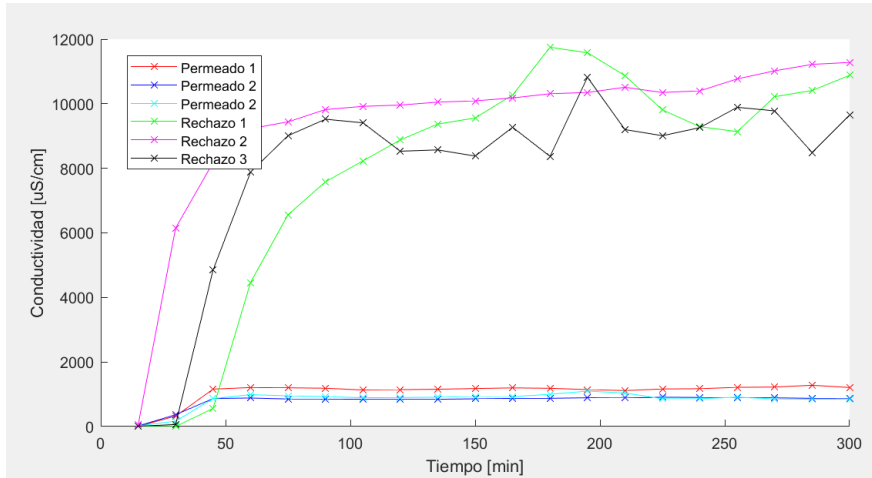


Figura 4.32: Conductividad en el tiempo para las pruebas con agua de Talabre a 400 psi a 5 horas.

Tabla 4.25: Tabla de conductividades y rechazo (%) de pruebas a 3.25 horas en aguas de relave Ovejería

Prueba	A	B	A	B
	300 psi	300 psi	400 psi	400 psi
Fecha	16-05-22	31-05-22	01-06-22	07-06-22
E.C µS/Cm (Alimentación)	3.920	3.540	3.530	3.480
E.C µS/Cm (Permeado)	321	409	161	136
E.C µS/Cm (Rechazo)	3.091	3.157	3.831	3.472
E.C µS/Cm (Norma)	750	750	750	750
Rechazo (%)	91,81	88,45	95,44	96,09

Tabla 4.26: Tabla de conductividades y rechazo (%) de pruebas a 5 horas en aguas de relave Ovejería

Prueba	A	B	C
	400 psi	400 psi	400 psi
Fecha	23-06-22	29-06-22	30-06-22
E.C µS/Cm (Alimentación)	3.319	3.309	3.342
E.C µS/Cm (Permeado)	153	150	135
E.C µS/Cm (Rechazo)	3.416	3.353	3.494
E.C µS/Cm (Norma)	750	750	750
Rechazo (%)	95,39	95,47	95,96

Tabla 4.27: Tabla de conductividades y rechazo (%) de pruebas a 3.25 horas en aguas de relave Talabre

Prueba	A	B	A	B
	300 psi	300 psi	400 psi	400 psi
Fecha	17-05-22	02-06-22	03-06-22	06-06-22
E.C $\mu\text{S}/\text{Cm}$ (Alimentación)	11.070	10.160	10.350	10.310
E.C $\mu\text{S}/\text{Cm}$ (Permeado)	641	983	766	891
E.C $\mu\text{S}/\text{Cm}$ (Rechazo)	10.657	9.839	9.643	9.045
E.C $\mu\text{S}/\text{Cm}$ (Norma)	750	750	750	750
Rechazo (%)	94,21	90,32	92,60	91,36

Tabla 4.28: Tabla de conductividades y rechazo (%) de pruebas a 5 horas en aguas de relave Talabre

Prueba	A	B	C
	400 psi	400 psi	400 psi
Fecha	09-06-22	10-06-22	13-06-22
E.C $\mu\text{S}/\text{Cm}$ (Alimentación)	10.390	10.380	10.100
E.C $\mu\text{S}/\text{Cm}$ (Permeado)	1.180	875	921
E.C $\mu\text{S}/\text{Cm}$ (Rechazo)	9.856	10.415	9.210
E.C $\mu\text{S}/\text{Cm}$ (Norma)	750	750	750
Rechazo (%)	88,64	91,57	90,88

En el permeado, la conductividad aumenta en conjunto con la disminución del flujo, hasta que se estabiliza al mismo tiempo, desde ahí, el aumento empieza a ser leve pero sostenido hasta un punto, entre los 150 y 165 minutos, en que se observa un leve declive en todas las pruebas. Sin embargo, en Talabre a 5 horas, se distingue que luego de esto, los TDS empieza a oscilar en un rango entre 490 y 520 ppm, para dicha prueba, es decir, una vez alcanzada la estabilización, se llega a un *peak* de la membrana para volver a estabilizarse.

En el rechazo, en cambio, ocurre un fenómeno desconcertante al principio, pero con una explicación lógica. Entre los 30 y 60 minutos aparentemente pasa solo agua limpia, ello corresponde a la salida del agua atrapada en la manguera la cual, por su extensión, se estima que contiene alrededor de 90 ml, que terminan de vaciarse en alrededor de una hora. Así, los resultados tomados bajo los distintos períodos de tiempo, corresponden en realidad al rechazo de uno o dos períodos anteriores, asociado a dicho desfase.

En cuanto al porcentaje de rechazo de la conductividad, graficados en la Figura 4.33, se observa que los rechazos varían en los rangos entre los 87 y 95 %, estos valores son consistentes con la literatura. Por otro lado, hay variaciones notables en las pruebas realizadas a 300 psi, mostrando valores dispares en duplicados. A 400 psi si logran observarse tendencias claras en cuanto a las distintas aguas, Ovejería presenta rechazos de alrededor del 95 %, lo cual es un resultado conforme a 400 psi, en cambio Talabre, a la misma presión, resulta en valores por lo general bajo el 90 % de rechazo, una vez que se analicen las concentraciones particulares de iones en las aguas se puede explicar mejor los fenómenos causantes de este comportamiento, lo cuales pueden ser atribuibles a los efectos del ion común y polarización de la membrana más rápida en aguas con mayor presencia de ciertos iones.

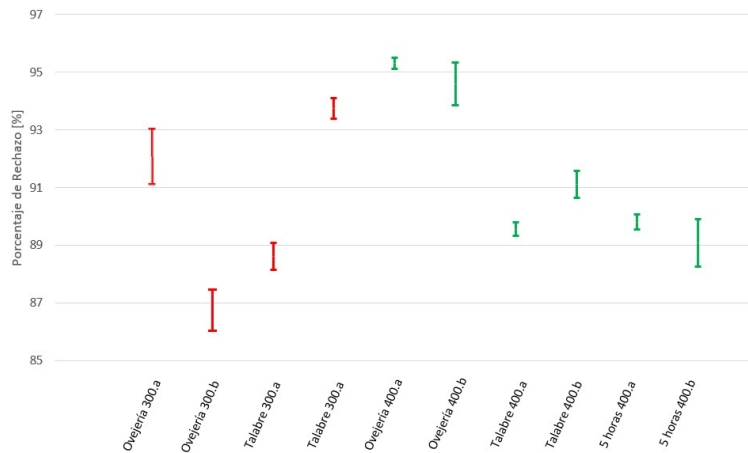


Figura 4.33: Porcentaje de rechazo.

En cuanto al paso de sales, este parámetro es contrario al rechazo de iones, lo cual, por la interpretación de los conceptos, es lógico, a medida que el sistema permite un menor paso de sales al permeado, el rechazo de iones aumenta, por lo cual los gráficos de tendencias de los resultados son congruentes.

Centrando el análisis en el rechazo de los iones totales, para Ovejería existe una marcada diferencia entre el rechazo producido a 300 psi, en torno al 90 %, y los 400 psi, aumentando a un 95 %. Para Talabre el valor se mantiene mas o menos constante para ambas presiones, en 91.37 % con una desviación estandar de 1.75. Comparándolo con el estudio de Pino et al (2018), quienes analizan membranas NF99 frente a AMD altamente concentrados, ellos obtienen un rechazo total de iones entre 84 - 92 %, siendo 15 bar (~220 psi) las condiciones óptimas, porcentajes que se encuentran en los rangos de resultados obtenidos.

Diversos autores explican los resultados, por ejemplo, en el caso de Ovejería, donde los efectos del mecanismo de exclusión de Donnan (carga de membrana por co-iones repelen a otros co-iones) y exclusión dieléctrica (simila a la de Donnan pero causado por el momentos dipolar del agua), aumentando el rechazo junto con ella. En el caso de Talabre, probablemente tenga que ver con el efecto estérico y de carga superficial (repulsión electrostática) que obstruyen el transporte de metales y sulfato, causando así una mayor dilución de especies en el permeado, provocados, por ende, por iones específicos que conllevan menor rechazo.

A presiones superiores a 25 bar (~350 psi), las carga superficial de las membranas generan más repulsión de cationes y causan un alto rechazo para mantener la electroneutralidad. Jadhav et al. (2016) muestran el efecto de la presión sobre el flujo de permeado para ambas membrana, con una tendencia de flujo similar en el rango de presión operativa que supone un ensuciamiento insignificante, la fuerza aplicada sobre la superficie de la membrana aumenta con la presión e incrementa el volumen de líquido descargado en el permeado, por otro lado, la hidrofobicidad de las membranas afecta en menor medida el flujo.

En cuanto al sulfato, a mayor presión tuvo un efecto adverso en Ovejería, dado que el porcentaje de rechazo disminuyó, Andrade et al (2017) señala que el aumento de la presión

aumenta el flujo de permeado, pero también la polarización de la membrana, disminuyendo el rendimiento de ella por la reducción de la resistencia de transporte en la interfase. Por otro lado, la fracción de especies asociada con el sulfato podría producir compuestos más grandes y provocar un aumento en el rechazo de especies.

Por otro lado, en otros artículos se reportan mayores rechazos de sulfato, por sobre el 93 % independientemente de las condiciones de operación y presencia de iones competidores, e inclusive llegando a 96 % de rechazo (Jadhav et al., 2016). Las causas de los disímiles resultados (60 a 70 % en Ovejería y 81 a 85 % en Talabre) se pueden atribuir a dos factores, el primero es que los estudios citados corresponden a pruebas en membranas en espiral, lo cual requiere de un escalamiento de los resultados, y lo segundo es que, tal como señala el mismo estudio, la cantidad de sulfato rechazado depende en gran medida del contraión y otras sales en la solución, aunque otros iones no afectan el rechazo medio de sulfato si son concentraciones comparativamente bajas, no es el caso de estos relaves. Finalmente, Jadhav et al. (2016) indica que el parámetro más influyente en el rechazo de sulfato resulta ser su concentración inicial, el aumento en la concentración inicial de sulfato resulta en una caída en el rechazo, lo cual sucede contrario a lo que se señala y puede explicarse ponderando la tasa de aumento de la concentración de sulfatos, con la de los otros iones en las distintas aguas.

Las mediciones del arsénico generan algo de desconfianza por el método usado y algunos resultados incongruentes (valores negativos), esto se debe a que los volúmenes enviados a análisis eran bajos para el requerimiento de la metodología, pero de todas formas da para análisis. El arsénico atañe en particular al relave de Talabre, en el se observan rechazos entre 97 a 99 %. Jadhav et al. (2016) reporta que la membrana logra retener por encima del 75 % de fluoruro, arsénico, sulfato y nitrato con una eficiencia muy alta para cada uno).

Jadhav et al. (2016) confirma que en pruebas con una duración corta como estas el espesor de la capa de gel producida por *fouling* es despreciable, y este fenómeno debe ser visto en el largo plazo (sobre 5 días).

4.5.3. Resultados: Temperatura

El sistema de regulación de temperatura consiste en un calentador de pecera y un serpentín al interior del tanque de agua salada, junto con un sensor de temperatura, esta se ajustaba a 20°C y cuando el sensor detectaba que el agua estaba bajo la temperatura encendía el calentador de pecera, una vez que la temperatura sobrepasaba los 20°C se abría una válvula que permitía el paso de agua fría (de la llave) al interior del serpentín, donde se descargaba el agua recirculada, el sistema lograba estabilizarse antes de encender la bomba, sin embargo, la acción de esta en el tiempo hacía que se calentara, y el agua que pasaba al interior de ella, salía con una temperatura mayor, lo cual explica el aumento en el tiempo de este parámetro.

La temperatura de operación está fuertemente influenciada por la temperatura ambiente, la cual varía día a día, lo cual explica las diferencias entre duplicados, además, las mediciones eran distintas respecto al equipo de medición utilizado (conductímetro o pHmetro), donde en general el segundo arrojaba temperaturas mayores que el primero. pero la temperatura, sirven de referencia en la obtención de parámetros sensibles a ella (conductividad, pH, etc).

4.5.3.1. Agua relave Ovejería a 300 y 400 psi por 3.25 horas

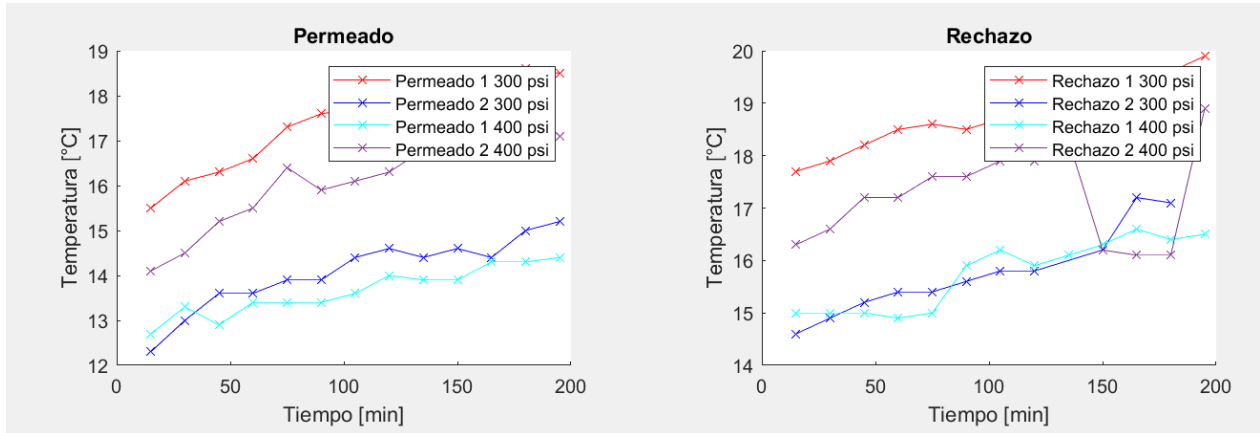


Figura 4.34: Temperatura en el tiempo para las pruebas con agua de Ovejería.

4.5.3.2. Agua relave Talabre a 300 y 400 psi por 3.25 y 5 horas

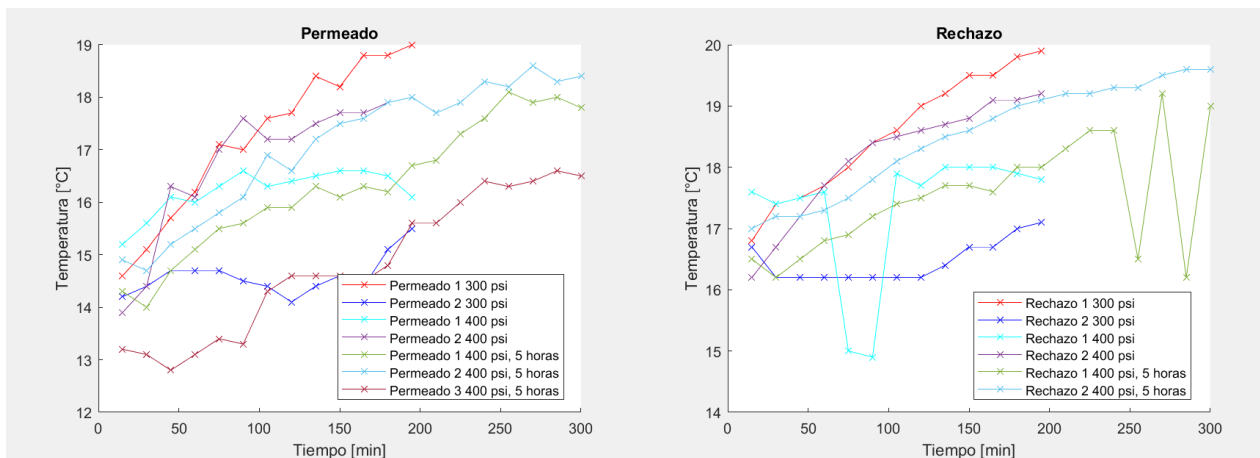


Figura 4.35: Temperatura en el tiempo para las pruebas con agua de Talabre.

4.5.4. Resultados: pH y ORP

Según el fabricante de las membrana, el rango de operación, a 25°C, es de un pH entre 4 y 9. En el caso de las pruebas, todas fueron ejecutadas con a pH entre 6.6 y 7.6, en el permeado y rechazo respectivamente, para Ovejería, lo cual consigue operar en el rango de trabajo de la membrana, y para Talabre, entre 7.0 y 9.6 para permeado y rechazo respectivamente, que superaron los límites de pH en el rechazo. En ambas aguas, el pH del rechazo supera al de alimentación, viendose reflejado en las aguas de Talabre una mayor diferencia entre ellos, lo cual puede asociarse a los oxianiones (de As o Mo, por ejemplo) concentrados, los cuales al protonarse generan más OH⁻, cambiando el potencial de oxidación.

Tabla 4.29: Valores de ORP y pH en aguas de rechazo

Prueba	pH				ORP			
	A		B		A		B	
	Media	Desv str	Media	Desv str	Media	Desv str	Media	Desv str
Ovejería 300	7.13	0.13	6.95	0.29	267.23	21.21	293.23	12.45
Ovejería 400	6.64	0.18	7.21	0.15	293.42	14.25	275.17	7.58
Talabre 300	8.58	0.56	8.01	0.88	203.15	29.05	205.23	58.54
Talabre 400	8.23	0.67	8.23	0.75	217.15	17.29	200.54	31.14
5 horas Talabre 400	8.48	0.38	8.34	0.41	237.90	19.92	251.98	21.26

El ORP (potencial de oxidación-reducción) es una medida de la capacidad de una masa de agua para oxidar contaminantes, se mide en milivoltios y varía en función del potencial estándar, la concentración relativa de iones, la temperatura y el número de electrones transferidos en las reacciones. Sirve para estimar el predominio de especies químicas dentro de un grupo redox, un agua con potencial redox elevado (sobre 400 mV) tenderá a comportarse como un agente oxidante mientras que si tiene un potencial negativo tenderá a actuar como reductor (Hernandez Batis, 2017).

Como se observa en los resultados, el rechazo tiene un ORP que ronda en los 300 mV lo cual no representa un gran potencial de oxidación. Sin embargo si tiene potencial y se trabaja en una zona oxidada, lo cual está relacionado con el contacto ambiental que tiene desde su depositación. La movilidad de iones férricos no es un factor influyente dado que a estos niveles de potencial de oxidación la mayoría de los iones se presentan como Fe^{2+} dado que el equilibrio del par Fe^{2+}/Fe^{3+} es de 771 mV.

Dados los resultados obtenidos, se consideran las aguas como soluciones con una concentración dominante de OH^- , pero cercano a la neutralidad, dada la formación de ácido producto de la oxidación por O_2 ambiental y acción bateriana en el tranque.

4.6. Resultados calidad de agua

Tabla 4.30: Tabla de calidad de pruebas a 3.25 horas en aguas de relave Ovejería

Prueba	A	B	A	B
	300 psi	300 psi	400 psi	400 psi
Fecha	16-05-22	31-05-22	01-06-22	07-06-22
pH Permeado	7,03	7,08	7,02	6,67
pH Rechazo	7,24	7,00	7,63	7,13
Sulfato mg/l (Alimentación)	2.119,69	2.119,69	2.119,69	2.119,69
Sulfato mg/l (Permeado)	554,00	668,00	834,00	743,00
% Rechazo Sulfato	73,86	68,49	60,65	64,95
Sulfato mg/l (NCh 1.333)	250,00	250,00	250,00	250,00
Sulfato mg/l (Rechazo)	1,994,00	2,324,00	2.718,00	2.193,00
% Concentración Sulfato	94,07	109,64	128,23	103,46

Tabla 4.31: Tabla de calidad de pruebas a 3.25 horas en aguas de relave Talabre

Prueba	A	B	A	B
	300 psi	300 psi	400 psi	400 psi
Fecha	17-05-22	02-06-22	03-06-22	06-06-22
pH Permeado	7,27	7,38	7,68	7,06
pH Rechazo	9,37	9,56	9,02	9,42
Sulfato mg/L (Alimentación)	3.057,64	3.057,64	3.057,64	3.057,64
Sulfato mg/L (Permeado)	444	554	458	551
% Rechazo Sulfato	85,48	81,88	85,02	81,98
Sulfato mg/l (NCh 1.333)	250	250	250	250
Sulfato mg/l (Rechazo)	2.886	3.071	3.250	3.237
Arsénico mg/l (Alimentación)	31,41	31,41	31,41	31,41
Arsénico mg/L (Permeado)	0,2	0,83	0,53	0,74
% Rechazo Arsénico	99,36	97,36	98,31	97,64
Arsénico mg/l (NCh 1.333)	0,1	0,1	0,1	0,1
Arsénico mg/l (Rechazo)	23,95	25,12	27,03	25,58
Cloruro mg/l (Alimentación)	2.147,68	2.147,68	2.147,68	2.147,68
Cloruro mg/l (Permeado)	47,86	67,36	56,72	65,58
% Rechazo Cloruro	97,77	96,86	97,36	96,95
Cloruro mg/l (NCh 1.333)	200	200	200	200

Capítulo 5

Conclusiones

En cuanto a los objetivos específicos propuestos en este documento, se concluye que:

1. Es importante estudiar el proceso minero detrás de la formación y composición de relaves, para entender la caracterización de sus aguas, sopesando el impacto de sus variables en ella.
2. En el caso de ambos casos de estudio, entre los factores más determinantes se encuentra el agua usada en el proceso. Primero, el agua fresca inyectada contiene gran cantidad de TDS y, en función de la zona, determinados contaminantes (arsénico, cloro, sulfatos, etc.), y segundo, el agua recirculada, dados los procesos a los que está expuesto (cambios de pH con aditivos, exposición a oxigenación, lixiviación de metales, etc.) se va cargando de más elementos disueltos.
3. Preliminarmente, el sistema de tratamiento de aguas claras de relaves por membranas de nanofiltración es una alternativa eficiente para la eliminación de iones disueltos en aguas de relaves, más no es eficiente en términos de la recuperación de agua. Los resultados de simulación de una planta pueden diferir del proceso real de la planta, pero proporcionan una guía para futuras investigaciones sobre los beneficios del proceso de NF, en base a los resultados obtenidos:
 - Conductividad: Cumple la norma chilena 1.333 en Ovejería, sin embargo en Talabre sobrepasa los límites en muchas pruebas, independiente de la presión usada.
 - pH: Cumple las normas en ambos relaves para el permeado.
 - Sulfatos: No cumple la norma chilena 1.333, se sobrepasa los límites en ambos relaves. Sin embargo, para los límites del D.S. 90, ambos relaves están por debajo de lo permitido para la descarga en acuíferos superficiales.
 - Arsénico: No cumple las normas, se sobrepasa los límites en ambos relaves.

Y en cuanto al objetivo general:

- El bombeo de aguas de relaves desde el tranque es necesario para mantener una estabilidad tanto física como química de la estructura, pero también es una de las oportunidades mejor esperadas para lograr una gestión integrada de las aguas.
- Si bien todas las faenas apuntan a recircular las aguas a sus respectivos procesos, la recirculación del agua al proceso tiene implicancias económicas y logísticas dadas por el

trade – off de la energía requerida para devolver el agua al proceso, con los costos de tratar el agua para conseguir una calidad estándar para la flotación o molienda.

- Al mejorar tratamientos existentes se puede ofrecer variadas alternativas en los usos del agua, no solo recirculación, si no también el riego agrícola consiguiendo un objetivo adicional que tiene que ver con mejorar las relaciones sociales con las comunidades que colindan los tranques.
- Poder concluir acerca de los alcances de la factibilidad de este sistema de tratamiento para aguas de relaves es apresurado. Si bien existen resultados prometedores en cuanto a la eliminación de especies comunes en las aguas de relaves, los resultados finales de las pruebas son insuficientes.
- La conversión no es concluyente, en ciertas pruebas resultó baja y por ello se deben buscar soluciones a esto antes de catalogar a esta tecnología como atractiva.
- Las complejas interacciones entre elementos provenientes de yacimientos mineros, con el agua expuesta a cambios de pH y de potenciales de oxidación, hace que para reutilizarla se deba tratar el agua.
- Se dificulta el análisis de composición de las aguas por la variabilidad mineral entre faenas, e incluso en un mismo yacimiento en operación cuya mineralogía va cambiando con el tiempo, poder analizarlo uno por uno es complejo por las trabas al acceso a la información de cada una.
- Respecto a la nanofiltración, sus ventajas radican en los altos flujos comparativos con las otras membranas y las experiencias previas existentes con este tipo de tecnologías, así como el conocimiento de sus desventajas y puntos de mejora. En la línea de las desventajas, una arista que debe incorporarse en el análisis es el rechazo generado, el cual tiene una componente de impacto ambiental muy alto, para ello se propone:
 - Pretratamiento que consiga un agua con calidad suficiente para el D.S. 90, tal que luego de la nanofiltración, el rechazo pueda descargarse al medio.
 - Tratamiento alternativo (sin membranas) que permita descargar la solución al medio.
 - Recuperación de metales concentrados disueltos del rechazo mediante métodos de precipitación o filtrado.
 - Reutilización en un proceso distinto que no requiera un alta calidad de agua, tal como agua industrial de un rubro distinto, por ejemplo, lavado de productos en los que los iones son inocuos.

Además, como recomendaciones:

- Para los objetivos de este trabajo, usar algún pretratamiento al sistema de tratamiento de membrana, tal que elimine el As, sulfatos, etc., estudios previos demuestran que es viable en aguas cargadas en altas concentraciones de iones. Sin embargo, el reuso para propósitos de riego agrícola requiere de un proceso adicional (ya sea de fitoremediación, electrodiálisis, ósmosis inversa, precipitación) previo o posterior al tratamiento con NF.

- Nanofiltración en dos etapas: Mohammad (2015) probó la NF de dos etapas con un dispositivo de recuperación de energía (ERD) para reducir el consumo específico y mejorar la eficiencia y el índice de recuperación. Comparativamente, el consumo específico de energía de NF se puede reducir a 2,09 kWh/m³ y la tasa de recuperación del sistema se puede aumentar a 42,78% en condiciones específicas, en relación a RO, aunque la especificidad de cada proceso hace que su integración sea más eficiente.
- La introducción de nanomateriales en la película delgada ha tenido un efecto significativo en el rendimiento de las membranas. Debido a su variada selectividad, las membranas NF también han tenido éxito en el tratamiento de aguas y aguas residuales, desalinización, aplicaciones farmacéuticas, biotecnológicas y alimentarias (Mohammad, 2015).

Más allá de los clásicos desafíos productivos que demanda una sociedad con crecientes estándares de vida, y una abundancia menor de recursos en yacimientos, el escenario minero se complejiza por las crecientes problemáticas en ámbitos poco tradicionales. La gestión del agua en sectores mineros, y las proyecciones del aumento del tamaño y cantidad de depósitos de relaves es un problema minero actual y futuro, una temática que ha cobrado interés tanto para las empresas, como para los gobiernos, permitiendo la generación de bases de datos de dichas instalaciones. Sin embargo, no se encuentran en todos los países, ni tampoco estandarizados. Por otro lado, la estandarización de los datos de relaves tiene su desventaja, si bien establece una vara de medición, cada faena y tranque tiene su particularidad que hace que se deba enfocar en cosas distintas para su análisis. Por ejemplo, la base de datos de Sernageomin es un catastro estandarizado de una cantidad limitada de elementos y minerales, y además, son datos muy parciales y preliminares, no es una base de datos representativa. Sumado a dicha iniciativa, la Instrucción General Resolución 31 Exenta tiene por objeto implementar un sistema de monitoreo en línea y reporte electrónico para un grupo de depósitos de relaves priorizados a nivel nacional, en base a criterios técnicos que han sido acordados con el Servicio Nacional de Geología y Minería ("Sernageomin") y la Dirección General de Aguas ("DGA"). Con ello se establece un sistema de conexión en línea con los sistemas de la SMA, donde se informan las mediciones de los parámetros de caudales extraído o inyectado, volumen acumulado, pH, conductividad eléctrica, temperatura, turbiedad y 21 parámetros discretos de calidad de aguas.

Finalmente, las vías del progreso humano han estado relacionadas a la incorporación de tecnologías, y estas últimas a minerales ¿Cómo sostener el progreso humano en armonía con un futuro sostenible?, Humberto Maturana responde que “todos los seres vivos transformamos el medio en que nos encontramos y que hace posible nuestra existencia, es parte de las coherencias propias del fluir del vivir de los sistemas ecológicos (...) vivir de un organismo ocurre como un continuo fluir de cambio estructural en el que se conservan a la vez su organización (autopoiesis) y su adaptación a su ámbito de interacciones”, la consecuencia fundamental es vivir en un medio en conversación continua, en un acoplamiento estructural con el, “en la deriva natural sobrevive el apto en un devenir no comparativo” (Dávila et al., 2019). La mayoría de los proyectos actualmente considera el tratamiento de agua para recircularla al proceso, y los que no, se preocupan sólo de cumplir el D.S. 90 de liberación de aguas a acuíferos, se podría pensar más allá incorporando las necesidades de las comunidades en donde se practica la minería y entregarle alternativas en la gestión de aguas, como lo busca este proyecto.

Bibliografía

- [1] Ayoob, S., Gupta, A. K., y Bhat, V. T., A conceptual overview on sustainable technologies for the defluoridation of drinking water, vol. 38. 2008, doi:10.1080/10643380701413310.
- [2] Adiansyah, J. S., Rosano, M., Vink, S., y Keir, G., “A framework for a sustainable approach to mine tailings management: Disposal strategies,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 108, pp. 1050–1062, 2015, doi:10.1016/j.jclepro.2015.07.139.
- [3] Koutsou, C. P., Yiantsios, S. G., y Karabelas, A. J., “A numerical and experimental study of mass transfer in spacer-filled channels: Effects of spacer geometrical characteristics and Schmidt number,” *Journal of Membrane Science*, vol. 326, no. 1, pp. 234–251, 2009, doi:10.1016/j.memsci.2008.10.007.
- [4] Jadhav, S. V., Marathe, K. V., y Rathod, V. K., “A pilot scale concurrent removal of fluoride, arsenic, sulfate and nitrate by using nanofiltration: Competing ion interaction and modelling approach,” *Journal of Water Process Engineering*, vol. 13, pp. 153–167, 2016, doi:10.1016/j.jwpe.2016.04.008.
- [5] Costello, C., “Acid Mine Drainage: Innovative Treatment Technologies,” *National Network of Environmental Management Studies Fellow, U.S. EPA*, no. October, p. 52, 2003.
- [6] Andrea, N. y Gómez, A., *Advances in Mine Tailings and Water Management in the Mining Industry for a Circular Economy*. 2020.
- [7] Briones Olivares, E., “Alternativas de tratamiento de sulfuros de baja ley Codelco División Andina,” *Pontificia Universidad Católica de Valparaíso*, p. 140, 2012, http://opac.pucv.cl/pucv_txt/txt-4500/UCF4962_01.pdf.
- [8] Filippov, L. O., Severov, V. V., y Filippova, I. V., “An overview of the beneficiation of iron ores via reverse cationic flotation,” *International Journal of Mineral Processing*, vol. 127, pp. 62–69, 2014, doi:10.1016/j.minpro.2014.01.002.
- [9] Cortés, M., “Análisis De Consolidación Y Secado De Relaves Para Evaluar Mejoras De Recuperación De Agua En Tranques De Relave Convencionales Operados Con Celdas Interiores,” p. 268, 2019, arXiv:arXiv:1011.1669v3.
- [10] Shengo, L. M., Gaydardzhiev, S., y Kalenga, N. M., “Assessment of water quality effects on flotation of copper-cobalt oxide ore,” *Minerals Engineering*, vol. 65, pp. 145–148, 2014, doi:10.1016/j.mineng.2014.06.005.
- [11] Takeno, N., “Atlas of Eh-pH diagrams Intercomparison of thermodynamic databases,” *National Institute of Advanced Industrial Science and Technology Tokyo*, vol. 5, no. 419, p. 285, 2005, <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Atlas+of+Eh-pH+diagrams+Intercomparison+of+thermodynamic+databases#0>.

- [12] Tapia, Y., Casanova, M., Castillo, B., Acuña, E., Covarrubias, J., Antilén, M., y Masaguer, A., “Availability of copper in mine tailings with humic substance addition and uptake by *Atriplex halimus*,” *Environmental Monitoring and Assessment*, vol. 191, no. 11, 2019, doi:10.1007/s10661-019-7832-2.
- [13] Dold, B., “Basic Concepts in Environmental Geochemistry of Sulfidic Mine-Waste Management,” *Waste Management*, no. January 2002, 2010, doi:10.5772/8458.
- [14] Hagemann, S. G., Angerer, T., Duuring, P., Rosière, C. A., Figueiredo e Silva, R. C., Lobato, L., Hensler, A. S., y Walde, D. H., “BIF-hosted iron mineral system: A review,” *Ore Geology Reviews*, vol. 76, pp. 317–359, 2016, doi:10.1016/j.oregeorev.2015.11.004.
- [15] Inzunza, J., “Capítulo 15. Climas De Chile.,” *Meteorología Descriptiva*, pp. 421–451, 2002.
- [16] Valencia-Moreno, M., Ochoa-Landín, L., Noguez-Alcántara, B., Ruiz, J., y Pérez-Segura, E., “Características metalogenéticas de los depósitos de tipo pórfido cuprífero en México y su situación en el contexto mundial,” *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, vol. 58, no. 1, pp. 1–26, 2006, doi:10.18268/bsgm2006v58n1a1.
- [17] Aburto, R. E. F., “CARACTERIZACIÓN GEOMETALÚRGICA DEL YACIMIENTO RADOMIRO TOMIC ENTRE LOS AÑOS 2017-2024, REGIÓN DE ANTOFAGASTA, CHILE,” 2017.
- [18] Lottermoser, B., Chapter 1. Mine Wastes. Characterization, Treatment and Environmental Impacts. 2010.
- [19] Ceniceros-Gómez, A. E., Macías-Macías, K. Y., de la Cruz-Moreno, J. E., Gutiérrez-Ruiz, M. E., y Martínez-Jardines, L. G., “Characterization of mining tailings in México for the possible recovery of strategic elements,” *Journal of South American Earth Sciences*, vol. 88, no. August, pp. 72–79, 2018, doi:10.1016/j.jsames.2018.08.013.
- [20] Elizondo-Álvarez, M. A., Uribe-Salas, A., y Bello-Teodoro, S., “Chemical stability of xanthates, dithiophosphinates and hydroxamic acids in aqueous solutions and their environmental implications,” *Ecotoxicology and Environmental Safety*, vol. 207, 2021, doi:10.1016/J.ECOENV.2020.111509.
- [21] Alarcón-Herrera, M. T., Bundschuh, J., Nath, B., Nicolli, H. B., Gutierrez, M., Reyes-Gomez, V. M., Nuñez, D., Martín-Dominguez, I. R., y Sracek, O., “Co-occurrence of arsenic and fluoride in groundwater of semi-arid regions in Latin America: Genesis, mobility and remediation,” *Journal of Hazardous Materials*, vol. 262, pp. 960–969, 2013, doi:10.1016/j.jhazmat.2012.08.005.
- [22] Andrade, L. H., Aguiar, A. O., Pires, W. L., Grossi, L. B., y Amaral, M. C., “Comprehensive bench- and pilot-scale investigation of NF for gold mining effluent treatment: Membrane performance and fouling control strategies,” *Separation and Purification Technology*, vol. 174, pp. 44–56, 2017, doi:10.1016/j.seppur.2016.09.048.
- [23] Andrade, L. H., Aguiar, A. O., Pires, W. L., Grossi, L. B., y Amaral, M. C., “Comprehensive bench- and pilot-scale investigation of NF for gold mining effluent treatment: Membrane performance and fouling control strategies,” *Separation and Purification Technology*, vol. 174, pp. 44–56, 2017, doi:10.1016/j.seppur.2016.09.048.
- [24] Chacón, L., Ruiz, F., y Zapico, R., “Concentración por flotación de menas de oro-cobre con bajas recuperaciones de arsénico,” *Revista de Metalurgia*, vol. 41, no. Extra,

- pp. 390–394, 2005, doi:10.3989/revmetalm.2005.v41.iextra.1062.
- [25] Cantalallopts A., J. y Ramírez, V., “Consumo de agua en la minería del cobre al año 2019,” pp. 1 – 58, 2020, https://www.cochilco.cl/ListadoTemtico/20201030ConsumoDeaguaenlamineriadelcobreal2019_versionfinal.pdf.
- [26] Renovables-Uncuyo Autor, N., Acosta, A., Blanco, R., Palca, L. A., Jáchal, Y., y Juan, S., “Contenido de elementos traza en los ríos Blanco, La Palca y Jachal, San Juan,” 2018, http://ediunc.bdigital.uncu.edu.ar/objetos_digitales/10871/tesis-irnr-abraham-acosta-said-nahir-2018.pdf.
- [27] Ministerio Secretaría General de la Presidencia, “Decreto supremo 90,” Decreto supremo 90, p. 16, 2000, https://dga.mop.gob.cl/administracionrecursoshidricos/Documentos/DTO_90_07_MAR_2001.pdf.
- [28] Ministerio de Minería, “Decreto Supremo N° 248: Reglamento para la Aprobación de Proyectos de Diseño, Construcción, Operación y Cierre de los Depósitos de Relaves,” Diario Oficial, pp. 159–182, 2007, http://www.sernageomin.cl/wp-content/uploads/2018/01/DS248_Reglamento_DepositosRelave.pdf.
- [29] Cifuentes Molina, G., Herrera Cayo, C., y Moura Bernardes, A., “DEGRADACIÓN DE XANTATO MEDIANTE OXIDACIÓN AVANZADA,” 2012, https://www.researchgate.net/publication/264898178_DEGRADACION_DE_XANTATO_MEDIANTE_OXIDACION_AVANZADA.
- [30] Li, Q., Chen, Z., Zhang, B., Li, B., Lu, K., Lu, L., y Guo, H., “Detection of tailings dams using high-resolution satellite imagery and a single shot multibox detector in the Jing-Jin-Ji Region, China,” *Remote Sensing*, vol. 12, no. 16, 2020, doi:10.3390/RS12162626.
- [31] Sarker, S. K., Haque, N., Bruckard, W., Bhuiyan, M., y Pramanik, B. K., “Development of a geospatial database of tailing storage facilities in Australia using satellite images,” *Chemosphere*, vol. 303, no. P2, p. 135139, 2022, doi:10.1016/j.chemosphere.2022.135139.
- [32] Rao, P., “Discussion of “ Mechanistic Model for CaSO₄ Fouling on Nanofiltration,” *Journal of Environmental Engineering*, no. September, pp. 941–946, 2007.
- [33] Fernández Bao, S., “Diseño de Experimentos: Diseño Factorial. Memorias y Anexos,” Upc, p. 73 Pag., 2020, https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/339723/TFM_Fernandez_Bao_Sheila.pdf?sequence=1&isAllowed=y.
- [34] Tapia, J., “Distribución de arsénico en las cuencas hidrológicas de la zona norte de la Región de Atacama,” 2014.
- [35] Vezzani, D. y Bandini, S., “Donnan equilibrium and dielectric exclusion for characterization of nanofiltration membranes,” *Desalination*, vol. 149, no. 1-3, pp. 477–483, 2002, doi:10.1016/S0011-9164(02)00784-1.
- [36] Herrera, V., Carrasco, C., Araneda, P., Varas, V., y Rojo, C., “Ecological potential risk by arsenic in the loas’s river mouth, north of Chile,” *Revista Internacional de Contaminacion Ambiental*, vol. 35, no. 3, pp. 609–622, 2019, doi:10.20937/RICA.2019.35.03.08.
- [37] Conejera, C., “Efecto de la Fábrica y la Estructura en la Resistencia No Drenada de Relave Integral,” 2016, <http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/139887/Efecto-de-la-fabrica-y-la-estructura-en-la-resistencia-no-drenada-de-relave-integral.pdf>.

f?sequence=1&isAllowed=y.

- [38] Han, K. N., “Effect of Anions on the Solubility of Rare Earth Element-Bearing Minerals in Acids,” *Mining, Metallurgy and Exploration*, vol. 36, no. 1, pp. 215–225, 2019, doi:10.1007/s42461-018-0029-3.
- [39] Simon, A., McDonald, J. A., Khan, S. J., Price, W. E., y Nghiem, L. D., “Effects of caustic cleaning on pore size of nanofiltration membranes and their rejection of trace organic chemicals,” *Journal of Membrane Science*, vol. 447, pp. 153–162, 2013, doi:10.1016/j.memsci.2013.07.013.
- [40] Luo, J. y Wan, Y., “Effects of pH and salt on nanofiltration—a critical review,” *Journal of Membrane Science*, vol. 438, pp. 18–28, 2013, doi:10.1016/j.memsci.2013.03.029.
- [41] Luo, J. y Wan, Y., “Effects of pH and salt on nanofiltration—a critical review,” *Journal of Membrane Science*, vol. 438, pp. 18–28, 2013, doi:10.1016/j.memsci.2013.03.029.
- [42] Smuda, J., Dold, B., Spangenberg, J. E., Friese, K., Kobek, M. R., Bustos, C. A., y Pfeifer, H. R., “Element cycling during the transition from alkaline to acidic environment in an active porphyry copper tailings impoundment, Chuquicamata, Chile,” *Journal of Geochemical Exploration*, vol. 140, pp. 23–40, 2014, doi:10.1016/j.gexplo.2014.01.013.
- [43] Grupo Medioambiental del Sistema de las Naciones Unidas, “Escasez Hidrica en Chile: Desafios pendientes,” Naciones Unidas, pp. 1–8, 2021, https://chile.un.org/sites/default/files/2021-03/PBRecursosHÁndricos_FINAL_17demarzo.pdf.
- [44] Bernardino, J. Y., “Estudio Comparativo De La Activación De Piritita En Flotación De Minerales a Nivel Industrial Y De Laboratorio Usando La Técnica De Espectroscopía Fotoelectrónica De Rayos X (Xps) Memoria Para Optar Al Título De Ingeniero Civil Químico Bayron Cayunao Collío,” 2014.
- [45] Murga, D. I. G., “Estudio experimental de la separación de enargita desde un concentrado de Cu-As mediante flotación,” *University Rankings*, 2022, <https://www.scimagoir.com/institution.php?idp=1184>.
- [46] Correa Mendoza, C. J., “Evaluación del efecto del pH y de los reactivos en la recuperación de cobre en el circuito de flotación colectiva de Cu-Mo en la Minera Los Pelambres,” 2019.
- [47] Zbinden, A., “Evaluación del riego con agua clara de relave alta en molibdeno y sulfatos sobre la calidad del suelo y del forraje,” 2011.
- [48] MIGUEL HERNÁN SOTO RUBIO, “EVALUAR LA FACTIBILIDAD TÉCNICA, ECONÓMICA Y ESTRATÉGICA PARA COMENZAR UNA OPERACIÓN DE IMPORTACIÓN Y COMERCIALIZACIÓN DE CAL Y SUS DIFERENTES TIPOS EN EL MERCADO MINERO,” pp. 9–25, 2019.
- [49] Lanteri, Y., Fievet, P., y Szymczyk, A., “Evaluation of the steric, electric, and dielectric exclusion model on the basis of salt rejection rate and membrane potential measurements,” *Journal of Colloid and Interface Science*, vol. 331, no. 1, pp. 148–155, 2009, doi:10.1016/j.jcis.2008.11.014.
- [50] Novoselov, A. A., Popov, S., y de Souza Filho, C. R., “Evaluation of uncertainties in solid-aqueous-gas chemical equilibrium calculations,” *Computers and Geosciences*, vol. 79, pp. 118–128, 2015, doi:10.1016/j.cageo.2015.03.012.

- [51] Dold, B., “Evolution of acid mine drainage formation in sulphidic mine tailings,” *Minerals*, vol. 4, no. 3, pp. 621–641, 2014, doi:10.3390/min4030621.
- [52] Hedenquist, J. W., Arribas, A., y Gonzalez-Urien, E., “Exploration for Epithermal Gold Deposits,” *Gold in 2000*, no. August, pp. 245–277, 2000, doi:10.5382/rev.13.07.
- [53] FERNANDEZ, Y. M. T., “FITORREMEDIAACION DE SUELOS CONTAMINADOS CON ARSENICO Y METALES PESADOS MEDIANTE EL USO DE ARBUSTOS DEL GENERO ATRIPLEX EN LA REGION DE ANTOFAGASTA, CHILE.,” 2015.
- [54] Schäfer, A. I., Andritsos, N., Karabelas, A. J., Hoek, E. M., Schneider, R., y Nyström, M., *Fouling in Nanofiltration*. 2021, doi:10.1002/9783527824984.ch7.
- [55] Frascoli, F. y Hudson-Edwards, K. A., “Geochemistry, mineralogy and microbiology of molybdenum in mining-affected environments,” *Minerals*, vol. 8, no. 2, pp. 1–18, 2018, doi:10.3390/min8020042.
- [56] Tilley, J., “Global copper production jumps more than 5 % in 2016| S&P Global Market Intelligence,” 2017, <https://pages.marketintelligence.spglobal.com/global-copper-production-jumps-more-than-5-percent-in-2016-MS.html>.
- [57] Zhu, Z., “Gold in iron oxide copper-gold deposits,” *Ore Geology Reviews*, vol. 72, no. P1, pp. 37–42, 2016, doi:10.1016/j.oregeorev.2015.07.001.
- [58] Ramírez Morandé, N. A., “Guía técnica de operación y control de depósitos de relaves,” Servicio Nacional de Geología y Minería, Departamento de Seguridad Minera, pp. 1–42, 2007.
- [59] Valenzuela, L., Campaña, J., Bard, E., y Figueroa, A., “High sand tailings dams: main challenges,” *Obras y proyectos*, no. 20, pp. 17–29, 2016, doi:10.4067/s0718-28132016002000002.
- [60] Pino, L., Vargas, C., Schwarz, A., y Borquez, R., “Influence of operating conditions on the removal of metals and sulfate from copper acid mine drainage by nanofiltration,” *Chemical Engineering Journal*, vol. 345, no. January, pp. 114–125, 2018, doi:10.1016/j.cej.2018.03.070.
- [61] SONAMI, “Informe Consumo De Agua.,” p. 29, 2021, <https://www.sonami.cl/v2/wp-content/uploads/2020/06/informe-de-agua-2018.pdf>.
- [62] Ojeda-Pereira, I. y Campos-Medina, F., “International trends in mining tailings publications: A descriptive bibliometric study,” *Resources Policy*, vol. 74, no. July, 2021, doi:10.1016/j.resourpol.2021.102272.
- [63] Szymczyk, A. y Fievet, P., “Investigating transport properties of nanofiltration membranes by means of a steric, electric and dielectric exclusion model,” *Journal of Membrane Science*, vol. 252, no. 1-2, pp. 77–88, 2005, doi:10.1016/j.memsci.2004.12.002.
- [64] Sanchis, A., “Las diez minas de oro más importantes del mundo, todas ellas bajo tierra, reunidas en un mapa,” 2022, <https://magnet.xataka.com/un-mundo-fascinante/diez-minas-oro-importantes-mundo-todas-ellas-tierra-reunidas-mapa>.
- [65] Ministerio de Obras Públicas, “Mesa nacional del agua: Primer informe,” Ministerio de Obras Públicas (MOP) del Gobierno de Chile, p. 29, 2020, https://www.mop.cl/Prensa/Documents/Mesa_Nacional_del_Agua_2020_Primer_Informe_Enero.pdf.
- [66] Smith, E. J., Davison, W., y Hamilton-Taylor, J., “Methods for preparing synthetic

- freshwaters,” *Water Research*, vol. 36, no. 5, pp. 1286–1296, 2002, doi:10.1016/S0043-1354(01)00341-4.
- [67] Hernandez Batis, J., “Microlab Industrial - ORP: El otro potencial en el agua,” 2017, <https://www.microlabindustrial.com/blog/orp-el-otro-potencial-en-el-agua>.
- [68] Kossoff, D., Dubbin, W. E., Alfredsson, M., Edwards, S. J., Macklin, M. G., y Hudson-Edwards, K. A., “Mine tailings dams: Characteristics, failure, environmental impacts, and remediation,” *Applied Geochemistry*, vol. 51, pp. 229–245, 2014, doi:10.1016/j.apgeochem.2014.09.010.
- [69] Dold, B., *Mineralogical and geochemical changes of copper flotation tailings in relation to their original composition and climatic setting : implications for acid mine drainage and element mobility*. 1999.
- [70] Artug, G., “Modelling and Simulation of Nanofiltration Membranes,” vol. 49, pp. 1–7, 2001.
- [71] Mohammad, A. W., Teow, Y. H., Ang, W. L., Chung, Y. T., Oatley-Radcliffe, D. L., y Hilal, N., “Nanofiltration membranes review: Recent advances and future prospects,” *Desalination*, vol. 356, pp. 226–254, 2015, doi:10.1016/J.DESAL.2014.10.043.
- [72] INN, “Norma chilena (NCh) 1333. Requisitos de calidad de agua para diferentes usos,” Inn, p. 15, 1978, <https://five.epicollect.net/>.
- [73] Smith, D. R., Inoue, T., Ushikubo, M., y Amano, S., “Nursing in Japan.,” *Australian nursing journal* (July 1993), vol. 9, no. 1, pp. 39–40, 2001, doi:10.1097/00000446-195210000-00005.
- [74] Lillo, J., “Peligros geoquímicos: arsénico de origen natural en las aguas. Grupo de Estudios de Minería y Medio Ambiente.,” 2003,
- [75] Fuentes, M., Fornero, J., y Rubio, H., “Pib Minero Y No Minero *,” Banco Central, pp. 94–109, 2017.
- [76] Silva, V., Montalvillo, M., Carmona, F. J., Palacio, L., Hernández, A., y Prádanos, P., “Prediction of single salt rejection in nanofiltration membranes by independent measurements,” *Desalination*, vol. 382, pp. 1–12, 2016, doi:10.1016/j.desal.2015.12.012.
- [77] Sernageomin, “Preguntas frecuentes sobre relaves,” Servicio Nacional de Geología y Minería, Departamento de Seguridad Minera, vol. 1999, no. December, pp. 1–6, 2006.
- [78] Ortega, I., “Principales factores que controlan la composición química de los fluidos acuosos de los tranques de relaves chilenos,” 2020.
- [79] Advanced Mining Technology Center (AMTC), “PROJECT: TECHNOLOGY AND ADVANCED MODELLING FOR INCREASED WATER RECOVERY AND REMEDIATION IN TAILING STORAGE FACILITIES FOR SUSTAINABLE REUS,” ANID 2021 STRATEGIC RESEARCH FUND ON DROUGHT, PROPOSAL APPLICATION FORM, 2021.
- [80] Cochilco, “Proyección de consumo de agua en la minería del cobre 2020-2031,” Dirección de Estudios y Políticas Públicas, vol. DEPP 27/20, pp. 1–36, 2020, <http://www.mch.cl/reportes/informe-proyeccion-de-consumo-de-agua-en-la-mineria-d-el-cobre-2014-2025/>.
- [81] COCHILCO, “Proyecciones de consumo de energía eléctrica y agua en la minería del

cobre al,” 2022.

- [82] Al-Zoubi, H., Hilal, N., Darwish, N. A., y Mohammad, A. W., “Rejection and modelling of sulphate and potassium salts by nanofiltration membranes: neural network and Spiegler-Kedem model,” *Desalination*, vol. 206, no. 1-3, pp. 42–60, 2007, doi:10.1016/j.desal.2006.02.060.
- [83] Janqui Guzman, G., “Remoción de Molibdeno del agua del rio Challhuahuacho de comtabambas- apurimac con carbon activado de tusa de Maiz,” Tesis, p. 105, 2018.
- [84] Al-Rashdi, B. A., Johnson, D. J., y Hilal, N., “Removal of heavy metal ions by nanofiltration,” *Desalination*, vol. 315, pp. 2–17, 2013, doi:10.1016/j.desal.2012.05.022.
- [85] Hoinkis, J., Valero-Freitag, S., Caporgno, M. P., y Pätzold, C., “Removal of nitrate and fluoride by nanofiltration - A comparative study,” *Desalination and Water Treatment*, vol. 30, no. 1-3, pp. 278–288, 2011, doi:10.5004/dwt.2011.2103.
- [86] Sun, W. D., Ling, M. X., Yang, X. Y., Fan, W. M., Ding, X., y Liang, H. Y., “Ridge subduction and porphyry copper-gold mineralization: An overview,” *Science China Earth Sciences*, vol. 53, no. 4, pp. 475–484, 2010, doi:10.1007/s11430-010-0024-0.
- [87] Krieg, H. M., Modise, S. J., Keizer, K., y Neomagus, H. W., “Salt rejection in nanofiltration for single and binary salt mixtures in view of sulphate removal,” *Desalination*, vol. 171, no. 2, pp. 205–215, 2005, doi:10.1016/j.desal.2004.05.005.
- [88] Tansel, B., Sager, J., Rector, T., Garland, J., Strayer, R. F., Levine, L., Roberts, M., Hummerick, M., y Bauer, J., “Significance of hydrated radius and hydration shells on ionic permeability during nanofiltration in dead end and cross flow modes,” *Separation and Purification Technology*, vol. 51, no. 1, pp. 40–47, 2006, doi:10.1016/j.seppur.2005.12.020.
- [89] C., J. A. y C., C. C., “Simulación Dinámica De Sistemas De Osmosis Inversa,” *Revista Peruana de Química e Ingeniería Química*, vol. 15, no. 1, pp. 21–37, 2012, <http://revistasinvestigacion.unmsm.edu.pe/index.php/quim/article/view/4758>.
- [90] Manchalwar, S. M., Anthati, V. A., y Marathe, K. V., “Simulation of micellar enhanced ultrafiltration by multiple solute model,” *Journal of Hazardous Materials*, vol. 184, no. 1-3, pp. 485–492, 2010, doi:10.1016/j.jhazmat.2010.08.060.
- [91] Manchalwar, S. M., Anthati, V. A., y Marathe, K. V., “Simulation of micellar enhanced ultrafiltration by multiple solute model,” *Journal of Hazardous Materials*, vol. 184, no. 1-3, pp. 485–492, 2010, doi:10.1016/j.jhazmat.2010.08.060.
- [92] OVALLE, N. F. V., “SÍNTESIS Y CARACTERIZACIÓN DE MEMBRANAS PARA OSMOSIS INVERSA CON CAPACIDAD ANTI-BIOINCRUSTANTE, POR INCORPORACIÓN DE NANO PARTÍCULAS DE DIÓXIDO DE TITANIO,” 2015.
- [93] Falcon-Hernandez, M. F. y Herrera-Zepelin, L., “Small tailings deposits in Chile: National impact of publicly available data,” *26th International Congress on Large Dams*, 2018, pp. 680–692, 2018.
- [94] Abdellatif, E., Mostafa, B., Bruno, B., y Thomas, G., “Spatial mapping of acidity and geochemical properties of oxidized tailings within the former eagle/telbel mine site,” *Minerals*, vol. 9, no. 3, 2019, doi:10.3390/min9030180.
- [95] Rachman, R. M., Bahri, A. S., y Trihadiningrum, Y., “Stabilization/solidification of

- tailings on traditional gold mining in Kulon Progo using fly ash,” *Journal of Ecological Engineering*, vol. 19, no. 3, pp. 178–184, 2018, doi:10.12911/22998993/86145.
- [96] Ghazizadeh, S., Bareither, C. A., Scalia, J., y Shackelford, C. D., “Synthetic Mining Solutions for Laboratory Testing of Geosynthetic Clay Liners,” *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 144, no. 10, 2018, doi:10.1061/(asce)gt.1943-5606.0001953.
- [97] Franks, D. M., Stringer, M., Torres-Cruz, L. A., Baker, E., Valenta, R., Thygesen, K., Matthews, A., Howchin, J., y Barrie, S., “Tailings facility disclosures reveal stability risks,” *Scientific Reports*, vol. 11, no. 1, pp. 1–7, 2021, doi:10.1038/s41598-021-84897-0.
- [98] Kemp, D., Owen, J. R., y Lèbre, , “Tailings facility failures in the global mining industry: Will a ‘transparency turn’ drive change?,” *Business Strategy and the Environment*, vol. 30, no. 1, pp. 122–134, 2021, doi:10.1002/bse.2613.
- [99] Moran-Palacios, H., Ortega-Fernandez, F., Lopez-Castaño, R., y Alvarez-Cabal, J. V., “The potential of iron ore tailings as secondary deposits of rare earths,” *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 9, no. 14, 2019, doi:10.3390/app9142913.
- [100] Ihle, C. F. y Kracht, W., “The relevance of water recirculation in large scale mineral processing plants with a remote water supply,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 177, pp. 34–51, 2018, doi:10.1016/j.jclepro.2017.12.219.
- [101] Araya, N., Kraslawski, A., y Cisternas, L. A., “Towards mine tailings valorization: Recovery of critical materials from Chilean mine tailings,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 263, no. January 2019, p. 121555, 2020, doi:10.1016/j.jclepro.2020.121555.
- [102] Binnemans, K., Jones, P. T., Blanpain, B., Van Gerven, T., y Pontikes, Y., “Towards zero-waste valorisation of rare-earth-containing industrial process residues: A critical review,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 99, pp. 17–38, 2015, doi:10.1016/j.jclepro.2015.02.089.
- [103] Manríquez, G., “Uso de depresantes alternativos para la flotación selectiva de molibdeno codeco división andina,” p. 56, 2019, http://152.74.17.92/bitstream/11594/398/1/Tesis_Uso_de_depresantes_alternativos.Image.Marked.pdf.
- [104] Pacheco-gutiérrez, L. A. y Durán Domínguez-de bazúa, M. d. C., “Uso del agua en la industria minera,” *Tecnología, Ciencia, Educación*, vol. 22, no. 1, pp. 15–29, 2007.
- [105] Chizhova, I. y Volkov, A., “Variations of Gold-silver Ratio in Ores of Epithermal Deposits: Comparative Analysis,” 16th IAMG Meeting, no. June, 2014.
- [106] Nguyen, M. T., Vink, S., Ziemski, M., y Barrett, D. J., “Water and energy synergy and trade-off potentials in mine water management,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 84, no. 1, pp. 629–638, 2014, doi:10.1016/j.jclepro.2014.01.063.
- [107] Mathias, P., “World Copper Resources,” *Innovation and Technology*, pp. 18–42, 1991.
- [108] Reichl, C. y Schatz, M., “World mining data 2019,” *International Organizing Committee for the World Mining Congresses*, vol. 34, p. 262, 2019, <http://www.wmc.org.pl/?q=node/49/>.
- [109] Davila, X., Maturana, H., Muñoz, I., y García, P., “¿Sustentabilidad o armonía biológico-cultural de los procesos? Todo sustantivo oculta un verbo .,” *Educación e Innovar en Sustentabilidad*, no. January 2009, p. 36 p., 2009.

Anexos

Anexo A. Especiación de aguas de relaves

Se consigue la especiación de las aguas en software '*Visual Medusa*' y los cálculos de concentraciones miliequivalentes.

1. Valencias de las especies atómicas, de acuerdo al principio de dureza y blandura de la nube electrónica más externa, y que en la muestra hay disociación completa de los iones.
2. Se determina la especiación de aniones y cationes presentes en la muestra mediante simulaciones del cálculo con la ayuda del software libre *Visual Medusa*.
3. Al conocer las especies que predominan en los valores de pH existentes (7.8 – 9.1); se realizan los cálculos de las concentraciones en miliequivalentes/L para determinar el porcentaje de la composición para el límite alto y bajo de cada agua.

A.1. Ovejería Límite Bajo

Tabla A.1: Especiación de Ovejería Límite Bajo exportada de *Visual Media*.

Components	MW (g/mol)	Measured Conc. (mg/L)	Molarity (mmol/L)	meq/L
Fe	55.8450	0.0200	0.0004	0.0011
Mn	54.9380	0.0160	0.0003	0.0006
Mo	95.9500	0.7650	0.0080	0.0478
Zn	65.3800	0.0220	0.0003	0.0007
As	74.9216	0.0106	0.0001	0.0007
Al	26.9815	0.5700	0.0211	0.0633
B	10.8110	0.3300	0.0305	0.0916
Cl	35.4530	67.0000	1.8898	1.8873
SO4	96.0600	1985.0000	20.6642	41.3542

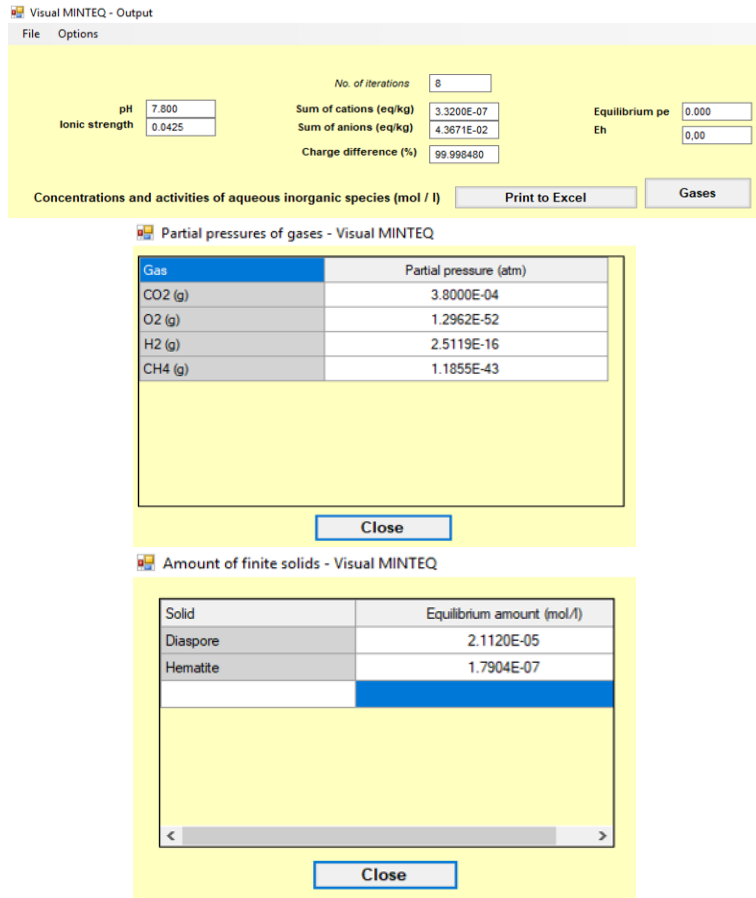


Figura A.1: Inputs usados en *Visual Media* para cálculos de Ovejería Límite Bajo

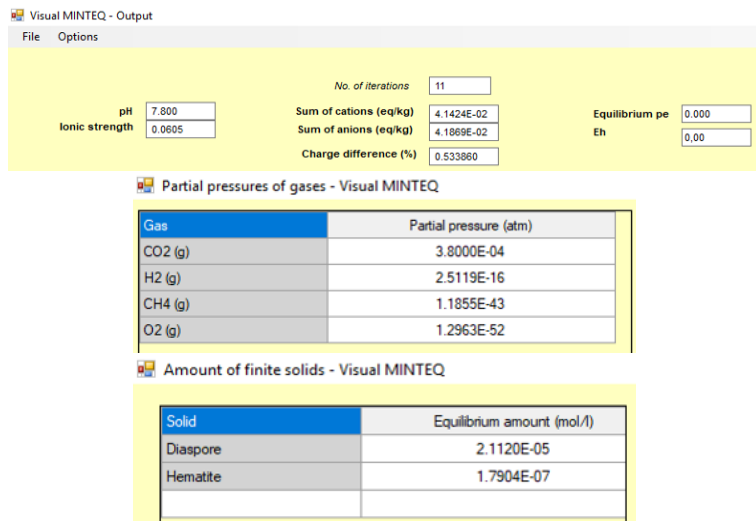


Figura A.2: Inputs usados en iteración *Visual Media* para cálculos de Ovejería Límite Bajo

A.2. Ovejería Límite Alto

Visual MINTEQ - Output

File Options

No. of iterations: 15

pH: 9.100
Ionic strength: 0.0738

Sum of cations (eq/kg): 9.5852E-08
Sum of anions (eq/kg): 8.0231E-02
Charge difference (%): 99.999761

Equilibrium pe: 0.000
Eh: 0.00

Concentrations and activities of aqueous inorganic species (mol / l)

Partial pressures of gases - Visual MINTEQ

Gas	Partial pressure (atm)
CO2 (g)	3.8000E-04
CH4 (g)	4.7199E-54
O2 (g)	2.0543E-47
H2 (g)	6.3096E-19

Amount of finite solids - Visual MINTEQ

Solid	Equilibrium amou...
Diaspore	8.7764E-06
Hematite	1.9660E-06
Cupric Ferite	9.3220E-08

Figura A.3: Inputs usados en *Visual Media* para cálculos de Ovejería Límite Alto

Tabla A.2: Especiación de Ovejería Límite Alto exportada de *Visual Media*.

Components	MW (g/mol)	Measured Conc. (mg/L)	Molarity (mmol/L)	meq/L
Cu	63.5460	0.0160	0.0003	0.0005
Fe	55.8450	0.2300	0.0041	0.0124
Mn	54.9380	0.0160	0.0003	0.0006
Mo	95.9500	0.8150	0.0085	0.0510
Zn	65.3800	0.0220	0.0003	0.0007
As	74.9216	0.0129	0.0002	0.0009
Al	26.9815	0.2400	0.0089	0.0267
B	10.8110	0.7100	0.0657	0.1970
Cl	35.4530	134.0000	3.7797	3.7746
SO4	96.0600	3130.0000	32.5838	65.2083

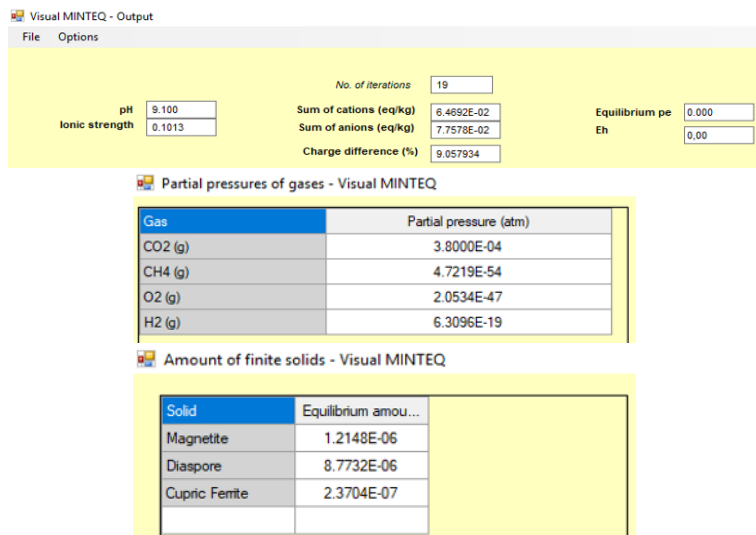


Figura A.4: Inputs usados en iteración *Visual Media* para cálculos de Ovejería Límite Alto

A.3. Especiación Ovejería Límite Alto y Bajo

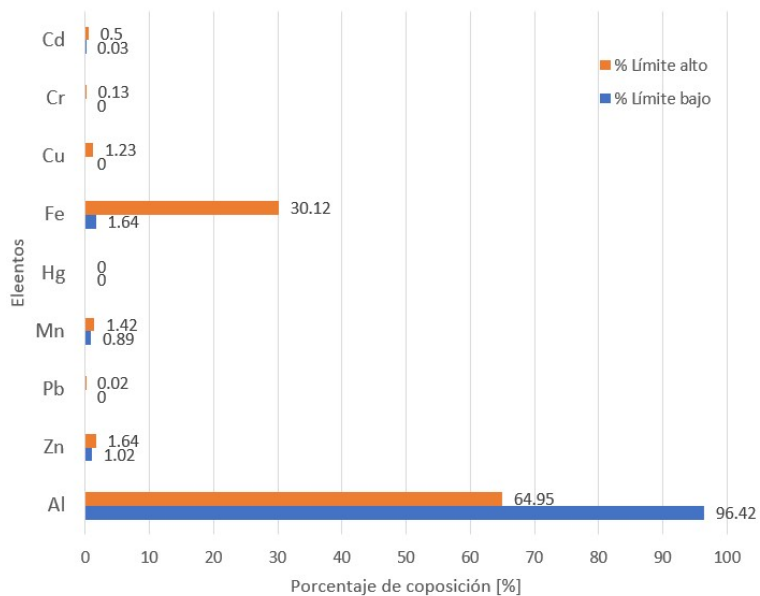


Figura A.5: Gráfica de la composición porcentual de los iones metálicos disueltos en el agua de relave Ovejería.

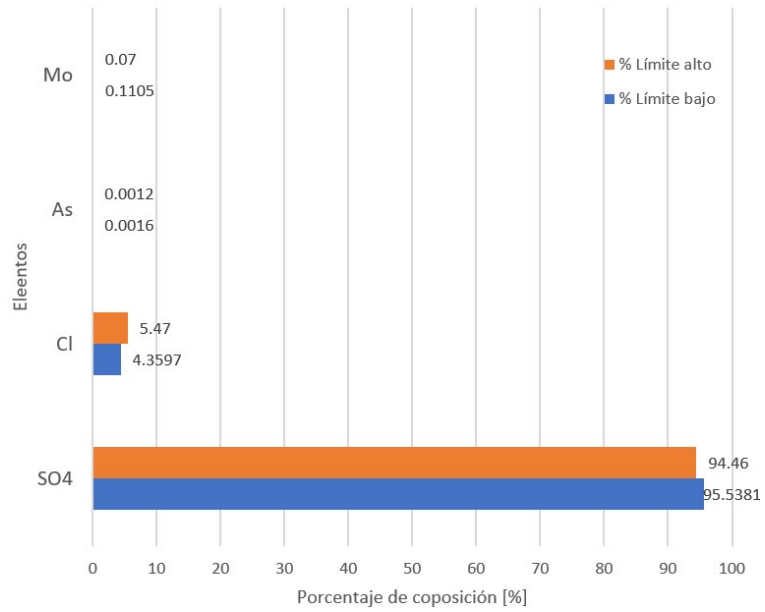


Figura A.6: Gráfica de la composición porcentual de los aniones disueltos en el agua de relaves Ovejería.

A.4. Talabre Límite Bajo

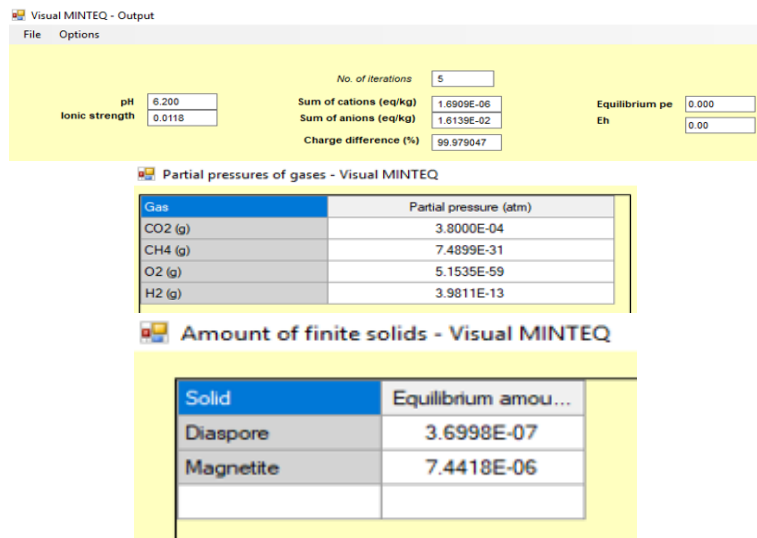


Figura A.7: Inputs usados en *Visual Media* para cálculos de Talabre Límite Alto

Tabla A.3: Especiación de Talabre Límite Alto exportada de *Visual Media*.

Components	MW (g/mol)	Measured Conc. (mg/L)	Molarity (mmol/L)	meq/L
Cr	51.9961	0.0040	0.0001	0.0002
Fe	55.8450	1.2700	0.0227	0.0683
Mo	95.9500	0.0800	0.0008	0.0050
Zn	65.3800	0.0130	0.0002	0.0004
As	74.9216	0.0140	0.0002	0.0009
Al	26.9815	0.0100	0.0004	0.0011
B	10.8110	3.5800	0.3311	0.9935
Cl	35.4530	309.0000	8.7158	8.7042
SO4	96.0600	356.0000	3.7060	7.4167

A.5. Talabre Límite Alto

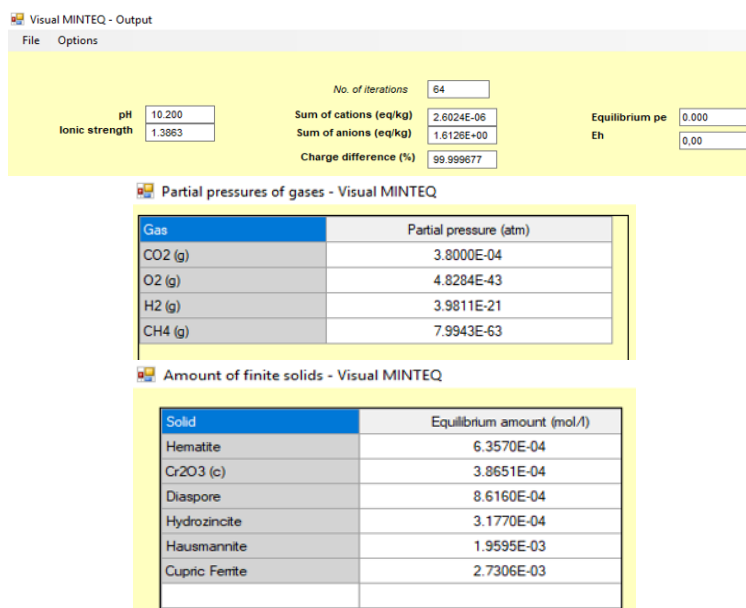


Figura A.8: Inputs usados en *Visual Media* para cálculos de Talabre Límite Alto

Tabla A.4: Especiación de Talabre Límite Alto exportada de *Visual Media*.

Components	MW (g/mol)	Measured Conc. (mg/L)	Molarity (mmol/L)	meq/L
Cr	51.9961	40.2000	0.7731	2.3194
Cu	63.5460	177.0000	2.7854	5.5660
Fe	55.8450	376.0000	6.7329	20.2151
Mn	54.9380	349.0000	6.3526	12.6909
Mo	95.9500	16.0000	0.1668	1.0006
Zn	65.3800	108.0000	1.6519	3.3028
As	74.9216	98.1300	1.3098	6.5488
Al	26.9815	23.3000	0.8636	2.5889
B	10.8110	147.6000	13.6528	40.9621
Cl	35.4530	10281.0000	289.9896	289.6056
SO4	96.0600	7260.0000	75.5778	151.2500

A.6. Especiación Talabre Límite Alto y Bajo

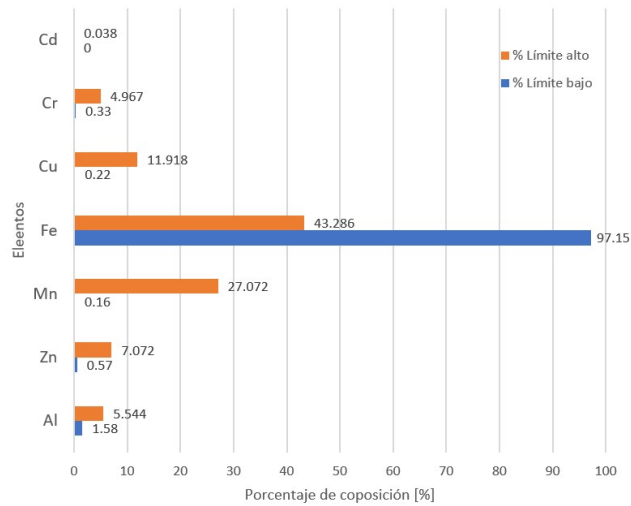


Figura A.9: Grafica de barras de la composición porcentual de los iones metálicos disueltos en el “tailing liquid” Talabre en las condiciones de límite de concentración bajo y alto.

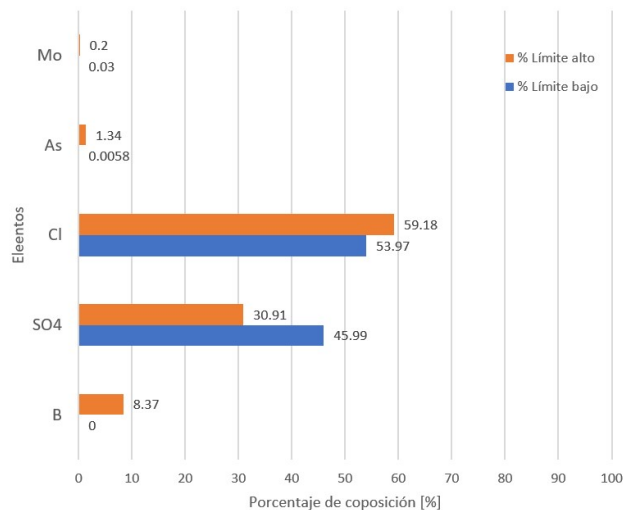


Figura A.10: Gráfica de barras de la composición porcentual de los aniones disueltos en el “tailing liquid” Talabre en las condiciones de límite de concentración bajo y alto.

Anexo B. Metodología de preparación de disoluciones

Las problemáticas de la producción de un sustituto inorgánico sintético de un agua dulce son:

1. Efectos de iones comunes cuando la disolución de una sal inorgánica hace que la solución se sobresature con respecto a otra sal dando como resultado la precipitación de un nuevo sólido (calcio y sulfato tiende a provocar sobresaturación).
2. Disolución de carbonato de calcio, que es una sal relativamente insoluble, algunas aguas duras comúnmente se acercan a la saturación o sobresaturación con respecto a la calcita y requieren procedimientos para crear condiciones que conduzcan a una disolución rápida del carbonato de calcio.

La base para idear una receta de agua dulce sintética es (Schmith et al., 2002):

1. Examinar sistemáticamente su composición química determinada analíticamente para determinar las sales requeridas.
2. Organizar las sales en grupos para evitar una solubilidad incongruente y producir tres o cuatro soluciones "stock" concentradas. Dependiendo si desean aguas blandas y ácidas, requieren tres soluciones madres, las aguas duras requieren cuatro. Dado que la producción de algunas soluciones madre da como resultado soluciones con un exceso de CO_2 , se debe restablecer el equilibrio con la atmósfera burbujeando la solución final de agua dulce con aire antes de su uso.

Para ello:

- Es mucho más fácil y preciso pesar varios gramos de cada sal en lugar de solo unos pocos miligramos.

- Altas concentraciones de iones en las soluciones madre aseguran que sean relativamente estables y libres de contaminación.
- El almacenamiento adecuado en un lugar fresco fuera de la luz solar directa asegurará que se conserven indefinidamente.
- A 100 veces la concentración final requerida, se utilizan masas suficientemente altas de sales para asegurar un pesaje fácil y una buena precisión, pero aún así evitar exceder la solubilidad de las sales.

Finalmente:

1. Diseño de una receta sintética de agua dulce blanda o dura.
 - a) Enumerar la composición de iones principales (unidades molares) del agua dulce requerida.
 - b) Como el CO_2 está presente en bajas concentraciones en la mayoría de las aguas naturales en un rango de pH de 7 a 8, se supone que la alcalinidad medida con frecuencia para las aguas blandas y duras es igual a la concentración del ion HCO_3^- .
 - c) La suma de todas las cargas catiónicas debe ser igual a la suma de las cargas aniónicas, sin embargo, se deben hacer pequeños ajustes a las concentraciones de algunos de los cationes y/o aniones para lograr un equilibrio perfecto.
 - i. Primero seleccione algún valor de microequivalentes totales (aproximadamente a mitad de camino) entre las dos sumas de cationes y aniones.
 - ii. Luego se deben hacer pequeños ajustes a las concentraciones de aniones y cationes hasta que sus sumas sean iguales a este punto medio.
 - iii. Los ajustes más grandes deben hacerse a los iones presentes en las concentraciones más altas con pequeños ajustes a los componentes menores.
2. Procedimiento de selección de las sales para la receta de agua blanda
 - a) Evitar el uso de sales de baja solubilidad.
 - b) Los pasos necesarios para seleccionar las sales apropiadas no es un protocolo completamente general debido a la diversidad de composiciones posibles, pero se resume en:
 - i. Use la concentración medida de Mg^{2+} para calcular la cantidad de MgCl_2 requerida (120 meq L⁻¹).
 - ii. El equilibrio de Cl requerido en la solución se obtiene agregando CaCl_2 (160 meq L⁻¹).
 - iii. Usar la concentración medida de NO_3^- para calcular la cantidad de $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ requerida (30 meq L⁻¹).
 - iv. El equilibrio de Ca^{2+} requerido en la solución se obtiene agregando CaCO_3 (340 meq L⁻¹).
 - v. Use la concentración medida de K^+ para calcular la cantidad de KHCO_3 requerida (25 meq L⁻¹).
 - vi. Use la concentración medida de SO_4^{2-} para calcular la cantidad de Na_2SO_4 requerida (230 meq L⁻¹).

- vii. El equilibrio de Na^+ requerido en la solución se obtiene agregando NaHCO_3 (20 meq L⁻¹).
- c) Es conveniente hacer agua de lago sintética preparando soluciones madre concentradas separadas que luego se mezclan en volúmenes apropiados para producir una solución de la composición requerida.
- d) Es necesario usar 3 soluciones madre para la receta de agua blanda y 4 para el agua dura, ya que a estas concentraciones más altas se requiere una solución separada de MgSO_4 para evitar la precipitación.
- e) Si se coloca en la solución 1 o 2, se puede formar un precipitado insoluble de CaSO_4 y si se coloca en la solución madre 3, se puede formar $\text{MgCO}_{3(s)}$. El carbonato de calcio es poco soluble y, por lo tanto, difícil de disolver. Por lo tanto, el carbonato de calcio se coloca en su propia solución madre separada para recetas de agua dulce blanda y dura.

3. Preparación de aguas sintéticas

- Es importante utilizar agua de alta pureza para evitar la introducción de contaminación y sustancias orgánicas en el agua.
- El pH de las aguas circumneutrales está controlado predominantemente por los equilibrios de las especies de carbonato, por lo que no se logrará el equilibrio correcto del pH para las aguas blandas y duras hasta que se elimine el exceso de CO_2 y el agua esté en equilibrio con la atmósfera.
- Aunque el agua eventualmente (días o semanas) se equilibraría naturalmente por la pérdida de CO_2 a la atmósfera, el proceso puede acelerarse burbujeando vigorosamente la solución con aire.
- Se supone que las aguas han alcanzado el equilibrio cuando el pH no cambia más de 0,04 unidades durante una hora.
- Cualquier agua se puede preparar a partir de sus soluciones madre en menos de un día.

Anexo C. Equipamiento de Planta Piloto de Nanofiltración

C.1. Bomba Hydra-Cell M03-S

Se usa la bomba Hydra-Cell M03-S para los experimentos, la cual bombea en un rango bajo de presión, hasta 83 bar para cabezales de bomba metálicos y 24 bar para cabezales de bomba no metálicos, el fluido que se desea permear. Cuenta con un diseño sin sellos ni válvulas de retención de disco horizontales que le permiten manejar abrasivos y partículas que puedan destruirla. El caudal máximo que puede manejar es de 11,7 l/min.

Para operar la unidad de celda de flujo cruzado CF042, STERLITECH recomienda esta bomba de diafragma de desplazamiento positivo diseñada para aplicaciones de flujo bajo y alta presión.

C.2. Conductivímetro de mesa EC/TDS/TEMP



Figura C.1: Conductivímetro de mesa EC/TDS/TEMP (Oakton Instruments).

Conductivímetro Oakton 35419-35, este medidor de conductividad de sobremesa CON 550 cuenta con un chip de microprocesador que proporciona calibración automática, compensación automática de temperatura, almacenamiento de datos, configuración de parámetros y pantalla de lectura máx./mín. El medidor lee de 0 a 200 mS/cm en cuatro rangos y la calibración de conductividad de cuatro puntos, con reconocimiento automático de solución, facilita la calibración. La avanzada tecnología de procesamiento digital mejora el tiempo de respuesta del medidor y la precisión de la medición. Aparece un modo de visualización de lectura estable cuando el valor de medición es estable.

Un electrodo de conductividad con sensor de temperatura mide la conductividad y la temperatura simultáneamente y permite la compensación automática de temperatura. El medidor compacto incluye un portaelectrodos desmontable y tres botellas de solución

de calibración de conductividad. Tiene una clasificación a prueba de polvo y derrames de IP54. Los conectores están protegidos por tapas de sellado de silicona.

- Mide la conductividad, TDS.
- Rango de conductividad de 0 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 200 mS/cm , resolución de 0,1/1 $\mu\text{S}/\text{cm}$; 0,01/0,1 mS/cm y precisión $\pm 1,0\%$ escala completa ± 1 dígito.
- TDDS rango de 0 a 100 g/L y resolución de 0,1/1 mg/L , 0,01/0,1 g/L .
- Rango de temperatura: 0 a 100°C / 32 a 212°F, resolución de temperatura: 0,1/1 °F (0,1 °C) y precisión de temperatura: $\pm 0,5$ °C ± 1 dígito.

C.3. pH-metro



Figura C.2: Medidor Digital multiparámetro: Phmetro, TDS, EC y Temperatura para Calidad De Agua.

Este medidor es pH-metro, con un rango de medición de pH entre 0 - 14, una resolución de 0.01 y precisión ± 0.05 . Medición de TDS de 0 - 19,990ppm, resolución de 1ppm; 0.1ppt y precisión: $\pm 2\%$ F.S. EC con rango de 0 - 19,990 $\mu\text{S}/\text{cm}$, resolución de 1 $\mu\text{S}/\text{cm}$; 0.1 mS/cm y precisión: $\pm 2\%$ F.S y medidor de temperatura de 0 - 60° C.

Anexo D. Protocolos de uso de planta piloto

- Preparación de membrana
 1. Cortar la membrana con cuidado.
 2. Humedecer la membrana, esto se realiza un día antes al sumergirla en un recipiente cerrado con alcohol isopropílico al 50 %.
- Preparación inicial de la planta.
 1. Cerciorarse inicialmente que la válvula 1 este completamente abierta. La válvula 4 debe estar abierta y la 3 cerrada (se inicia la prueba con agua destilada) y que la válvula 2 está casi completamente cerrada (puede cerrarla completamente y luego abrirla media vuelta de llave).
 2. La manguera de recirculación debe estar dirigida al tanque de agua destilada.
 3. Llenar el tanque 2 con agua purificada y el tanque 1 con agua ionizada (agua de relave o sintética).
 4. Debe conectar el sistema de control de temperatura y abrir la llave del serpentín del intercambiador de calor. El calentador de estanque y el sensor de temperatura deben estar sumergidos en el tanque 1.
 5. Conectar la bomba.
 6. Abrir la válvula del tanque 2.
 7. Preparar las probetas y muestras de permeado y rechazo, usando 13 probetas marcadas cada 15 minutos.
- Montaje de la membrana y medición de condiciones iniciales.
 1. Retirar las tapas de los tanques de agua salada y agua destilada. La tapa del agua de rechazo también debe quedar semi abierta (Figura 3.2).
 2. Retirar del carro-maleta que se encuentra debajo de la bomba principal, el conductímetro, las probetas de medición, tijeras y huincha aisladora y cuaderno de la planta.
 3. Montar el conductímetro y enchufarlo, no es necesario calibrar.
 4. Colocar las probetas de medición delante del tanque de agua destilada. Se aconseja anclarlas a la mesa con la huincha aisladora. A estas probetas debe ir la manguera de salida del permeado y se usara para medir el tiempo de permeado y la salinidad (Figura 3.2).
 5. Para montar la membrana en el módulo de membrana:
 - a) Retirar las 4 perillas del modulo de membrana.
 - b) Levantar la mitad superior del módulo. Si el soporte metálico sinterizado se despegar de la mitad superior, volver a colocar, mojándolo en el agua destilada previamente para generar succión.
 - c) Secar adecuadamente el interior del modulo previo a colocar la membrana.
 - d) Colocar la membrana (manipularla con guantes) con la cara activa hacia abajo, en el centro de la parte inferior de la celda.

- e) Encima de la membrana colocar el soporte de poliéster (hay algunos en el cuaderno de pruebas de la planta).
 - f) Usar cinta adhesiva para adherir 1 o 2 esquinas de la membrana+soporte a la parte inferior de la celda.
 - g) Colocar delicadamente la parte superior de la celda, procurando que no se mueva ni dañe la membrana y cerrar las perillas de ajuste con fuerza, para que no filtre el sistema.
6. Anotar en el cuaderno los datos iniciales de la prueba: Tipo de membrana, concentración de sal a utilizar, etc.
 7. Con el conductímetro, anotar la concentración de sal y la temperatura de ambos tanques (de agua destilada y salada) en el cuaderno de pruebas. La temperatura del tanque de agua salada se considera la inicial y puede ser seteada con el controlador de temperatura (típicamente se trabaja a 20°C).
- Encendido de planta y medición de muestras.
 1. Encender la bomba con el interruptor que se encuentra al lado izquierdo del mesón, botón negro (botón rojo de apagado).
 2. Empezar a cerrar la válvula 1 y revisar en el barómetro al lado de esta llave (Figura ??) que la presión aumente lentamente (para evitar saltos de presión) hasta el valor de presión de trabajo usado (300 o 400 psi).
 3. Revisar que el flujo de rechazo sea tan pequeño como un goteo. En caso contrario, manipular la válvula 2 hasta conseguirlo. Una vez nivelada la presión de operación, iniciar el cronómetro.
 - Medición de flujo de permeado con agua limpia.
 1. Con una probeta para el permeado y otra para el rechazo, medir el tiempo en que cada una alcanza los 20ml de solución.
 2. Medir la conductividad, TDS y temperatura de la muestra.
 3. Anotar los datos.
 4. Repetir todos los pasos anteriores por segunda vez.
 - Cambio de agua limpia a agua ionizada.
 1. Cerrar la llave de paso del Tanque 2 al tiempo que se abre la del tanque 1.
 2. Quitar la manguera de recirculación del tanque 1, esperar 10 segundos con la manguera en un recipiente grande, para que el agua limpia remanente de las tuberías del sistema se vacíen, e introducir la manguera al tanque 1.
 3. Poner la manguera del permeado y la del rechazo en las muestras del permeado y rechazo de los 15 minutos, respectivamente.
 4. Cada 15 minutos, medir conductividad, TDS, ORP, pH y temperatura de cada muestra.
 5. Extraer agua de alimentación con la misma periodicidad y medir TDS, conductividad y temperatura.

- Apagado de bomba y limpieza.
 1. Apagar la bomba pulsando el botón rojo en el interruptor de la bomba al costado izquierdo del mesón.
 2. Tomar y preparar las muestras para análisis químico.
 3. Vaciar el tanque 1 y llenarlo con agua de la llave.
 4. Encender la bomba por 5 minutos con recirculación al tanque 1 y luego vaciarlo.
 5. Abrir completamente las válvulas 1 y 2. LLenar con 10 litros de agua de la llave el tanque 1 y encender la bomba hasta que el tanque 1 se vacíe.
 6. Repetir el punto anterior 4 veces más.
 7. Llenar el tanque 1 con agua destilada y hacer circular el agua dos veces más.
 8. Medir la conductividad.

Anexo E. Pruebas de calibración

Tabla E.1: Condiciones de operación de pruebas de calibración

Nombre de prueba	Presión [psi]	Concentración [ppm]	pH
Ovejería límite Bajo 300.a	300	2000	8.85
Ovejería Límite Bajo 300.b	300	2070	9.12
Ovejería Límite Bajo 400.a	400	2010	9.18
Ovejería Límite Bajo 400.b	400	2050	9.11
Ovejería Límite alto 300.a	300	4110	10.09
Ovejería Límite Alto 300.b	300	4020	10.10
Ovejería Límite alto 400.a	400	3870	10.25
Ovejería Límite Alto 400.b	400	3980	10.18

Tabla E.2: Tabla del rechazo porcentual en función del tiempo de las pruebas de calibración

Tiempo	Rechazo (%)							
	Ovejería límite Bajo 300.a	Ovejería Límite Bajo 300.b	Ovejería Límite Bajo 400.a	Ovejería Límite Bajo 400.b	Ovejería Límite alto 300.a	Ovejería Límite Alto 300.b	Ovejería Límite alto 400.a	Ovejería Límite Alto 400.b
15	99.70	99.90	99.44	99.80	99.94	99.82	99.90	99.92
30	98.73	99.85	98.74	99.08	99.85	99.81	99.16	99.91
45	96.13	99.02	95.20	96.96	98.83	99.11	96.11	99.54
60	94.96	97.03	94.47	96.73	97.88	96.71	95.43	98.62
75	93.79	96.35	94.45	96.67	97.23	95.78	95.22	97.85
90	93.77	96.25	94.67	96.69	97.03	95.50	95.06	97.50
105	93.62	96.06	94.49	96.58	96.97	95.57	94.96	97.39
120	93.55	96.08	94.34	96.67	96.91	95.56	94.82	97.40
135	93.76	95.96	94.34	96.58	96.87	95.69	94.83	97.48
150	93.83	96.03	94.41	96.50	96.80	95.64	94.84	97.47
165	93.84	95.93	94.38	96.64	96.76	95.66	94.88	97.40
180	93.85	95.90	94.39	96.61	96.85	95.67	94.98	97.39
195	93.76	95.93	94.46	96.62	96.96	95.81	94.88	97.39

Anexo F. Premeabilidad Hidráulica

Tabla F.1: Resultados de Permeabilidad Hidráulica

Presión	Prueba	Coef. Permeabilidad Hidráulica [L/(m ² *H*bar)]	Flujo de agua limpia [L/m ² *H]
300	Ovejería a	25.88	1.25
	Ovejería b	33.59	1.62
	Talabre a	28.63	1.38
	Talabre b	32.91	1.59
400	Ovejería a	49.03	1.78
	Ovejería b	43.32	1.57
	Talabre a	45.19	1.64
	Talabre b	43.06	1.56
	Talabre 5 a	59.52	2.16
	Talabre 5 b	46.23	1.68

Tabla F.2: Promedios de Permeabilidad Hidráulica

Presión		Coef. Permeabilidad Hidráulica [L/(m ² *H*bar)]	Flujo de agua limpia [L/m ² *H]
300	Promedio	30.25	1.46
	Desv. Str	3.65	0.18
400	Promedio	47.73	1.73
	Desv. Str	6.18	0.22

F.1. Celda CF016



Figura F.1: Celda CF016 (STERLITECH).

La Celda CF016 (Figura F.1) es una unidad de filtración de flujo cruzado a escala de laboratorio diseñada para proporcionar datos de rendimiento rápidos y precisos con cantidades mínimas de producto, gasto y tiempo, es la celda usada en la planta piloto de Osmosis Inversa, con una presión máxima de funcionamiento de 1000 psi (69 bar), pero sus versiones de PTFE y acrílico son de 400 psi, con un área de membrana activa de 20,6 cm².

Anexo G. Elementos en trazas en relaves

G.1. Tranque Ovejería

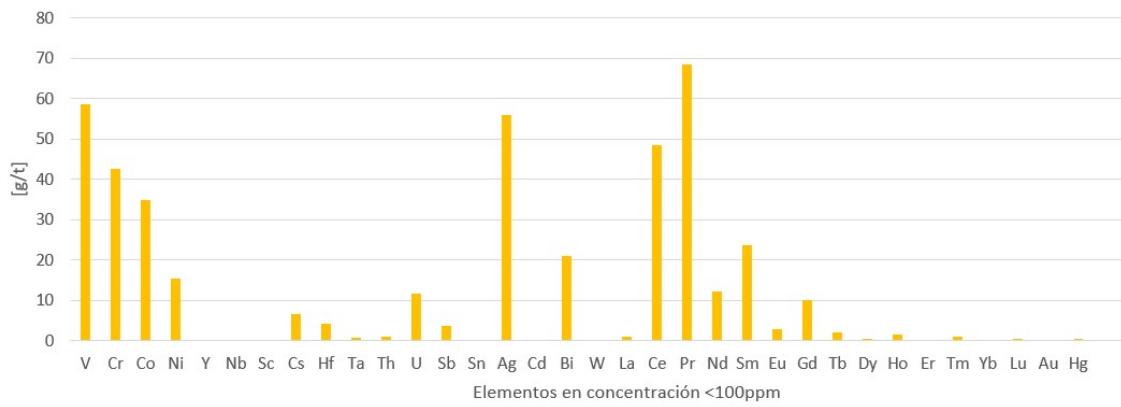


Figura G.1: Composición de elementos con una concentración <100 ppm (trazas) del Tranque de Relaves Ovejería (Sernageomin, 2020).

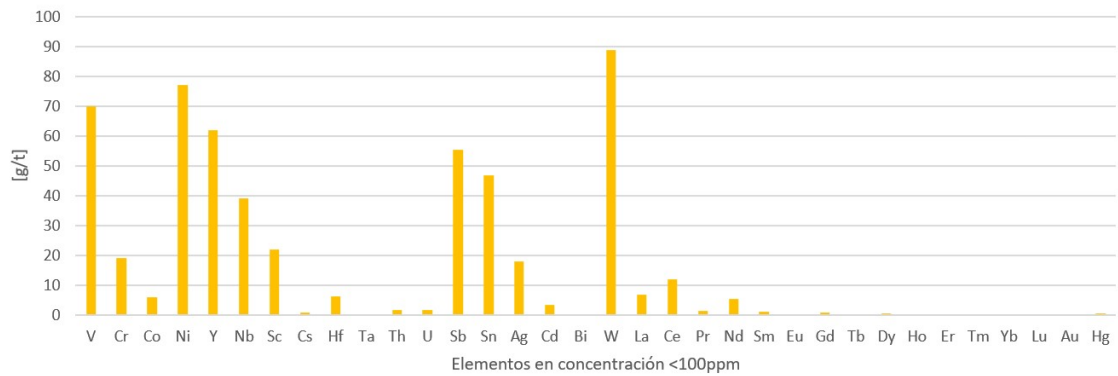


Figura G.2: Composición de elementos con una concentración <100 ppm (trazas) del Tranque de Relaves Talabre (Sernageomin, 2020).

Anexo H. Resultados parámetros operativos

Tabla H.1: Tabla operativa de resultados para pruebas a 3.25 horas en aguas de relave Ovejería

			Flux permeado (l/hm ²)	% Rechazo	Fecha	E.C μS/cm (Feed)	Estabilización (h)
3,25 horas	A	Promedio 300 psi	19,28	92,07	16-05-22	3.920	1,75
		Desviación str	2,40	0,95			
	B	Promedio 300 psi	23,95	86,74	31-05-22	3.540	1,5
		Desviación str	1,44	0,72			
A	Promedio 400 psi	24,92	95,31	01-06-22	3.480	1,5	
	Desviación str	2,31	0,18				
B	Promedio 400 psi	15,96	94,60	07-06-22	3.530	1,5	
	Desviación str	3,23	0,74				

Tabla H.2: Tabla operativa de resultados para pruebas a 3.25 horas en aguas de relave Talabre

			Flux permeado (l/hm ²)	% Rechazo	Fecha	E.C μS/cm (Feed)	Estabilización (h)
3,25 horas	A	Promedio 300 psi	18,00	88,62	17-05-22	10.160	1,75
		Desviación str	1,06	0,47			
	B	Promedio 300 psi	17,22	93,74	02-06-22	11.070	1,5
		Desviación str	1,41	0,35			
A	Promedio 400 psi	22,30	89,55	03-06-22	10.310	1,5	
	Desviación str	1,27	0,23				
B	Promedio 400 psi	22,85	91,11	06-06-22	10.350	1,5	
	Desviación str	0,85	0,46				
5 horas	A	Promedio 400 psi	21,38	86,49	09-06-22	10.390	1,5
		Desviación str	0,89	0,46			
	B	Promedio 400 psi	25,10	89,80	10-06-22	10.380	1,5
Desviación str		0,85	0,26				
C	Promedio 400 psi	24,60	89,08	13-06-22	10.100	1,5	
		Desviación str	1,49	0,82			

Anexo I. Errores en las pruebas

Los errores en las pruebas se dividen en:

- Errores sistemáticos: Que tienen que ver con las falencias de la metodología usada.
- Errores aleatorios: Asociados, circunstancialmente, a factores aleatorios de cada prueba.

En cuanto a los errores sistemáticos, estos eran conocidos previamente por el equipo de trabajo, lo cual en estas pruebas se esforzaron por disminuirse, se enumeran a continuación los más influyentes:

- Temperatura variable de la alimentación.
Sistema de intercambio de calor no asegura el trabajo a una temperatura constante dado que la bomba se calienta en el tiempo, y el sistema de intercambio de calor contaba con un sensor de temperatura que activa un calentador de agua de pecera (con un error asociado) o un sistema de enfriamiento de un serpentín conectado al agua de la llave (a temperatura desconocida).

- Flujo de rechazo variable.
Variaciones en el flujo del rechazo, debido a no estandarización del caudal, por ausencia de flujómetros que la controlen, sólo se controla la presión de salida de esta.
- Medición de volúmenes.
La medición de volúmenes está de por sí asociada a errores dado que se mide por la observación del volumen que coincide con la gradación de la probeta.
- Pérdidas en trasvasijos.
Para las mediciones se pasaban usualmente los líquidos a otros tubos para ser medidos, lo cual provocaba pérdidas de volumen.
- Cambio de tanque de agua limpia a salada.
Puede existir una mezcla de agua limpia en el tanque de agua salada, por el agua contenida en el sistema cuando se hace funcionar al principio con agua limpia y luego se inicia a recolectar datos con el agua salada.
- Medición de parámetros.
Los equipos con los que se mide TDS, concentraciones y temperatura, están asociados a errores.

En cuanto a los errores aleatorios, estos se disminuyen al ejectar más pruebas de laboratorio, de manera que los datos sean similares en un 95 % de ellas y establecer, mediante análisis estadísticos, la confiabilidad de los resultados. Para este trabajo, sólo se cuenta con duplicados de cada prueba, lo cual deja poco espacio de análisis de errores aleatorios, sin embargo, estos se podrían enumerar como:

- Condiciones iniciales.
 - Temperatura ambiental.
 - Suciedad en Tanque de alimentación.
 - Temperatura de los equipos.
- Trasvasije de muestras.
- Incrustaciones en mangueras.
- Suciedad de probetas o equipos de medición.
- Suciedad ambiental (polvo).