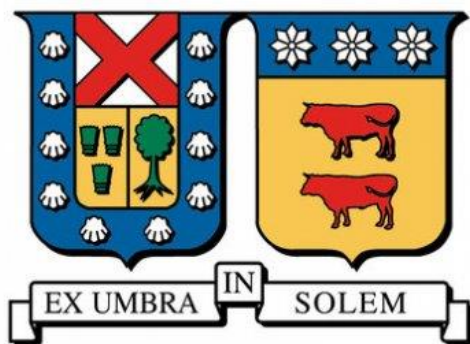


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA Y AMBIENTAL
SANTIAGO – CHILE



**“Factibilidad técnica-económica de la integración de
agua permeada en el proceso de flotación Rougher
Cobre-Molibdeno de la Compañía Minera Doña Inés de
Collahuasi SCM.”**

LEANDRO IGNACIO RUIZ MORAGA

**MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL QUÍMICO**

PROFESORA GUÍA: DRA. PAULA GUERRA PINTO.
PROFESORA CORREFERENTE: DRA. MARÍA PAZ DOMÍNGUEZ DOMÍNGUEZ.
TUTORA DE LA COMPAÑÍA: PATRICIA VÉLIZ SEGUEL.

*“Material de referencia, su uso no involucra responsabilidad de la compañía ni de la
universidad”*

AGOSTO – 2017

LIBERACIÓN DE RESPONSABILIDAD.

“Esta memoria presenta contenidos acerca de las operaciones de la **Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi SCM**, los cuales fueron facilitados para el desarrollo del tema de tesis. Todo lo expuesto en esta, es de exclusiva responsabilidad del autor y no involucra al personal de la compañía ni de colaboradores.”

RESUMEN

El presente estudio se realizó en la Superintendencia de Molibdeno y Aguas, Gerencia Operaciones Puerto, de la Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi, el cual tiene por objetivo evaluar la factibilidad técnica-económica de utilizar agua permeada de las etapas ultrafiltración (UF) u osmosis inversa (OR) de la planta de tratamiento de RILes para el proceso de flotación selectiva Rougher de Cu-Mo. Para aquello, se determinó la disponibilidad de agua permeada en cantidad y calidad de las etapas de UF y OR. En cuanto a la cantidad se reportó que en la etapa OR se obtiene un permeado equivalente al 55 [%] del volumen producido en la UF, es decir, esta última proporciona una mayor cantidad de agua (En el año 2016, 165.000 [m³/año] y 75.000 [m³/año] de agua UF y OR respectivamente). En cuanto a calidad se analizaron dos parámetros: conductividad y turbidez. El agua OR presentó un 85 [%] de conductividad menos que el permeado UF y una turbidez similar. Se realizaron pruebas de flotación con diferentes mezclas de aguas, es decir, AP/UF y AP/OR. De estas, se obtuvo que el hecho de utilizar agua permeada UF o bien OR, permite mejorar la recuperación y ley selectiva de Mo en comparación al utilizar solamente AP. Además, se reportó que la mezcla 20%AP/80%UF es la que permite aumentar en mayor cantidad de puntos la recuperación, esto es, en 2,82 [%]. Sin embargo, desde el punto de vista económico, esta alternativa es inviable, puesto que genera un flujo de caja negativo con un VAN de -3.600.000 [USD]. Por otra parte, se estudió la factibilidad económica de la alternativa 80%AP/20%UF, la cual aumenta la recuperación de Mo en 1,90 [%], es decir, 400.000 [lb] de concentrado fino de Mo. De esta alternativa, se obtiene un VAN cercano a los 2.000.000 [USD].

AGRADECIMIENTOS

Un sentimiento importante en el desarrollo de mi vida es el agradecimiento. Encuentro que es una expresión humana para poder valorar al entorno, principalmente al ser superior, a los más cercanos y a uno mismo.

Lo más importante, mis padres. Amo todo lo que me han dado, sus enseñanzas, valores, crianza, entre otros. A mi madre querida, “la mumilla”, la cual se ha preocupado continuamente en todo momento de mi vida, en especial en momentos difíciles y cuando he estado lejos de casa. A Dios, por acompañarme siempre y en todo lugar, y también por haber dado una segunda oportunidad de vida a mi padre “guatón” Jaime, luego de su accidente cardiovascular. No puedo olvidar a la “Yopla”, mi hermana, por su paciencia en las bromas pesadas que le hago y sacarla de quicios. A mi sobrina Anais también.

A toda mi familia materna y paterna, quienes me han escuchado, apoyado, acompañado y valorado continuamente por lo alcanzado hasta el momento, en especial a mis tíos y tías: Cholchita, Uca, Ximena, Isabel, Alejandro, Richi, Lucho, Juan Luengo. A mis abuelas Olga e Hilda (Q.E.P.D), tata y padrino de confirmación Pancho (Q.E.P.D). A mis primos, a los que les tengo un cariño en especial y que desde mi infancia me han acompañado, Esteban y Cami.

A mis queridos amigos y amigas: Nina “amigaza” Cattaneo, Nati “mi zorrote” Cartajena, Pauli “la banco” Sangüesa, Coni “kitana” Riquelme, Renato “ratata” Alvarado, Carito Geoffroy, Coni Leyton, Cocó, Mauri “tisher” Muñoz. Por su paciencia, compañía, cariños, cenas, almuerzos y por esos “palazos” mandados jajaja.

A los padres de los niños que les hacía clases particulares, por su acogida, confianza y expresión de hacer las cosas bien, en especial a: Isabel Muro, Víctor Parra, Angelina Rossitto y Pamela Carvajal.

A la Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi SCM por haberme elegido para realizar mi memoria de título en esta importante minera. Siempre anhelé este rubro y creo que de a poco me he estado haciendo parte de esta enciclopedia de procesos. Aquí conocí a dos importantes personas, los “volantines de cuero”, Juan Luna “JAL” y Pati Veliz, mi tutora de la compañía. A JAL por hacer mi acogida en Iquique agradable (frase típica: OS) y por

las chistosas bromas al Pato “el viejo paleña”. A la Pati por darme consejos de las relaciones en el entorno laboral y confiar en mí.

A mi profesora guía, Paula Guerra, quien me acompañó, guio y dedicó tiempo en el apoyo y revisión de esta memoria de título. Además a mi profesora correferente María Paz, por su tiempo en la corrección. Como olvidar a la “profesora de termo argentina” quien estuvo en la UTFSM, Susana Espinosa. También a la profesora Carolyn Palma. Muchas gracias por haberme escuchado siempre. Al profe Max y Abner, quienes entregaron su confianza en mí estadía como ayudante en el laboratorio de Física.

A las médicas, Alejandra Armijo, Daniela Saavedra y Alejandra Muñoz, psicóloga Karen Illanes, por haberme escuchado, guiado y acompañado.

En parte también, a las personas que conocí en el Instituto Nacional, en especial al Pancho González, mentor en los conocimientos de química desde el colegio, y por ser buen consejero de la vida. Chistosos recuerdos, no solo como profesor sino como persona, hablando de la “flaca” de música.

A aquellos que conocí en Fátima, quienes me mostraron sus gestos de cariño y valoración lo que hacía como acólito cuando era chico, en particular, a la tía Anita, al padre Lucho y padre José Antonio, quienes sabiamente me guiaron y enseñaron valores que llevo en mi vida.

A mis seres queridos que ya no están en este mundo terrenal, tío Hernán, “Guarín”, tata Pancho.

A toda persona que he olvidado en este escrito y que han confiado en mí.

*Dedico este esfuerzo y triunfo a mi querida madre Olga,
lo más importante de mi vida...*

ÍNDICE DE CONTENIDOS

LIBERACIÓN DE RESPONSABILIDAD.....	2
RESUMEN	3
AGRADECIMIENTOS.....	4
ÍNDICE DE CONTENIDOS.....	7
ÍNDICE DE TABLAS.....	11
ÍNDICE DE FIGURAS	13
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.....	15
1.1. Contexto.....	15
1.2. Estructura de la memoria.	16
CAPÍTULO 2: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	17
2.1. Pórfidos cupríferos.....	17
2.1.1. Minerales sulfurados de Cu	17
2.1.2. Molibdeno (Mo)	18
2.1.3. Minerales sulfurados de Mo	19
2.2. Proceso de flotación de minerales	20
2.2.1. Descripción del proceso de flotación.....	20
2.2.2. Flotación colectiva de Cu-Mo	22
2.2.3. Flotación selectiva de Cu-Mo.....	23
2.3. Ley y recuperación metalúrgica.....	23
2.4. Descripción de procesos de tratamiento de RILes.....	26
CAPÍTULO 3: OBJETIVOS	30
3.1. Objetivo general	30
3.2. Objetivos específicos.....	30
CAPÍTULO 4: DESCRIPCIÓN DE PROCESOS PRODUCTIVOS DE LA COMPAÑÍA MINERA DOÑA INÉS DE COLLAHUASI SCM.....	31
4.1. Descripción de la compañía	31
4.2. Descripción general de los procesos en CMDIC	32
4.3. Descripción general de los procesos en el área Puerto CMDIC	33
4.3.1. Recepción del concentrado de Cu-Mo (CUCON).....	34
4.3.2. Acondicionamiento del concentrado de Cu-Mo.....	34
4.3.3. Planta de Flotación selectiva Cu-Mo.....	35

4.4.	Manejo de aguas en área Puerto.....	37
4.4.1.	Espesadores de Cu y sentina.....	38
4.4.2.	Planta de Mo.....	39
4.4.3.	Planta de filtrado de Cu	39
4.5.	Descripción de procesos en planta de tratamiento de RILes CMDIC	40
4.5.1.	Descripción general planta de RILes.....	40
4.5.1.1.	Sedimentación.....	41
4.5.1.2.	Flotación por aire disuelto (DAF).....	42
4.5.1.3.	Filtrado con arena	42
4.5.1.4.	Filtrado con carbón activo	43
4.5.1.5.	Ultrafiltración (UF).....	43
4.5.1.6.	Osmosis Inversa (OR).....	44
CAPÍTULO 5: MATERIALES Y MÉTODOS.....		45
5.1.	Diseño Experimental.....	45
5.2.	Metodología de muestreo.....	45
5.2.1.	Concentrado colectivo de Cu-Mo (CUCON)	45
5.2.2.1.	Agua de procesos	47
5.2.2.2.	Agua permeada UF	47
5.2.2.3.	Agua permeada OR.....	47
5.3.	Reactivos	48
5.4.	Materiales y equipos para las pruebas de flotación.....	48
5.5.	Procedimiento experimental	49
5.5.1.	Determinación del porcentaje en sólidos de las pulpas	50
5.5.2.	Flotación	50
5.5.3.	Análisis Químico	52
CAPÍTULO 6: DATOS HISTÓRICOS DE AGUAS PLANTA RILES Y FLOTACIÓN ROUGHER.....		53
6.1.	Cantidades de aguas en la planta de RILes.....	53
6.1.1.	Sedimentación	53
6.1.2.	UF	54
6.1.3.	OR.....	55
6.2.	Calidades de aguas en la planta de RILes.....	56
6.2.1.	Conductividad.....	56

6.2.2.	Turbidez.....	58
6.2.3.	pH	59
6.3.	Producción histórica de agua permeada UF y OR	61
CAPÍTULO 7: RESULTADOS Y ANÁLISIS DE LAS PRUEBAS DE FLOTACIÓN		63
7.1.	Recuperaciones selectivas Rougher	63
7.1.2.	Recuperación de Insolubles	64
7.1.3.	Recuperación de Cu.....	65
7.2.	Leyes selectivas Rougher.....	66
7.2.1.	Ley de Mo.....	66
7.2.2.	Ley de Insolubles.....	67
7.2.3.	Ley de Cu	68
7.3.	Flujo y ley de alimentación CUCON.....	69
CAPÍTULO 8: EVALUACIÓN ECONÓMICA		70
8.1.	Elementos de la evaluación económica	70
8.2.	Costos generales planta de RILes	70
8.2.1.	Costos de producción de agua permeada UF y OR	72
8.2.2.	Determinación de costos de producción aguas UF y OR respecto a las proporciones de mezclas en el diseño experimental	73
8.3.	Criterios de la evaluación económica	74
8.4.	Evaluación económica alternativa 20%AP/80%UF	74
8.4.1.	Estimación de ingresos	74
8.4.2.	Flujo de caja	76
8.4.3.	Análisis de sensibilidad	76
8.4.4.	Resumen de la factibilidad económica	81
8.5.	Evaluación económica alternativa 80%AP/20%UF	82
8.5.1.	Estimación de ingresos	82
8.5.2.	Flujo de caja	82
8.5.3.	Análisis de sensibilidad	83
8.5.4.	Resumen de la factibilidad económica	88
CAPÍTULO 9: CONCLUSIONES		90
CAPÍTULO 10: GLOSARIO		91
CAPÍTULO 11: REFERENCIAS		93
CAPÍTULO 12: ANEXOS		95

A.	Tablas con data histórica de cantidades y calidades de aguas en los procesos en estudio planta de RILes.....	96
A.1.	Parámetros de entrada de las agua de procesos	96
A.2.	Parámetros de agua permeada UF	99
A.3.	Parámetros de agua permeada OR.....	102
B.	Tablas resultados pruebas de flotación	104
B.1.	Parámetros iniciales.....	104
B.2.	Consumo de reactivos.....	106
B.3.	Recuperaciones selectivas	107
B.4.	Leyes selectivas	108
C.	Tablas evaluación económica	109
C.1.	Producción de Mo año 2016 y aumento de recuperación selectiva del 2,82 [%] 109	
C.2.	Flujo de caja caso 20%AP/80%UF	110
C.3.	Producción de Mo año 2016 y aumento de recuperación selectiva del 1,89 [%] 111	
C.4.	Flujo de caja caso 80%AP/20%UF	112
D.	Análisis Químico	113
D.1.	Determinación de Cu.....	113
D.2.	Determinación de Mo.....	116
D.3.	Determinación de Insolubles	119
E.	Imágenes planta de RILes CMDIC Puerto	121
E.1.	Sedimentación	121
E.2.	DAF	121
E.3.	Filtros de arena.....	122
E.4.	Filtros de carbón activado.....	122
E.5.	UF	123
E.6.	OR.....	123

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Minas con reservas de pórfidos cupríferos en Chile (Elaboración propia)	17
Tabla 2: Tipos de tratamientos de aguas (Elaboración propia)	26
Tabla 3: Mezclas de aguas para cada prueba de flotación.....	45
Tabla 4: Parámetros de las muestras de aguas.....	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 5: Reactivos utilizados en las pruebas cinéticas de flotación.	48
Tabla 6: Producción y variación de agua permeada UF/OR, años 2011-2016.....	61
Tabla 7: Costos totales [USD] de la planta de tratamiento de RILes, años 2014-2016.	70
Tabla 8: Costo de producción agua permeada UF/OR entre los años 2014-2016.....	73
Tabla 9: Volúmenes requeridos de agua permeada UF/OR para cada mezcla y su costo anual de producción.....	73
Tabla 10: Ingreso adicional por venta de Mo fino producto del aumento en la recuperación selectiva Mo.....	75
Tabla 11: Variación en la ley de alimentación de Mo y su efecto en el VAN (Caso base ley de alimentación: 0,38 [%] – Mezcla 20%AP/80%UF).....	76
Tabla 12: Variación en el precio de venta del Mo y su efecto en el VAN (Caso base precio de venta del Mo: 3,35 [USD/lb] – Mezcla 20%AP/80%UF).	78
Tabla 13: Variación en los costos totales de la planta de RILes y su efecto en el VAN (Caso base costo total: \$2.042.886 [USD/año] – Mezcla 20%AP/80%UF).....	79
Tabla 14: Variación en la recuperación selectiva de Mo y su efecto en el VAN (Caso base aumento en la recuperación: 2,82 [%] – Mezcla 20%AP/80%UF).....	80
Tabla 15: Condiciones de parámetros sensibilizados para obtener VAN=0 (mezcla 20%AP/80%UF).....	81
Tabla 16: Variación en la ley de alimentación de Mo y su efecto en el VAN (Caso base ley de alimentación: 0,38 [%] – Mezcla 80%AP/20%UF).....	83
Tabla 17: Variación en el precio de venta del Mo y su efecto en el VAN (Caso base precio de venta del Mo: 3,35 [USD/lb] – Mezcla 80%AP/20%UF).	84
Tabla 18: Variación en los costos totales de la planta de RILes y su efecto en el VAN (Caso base costo total: \$510.722 [USD/año] – Mezcla 80%AP/20%UF).....	86
Tabla 19: Variación en la recuperación selectiva de Mo y su efecto en el VAN (Caso base aumento en la recuperación: 1,89 [%] – Mezcla 80%AP/20%UF).....	87
Tabla 20: Condiciones de parámetros sensibilizados para obtener VAN=0 (mezcla 80%AP/20%UF).....	88
Tabla 21: Histórico de parámetros de entrada de aguas de proceso en la planta de RILes años 2013-2016.	96
Tabla 22: Histórico de datos en la etapa UF años 2013-2016.....	99
Tabla 23: Datos históricos de parámetros en la etapa OR.....	102
Tabla 24: Parámetros iniciales en las pruebas de flotación.	104
Tabla 25: Consumo de reactivos en las pruebas de flotación.....	106
Tabla 26: Resultados finales de recuperación selectiva de Mo, insolubles y Cu.	107
Tabla 27: Resultados finales de ley selectiva de Mo, insolubles y Cu.	108
Tabla 28: Parámetros de producción año 2016 y producción adicional de concentrado fino de Mo con mezcla 20%AP/80%UF.....	109

Tabla 29: Flujo de caja caso 20%AP/80%UF.	110
Tabla 30: Parámetros de producción año 2016 y producción adicional de concentrado fino de Mo con mezcla 80%AP/20%UF.	111
Tabla 31: Flujo de caja caso 80%AP/20%UF.	112
Tabla 32: Reactivos utilizados en la determinación de Cu.	113
Tabla 33: Reactivos utilizados en la determinación de Mo.	116
Tabla 34: Condiciones de operación del espectrofotómetro de absorción atómica.	118
Tabla 35: Reactivos utilizados en la determinación de insolubles.	119

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Pórfidos cupríferos (Covelina-Calcopirita (A), Bornita-Calcopirita (B), Calcosina-Calcopirita (C), Enargita-Calcopirita (D), Calcopirita (E)) [4].....	18
Figura 2: Molibdenita (A) - Estructura de la molibdenita (B) [6].....	19
Figura 3: Celda convencional de flotación. En zona superior se obtiene el concentrado y por el fondo, el relave (A). Adhesión de partículas de mineral de interés a las burbujas de aire (B) [7]....	20
Figura 4: Coagulante se adsorbe en las partículas formando agregados [7].	21
Figura 5: Colector adsorbido en la superficie del mineral de interés (A). La zona apolar queda expuesta al agua (B) [7]	22
Figura 6: Acción general del floculante [7].....	22
Figura 7: Forma de calcular grado o ley. (Partículas cafés son mineral valioso – Partículas verdes son gangas) [7]	24
Figura 8: Forma de calcular recuperación metalúrgica. (Partículas cafés son mineral valioso – Partículas verdes son gangas) [7].....	25
Figura 9: Recuperación en función del tiempo (A), recuperación en función del grado (B), recuperación (azul) y grado (rojo) en función del tiempo (C) [7]	25
Figura 10: Diagrama de fuerzas de una partícula sumergida	27
Figura 11: Equipos involucrados en la etapa DAF [9].....	27
Figura 12: Operación del filtrado con arena [10].....	28
Figura 13: Flujo de agua en un filtro con carbón activado [11]	28
Figura 14: Sustancias que difunden en la etapa UF [12].....	29
Figura 15: Operación de un tubo etapa OR [13]	29
Figura 16: Ubicación geográfica Collahuasi Área Cordillera [15]	31
Figura 17: Diagrama de procesos general Collahuasi	32
Figura 18: Diagrama de procesos Collahuasi Área Puerto.....	33
Figura 19: Concentroductos en área Puerto.	34
Figura 20: Tanque almacenador (312-TK-1504) de CUCON.....	34
Figura 21: Movimientos general de aguas en el Área Puerto.....	37
Figura 22: Movimientos de aguas en la sentina TK-035.....	38
Figura 23: Planta de tratamiento de RILes.	40
Figura 24: Secuencia de procesos en la planta de tratamiento de RILes.....	40
Figura 25: Diagrama de procesos de la etapa sedimentación.....	41
Figura 26: Diagrama de procesos de la etapa DAF	42
Figura 27: Diagrama de procesos de la etapa filtrado con arena.....	42
Figura 28: Diagrama de procesos de la etapa filtrado con carbón activado	43
Figura 29: Diagrama de procesos de la etapa UF.....	44
Figura 30: Diagrama de procesos de la etapa OR	44
Figura 31: Zona de muestreo CUCON (1) y agua de procesos (2).	46
Figura 32: Zona de muestreo de agua permeada UF.....	47
Figura 33: Zona de muestreo de agua permeada OR.	48
Figura 34: Diagrama general del procedimiento experimental.	49
Figura 35: Filtros (A) y horno eléctrico (B) en el laboratorio metalúrgico	50
Figura 36: Equipo de Flotación (A), bandejas rotuladas de concentrado (B), paleta (C) y sobres para análisis químico (D)	52

Figura 37: Flujo volumétrico de agua de proceso alimentada a la planta de RILes entre los años 2013-2016.	54
Figura 38: Flujo volumétrico de agua permeada UF entre años 2013-2016.	55
Figura 39: Flujo volumétrico de agua permeada OR entre años 2013-2016.	55
Figura 40: Conductividad del agua de procesos alimentada a la planta de RILes entre años 2013-2016.	56
Figura 41: Conductividad del agua permeada UF entre años 2013-2016.	57
Figura 42: Conductividad del agua permeada OR entre años 2013-2016.	57
Figura 43: Turbidez del agua de procesos alimentada a la planta de RILes entre años 2013-2016. ..	58
Figura 44: Turbidez de entrada agua total UF entre años 2013-2016.	59
Figura 45: Turbidez del agua permeada UF y OR entre años 2013-2016.	59
Figura 46: pH del agua de procesos en el flujo de alimentación planta de RILes entre años 2013-2016.	60
Figura 47: pH del agua permeada UF entre años 2013-2016.	60
Figura 48: Volúmenes de agua permeada UF y OR producida entre años 2011-2016.	61
Figura 49: Flujo volumétrico promedio de agua de procesos utilizada en la dilución de pulpa Rougher (segundo semestre 2016).	62
Figura 50: Recuperación selectiva de Mo en la etapa Rougher.	64
Figura 51: Recuperación selectiva de Insolubles en la etapa Rougher.	65
Figura 52: Recuperación selectiva de Cu en la etapa Rougher.	66
Figura 53: Ley selectiva de Mo en la etapa Rougher.	67
Figura 54: Ley selectiva de Insolubles en la etapa Rougher.	67
Figura 55: Ley selectiva de Cu en la etapa Rougher.	68
Figura 56: Flujo y ley de alimentación Rougher en el año 2016.	69
Figura 57: Costos generales planta de RILes año 2014.	71
Figura 58: Costos generales planta de RILes año 2015.	71
Figura 59: Costos generales planta de RILes año 2016.	72
Figura 60: Cambio experimentado en el VAN al modificar la ley de alimentación de Mo.	77
Figura 61: Cambio experimentado en el VAN al modificar el precio de venta del Mo.	79
Figura 62: Cambio experimentado en el VAN al modificar los costos de la planta de RILes.	80
Figura 63: Efecto en el VAN al modificar la recuperación de Mo.	81
Figura 64: Cambio experimentado en el VAN al modificar la ley de alimentación de Mo.	84
Figura 65: Cambio experimentado en el VAN al modificar el precio de venta del Mo.	85
Figura 66: Cambio experimentado en el VAN al modificar los costos de la planta de RILes.	86
Figura 67: Cambio experimentado en el VAN al modificar la recuperación de Mo.	87
Figura 68: Resumen de curvas del VAN al modificar parámetros en estudio.	89
Figura 69: Liberación de mineral al realizar procesos de chancado y molienda (conminución).	92
Figura 70: Piscinas de sedimentación de la planta de RILes Puerto Collahuasi.	121
Figura 71: Celda de flotación por aire disuelto de la planta de RILes Puerto Collahuasi.	121
Figura 72: Batería de filtros de arena de la planta de RILes Puerto Collahuasi.	122
Figura 73: Batería de filtros de carbón activado de la planta de RILes Puerto Collahuasi.	122
Figura 74: Módulos UF de la planta de tratamiento de RILes Puerto Collahuasi.	123
Figura 75: Módulo OR de la planta de tratamiento de RILes Puerto Collahuasi.	123

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1. Contexto

El agua es un insumo vital para los procesos productivos, entre ellos agropecuarios, industriales, mineros, entre otros. En particular, la industria minera requiere de agua para sus procesos extractivos y procesamiento de minerales, es decir, mina, concentración (molienda y flotación), hidrometalurgia, pirometalurgia, entre otros. En base al reporte “Consumo de agua en la minería del cobre al 2015”, en la minería del Cu se consumió aproximadamente 13 [m³/s] de aguas continentales, derivándose cerca del 70 [%] de estas a los procesos de concentración. Sin embargo, el agua utilizada no proviene únicamente de la extracción de aguas continentales, sino también de la recirculación de aguas en los procesos mineros, con una tasa de consumo cercana a 40 [m³/s] [1]. Por otra parte, no solamente se ha buscado optimizar el manejo de aguas en requerimientos de los procesos, sino también en la disposición de las aguas provenientes de la filtración del concentrado de cobre y otros subproductos.

Dentro de las opciones para evitar el vertimiento de RILes al medioambiente, el agua puede tratarse a través de una serie de etapas para remover contaminantes y a fin de obtener agua de buena calidad. El lineamiento anteriormente señalado, ha seguido la Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi SCM (CMDIC) en sus instalaciones Puerto, en donde parte del agua de procesos es tratada en una planta de tratamiento de RILes para producir agua permeada.

A la fecha, dicha agua es descargada en una Forestación cuyo cierre está proyectado para un futuro cercano. Sin embargo, una vez que esta se cierre, la planta de tratamiento de RILes se encontrará disponible para eventualmente evaluar alternativas de re-utilización de agua permeada en procesos del Puerto CMDIC.

En base a lo descrito en los párrafos precedentes, en esta memoria se estudia la alternativa de utilizar mezclas de agua permeada y/o de procesos, en la flotación selectiva Rougher de Cu-Mo, en donde actualmente la pulpa es diluida totalmente con agua recirculada en el Puerto.

1.2. Estructura de la memoria

Esta tesis se encuentra estructurada en 12 capítulos. El presente capítulo es el primero y corresponde a la Introducción. El segundo capítulo corresponde a una breve revisión bibliográfica acerca de los pórfidos de Cu y Mo, flotación de minerales y descripción de procesos involucrados en una planta de tratamiento de RILes.

En el tercer capítulo se describe la Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi SCM (CMDIC) y los procesos que se desarrollan en sus áreas Cordillera y Puerto.

Posteriormente, en el capítulo 4 se describen los materiales y métodos del desarrollo experimental.

El capítulo 5 está conformado por el análisis de datos históricos de cantidades y calidades de aguas de la planta de tratamiento de RILes y flotación selectiva Rougher Cu-Mo.

El capítulo 6 corresponde a la evaluación técnica de los resultados obtenidos de las pruebas de flotación, en donde se analizan las recuperaciones y leyes de Mo, insolubles y Cu.

En el capítulo 7 se realizan dos evaluaciones económicas de dos mezclas de aguas 80%AP/20%UF y 20%AP/80%UF, en donde se estiman los costos e ingresos para efectuar el flujo de caja y su respectivo análisis de sensibilidad.

Los capítulos restantes, 8, 9, 10, 11 y 12 corresponden a las conclusiones, conceptos, referencias y Anexos, respectivamente.

CAPÍTULO 2: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1. Pórfidos cupríferos

Las menas pórfidas de Cu son aquellos depósitos que poseen cantidades de minerales a explotar entre 50 y 500 [Mton], con leyes de Cu entre 0,2 [%]-1,0 [%] aproximadamente [2]. Chile posee 16 minas de estas menas, las cuales se resumen en la Tabla 1.

Algunos pórfidos de Cu, se encuentran asociados otros elementos de valor económico, como por ejemplo: Au, Ag, Re, entre otros.

Tabla 1: Minas con reservas de pórfidos cupríferos en Chile

Mina	Propiedad
Los Pelambres	Antofagasta Minerals
Los Bronces	AngloAmerican
Zaldívar	Barrick – Antofagasta PLC
Cerro Colorado	BHP Billiton
Escondida	BHP Billiton
Radomiro Tomic	Codelco
Chuquibambilla	Codelco
El Salvador	Codelco
El Teniente	Codelco
Dos Amigos	Compañía Explotadora de Minas
Rosario	Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi
Ujina	Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi
El Abra	Freeport-McMoRan
Quebrada Blanca	Teck
Andacollo	Teck
Río Blanco	Tongguan
Lomas Bayas	Xstrata Copper

2.1.1. Minerales sulfurados de Cu

Los minerales sulfurados se caracterizan por estar asociados principalmente a elementos como el Cu, S y Fe [3]. La especie más común de estos minerales corresponde a la calcopirita (CuFeS_2), la cual se encuentra junto a otros sulfuros de Cu, entre ellos: calcosita (Cu_2S), bornita (Cu_5FeS_4), covelina (CuS), y en menor cantidad a la enargenita (Cu_3AsS_4), tetraedrita ($\text{Cu}_{12}\text{Sb}_4\text{S}_{13}$), atacamita ($\text{Cu}_2\text{Cl}(\text{OH})_3$) y tennantita ($\text{Cu}_{12}\text{As}_4\text{S}_{13}$). Cabe señalar que estos minerales se encuentran asociados a una serie de insolubles (vetas de arcillas)

tales como la pirofilita ($\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$), caolinita ($\text{Al}_2\text{Si}_5\text{O}_5(\text{OH})_4$) y Montmorillonita ($((\text{Na},\text{Ca})_{0,3}(\text{Al},\text{Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O})$).

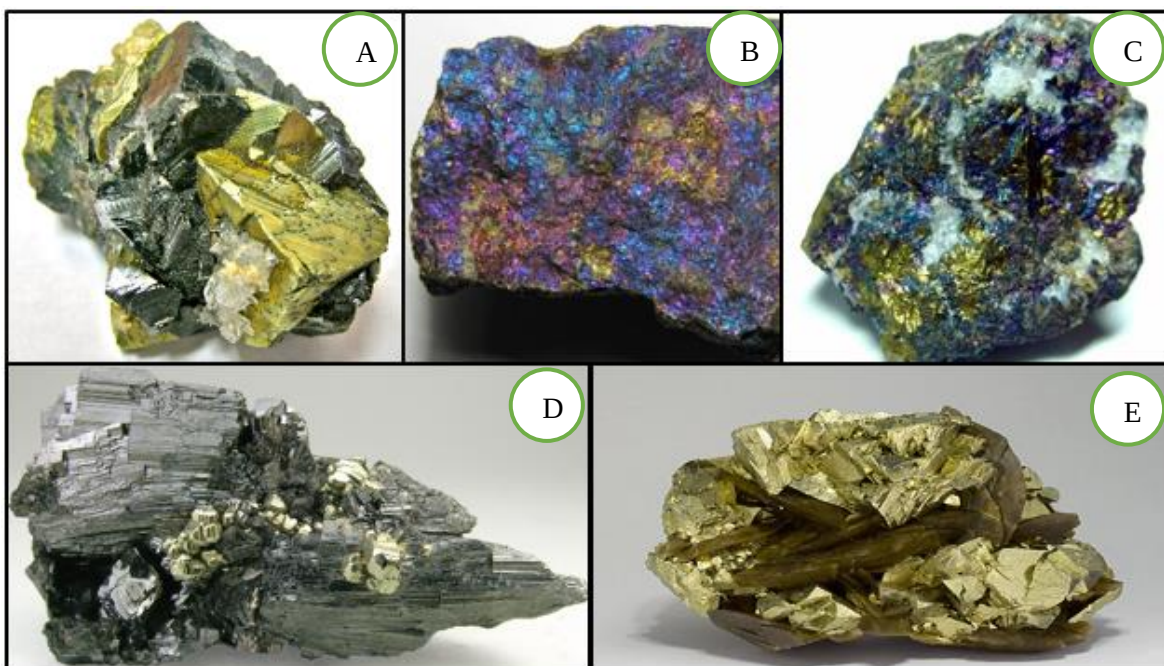


Figura 1: Pórfidos cupríferos (Covelina-Calcopirita (A), Bornita-Calcopirita (B), Calcosina-Calcopirita (C), Enargita-Calcopirita (D), Calcopirita (E)) [4]

2.1.2. Molibdeno (Mo)

El Mo es un elemento de la tabla periódica que tiene número atómico 42. Se clasifica como un metal de transición el cual presenta las siguientes propiedades:

- ✓ Altas temperaturas de fusión ($4.600\text{ }^{\circ}\text{C}$) aproximadamente).
- ✓ Alta conductividad térmica y eléctrica.
- ✓ Baja dilatación térmica.

Por otra parte, el Mo se utiliza principalmente en la fabricación de [5]:

- ✓ Lubricantes.
- ✓ Químicos agrícolas.
- ✓ Pinturas.
- ✓ Pigmentos.
- ✓ Cerámicas.
- ✓ Aceros inoxidables y de ingeniería.

2.1.3. Minerales sulfurados de Mo

El Mo se encuentra presente en minerales tales como la powellitita (CaMoO_4), wulfenita (PbMoO_4) y molibdenita (MoS_2). Este último es de importancia comercial, puesto que es un mineral sulfurado con Mo natural.

La molibdenita (Figura 2A) contiene 40 [%] y 60 [%] de Mo y S respectivamente. Es un mineral que posee flotabilidad natural, la cual se fundamenta en su estructura cristalina hexagonal [6].

La estructura de la molibdenita presenta 2 tipos de interacciones (Figura 2B). La primera, enlaces covalentes entre átomos de Mo y S, y la segunda, fuerzas de Van der Waals entre superficies del mineral.

En base a dichas interacciones, las partículas Mo-S presentan 2 tipos de superficies:

- ✓ *Caras hidrofóbicas:* se originan producto de la ruptura entre los enlaces de Van der Waals.
- ✓ *Bordes hidrofílicos:* se generan producto de la ruptura de los enlaces Mo-S.

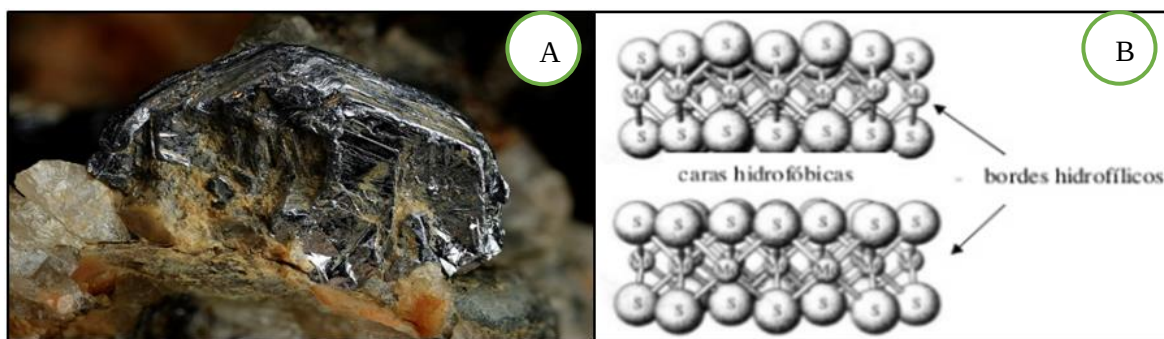


Figura 2: Molibdenita (A) - Estructura de la molibdenita (B) [6]

2.2. Proceso de flotación de minerales

2.2.1. Descripción del proceso de flotación

La flotación de minerales es un método de separación que explota las propiedades físicas y químicas de las superficies de los minerales, siendo las más relevantes: tensión interfacial y carga eléctrica. Estas se aplican cuando las partículas sólidas a separar se exponen a dos fases, como por ejemplo líquido-gaseoso (comúnmente agua y aire respectivamente) [7].

Las diferencias de la tensión interfacial conllevan a diferencias en la hidrofobicidad de las partículas a recuperar, es decir, el mineral más hidrofóbico es separado por medio de la adhesión de burbujas (agregado partícula-burbuja) y recuperado en la superficie (Figura 3A/B). Es relevante mencionar que para se lleve a cabo la flotación de minerales, es necesario un medio líquido como transporte de sólidos (en este caso, agua fresca). A esta mezcla se denomina pulpa (agua más los sólidos triturados en la molienda).

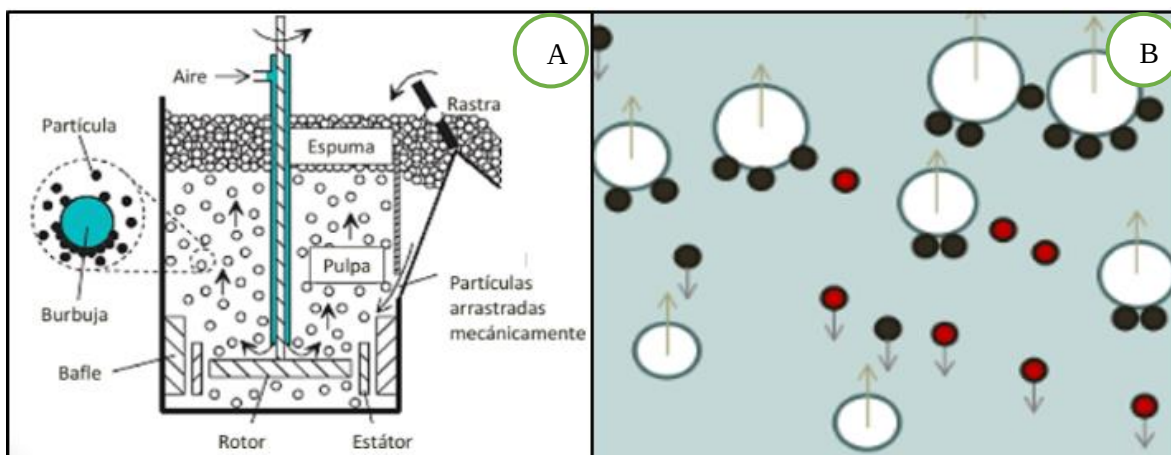


Figura 3: Celda convencional de flotación. En zona superior se obtiene el concentrado y por el fondo, el relave (A). Adhesión de partículas de mineral de interés a las burbujas de aire (B) [7]

Por otra parte, la mayoría de los minerales no se adhieren naturalmente a las burbujas de aire, por lo que es necesario manipular e integrar una serie de componentes. Estos últimos no pueden ser considerados de forma aislada, puesto que la modificación de un componente, puede alterar a otro. Se pueden distinguir los siguientes componentes:

- ✓ *Químicos:* colectores, espumantes, activadores, depresores y pH.
- ✓ *Equipos:* diseño de celda, agitación, flujo de aire, configuración y control de celdas.
- ✓ *Operacionales:* flujo de alimentación, mineralogía, tamaño de partícula, densidad de pulpa y temperatura.

Dentro de los componentes químicos, se describen los siguientes reactivos utilizados tanto en la flotación colectiva como en la selectiva:

- ✓ *Antiespumante:* en el proceso de flotación, es vital mantener la altura de espuma en condiciones óptimas de operación. Sin embargo, cuando la pulpa del concentrado arrastra exceso de espuma, es necesario adicionar este reactivo con el fin de dispersarla.
- ✓ *Coagulante:* reactivo inorgánico que neutraliza la carga superficial de las partículas de minerales que evitan repulsión electrostática entre ellas (Figura 4). Los coagulantes comúnmente utilizados corresponden al sulfato férrico (FeSO_4) y tricloruro de aluminio (AlCl_3).

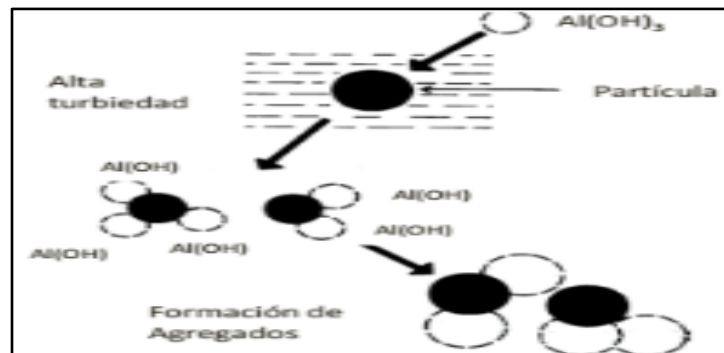


Figura 4: Coagulante se adsorbe en las partículas formando agregados [7].

- ✓ *Colector:* reactivos de cadenas hidrocarbonadas largas que permiten cambiar la hidrofobicidad del mineral a recuperar (Figura 5A). La zona polar del colector es adsorbido en las partículas del mineral, mientras que la zona apolar queda expuesta a la fase acuosa (Figura 5B). Un ejemplo de colector utilizado para adherir partículas de minerales sulfurados es el xantato de sodio.

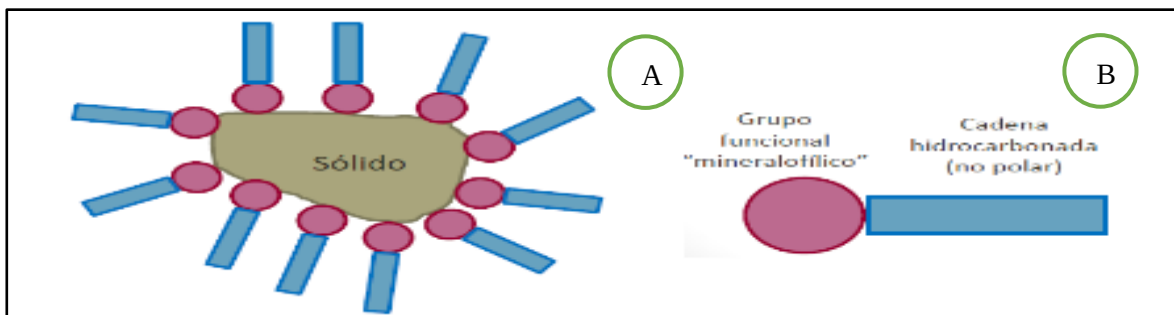


Figura 5: Colector adsorbido en la superficie del mineral de interés (A). La zona apolar queda expuesta al agua (B) [7]

- ✓ *Depresante*: reactivo que evita la adsorción entre el colector y minerales que no son valiosos. En la flotación selectiva de Cu-Mo, se utiliza comúnmente NaSH, el cual cumple la función de depresar el Cu.
- ✓ *Espumante*: reactivo que estabiliza la espuma y evita la coalescencia de las burbujas en la colección, disminuyendo el tamaño de estas últimas. Entre los espumantes más comunes utilizados en la minería, se encuentran los cresoles, MICB y aceite de pino.
- ✓ *Floculante*: reactivo que genera puentes entre partículas finas, permitiendo que se formen flóculos (Figura 6), los cuales decantan por gravedad. Un ejemplo de floculante corresponde a la amina de polietileno.

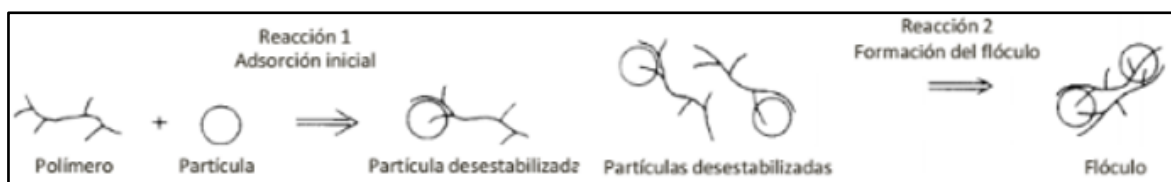


Figura 6: Acción general del floculante [7]

2.2.2. Flotación colectiva de Cu-Mo

Las rocas extraídas desde la mina están compuestas de varios tipos de minerales, las cuales se envían a un proceso de chancado y molienda con el fin de disminuir sus tamaños. Posteriormente a estos dos procesos, se lleva a cabo la flotación colectiva, la cual separa minerales de interés con dos o más componentes de otros minerales no relevantes que no presentan valor comercial.

En la flotación colectiva de Cu-Mo, la industria minera utiliza circuitos de equipos que cumplen la función de flotar minerales de Cu y Mo, recuperando un concentrado colectivo de Cu-Mo y obteniendo un relave con bajas leyes de estos elementos.

Un circuito típico de flotación está conformado por una secuencia de 4 etapas, en donde en cada una de ellas se adicionan reactivos y se manipulan variables operacionales tales como altura de espuma, agitación y tiempo de residencia, dependiendo de la pulpa a flotar. La secuencia es la siguiente:

- ✓ *Primaria o Rougher:* estas celdas o bancos permiten obtener una alta recuperación pero baja ley del mineral de interés, el cual es enviado a las etapas de limpieza.
- ✓ *Primera limpieza:* el objetivo es obtener un concentrado de mayor ley. El concentrado recuperado es enviado a una segunda limpieza y generalmente el relave es recirculado a la Rougher.
- ✓ *Segunda limpieza:* al igual que el proceso anterior, el concentrado se continúa limpiando aunque la dosificación de los reactivos disminuye en comparación a la Rougher y primera limpieza.
- ✓ *Tercera y cuarta limpieza:* cuando se desea aumentar la ley y mejorar la calidad del concentrado, este es enviado a estas etapas de relimpiezas.

2.2.3. Flotación selectiva de Cu-Mo

La flotación selectiva a diferencia de la colectiva, separa el concentrado colectivo (CUCON) en: concentrado de Cu (relave) y Mo. Para esto, el CUCON se alimenta a un circuito de flotación Rougher-Limpieza-Relimpieza.

En el circuito anterior, se utilizan depresantes, generalmente sulfhidrato de sodio (NaSH) con el objetivo de inhibir la acción de los colectores utilizados en la flotación colectiva, ya que la molibdenita posee una hidrofobicidad natural, mientras que los sulfuros de Cu requieren acondicionarlos con una serie de reactivos que permitan modificar su mojabilidad.

2.3. Ley y recuperación metalúrgica

Con el objetivo de evaluar la eficiencia de la flotación (desempeño metalúrgico) se utilizan dos parámetros relevantes: (a) ley y (b) recuperación metalúrgica [8].

- (a) La ley o grado corresponde a la razón porcentual entre la masa de mineral valioso y la masa total de mineral extraído (Figura 7). Esto es:

$$Ley = \frac{\text{masa de mineral valioso en el concentrado}}{\text{masa de mineral valioso} + \text{masa de ganga (en el concentrado)}} \cdot 100\% \quad (1)$$

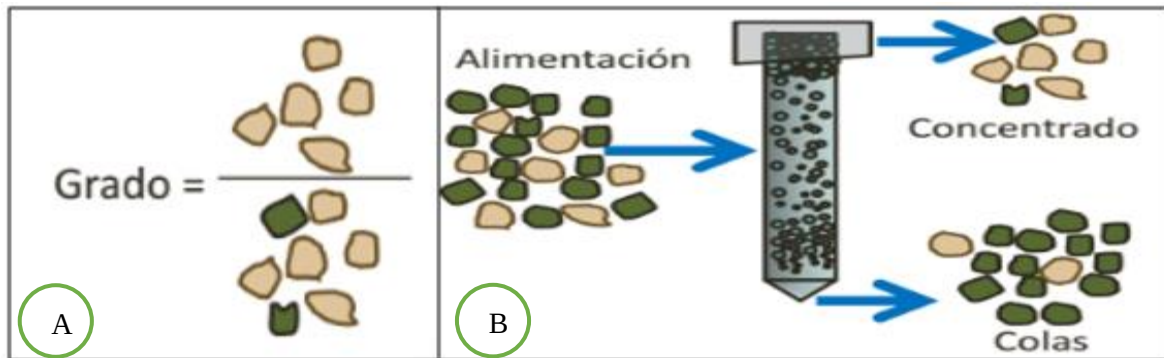


Figura 7: Forma de calcular grado o ley. (Partículas cafés son mineral valioso – Partículas verdes son gangas) [7]

En la relación (1), se puede observar que la ley es mayor cuando la cantidad de ganga (mineral que no es de interés) en el concentrado, es menor. Esto es relevante al momento de comercializar el concentrado.

(b) La recuperación metalúrgica, se define como el cociente porcentual entre la masa del mineral valioso en el concentrado y la masa del mineral valioso en la alimentación (Figura 8A/B). Esto es:

$$Recuperación = \frac{\text{masa de mineral valioso en el producto}}{\text{masa de mineral valioso en la alimentación}} \cdot 100\% \quad (2)$$

De la relación (2), se observa que la recuperación es mayor cuando el mineral valioso de la alimentación se rescata en el concentrado y en menor cantidad en la cola o relave.

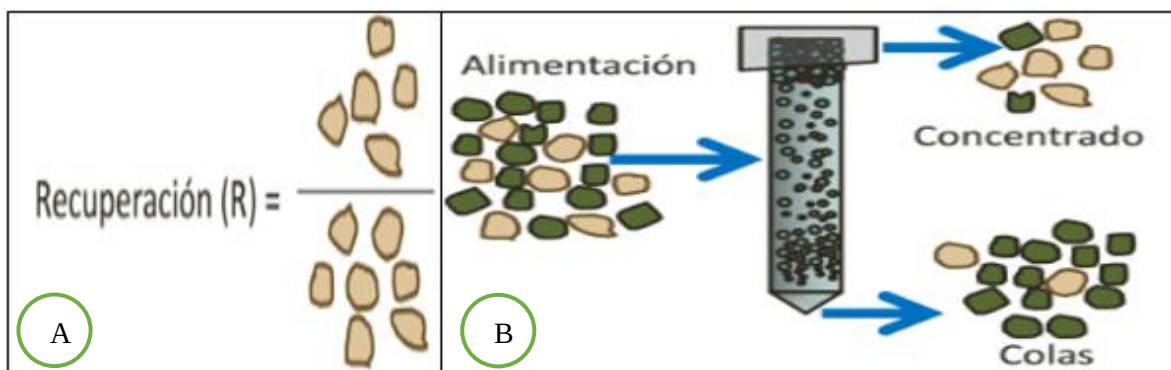


Figura 8: Forma de calcular recuperación metalúrgica. (Partículas cafés son mineral valioso – Partículas verdes son gangas) [7]

Complementando lo anterior, las celdas Rougher buscan maximizar la recuperación metalúrgica, por lo que a mayor número de bancos de celdas, la recuperación es mayor como se observa en la (Figura 9A).

Al momento de evaluar el desempeño metalúrgico del proceso de flotación, es ideal considerar simultáneamente la recuperación y ley. Por ejemplo, si la ley de Mo que ingresa a la celda Rougher es del 0,2 [%] y se cierra el tapón del relave, la recuperación es máxima y la ley es la misma que la alimentada. Al abrir el tapón del relave se acarrea un 25 [%] de ley Cu y 0,05-0,1 [%] de Mo, es decir, disminuyendo su ley e incrementando la recuperación (Figura 9B/C). Sin embargo, para aumentar la calidad del concentrado, es decir, aumentar la ley de Mo, es necesario someterlo a procesos de limpieza y relimpieza.

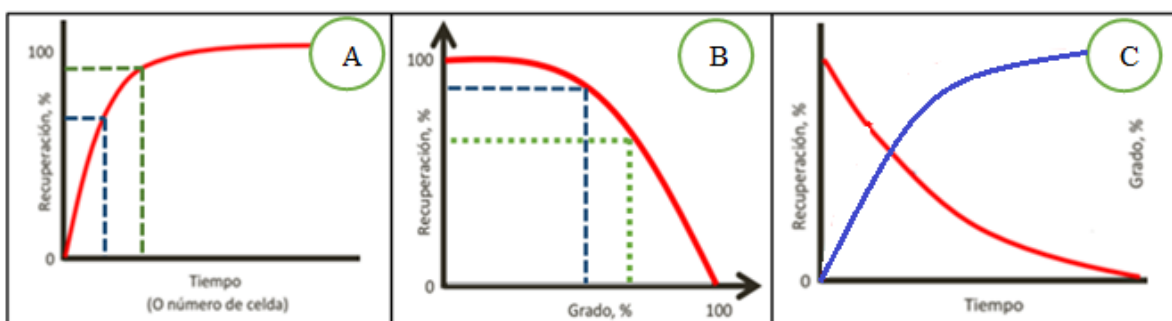


Figura 9: Recuperación en función del tiempo (A), recuperación en función del grado (B), recuperación (azul) y grado (rojo) en función del tiempo (C) [7]

2.4. Descripción de procesos de tratamiento de RILes

Los residuos industriales líquidos son aquellos efluentes que poseen contaminantes producto de procesos industriales. Estos residuos no pueden ser descargados directamente al medioambiente, la cual está regulada en Chile a través del Decreto Supremo MINSEGPRES N°90, por lo que es necesario que se realicen uno o más tratamientos, los cuales se describen en la Tabla 2.

Tabla 2: Tipos de tratamientos de aguas

Tratamiento	Función	Tipo de procesos	Ejemplos de procesos
Primario	Reducir la cantidad de sólidos en suspensión, aceites, grasas, entre otros	Físico-Químico	Sedimentación, flotación, filtración, neutralización.
Secundario	Eliminar materia orgánica utilizando microorganismos	Biológico	Lechos biológicos, fangos activos, digestión anaerobia, electrooxidación, reactor biológico por membrana.
Terciario	Remover parte de contaminantes que perduran luego de los tratamientos primarios y secundarios	Físico-Químico	Arrastre con vapor de agua, intercambio iónico, procesos de membrana, osmosis inversa, carbón activado, oxidación.

Por otra parte, una planta de tratamiento de residuos industriales líquidos (RILes) comúnmente en el ámbito minero, para la obtención de agua re-utilizable en los procesos, está compuesta por una o más etapas, entre ellas:

✓ *Sedimentación:* el objetivo es reducir la cantidad de sólidos suspendidos por efecto de gravedad. Sin embargo, partículas pequeñas pueden quedar en el seno del agua, por lo que es necesario adicionar floculante para acoplar las partículas y así aumentar la fuerza de gravedad $\vec{F}_g$, de tal forma que esta sea mayor que la fuerza de empuje $\vec{F}_e$. Esto se muestra en la Figura 10.

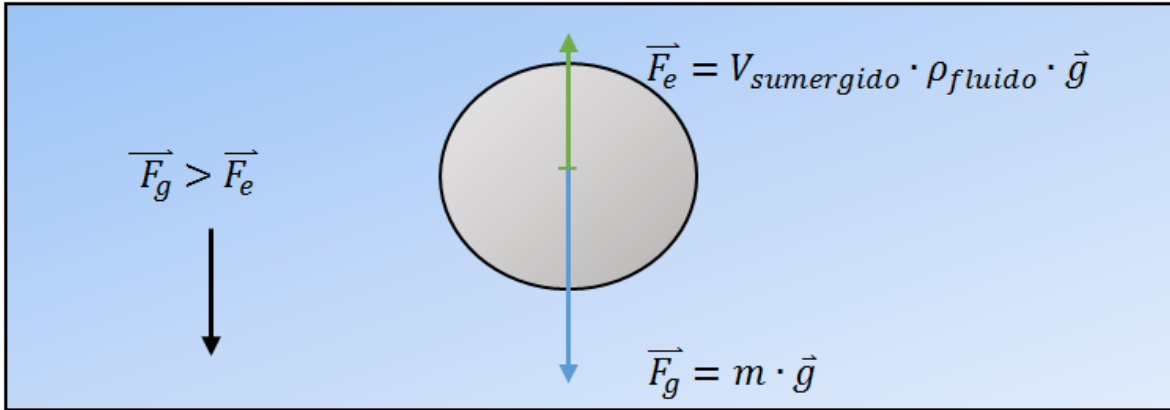


Figura 10: Diagrama de fuerzas de una partícula sumergida

✓ *Flotación por aire disuelto (DAF)*: es un proceso de separación sólido-líquido que se utiliza para reducir la carga de aceites y sólidos suspendidos, a través de la inyección de burbujas de aire finas (Figura 11). Parte de las partículas de contaminantes, suben a la superficie produciendo un efluente, el cual es enviado a procesos de filtración [9].

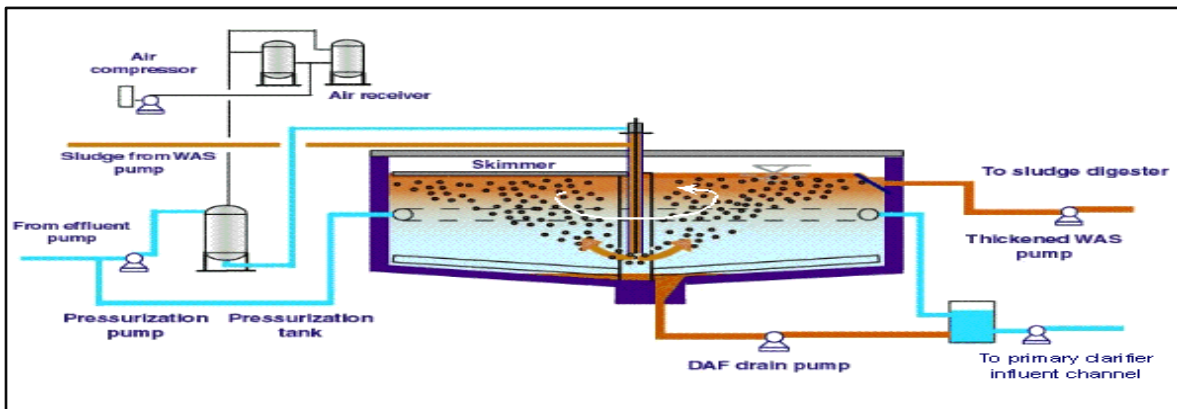


Figura 11: Equipos involucrados en la etapa DAF [9]

✓ *Filtrado con arena*: es la etapa posterior a la DAF. Los filtros de arena son más selectivos en cuanto a la remoción de sólidos suspendidos y metales como Fe y Al. El agua es alimentada a los filtros y es distribuida en el lecho de arena, en donde quedan retenidas fracción de las partículas mencionadas (Figura 12). El efluente puede ser enviado a otras etapas en donde se remueven otros tipos de sustancias [10].

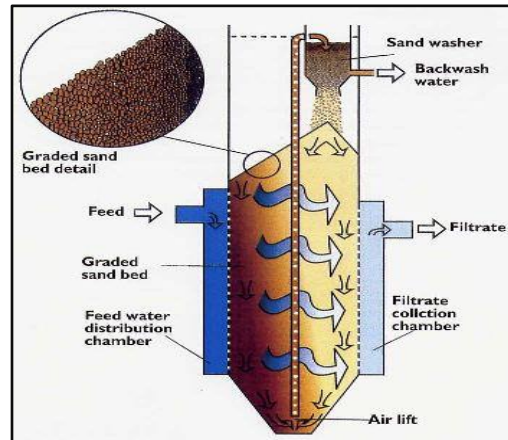


Figura 12: Operación del filtrado con arena [10]

✓ *Filtrado con carbón activado:* estos filtros permiten remover impurezas orgánicas, las cuales se adsorben en carbón activado y difunden hacia el interior del filtro [11]. Esto ocurre por una diferencia de presión entre el agua alimentada y filtrada como se muestra en la Figura 13:

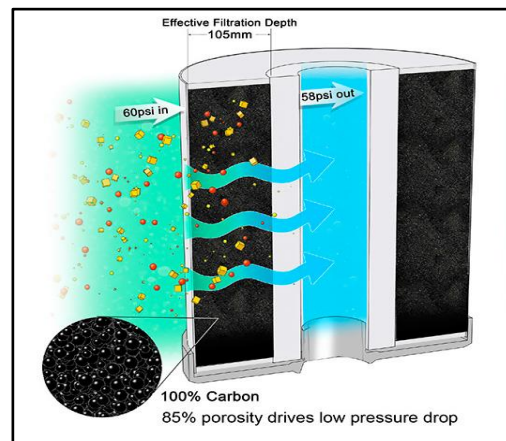


Figura 13: Flujo de agua en un filtro con carbón activado [11]

✓ *Ultrafiltración (UF):* es un proceso que permite remover partículas con tamaños pequeños entre 0,001 y 0,1 μm . Estas sustancias suelen ser organismos biológicos, sedimentos, coloides y sólidos suspendidos que no fueron retenidos en las etapas anteriores (Figura 14). Cabe señalar que el flujo de alimentación a la UF es similar al de salida, ya que el rechazo es cuando se lavan las membranas. Es relevante mencionar que el agua

permeada UF contiene sales disueltas, por lo que para removerlas se puede someter a un proceso de osmosis inversa (OR).

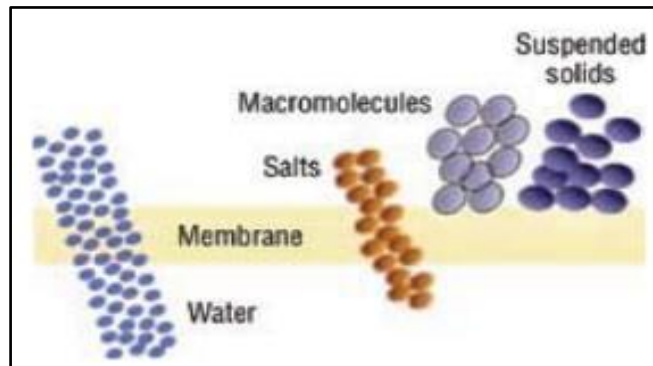


Figura 14: Sustancias que difunden en la etapa UF [12]

✓ *Osmosis Inversa (OR)*: permite remover la mayor parte de sólidos disueltos (sales) del flujo permeado de la UF. Esta remoción se lleva a cabo a través de una membrana semipermeable, en donde aplicando una presión externa, el agua fluye desde una alta concentración de sales hacia una de baja (Figura 15). A través de constantes lavados a las membranas, se genera un agua de rechazo, el cual es cercano al 55 [%] del flujo volumétrico de agua alimentada, mientras que el restante es el caudal de agua permeada OR [13].

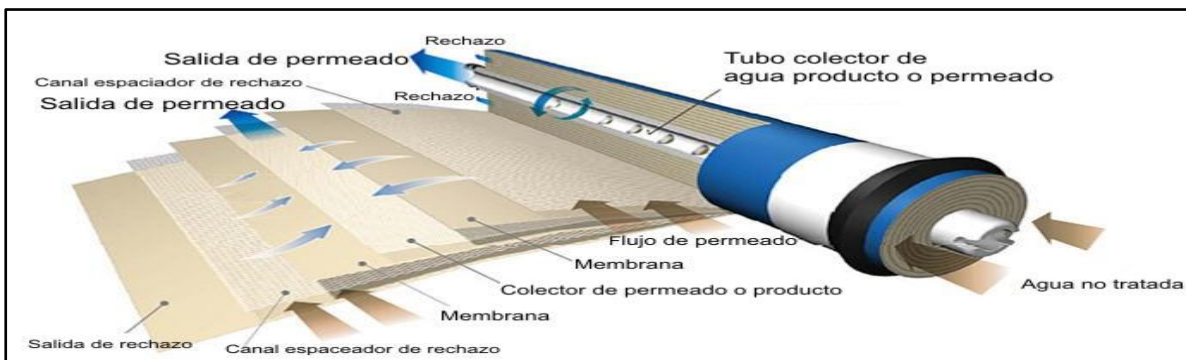


Figura 15: Operación de un tubo etapa OR [13]

CAPÍTULO 3: OBJETIVOS

3.1. Objetivo general

Evaluar la factibilidad técnica-económica de utilizar el agua permeada proveniente de la planta de tratamiento de RILes de CMDIC para el proceso de flotación selectiva Rougher de Cu-Mo.

3.2. Objetivos específicos

- ✓ Analizar los requerimientos de agua permeada en cantidad y calidad de las etapas de ultrafiltración y osmosis inversa.
- ✓ Evaluar los requerimientos de agua de procesos en cantidad y calidad utilizada actualmente en la etapa de flotación selectiva Rougher, con el fin de comparar con el agua permeada obtenida en la planta de tratamiento de RILes.
- ✓ Definir pruebas comparativas de flotación selectiva Rougher entre agua permeada de las etapas de ultrafiltración u osmosis inversa, y agua de procesos, para estimar el impacto del tipo agua utilizada sobre la recuperación/ley metalúrgica de Mo.
- ✓ Evaluar económicamente los resultados metalúrgicos obtenidos en las pruebas comparativas de flotación, considerando los costos asociados a la operación y mantención de la planta de RILes.

CAPÍTULO 4: DESCRIPCIÓN DE PROCESOS PRODUCTIVOS DE LA COMPAÑÍA MINERA DOÑA INÉS DE COLLAHUASI SCM

4.1. Descripción de la compañía

La Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi SCM (CMDIC), es un *joint venture* conformada por tres accionistas de nivel mundial: Anglo American PLC, Glencore y Japan Collahuasi Resources, con propiedad del 44 [%], 44 [%] y 12 [%] respectivamente [14].

Collahuasi es el tercer yacimiento de Cu más grande del mundo, con una producción de Cu fino al año 2015 cercana a las 455.000 [ton] de Cu fino y 6.500 [ton] de concentrado de Mo.

La principal operación minera de Collahuasi, se encuentran ubicadas en el área “Cordillera” (Figura 16) a una altura entre 3800 y 4600 [m] sobre el nivel del mar, y a una distancia de 200 [km] al sureste de la ciudad de Iquique, en la comuna de Pica. En esta área se ubican tres yacimientos mineros a rajo abierto: Ujina, Rosario y Huinquintipa, con cantidades de minerales de Cu cercana a las 9.964 millones de toneladas.



Figura 16: Ubicación geográfica Collahuasi Área Cordillera [15]

En Ujina se encuentra la planta concentradora, con una capacidad de 170 [ktpd] (a enero del 2017), en donde se realizan los procesos de chancado, molienda y flotación colectiva.

4.2. Descripción general de los procesos en CMDIC

En el área Cordillera se llevan a cabo los siguientes procesos para la extracción de minerales: chancado (Figura 17A), molienda (Figura 17B) y flotación colectiva Cu-Mo (Figura 17C) y procesos de tranques, relaves (Figura 17D) y concentrados (Figura E).

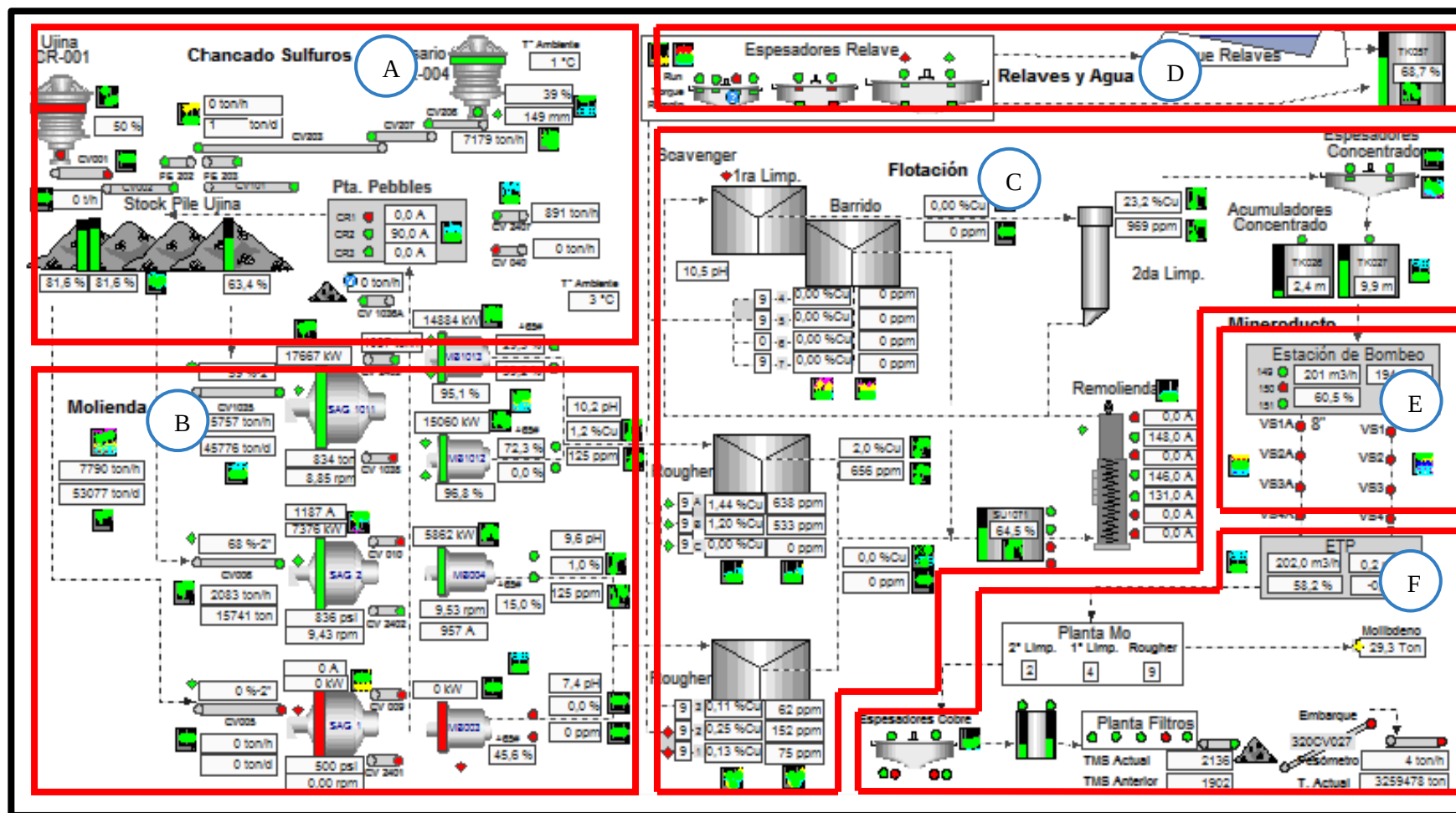
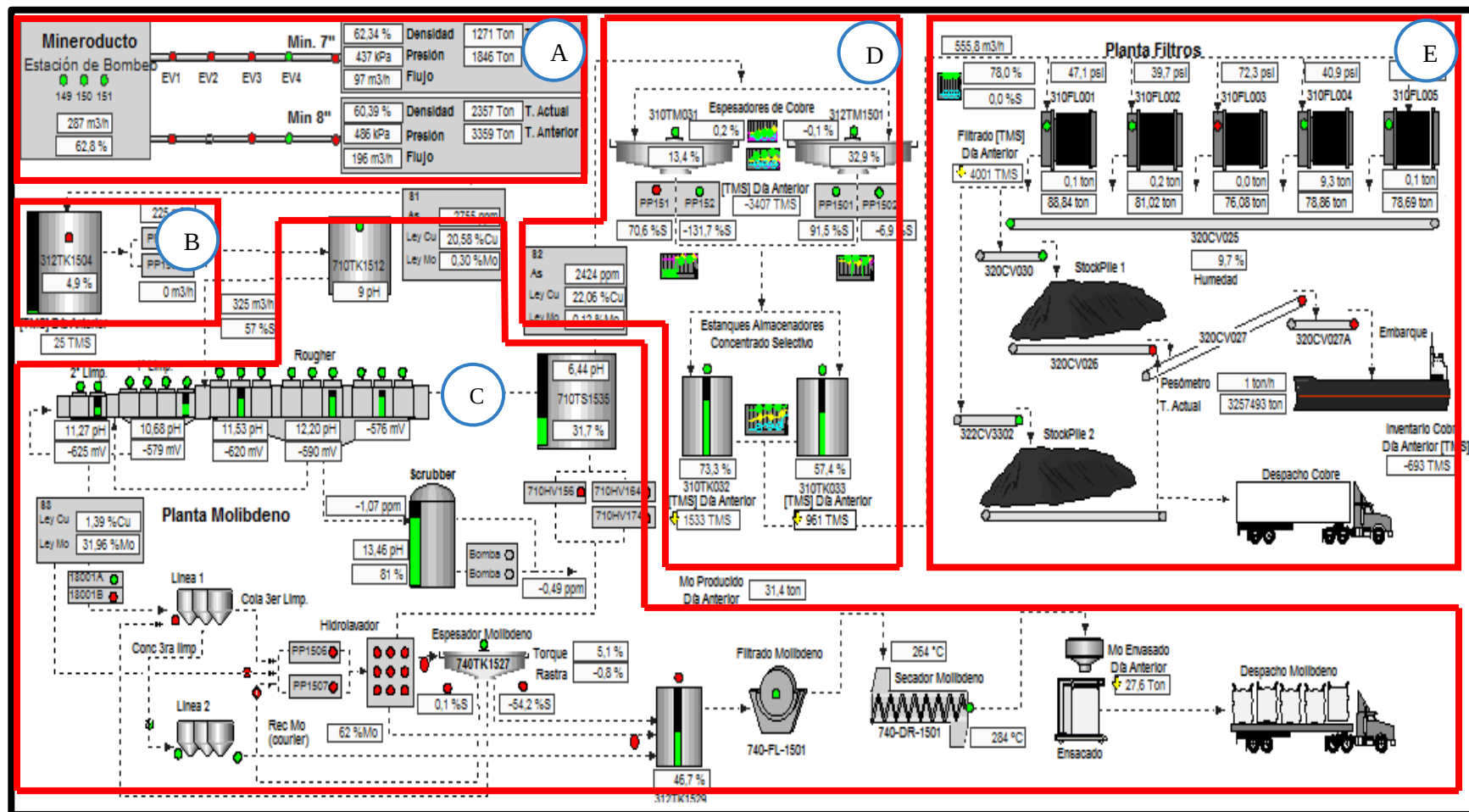


Figura 17: Diagrama de procesos general Collahuasi

4.3. Descripción general de los procesos en el área Puerto CMDIC

La Figura 18A indica la recepción del concentrado en área Puerto. En la Figura 18B ocurre el acondicionamiento previo ingreso a la planta de Mo (Figura 18C). El relaye de esta última es enviado al espesamiento (Figura 18D), filtrado y embarque de Cu (Figura 18E).



4.3.1. Recepción del concentrado de Cu-Mo (CUCON)

En las instalaciones del Puerto Collahuasi, se recibe el concentrado de Cu-Mo enviado desde la concentradora Ujina, a través de dos concentroductos con una longitud de 202 [km] y diámetro nominal de 7'' y 8'' (Figura 19).



Figura 19: Concentroductos en área Puerto.

4.3.2. Acondicionamiento del concentrado de Cu-Mo

El CUCON recibido en Puerto, es enviado a un cajón de traspaso 312-ST-1507 y de este a un cajón distribuidor 312-DI-1501. El concentrado es bombeado a un estanque acondicionador 312-TK-1504 (Figura 20), en donde se adiciona ácido sulfúrico. Este reactivo se utiliza para disminuir el pH desde 9-10 hasta 8-8.5, e inhibir los reactivos remanentes del proceso de flotación colectiva (Figura 18B).



Figura 20: Tanque almacenador (312-TK-1504) de CUCON.

4.3.3. Planta de Flotación selectiva Cu-Mo

Cuando se alcanza el tiempo de residencia adecuado en el estanque 312-TK-1504 (Figura 19), el concentrado es impulsado por medio de dos bombas horizontales hacia un estanque agitado 710-TK-1512 ubicado en la planta de Mo (Figura 18C). En este se adicionan reactivos, como el depresor NaSH (Sulfhidrato de sodio), agua de procesos para diluir el concentrado a un 40-45 [%] en sólidos, espumante P-4000 (Polipropilenglicol), entre otros.

El concentrado se transporta por medio de rebalse al circuito de flotación selectiva, consistente en la siguiente secuencia de etapas:

- ✓ *Rougher:* conformada por tres bancos, cada uno con tres celdas convencionales 710-FT-1501/1509. En el tope de estas, se recupera un concentrado Cu-Mo con mayor ley de Mo, mientras que en el relave se recupera principalmente concentrado de Cu. El primero es enviado a la primera limpieza, mientras que el segundo se bombea hacia dos Espesadores de Cu.
- ✓ *Primera limpieza:* El concentrado proveniente de la etapa Rougher y el relave de la segunda limpieza, es alimentado a dos bancos, cada uno con dos módulos (710-FT-1511/1514).
- ✓ *Segunda limpieza:* En esta etapa, se recibe el concentrado de la primera limpieza y el relave de la tercera limpieza en un banco con dos módulos 710-FT-1515/1516), en donde se vuelven a dosificar los reactivos NaSH, P-4000 y agua de procesos. Luego por gravedad, el concentrado de Mo, se envía a las etapas de tercera y cuarta limpieza.
- ✓ *Tercera y cuarta limpieza:* consistente en seis celdas de flotación neumática Maelgwyn, en las cuales se obtiene un concentrado de Mo con ley entre 25-40 [%] dependiendo de la mineralogía del concentrado enviado por la concentradora.

Posterior a la etapa de flotación selectiva, el concentrado es impulsado a un hidroseparador, el cual separa el concentrado Mo de arcillas. El primero se lleva a un espesador de Mo 740-TK1627. Por la descarga inferior de este, se obtiene el concentrado con un porcentaje en sólidos de 50 [%] aproximadamente, para ser enviado a un estanque de almacenamiento final de Mo 312-TK-1529. Luego, el concentrado de Mo es llevado a la unidad de filtro de vacío 740-FL-1501, en donde se reduce la humedad a un 13-17 [%]. Este producto es

enviado a un secador 740-DR-1501, para disminuir la humedad entre 3 y 4 [%]. Finalmente, el concentrado se envasa en maxisacos de 1 a 2 [ton] que son dispuestos en una cancha, para luego ser despachado por medio de camiones a clientes dentro del territorio nacional (principalmente Molymet).

4.3.4. Tratamiento del concentrado de Cu

Relaves provenientes de la flotación selectiva es el concentrado de Cu, el cual es enviado en la planta de Mo a un cajón distribuidor 312-ST-1503. Desde este se impulsa por medio de dos bombas horizontales hacia un cajón distribuidor 310-DI-18 para luego alimentar a dos Espesadores de Cu 312-TK-031 y 312-TK-1501 (Figura 18D). El rebose de estos equipos, consistente en agua de procesos, se transporta por gravedad hacia una sentina 310-TK-035 y así alimentar con agua de procesos a la planta de Mo, piscinas de decantación 9 y 10, piscinas de evaporación solar (PES) y planta de RILes.

4.3.5. Filtrado y embarque

Por el fondo de los Espesadores de Cu, se recuperan sólidos con un porcentaje cercano al 55 [%], para ser enviado a dos estanques almacenadores de concentrado de Cu selectivo (310-TK-032 y 310-TK-033), luego se disminuye la cantidad de agua a un valor cercano al 8 [%], por medio de cinco filtros prensa que operan en paralelo (310-FL-001/005). Una vez filtrado, el concentrado de Cu se almacena en dos stock piles. Dependiendo de los requerimientos de clientes, el concentrado generalmente se despacha por vía marítima (Figura 18E).

4.4. Manejo de aguas en área Puerto

Los principales volúmenes de aguas del Puerto se distribuyen en los procesos de flotación selectiva Cu-Mo (Figura 21A), espesadores de Cu (Figura 21B), planta de filtros (Figura 21C), piscinas de decantación (Figura 21D), sentina (Figura 21E), FAD y PES (Figura 21F), planta de RILes (Figura 21G) y Forestación (Figura 21H):

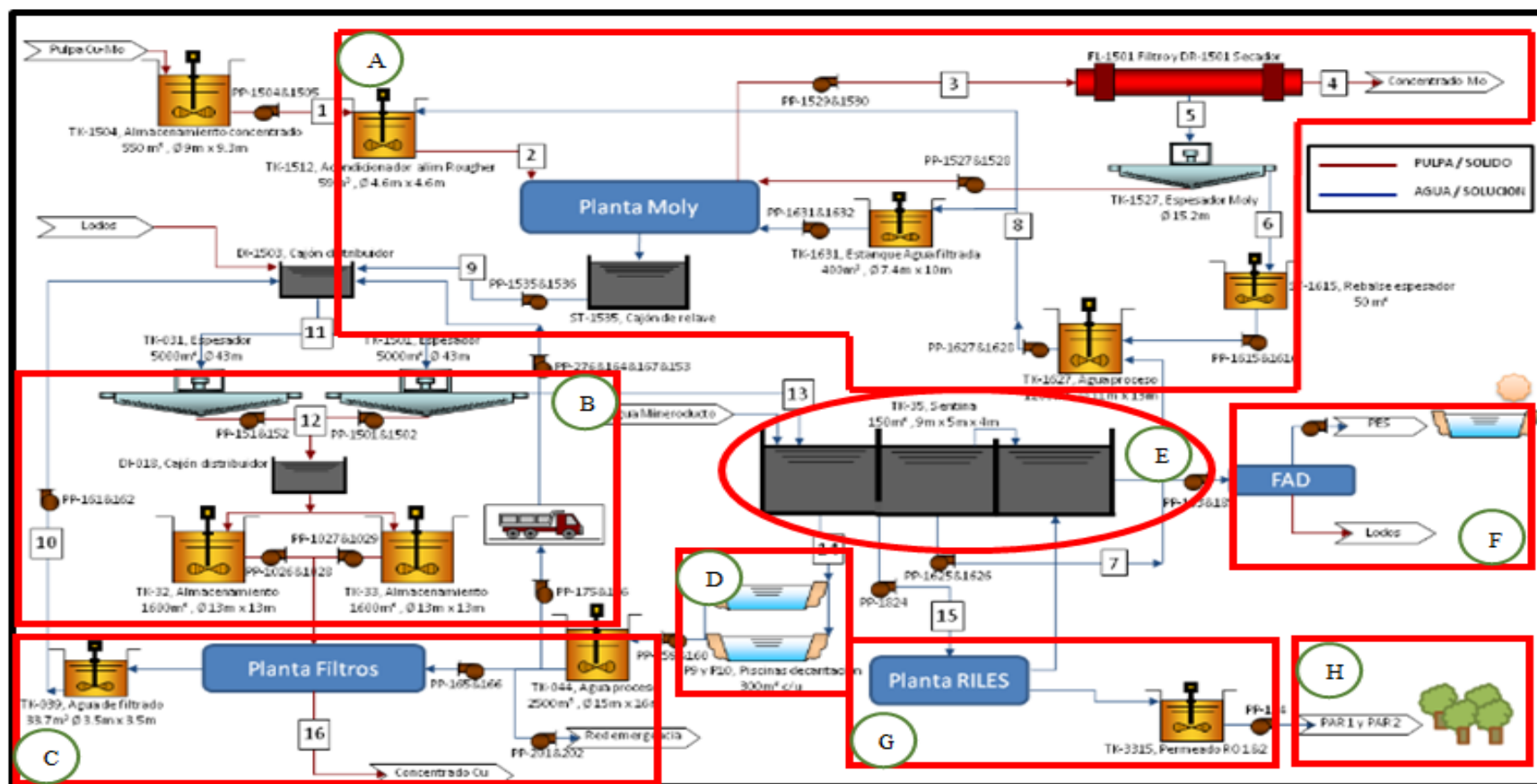


Figura 21: Movimientos general de aguas en el Área Puerto

4.4.1. Espesadores de Cu y sentina

El relave de la planta de Mo, es decir, el concentrado selectivo de Cu es enviado a dos Espesadores, TK-031 y TK-1501 respectivamente (Figura 21B), para aumentar la cantidad de sólidos y por rebalse, recuperar agua de procesos. Esta última es enviada a una sentina TK-035, la cual recibe agua proveniente de los concentrados cuando estos se empaquetan y los rechazos que se genera en etapas de la planta de RILes (sedimentación, filtrado de arena, carbón activado y OR).

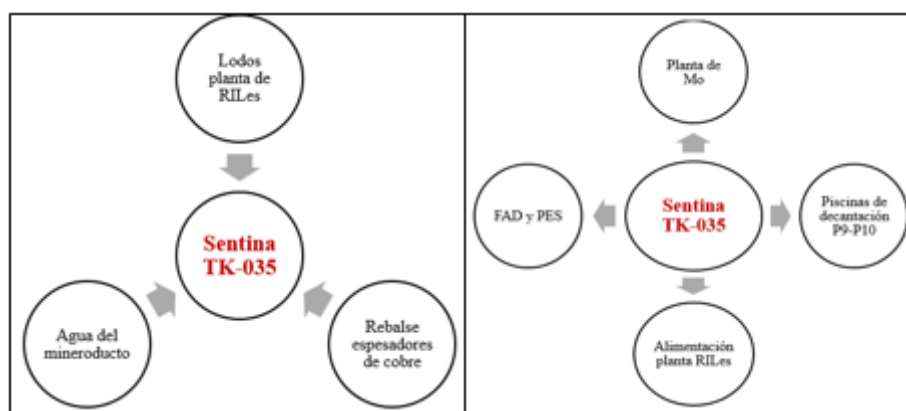


Figura 22: Movimientos de aguas en la sentina TK-035

Por otra parte, el agua de la sentina, es enviada a diferentes operaciones:

- ✓ *Planta de Mo:* por medio de dos bombas centrífugas PP-1625 y PP-1626, se envía agua de procesos para diluir la pulpa en las diferentes etapas de la flotación selectiva de Cu-Mo (Figura 21A).
- ✓ *Planta de RILes:* a través de la bomba centrífuga PP-1824, se transporta agua cruda hacia la planta de RILes con el fin de producir agua permeada OR, la cual se utiliza para el riego de la Forestación (Figura 21F). En cuanto al rechazo es dispuesto en la sentina (Figura 21E).
- ✓ *Planta de flotación por aire disuelto (FAD):* por medio de las bombas PP-183 y PP-185 (una en operación y la otra en stand-by), se alimenta a la planta FAD (Figura 21G). El objetivo esta es amortiguar la carga de metales pesados, arcillas, sulfuros, entre otros compuestos. El efluente es enviado a las piscinas de evaporación solar (PES).

✓ *Piscinas de decantación (P9 y P10):* parte del agua de la sentina, es impulsada a dos piscinas de decantación de 300 [m³], en donde decantan remanentes de concentrado de Cu-Mo, metales pesados y otros (Figura 21D).

4.4.2. Planta de Mo

Una vez realizada la dilución anterior en el TK-1512, la alimentación fresca se ingresa al circuito de flotación Rougher, donde el agua de dilución es aproximadamente al 80 [%] del agua total adicionada a la flotación selectiva.

El concentrado de Mo recuperado es enviado a tres equipos: hidrolavador, filtro prensa y secador, en donde el agua recuperada de estos procesos, es enviada al espesador de Mo TK-1527. El rebose de este se bombea al TK-1627 para recircular esta agua en la planta de Mo. (Figura 21A).

4.4.3. Planta de filtrado de Cu

El efluente de las piscinas P9 y P10, es enviado al tanque TK-044 con una capacidad de 2500 [m³], el cual alimenta por medio de dos bombas centrífugas, PP-165 y PP-166 a la planta de filtros (Figura 21C).

4.5. Descripción de procesos en planta de tratamiento de RILes CMDIC



Figura 23: Planta de tratamiento de RILes.

4.5.1. Descripción general planta de RILes

Parte del agua de procesos almacenada en la sentina 310-TK-035, es enviada a una planta de tratamiento de RILes, con el fin de remover diferentes tipos de sustancias con tamaño de hasta $0,001\ [\mu\text{m}]$ de diámetro y obtener agua permeada UF/OR. Las sustancias pueden ser: sólidos disueltos y suspendidos, metales, impurezas iónicas, coloides y materia orgánica.

La planta de tratamiento de RILes puede operar un flujo de alimentación de hasta $216\ [\text{m}^3/\text{h}]$, y bajo este valor nominal, lo esperado es obtener $135\ [\text{m}^3/\text{h}]$ de agua permeada OR y $81\ [\text{m}^3/\text{h}]$ de agua de rechazo. Para aquello es necesario que el agua de procesos pase por una serie de etapas: sedimentación, flotación por aire disuelto (DAF), filtrado y adsorción (filtros de arena y carbón activado), UF y OR (Figura 24).

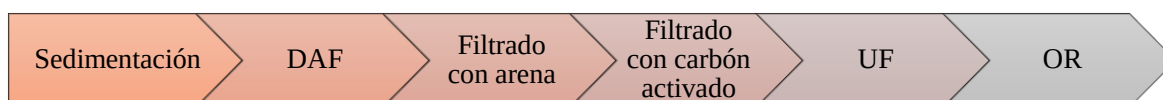


Figura 24: Secuencia de procesos en la planta de tratamiento de RILes

4.5.1.1. Sedimentación

El agua cruda proveniente desde la sentina 310-TK-035, ingresa a la planta de tratamiento de RILes por medio de una cañería con diámetro 10'' y longitud de 30 [m]. La sedimentación se lleva a cabo en una serie de piscinas (352-TK-3301/04) en donde se ajusta pH y se adicionan reactivos como coagulante y floculante (Figura 25). Este proceso genera dos flujos: un efluente que es impulsado por una bomba centrífuga 352-PP-3301A/B (una en stand-by y otra operando) hacia la etapa DAF y los lodos se almacenan en un tanque recolector 352-TK-3305, para luego ser bombeado a un proceso de engrosamiento.

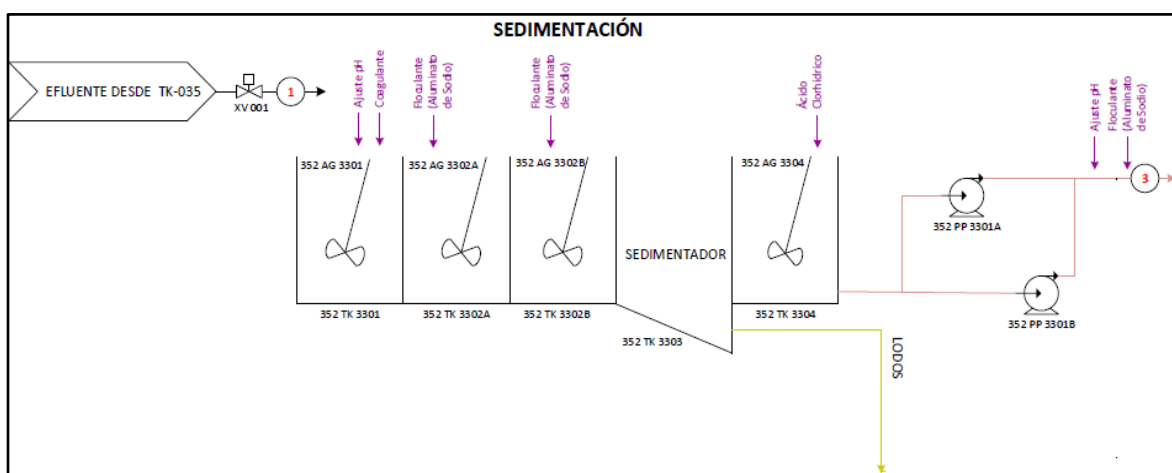


Figura 25: Diagrama de procesos de la etapa sedimentación

4.5.1.2. Flotación por aire disuelto (DAF)

A través de la inyección de aire comprimido, la DAF permite disminuir la cantidad de SST y remover fracción de aceites y grasas. Para esto, se dispone de dos unidades que operan en paralelo (Figura 26). El lodo se envía a un tanque 352-TK3305 y el efluente DAF hacia la etapa de filtrado con arena.

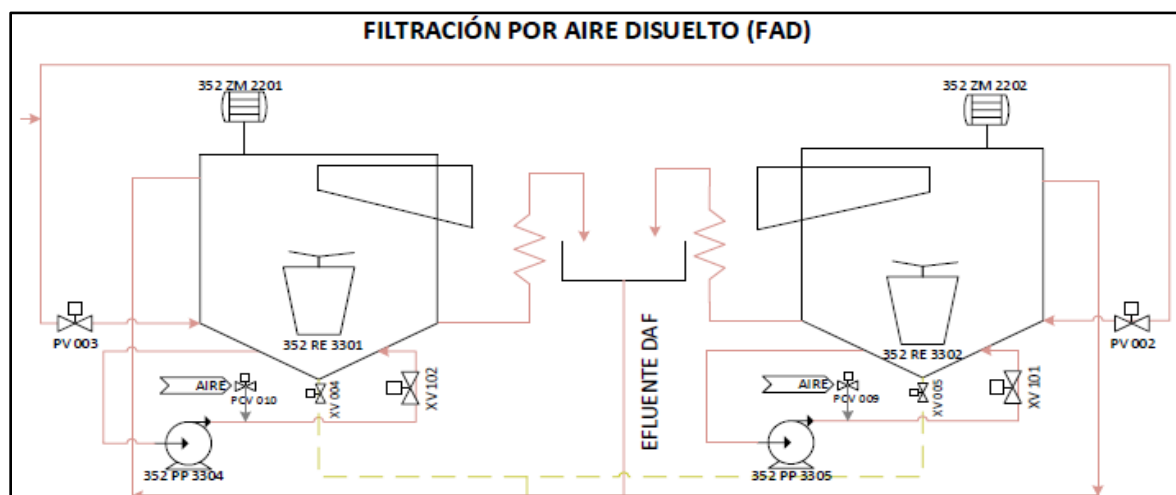


Figura 26: Diagrama de procesos de la etapa DAF

4.5.1.3. Filtrado con arena

El flujo de agua proveniente de la DAF que oscila por diseño entre 165 y 175 [m³/h], es impulsado por medio de una bomba centrífuga 352-PP-3306, hacia 6 filtros de arena 352-FL-3301/3306, los cuales operan en paralelo (Figura 27). Cuando en los filtros se alcanza un diferencial de presión de 15 [psi], se realizan ciclos de retrolavado, con agua dispuesta en el 352-TK-3308.

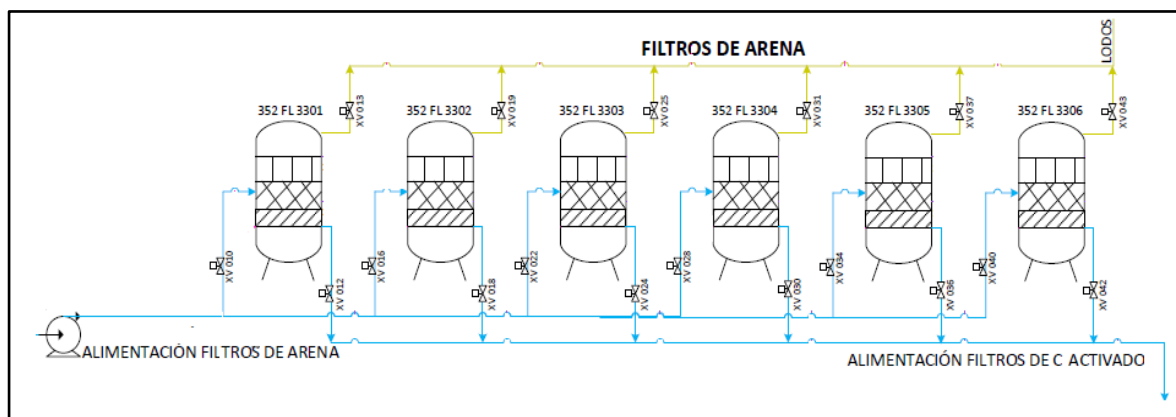


Figura 27: Diagrama de procesos de la etapa filtrado con arena

4.5.1.4. Filtrado con carbón activo

Previo al filtrado con carbón activado, el agua ingresa a tres filtros de media o anilla 352-FL-3313A/B/C, los cuales tienen un tamaño de retención igual a 200 [µm] y se encuentran configurados en paralelo. Su objetivo es retener arena del proceso anterior.

Luego, el agua ingresa a seis filtros de carbón activado granular 352-FL-3307/12 (Figura 28). La función de estos es adsorber partículas orgánicas. Cabe señalar que el carbón activado de los filtros es cambiado cuando se saturan.

El agua de salida se lleva a tres filtros de anilla de 200 [µm] configurados en paralelo 352-FL 3314/A/B/C, para retener compuestos orgánicos que no fueron removidos en los filtros de carbón activado.

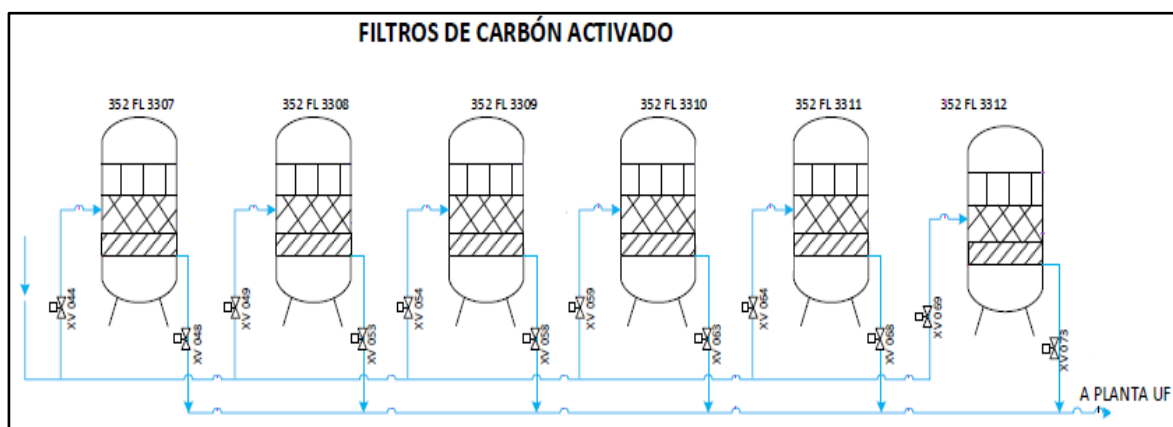


Figura 28: Diagrama de procesos de la etapa filtrado con carbón activado

4.5.1.5. Ultrafiltración (UF)

La UF cuenta con dos módulos 352-UF-1/2 de 45 membranas cada una (Figura 29) (fabricante Dow modelo SPF-2860 [16]). El agua tratada es enviada al 352-TK-3309, el cual alimenta a la OR. Para el correcto funcionamiento de las membranas, se realizan una serie de retrolavados, lavados CEB (“Chemically Enhanced Backwash”) y CIP (“Cleaning in place”). El lavado CEB inyecta NaOCl, H₂SO₄ y Cl, para controlar el grado de ensuciamiento orgánico e inorgánico, mientras que el lavado CIP se realiza para eliminar por medio de aire, compuestos que no requieren de tratamiento químico.

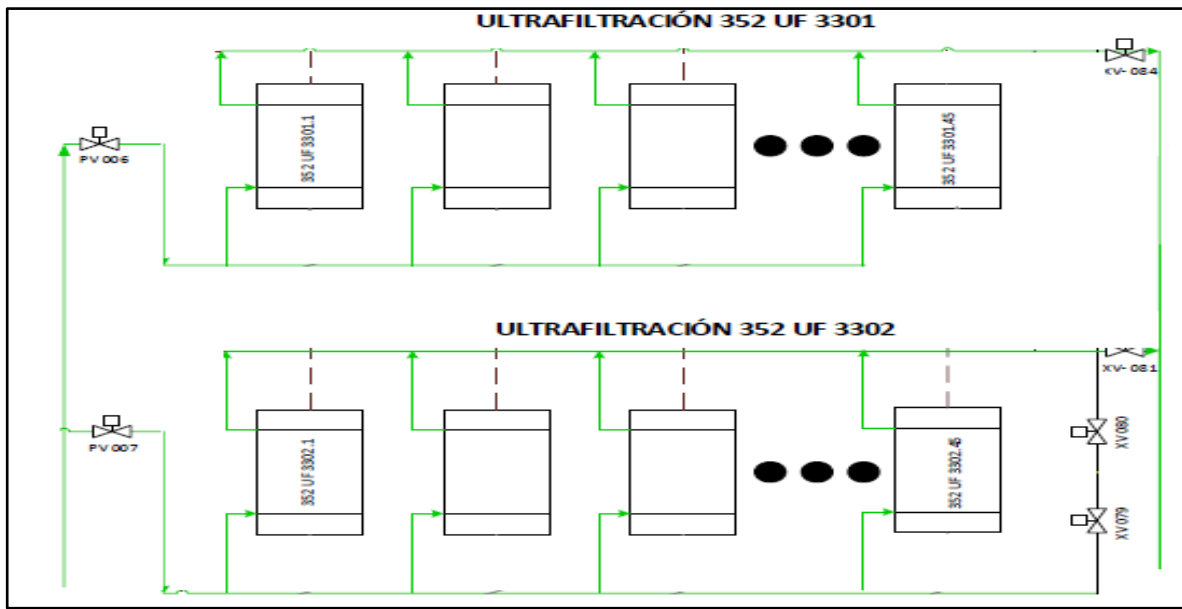


Figura 29: Diagrama de procesos de la etapa UF

4.5.1.6. Osmosis Inversa (OR)

El agua permeada UF, alimenta a dos unidades de OR 352-RO3301A/B (Figura 30) (BEL COMPOSITE INDUSTRIES modelo BEL 8-S-600) a través de una bomba impulsora de alta presión (600 [psi]) 352-PP-3313. El agua permeada producida en esta es almacenada en un tanque 352-TK-3315 para ser impulsada por la bomba 352-PP-184 hacia dos piscinas de agua de riego (PAR1/2).

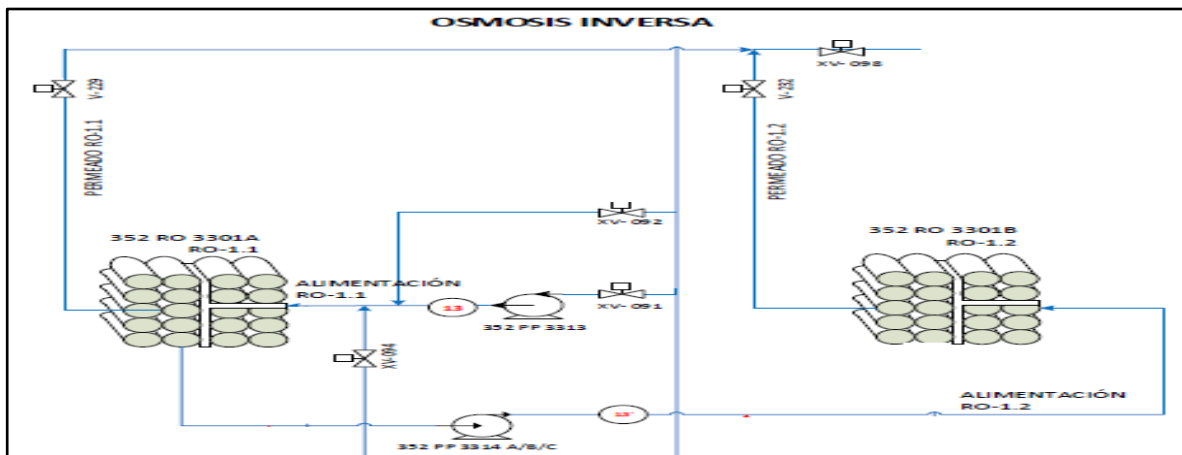


Figura 30: Diagrama de procesos de la etapa OR

CAPÍTULO 5: MATERIALES Y MÉTODOS

5.1. Diseño Experimental

Actualmente, el agua de dilución utilizada en la flotación Rougher es 100 [%] agua de procesos. Sin embargo, para estimar el impacto del tipo de agua utilizada sobre la recuperación/ley metalúrgica de Mo, se realizaron 11 pruebas de flotación en duplicado, considerando el mismo volumen de pulpa.

En cuanto al volumen total de agua, se considera la misma cantidad que es utilizada para diluir la pulpa desde 60 [%] hasta 40 [%] en sólidos aproximadamente. De dicho total, lo único que cambia es la mezcla de tipos de aguas como dilución, ya sea la combinación agua de procesos y permeada UF, o bien agua de procesos (AP) y permeada OR. Estas se muestran en la Tabla 3:

Tabla 3: Mezclas de aguas para cada prueba de flotación.

Test	AP	UF	OR
R01	100%	0%	0%
R02	80%	20%	0%
R03	60%	40%	0%
R04	40%	60%	0%
R05	20%	80%	0%
R06	0%	100%	0%
R07	80%	0%	20%
R08	60%	0%	40%
R09	40%	0%	60%
R10	20%	0%	80%
R11	0%	0%	100%

5.2. Metodología de muestreo

5.2.1. Concentrado colectivo de Cu-Mo (CUCON)

El muestreo de concentrado colectivo Cu-Mo se puede realizar de dos maneras: puntual y compuesta. Cuando se trata del puntual, la toma de mineral es en un lapso de tiempo no mayor a 15 [min], mientras que la muestra compuesta requiere de un cortador de flujo, el cual cada cierto tiempo durante el día, recolecta cantidades de pulpa. Esta es almacenada en un balde para posteriores análisis químicos.

Para efectos de esta memoria, el muestreo fue puntual y tomado en el muestreador 312-SA-1508/1509 (Punto 1 de la Figura 31). La razón de esta elección fue debido a que no existe un lugar físico para la toma segura de la muestra en la alimentación Rougher, ya que este proceso se encuentra encapsulado por riesgos de emanaciones de NaSH.

Cabe indicar que el CUCON muestreado posee las mismas características mineralógicas para todo el set de pruebas. Como condiciones iniciales, se tienen leyes de Mo, insolubles y Cu del 0,14 [%], 9,29 [%] y 23,95 [%] respectivamente, los cuales se realizaron por medio de análisis químico.

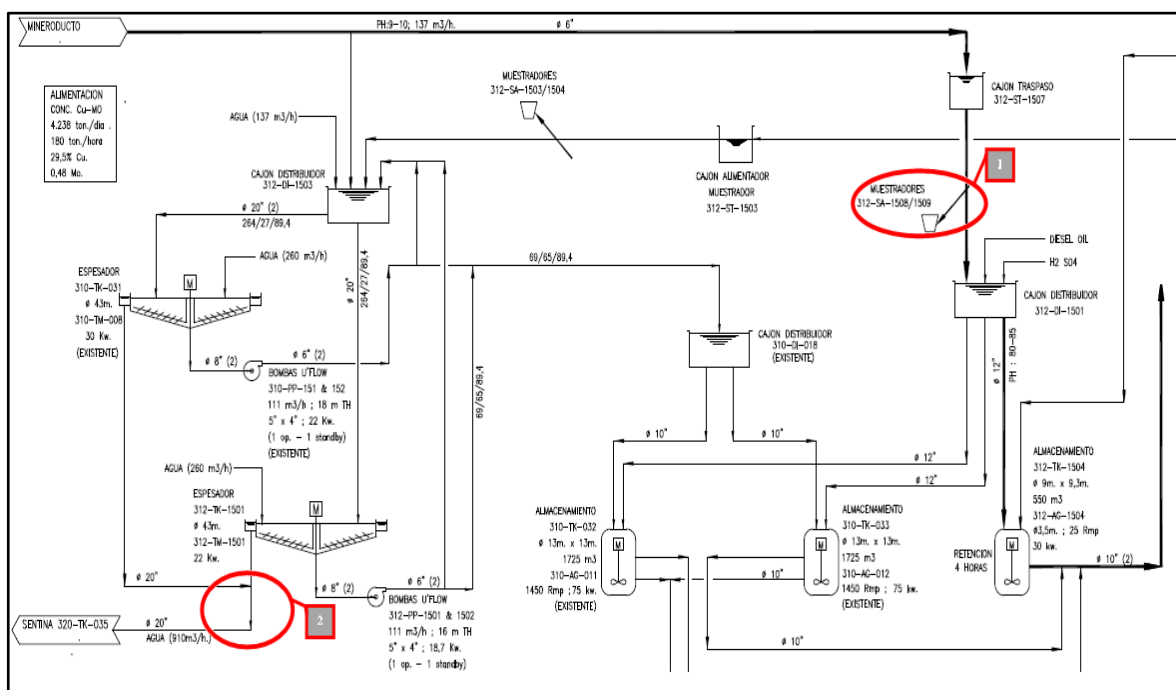


Figura 31: Zona de muestreo CUCON (1) y agua de procesos (2).

Por otra parte, se muestreó un volumen de pulpa de 110 [L] aproximadamente y se dispuso en 11 baldes de 20 [L], llenado cada uno hasta la mitad. Este muestreo fue realizado el día jueves 27 de abril a las 15:00 [h] por el Laboratorio “*Alfred-Knight*”. Este equipo de trabajo fue el encargado de realizar y reportar los resultados de las pruebas de flotación y análisis químicos.

5.2.2. Aguas.

5.2.2.1. Agua de procesos

La toma del agua de procesos fue realizada en el rebose del espesador de Cu. Se seleccionó este punto pues en los espesadores se recupera gran parte del volumen de agua recirculada en la planta de Mo. La toma se realizó a través de una manguera, en donde fueron recolectados 80 [L] y depositados en 6 bidones de 20 [L] cada uno llenado hasta 3/4 de su capacidad (punto 2 Figura 31).

5.2.2.2. Agua permeada UF

Tanto para el muestreo de agua permeada UF y OR, fue necesario operar la planta de RILes hasta alcanzar el estado estacionario. Posteriormente, en la salida de la UF se abrieron las válvulas de la Figura 32 (Punto 3.A y 3.B) y a través de una manguera, fue extraída 30 [L] de agua permeada UF y dispuesta en 2 bidones de 20 [L] llenado hasta 3/4 de su capacidad.

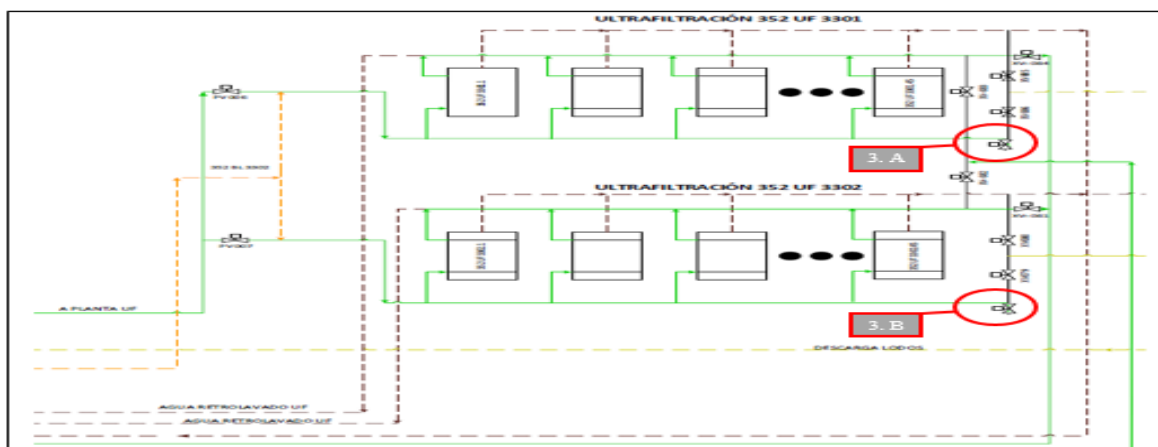


Figura 32: Zona de muestreo de agua permeada UF.

5.2.2.3. Agua permeada OR

El agua permeada OR fue obtenida abriendo la válvula mostrada en la Figura 33, y por medio de una manguera, fue dispuesto 30 [L] de agua permeada OR y depositada en 2 bidones de 20 [L].

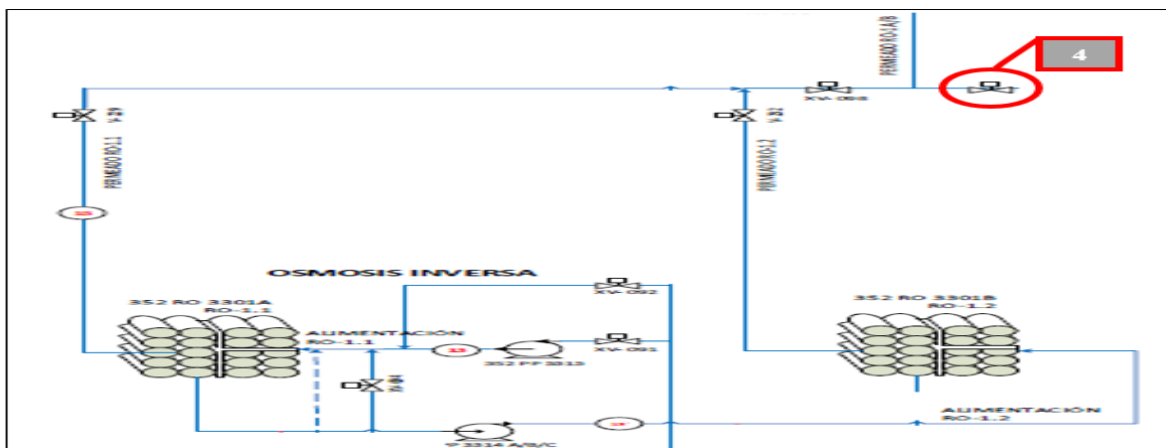


Figura 33: Zona de muestreo de agua permeada OR.

5.3. Reactivos

Los reactivos utilizados para las pruebas de flotación, fueron los mismos que se dosifican en la flotación Rougher. Estos se detallan en la siguiente Tabla 4:

Tabla 4: Reactivos utilizados en las pruebas cinéticas de flotación.

Reactivos	Función	Pureza [%]	Densidad [g/mL]
Sulfhidrato de sodio (NaSH)	Depresante	42	1,84
Ácido sulfúrico (H ₂ SO ₄)	Regulador de pH	98	1,80
MX2415	Colector de Mo	-	0,94
P4000	Antiespumante	-	0,98

5.4. Materiales y equipos para las pruebas de flotación

- Balanza granatoria con precisión de dos decimales.
- Vaso precipitado de 200 [mL].
- Filtro a presión.
- Horno eléctrico de secado.
- Sistema de extracción de polvo.
- Sistema de aire comprimido.
- Bandejas.
- Equipo de flotación SERQUIMET.
- Celda de flotación.

- j) pH metro.
- k) Paleta removedora de concentrado.
- l) Piseta.
- m) Cilindro de Nitrógeno.
- n) Detector de H₂S.
- o) Electrodo pH y ORP.
- p) Papel craft.
- q) Tamiz #100 malla Tyler.

5.5. Procedimiento experimental

El tratamiento experimental se divide en dos partes: la determinación del porcentaje en sólido de la pulpa muestreada (punto 5.2.1) y la metodología utilizada en las pruebas de flotación (Figura 34). Las pruebas fueron realizadas por *Alfred-Knight*, las que se describen en esta sección.

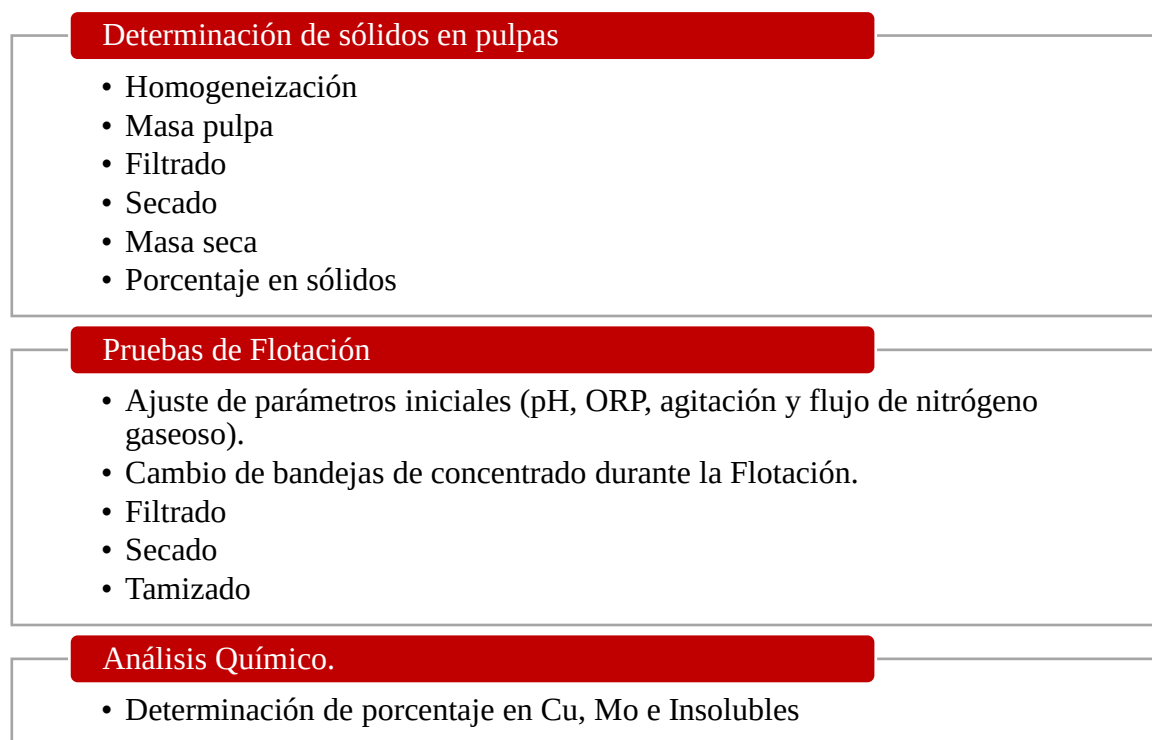


Figura 34: Diagrama general del procedimiento experimental.

5.5.1. Determinación del porcentaje en sólidos de las pulpas

Se homogenizó la pulpa dispuestos en los baldes. Luego, se taró un vaso precipitado de 200 [mL] y se tomó una muestra de la pulpa. El vaso con la pulpa fue masado en una balanza analítica (m_p). Paralelamente, se rotularon y ajustaron papeles craft en la parte inferior de los filtros (Figura 35A). En estos últimos fue vertida la muestra de pulpa contenida en el vaso precipitado. Luego se lavó el vaso con agua para así soltar las partículas residuales que quedaron en el recipiente. Una vez filtrada la muestra, se debió abrir primero la tapa superior del papel craft y después la tapa inferior para retirar la muestra filtrada. Posteriormente, se secó la muestra en un horno eléctrico (Figura 35B) para que al cabo de unas horas se retirasen y enfriasen durante un minuto para así masar la muestra seca (m_s). Finalmente, se calculó el porcentaje en sólidos ($\%_{sólidos}$) mediante la siguiente relación:

$$\%_{sólidos} = \frac{m_s}{m_p} \cdot 100\% \quad (3)$$



Figura 35: Filtros (A) y horno eléctrico (B) en el laboratorio metalúrgico

5.5.2. Flotación

En primer lugar, una celda de flotación Rougher escala de laboratorio (Figura 36A) fue tarada. En esta, se adicionó la pulpa con el porcentaje en sólidos determinada en el punto 5.5.1, para posteriormente agregar la mezcla de agua definida hasta completar 3,5 [L]. Luego, fue encendido el equipo de flotación y el agitador, el cual se ajustó a 700 [rpm] (Figura 36C). Mientras se mezclaba la solución presente en la celda, se registraron datos de pH y ORP iniciales. Después se dosificó NaSH hasta alcanzar un ORP de -450 [mV] y se

acondicionó durante 3 [min]. Al cabo de este tiempo, se registró nuevamente el pH y ORP. Una vez alcanzadas las condiciones, se iniciaron las pruebas de flotación ajustando el flujo de nitrógeno gaseoso a un valor de 5,66 [LPM]. Cabe indicar que los tiempos de flotación correspondieron a 1, 2, 4, 8 y 16 [min] (tiempos en los cuales se cambiaron las bandejas debidamente rotuladas (Figura 36B)), con paleteos cada 20 [s]. Durante el transcurso de la prueba de flotación, fue removido el concentrado parcial adicionando la mezcla de agua utilizada en el test de flotación, para mantener el volumen y limpieza de las paredes de la celda. Cada 2 [min], se fue registrando los valores de pH y ORP durante la ejecución de la prueba, manteniendo el ORP lo más cercano a los -450 [mV]. Finalizado el tiempo de flotación, fue cerrado el flujo de nitrógeno gaseoso y se registró el pH y ORP final. Luego, se filtraron y secaron el contenido de las bandejas. Estas muestras una vez secas, se tamizaron a #100 malla Tyler y se envasaron en sobres rotulados (Figura 36D) para realizar el análisis químico de Cu, Mo e insolubles.

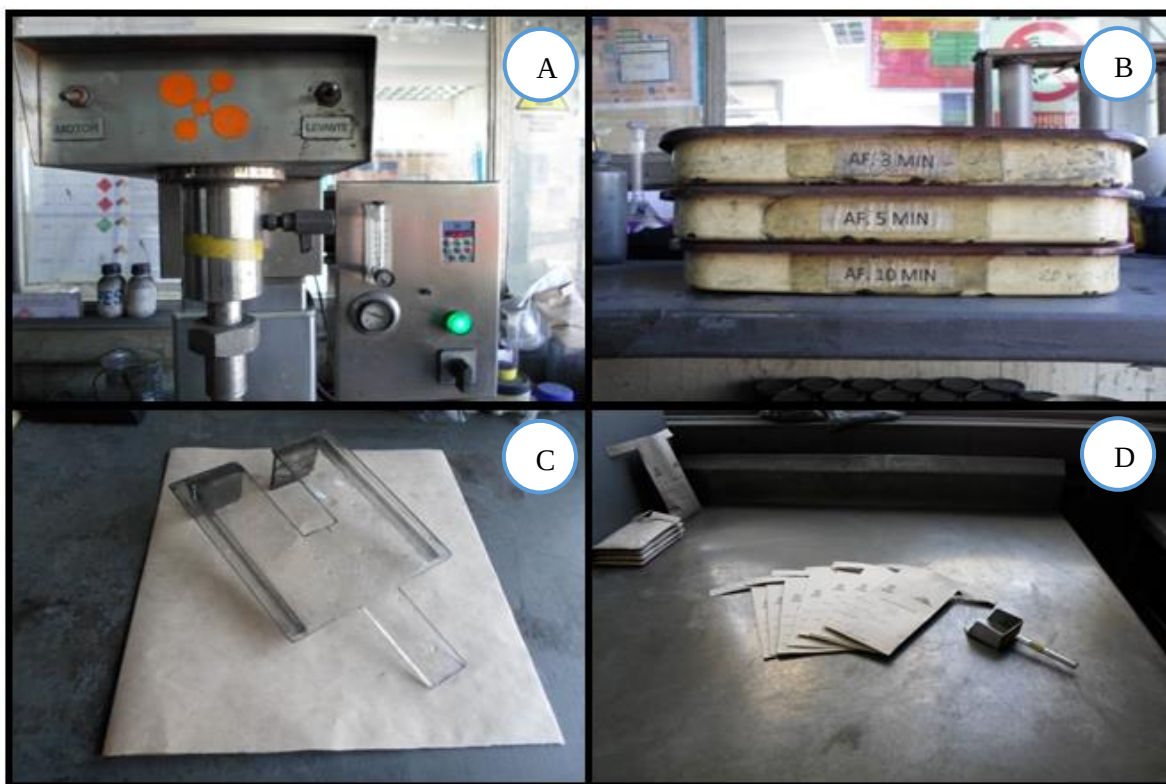


Figura 36: Equipo de Flotación (A), bandejas rotuladas de concentrado (B), paleta (C) y sobres para análisis químico (D)

5.5.3. Análisis Químico

Los análisis químicos se realizan con el objetivo de determinar el porcentaje de Cu, Mo e insolubles presentes en los concentrados secos obtenidos en los tiempos de flotación (El detalle de los procedimientos se muestra en Anexos). Estos se realizan a través de los métodos volumétricos, absorción atómica y calcinación respectivamente.

CAPÍTULO 6: DATOS HISTÓRICOS DE AGUAS PLANTA RILES Y FLOTACIÓN SELECTIVA ROUGHER

En este capítulo se detallan y analizan los datos históricos de cantidades y calidades de aguas en la planta de tratamiento de RILes (años 2013-2016), especialmente del agua de procesos que ingresa a la sedimentación, entradas y salidas de aguas permeadas en las etapas de UF y OR.

Posteriormente, se realiza lo mismo para la flotación selectiva Rougher, en donde se muestra y analiza la data de flujos volumétricos de agua de procesos que se ha utilizado como dilución.

Las mediciones son diarias y los valores reportados corresponden a la media mensual con su respectiva desviación estándar para observar la variación (Tabla 21, 22 y 23, Anexo A).

Lo anterior se realiza con el fin de tener una línea base de los flujos y calidades de aguas que produce la planta de RILes de las etapas en estudio.

6.1. Cantidades de aguas en la planta de RILes

6.1.1. Sedimentación

En la Figura 37 se observa que durante el año 2013 los flujos volumétricos de alimentación a la sedimentación, fluctuaron entre valores de 110 y 130 [m³/h], registrándose en los últimos meses desviaciones del 8 [%]. Sin embargo, desde el 2014 hasta el 2016, se reportaron flujos de alimentación con variaciones máximas al 4 [%], con un valor promedio de 125 [m³/h].

Los caudales mencionados anteriormente son menores al valor crítico de diseño 220 [m³/h], ya que si se supera, el tiempo de residencia en la sedimentación disminuye considerablemente, lo cual repercute en la eficiencia de la planta. Se observa que este valor crítico no fue superado durante el periodo de estudio.

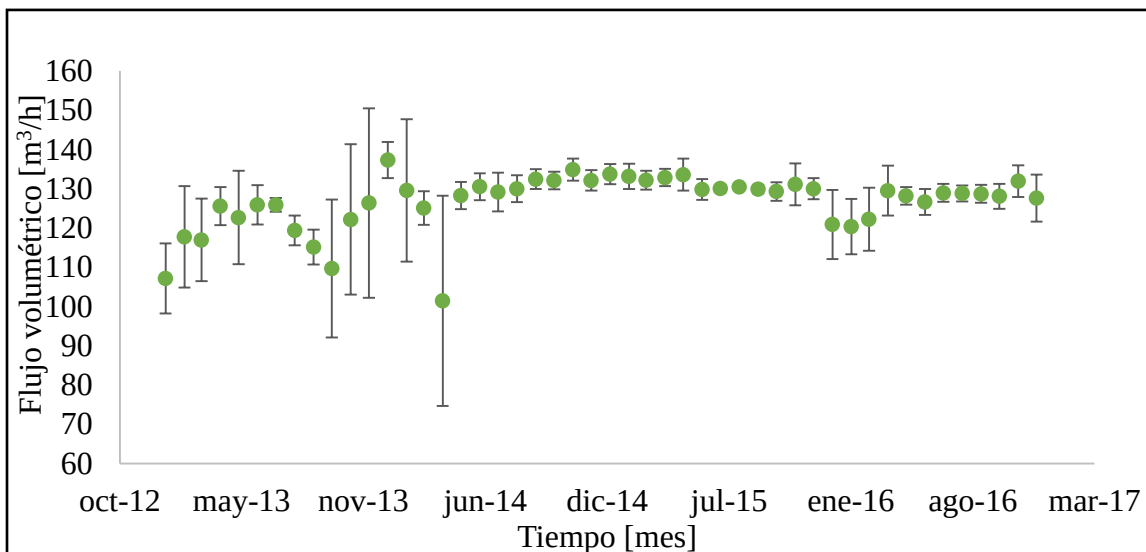


Figura 37: Flujo volumétrico de agua de proceso alimentada a la planta de RILes entre los años 2013-2016.

6.1.2. UF

El flujo volumétrico de agua permeada UF se muestra en la Figura 38. En esta se destaca que el caudal promedio para el año 2013 fue de 120 [m³/h], presentando desviaciones del 8 [%] respecto a la media. Para los siguientes años existió una situación similar aunque con variaciones menores al 5 [%].

Los flujos de agua permeada UF en comparación con los caudales de alimentación a la planta de RILes son similares, puesto que los rechazos de etapas intermedias (DAF, filtros de arena y carbón activado) son despreciables, ya que estos se efectúan al momento de realizar lavados con el fin de eliminar impurezas retenidas en los equipos.

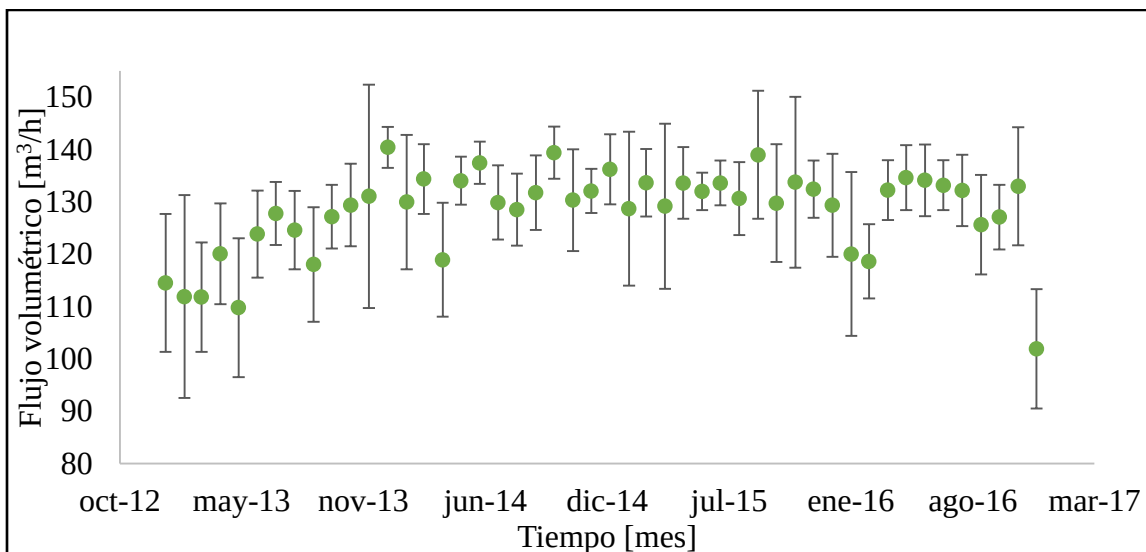


Figura 38: Flujo volumétrico de agua permeada UF entre años 2013-2016.

6.1.3. OR

Los flujos del permeado OR en los años en estudio han estado en torno a una media de 60 $[m^3/h]$, con una desviación no mayor al 10 [%]. Al comparar la Figura 37, 38 con 39 se tiene que esta última presenta caudales menores a los de alimentación a la planta de RILes y permeado UF, ya que en la OR se tiene un rechazo del 55 [%] respecto al flujo de entrada a dicha etapa.

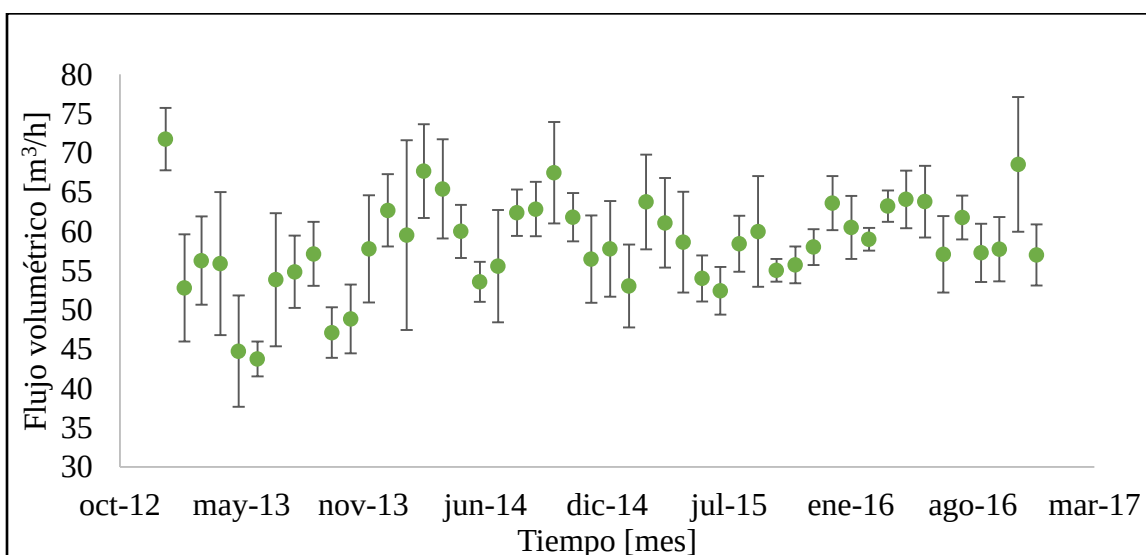


Figura 39: Flujo volumétrico de agua permeada OR entre años 2013-2016.

6.2. Calidades de aguas en la planta de RILes

6.2.1. Conductividad

En la Figura 40, se observa que la conductividad del agua alimentada a la planta de RILes en los dos primeros años, presentó fluctuaciones aproximadas entre 18 y 22 [mS/cm] y en los siguientes años, se obtuvieron valores en torno a 18 [mS/cm] como promedio.

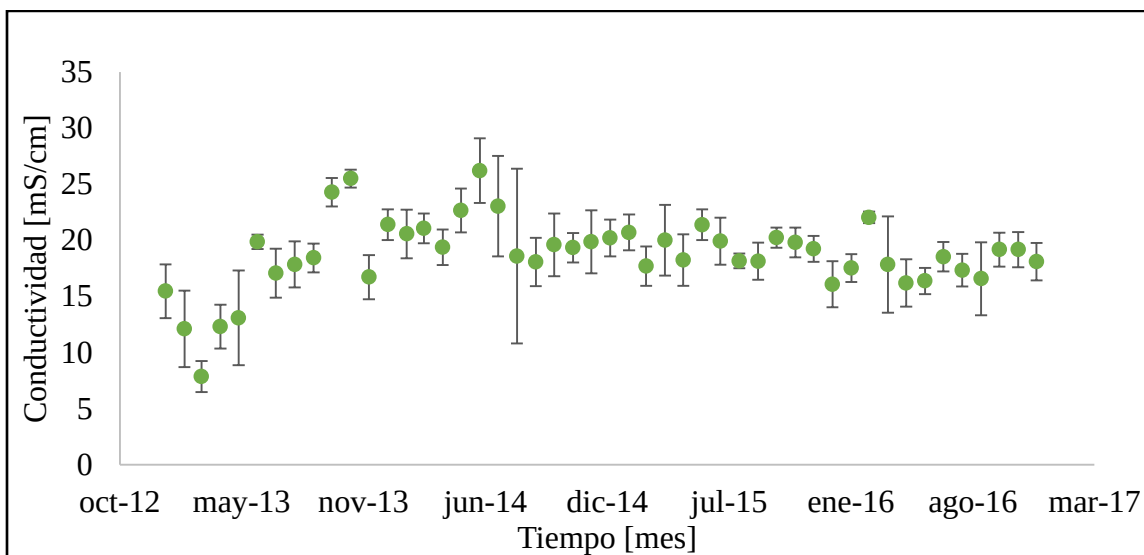


Figura 40: Conductividad del agua de procesos alimentada a la planta de RILes entre años 2013-2016.

En cuanto a la conductividad del agua permeada UF, en la Figura 41 se muestran conductividades similares a las del flujo de alimentación en la planta de RILes. Esto se debe a que el proceso UF permite el paso de sales a través de las membranas, reteniendo solamente sólidos suspendidos, coloides y ciertos metales.

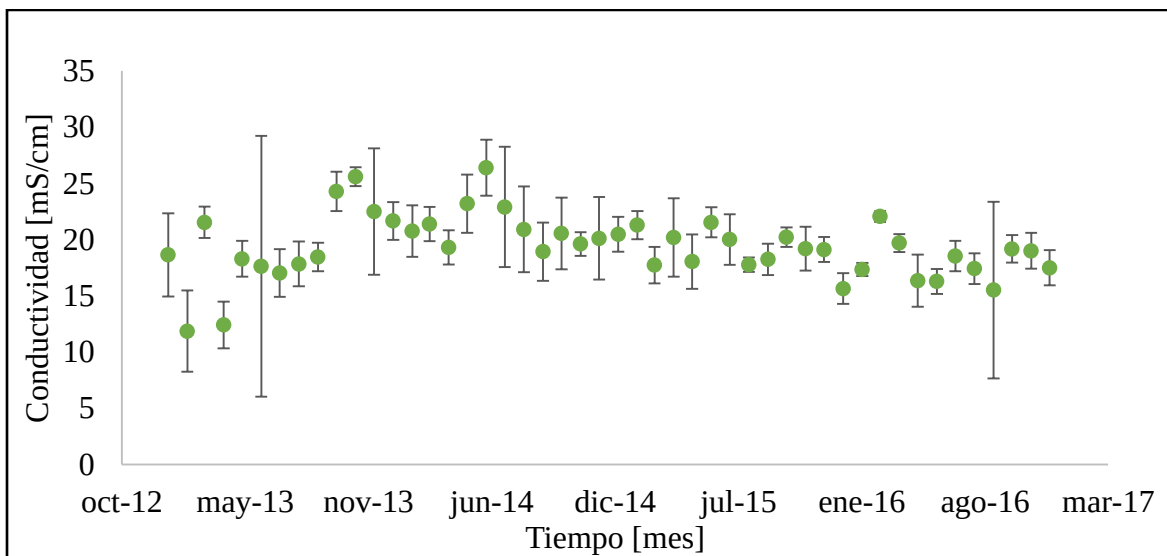


Figura 41: Conductividad del agua permeada UF entre años 2013-2016.

Por otra parte, en el permeado OR se logra identificar valores de conductividad menores a 1,65 [mS/cm] para los años 2013-2015 debido a que la OR permite remover gran parte de los sólidos totales disueltos (Figura 42). Sin embargo, en el año 2016 la conductividad aumentó considerablemente en un 71 [%] aproximadamente, lo cual posiblemente se debería a la falta de regeneración de las membranas OR.

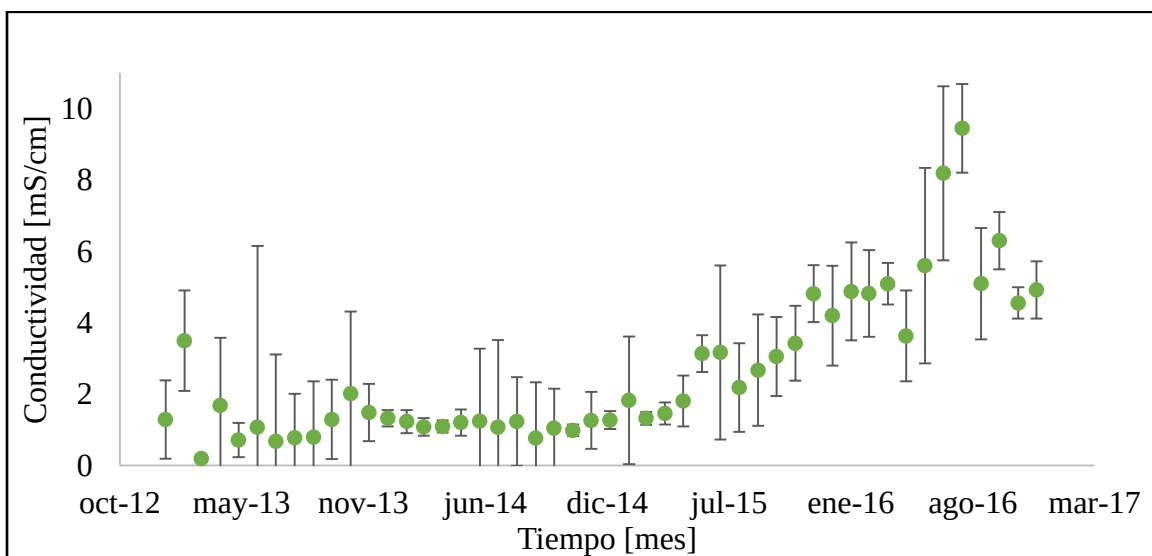


Figura 42: Conductividad del agua permeada OR entre años 2013-2016.

En resumen, en las conductividades de alimentación a la planta de RILes y salida de la UF no se observan diferencias importantes, mientras que en el permeado de la OR se logra reducir la conductividad en un 85 [%] aproximadamente.

6.2.2. Turbidez

Por diseño, idealmente el agua que ingresa a la sedimentación debe presentar un valor menor a 120 [NTU], ya que si resulta ser mayor, aumenta la presión del sistema y disminuye la vida útil de las membranas de la UF y OR. En la Figura 43, se tienen aguas de procesos dentro del parámetro establecido tendiendo aproximadamente a las 65 [NTU] durante el tiempo en estudio.

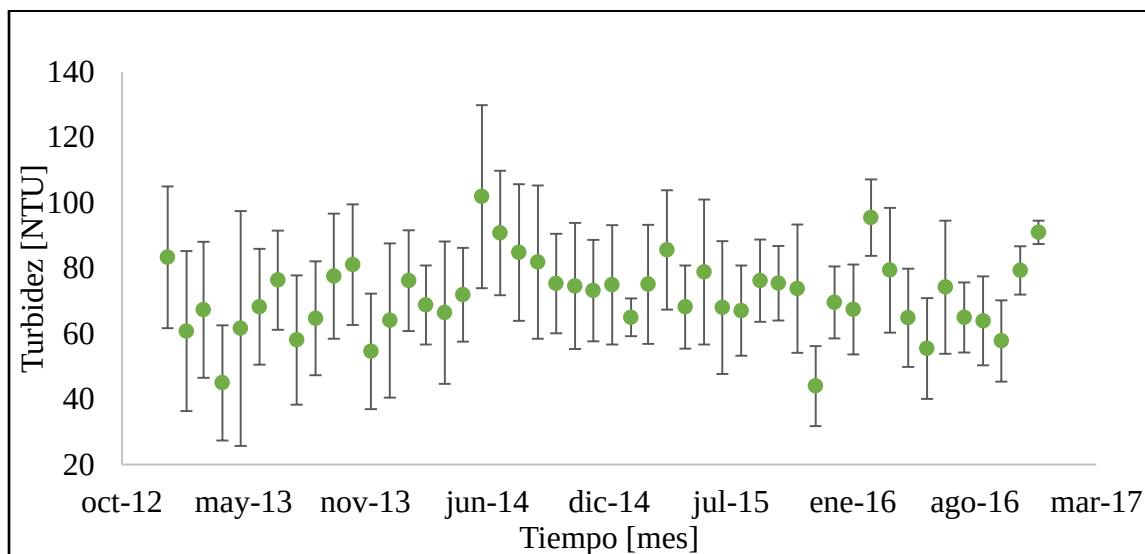


Figura 43: Turbidez del agua de procesos alimentada a la planta de RILes entre años 2013-2016.

Posteriormente, en los procesos de flotación por aire disuelto (DAF) y filtros de arena, se continúan removiendo sólidos suspendidos, reportándose valores menores a 20 [NTU] en el flujo de entrada a la UF, lo que se traduce en una reducción del 85 [%] aproximadamente. Esta agua ingresa a la UF y su efluente tiene un 80 [%] menos en promedio de carga de sólidos suspendidos (Figura 44).

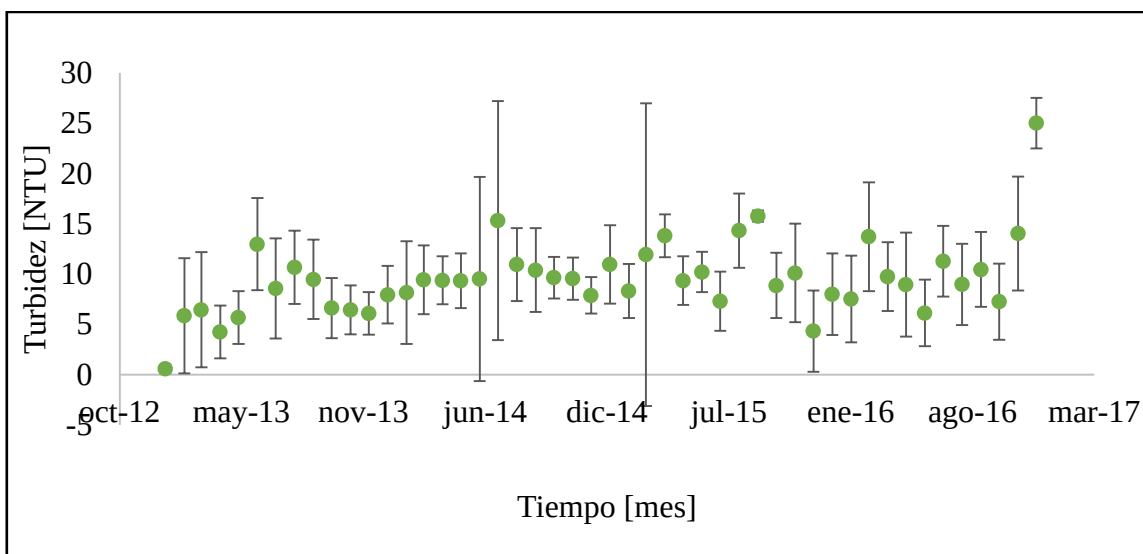


Figura 44: Turbidez de entrada agua total UF entre años 2013-2016.

Cabe señalar que el agua permeada OR, posee la misma turbidez que el agua permeada UF que ingresa a la etapa OR, puesto que esta última solamente se remueven sólidos disueltos (Figura 45).

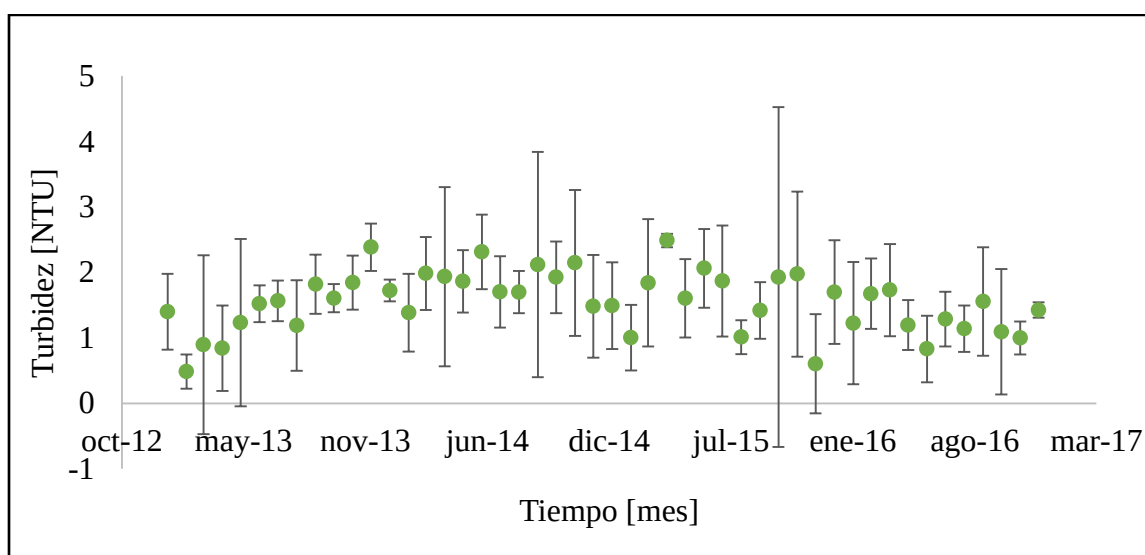


Figura 45: Turbidez del agua permeada UF y OR entre años 2013-2016.

6.2.3. pH

El pH que ingresa a la planta de RILes como se muestra en la Figura 46, varió entre 8 y 10 (intervalo de variación es causa de las dosificaciones de NaSH, ya que dependen de la mineralogía de la pulpa). Estos valores alcalinos se deben principalmente a que el agua de

procesos que se utiliza en la planta contiene residuos provenientes de la flotación selectiva, etapa en cual se requieren pH mayores para depresar el Cu y evitar la generación de H_2S .

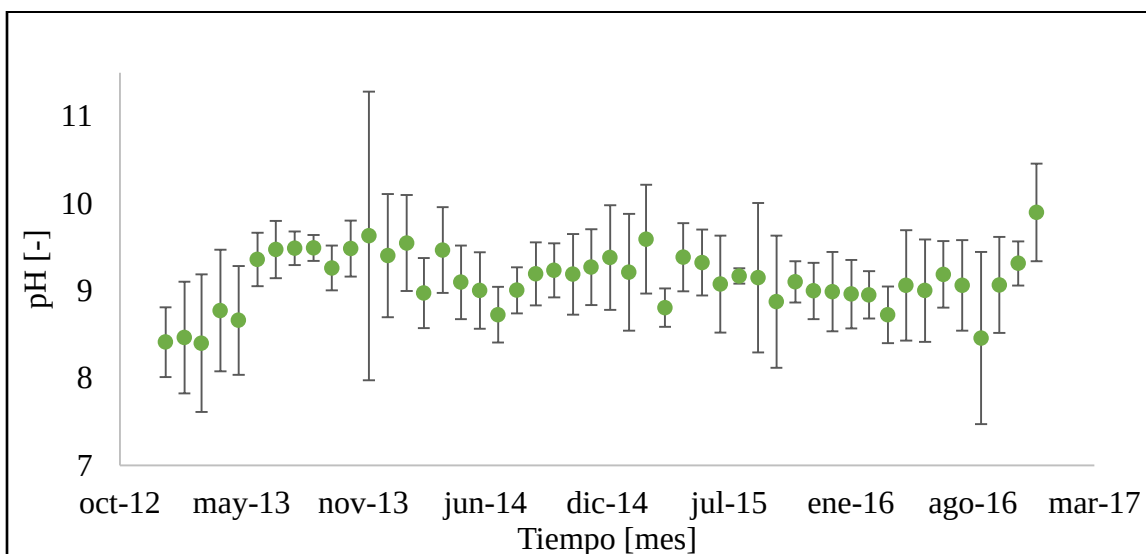


Figura 46: pH del agua de procesos en el flujo de alimentación planta de RILes entre años 2013-2016.

En cuanto al agua permeada UF (Figura 47), el pH disminuye producto de la adición de reactivos en los procesos previos, variando entre pH 6,5 y 7,5, es decir, relativamente un carácter neutro.

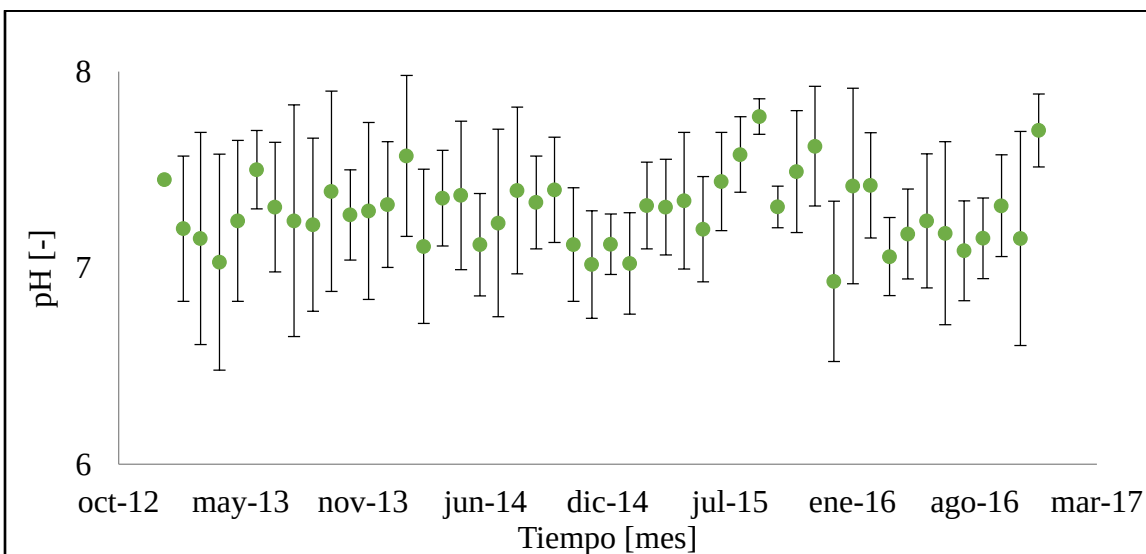


Figura 47: pH del agua permeada UF entre años 2013-2016.

6.3. Producción histórica de agua permeada UF y OR

En la Figura 48, se muestran los volúmenes de agua permeada UF y OR producida en la planta de RILes durante el año 2011-2016, donde se puede observar que los volúmenes de aguas permeada UF y OR se han reducido de forma significativa en un 73 [%] y 69 [%] respectivamente, entre dichos años.

Las mayores variaciones fueron entre los años 2013 y 2014, en donde las producciones de agua permeada se redujeron en un 49 [%], alcanzándose al año 2014, volúmenes UF y OF de 265.000 y 125.000 [m³/año], cada uno. Sin embargo, disminuciones no menores se reportaron en los años posteriores, en los cuales al año 2016, se produjeron 165.000 [m³/año] UF y 75.000 [m³/año] OR (Tabla 6).

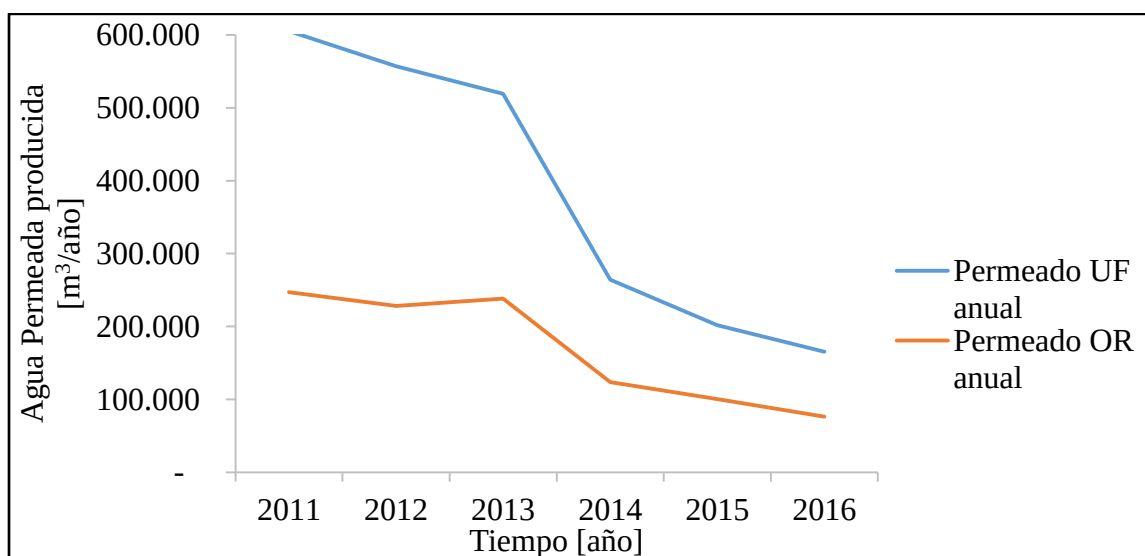


Figura 48: Volúmenes de agua permeada UF y OR producida entre años 2011-2016.

Tabla 5: Producción y variación de agua permeada UF/OR, años 2011-2016.

Año	UF Anual [m³/año]	ΔUF	RO Anual [m³/año]	ΔOR
2011	605.251		246.952	
2012	556.997	-8%	228.211	-8%
2013	519.298	-7%	238.267	4%
2014	264.391	-49%	123.761	-48%
2015	201.783	-24%	100.590	-19%
2016	165.468	-18%	76.224	-24%

6.4. Cantidad requerida de agua de dilución en la flotación Rougher

En el año 2016, se utilizó alrededor de 560.640 [m³] de agua de procesos en la flotación Rougher, con un valor promedio de 64 [m³/h]. Este es aproximado puesto que dependiendo del porcentaje en sólidos que recibe la planta de Mo, es la cantidad de agua de procesos que se utiliza en la dilución de pulpa para alcanzar el 40 [%]. Sin embargo, el valor es representativo ya que por diseño el flujo de agua es cercano a los 60 [m³/h]. En la Figura 49, se muestran los flujos del segundo semestre del 2016:

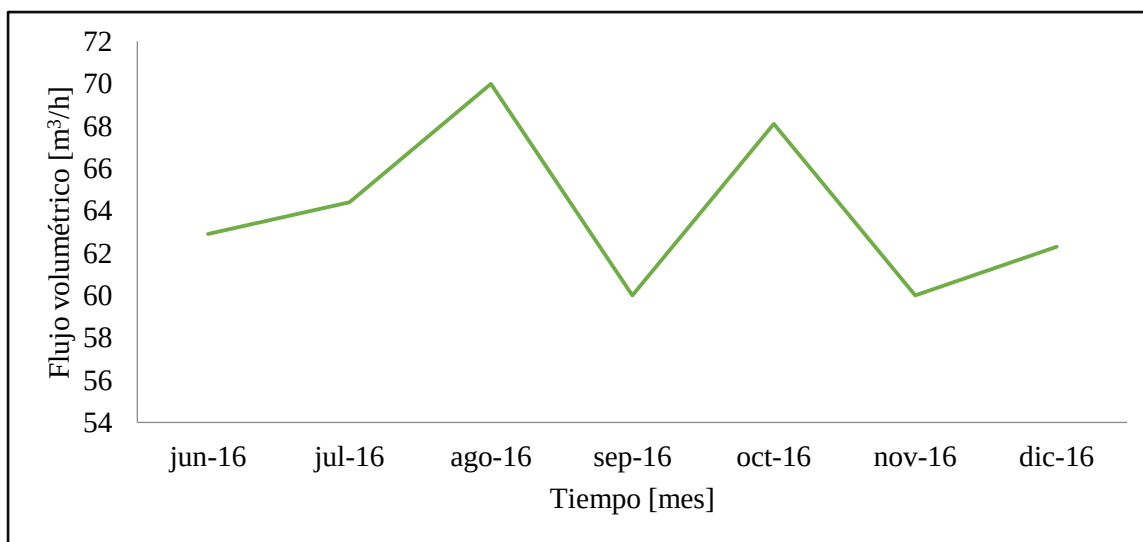


Figura 49: Flujo volumétrico promedio de agua de procesos utilizada en la dilución de pulpa Rougher

CAPÍTULO 7: RESULTADOS Y ANÁLISIS DE LAS PRUEBAS DE FLOTACIÓN

7.1. Recuperaciones selectivas Rougher

A continuación se reportan los resultados de las recuperaciones metalúrgicas de Mo, insolubles y Cu en la flotación selectiva Rougher (Tabla 26, Anexo B). Se establece que cambios en la recuperación Rougher repercuten en la misma proporción en la recuperación global, es decir, son las mismas, ya que la etapa Rougher busca aumentar la recuperación, mientras que el resto del proceso de flotación simplemente permite aumentar la ley del concentrado de Mo.

7.1.1. Recuperación de Mo

En la Figura 50, se reporta que para las distintas mezclas realizadas la recuperación de Mo aumentó entre 1,05 y 2,82 puntos como promedio respecto a la prueba 100%AP.

La mayor recuperación selectiva de Mo se obtuvo en la mezcla 20%AP/80%UF mientras que la menor ocurrió en la mezcla 100%AP.

Al comparar la recuperación de la mezcla 100%UF y 100%OR, se tiene un aumento en 2,23 y 1,64 puntos respectivamente en comparación al blanco. Esta diferencia posiblemente se deba a que el agua permeada UF muestreada presenta un valor de 4 veces más en la conductividad que el permeado OR, lo cual se condice con el estudio “An Investigation into the Effect of Water Quality on Flotation Performance” [17], que indica que la presencia de sólidos disueltos en aguas de procesos puede reducir las recuperaciones metalúrgicas en el procesamiento de minerales.

Además, el hecho que las pruebas de flotación de 100%AP presenten menor recuperación metalúrgica que las pruebas de 100%UF y 100%OR, posiblemente se deba a que el agua de procesos presenta mayor contenido de sólidos suspendidos que estas últimas.

Por otra parte, entre las mezclas 80%AP/20%UF y 80%AP/20%OR, se observa un comportamiento similar al caso anterior, es decir, la recuperación de estas es mayor que al utilizar únicamente AP. Sin embargo, los valores de recuperación son menores que los obtenidos al utilizar agua 100% permeada UF y OR.

La misma tendencia sigue el resto de las mezclas, validándose que el hecho de utilizar agua permeada UF en vez de agua permeada OR, permite obtener mayores recuperaciones de Mo, lo que se traduce en una flotación más eficaz.

Sin embargo, al comparar las mezclas entre AP/UF en las proporciones realizadas, no se tiene una relación clara, ya que en ciertos casos al aumentar la cantidad de volumen de agua UF, la recuperación aumenta o bien disminuye.

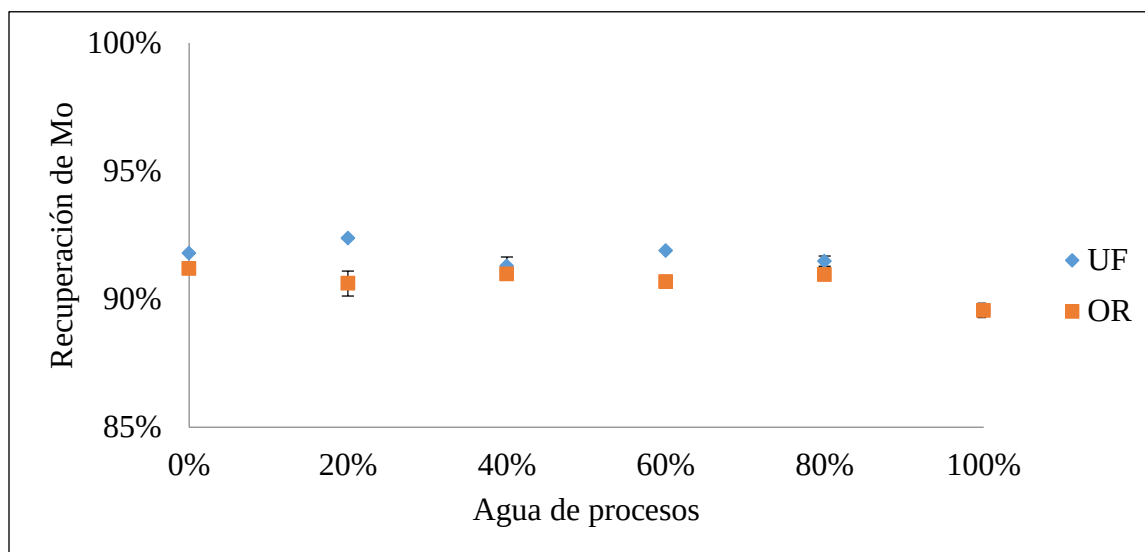


Figura 50: Recuperación selectiva de Mo en la etapa Rougher.

7.1.2. Recuperación de Insolubles

Los insolubles son arcillas hidrofóbicas de peso específico bastante bajo (2 aproximadamente), las cuales flotan junto al Mo. La recuperación de insolubles es importante que sea baja, ya que permite obtener aguas recuperadas con menor turbidez.

La Figura 51 muestra la recuperación metalúrgica de insolubles. En ella se obtuvo que el 100%AP presentó menor recuperación de arcillas que el resto de las pruebas, mientras que el 100%UF reflejó una mayor recuperación. La mayor recuperación de Mo, es decir, la combinación de 20%AP/80%UF, tuvo una recuperación no menor de insolubles, con un valor cercano a 17,5 [%]. Además, es necesario mencionar que las mezclas de aguas AP/OR reportan menor recuperación de insolubles que mezclas AP/UF, siendo la más alta el uso de 100%UF. En general, al comparar la Figura 50 con la Figura 51, se observa que cuando aumenta la recuperación metalúrgica de insolubles, aumenta la de Mo.

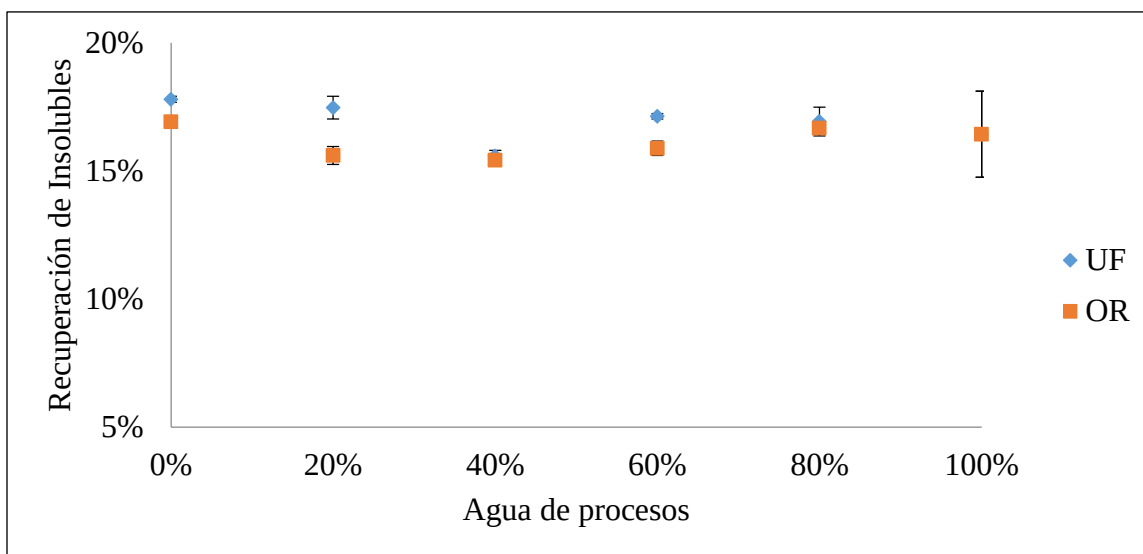


Figura 51: Recuperación selectiva de Insolubles en la etapa Rougher.

7.1.3. Recuperación de Cu

En la etapa Rougher como se mencionó anteriormente, el Cu es depresado por la acción del NaSH, permitiendo que la mayor cantidad de Cu se obtenga en el relave y una fracción menor sea recuperada en el concentrado de Mo.

Los resultados reportados en la Figura 52, muestran que la mayor recuperación de Cu en el concentrado se obtiene al utilizar 100%AP. Si bien no representa un importante aumento en comparación a las otras mezclas de aguas, implica que hay pequeñas fracciones de Cu que flotan por arrastre con las arcillas.

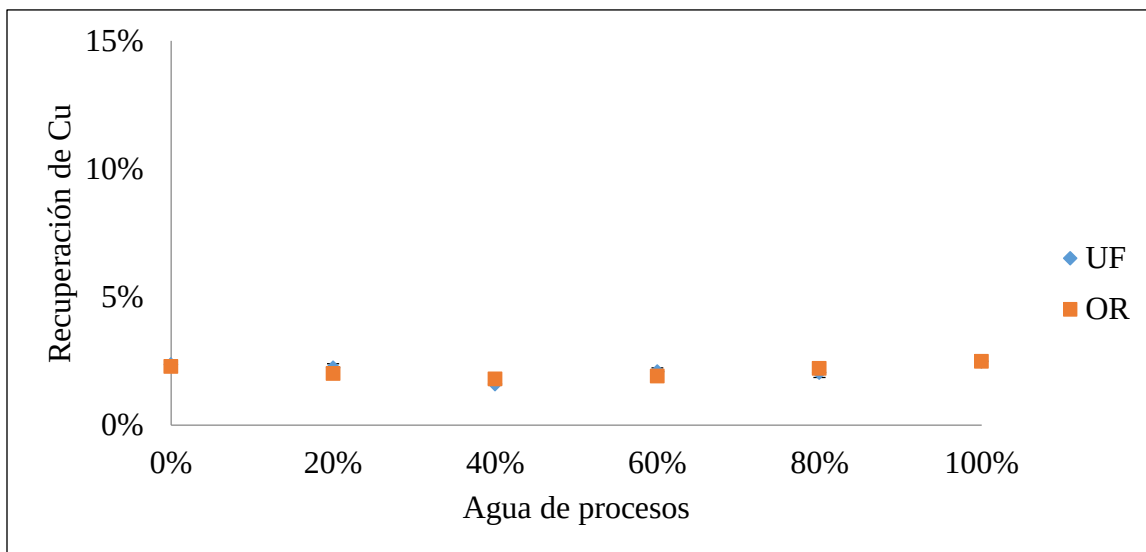


Figura 52: Recuperación selectiva de Cu en la etapa Rougher.

7.2. Leyes selectivas Rougher

7.2.1. Ley de Mo

La ley de Mo es un parámetro importante al momento de comercializar el concentrado, debido a que se vende de acuerdo a la ley que presenta este. Sin embargo, la principal función de la flotación Rougher es aumentar la recuperación y no la ley, ya que en circuitos limpiadores se busca mejorar la calidad del concentrado.

Sin embargo, en la Figura 53 se muestra un leve aumento en la ley selectiva al mezclar aguas en comparación al escenario 100%AP. El mayor aumento se reportó en la mezcla 40%AP/60%OR, en donde la ley mejoró en 0,79 [%] aproximadamente. Además, al comparar recuperación con la ley obtenida para cada proporción de agua, no se tiene una tendencia entre ellas.

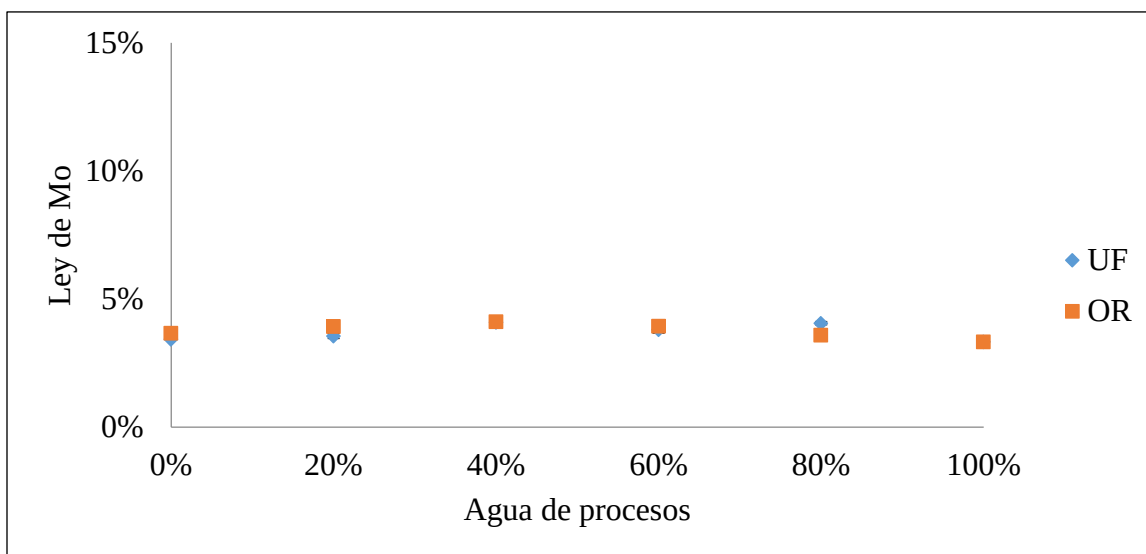


Figura 53: Ley selectiva de Mo en la etapa Rougher.

7.2.2. Ley de Insolubles

El aumento de la ley de insolubles no es deseable, puesto que la presencia de arcillas en el concentrado se traduce en una menor calidad de este. En la Figura 54, no se observan diferencias significativas al utilizar proporciones de aguas UF y OR, lo cual resulta ser beneficioso para los circuitos de limpieza del concentrado.

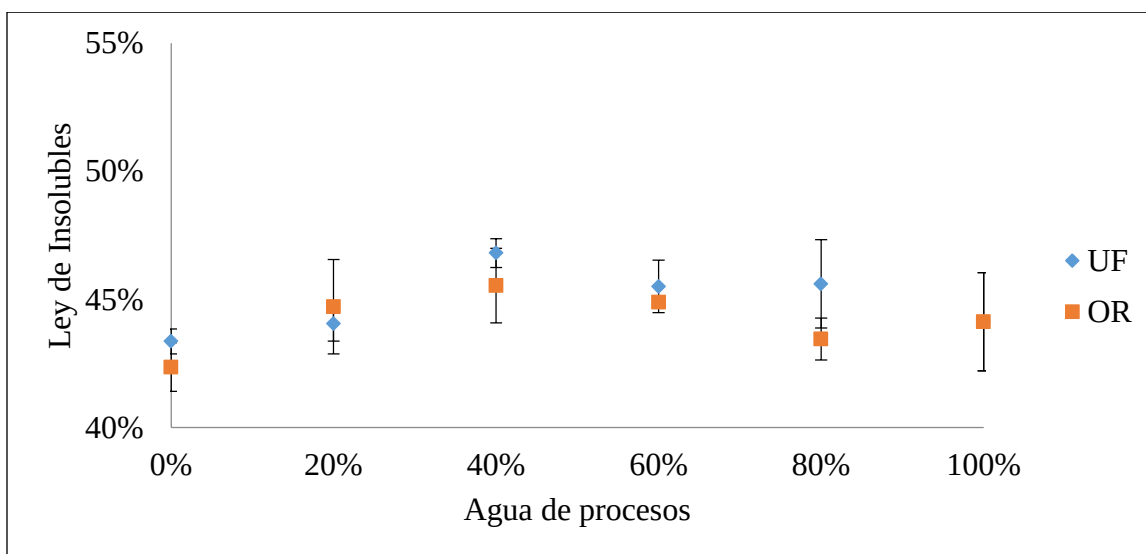


Figura 54: Ley selectiva de Insolubles en la etapa Rougher.

7.2.3. Ley de Cu

Históricamente en CMDIC, la ley de Cu no ha experimentado problemas en su comercialización. Los resultados (Figura 55) muestran que no hay diferencias importantes en las leyes de Cu en el concentrado Rougher entre una mezcla de agua y otra.

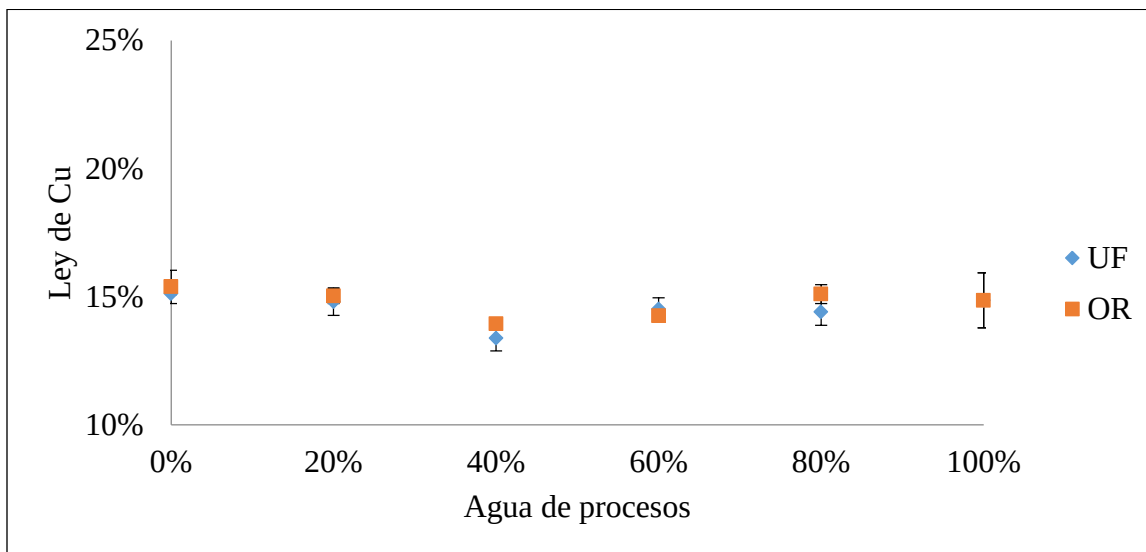


Figura 55: Ley selectiva de Cu en la etapa Rougher.

7.3. Flujo y ley de alimentación CUCON

Durante el año 2016, la planta de flotación selectiva procesó un total de 1.710.478 toneladas métricas secas con una ley de alimentación promedio del 0,38 [%]. En la Figura 56, se observa una tendencia a la baja en la ley de alimentación desde el mes de Mayo hasta Diciembre, disminuyendo a este último mes en un 52 [%] aproximadamente. Además durante dicho año, el porcentaje en sólidos promedio fue del 60 [%] previo a la dilución Rougher.

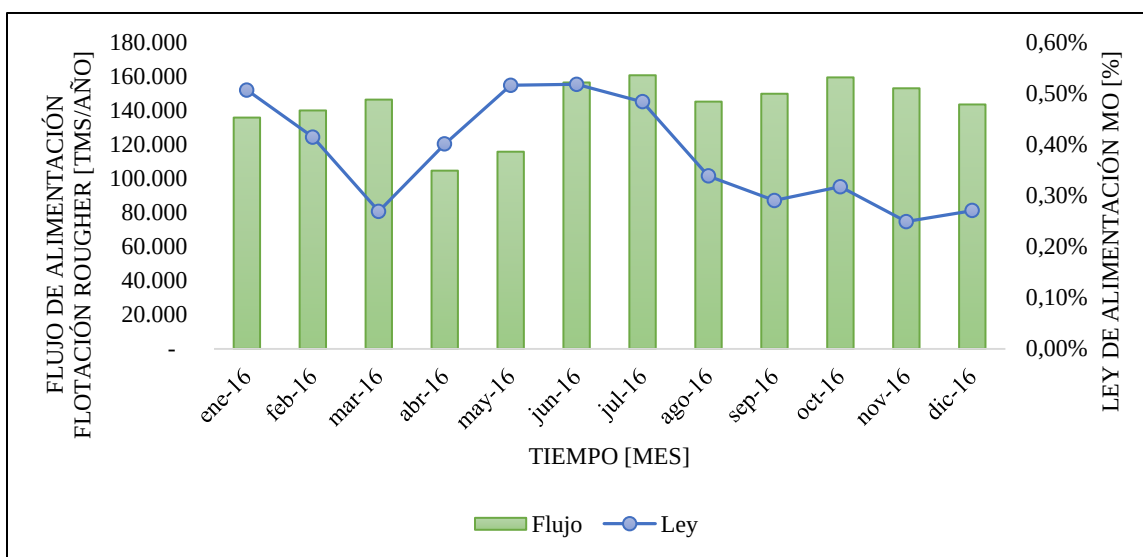


Figura 56: Flujo y ley de alimentación Rougher en el año 2016.

CAPÍTULO 8: EVALUACIÓN ECONÓMICA

8.1. Elementos de la evaluación económica

En primer lugar se presentan los costos de operación y mantención de la planta de tratamiento de RILes, como también los costos asociados a la producción de agua permeada UF y OR en las proporciones establecidas en el diseño experimental.

En la sección posterior, se describen los criterios a utilizar en las dos evaluaciones económicas. Estas corresponden a las mezclas de aguas: 20%AP/80%UF y 80%AP/20%UF. La primera se evalúa puesto que es aquella que reporta la mayor recuperación selectiva de Mo, mientras que la segunda si bien presenta menor recuperación que la mezcla 20%AP/80%UF, el volumen de agua requerido UF es 4 veces menor.

8.2. Costos generales planta de RILes

Los costos que se manejan respecto a la planta de RILes (en USD) consideran los costos anuales asociados a todos los procesos que se llevan a cabo en ella, desde la sedimentación hasta la OR, ambas incluyentes. Dichos costos se han clasificado en dos: operacionales y mantención. Estos se obtuvieron de los cierres anuales 2014, 2015 y 2016 (Tabla 7).

Tabla 6: Costos totales [USD] de la planta de tratamiento de RILes, años 2014-2016.

Descripción del gasto	2014	2015	2016
Aluminato de Sodio	\$ 8.450	\$ 0	\$ 4.867
Carbón Activado	\$ 0	\$ 47.201	\$ 0
Costo Energía Eléctrica Distribuida	\$ 44.000	\$ 36.659	\$ 40.863
Desincrustante	\$ 88.809	\$ 90.454	\$ 52.760
Materiales totales	\$ 1.065.334	\$ 1.206.752	\$ 552.662
Membranas	\$ 96.228	\$ 0	\$ 75.208
Contratos totales	\$ 131.648	\$ 240.273	\$ 352.646
Respuestos totales	\$ 211.961	\$ 65.407	\$ 78.356
Soda Cáustica	\$ 2.043.403	\$ 1.380.220	\$ 518.444
Reactivo Control de Olores	\$ 345.284	\$ 172.381	\$ 0
Gastos totales [USD/año]	\$ 4.035.117	\$ 3.239.347	\$ 1.675.805

Durante el año 2014, se gastó alrededor de 4.000.000 [USD], de los cuales 74 [%] corresponden a costos de operación y el resto a costos de mantención. En relación a los primeros, se gastó principalmente un 51 [%] y 27 [%] en soda cáustica y materiales e insumos respetivamente. La repartición de los costos se desglosa en la Figura 57.

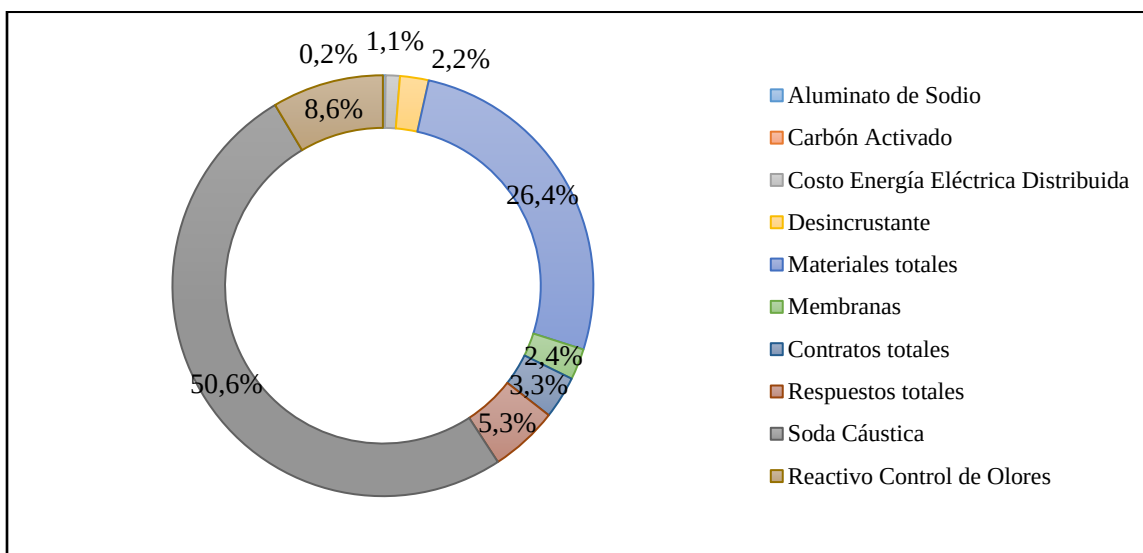


Figura 57: Costos generales planta de RILes año 2014.

En cuanto al año 2015, el gasto total de la planta de RILes disminuyó en un 20 [%] respecto al año 2014, en donde los costos operativos representaron el 94 [%] de este (Figura 58). El remanente fue utilizado en la mantención de equipos principales, aunque no se evidencian gastos en cambios de membranas de los procesos de UF y OR.

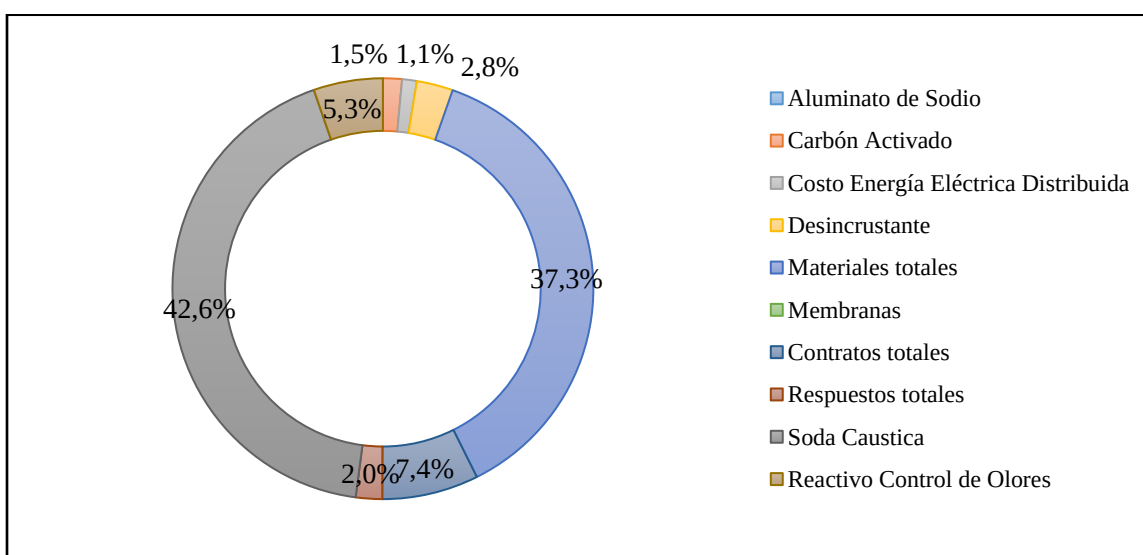


Figura 58: Costos generales planta de RILes año 2015.

Por otra parte, al año 2016 la reducción de costos respecto al año 2014 fue en un 60 [%] aproximadamente, reportándose una suma de 1.675.805 [USD], siendo los mayores gastos en soda cáustica y materiales varios. El desglose de lo gastado en el 2016 se muestra en la siguiente Figura 59:

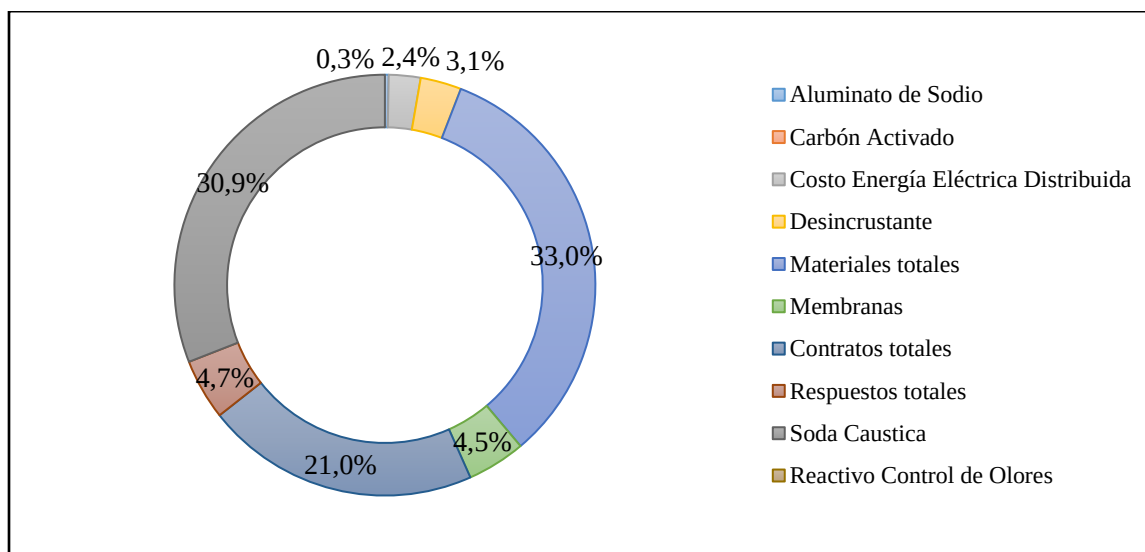


Figura 59: Costos generales planta de RILes año 2016.

8.2.1. Costos de producción de agua permeada UF y OR

En la evaluación técnica, se mostraron las producciones anuales de agua permeada UF y OR (años 2014, 2015 y 2016) y en el punto anterior, los costos asociados a la planta de RILes incluyendo la etapa de OR.

Con el fin de estimar el costo de producir 1 [m³] de agua permeada OR, se calculó el cociente entre el costo anual de producción de la planta de RILes y las producciones de los años en estudio, obteniéndose valores de 33, 32 y 22 [USD/m³] para los años 2014, 2015 y 2016 respectivamente. Sin embargo, no se cuentan con los costos de operación y mantención hasta la etapa de UF, esto es, sin considerar los costos relacionados a la OR. Así, para estimar el costo de producción 1 [m³] de agua permeada UF, se realizó el supuesto de un 50 [%] del costo total de producción de agua permeada OR, el cual fue recomendado por la Superintendencia de Molibdeno y Aguas CMDIC. De forma análoga al costo de agua permeada OR, se estimaron costos de 7,6, 8 y 5,1 [USD/m³] entre los años 2014 y 2016 respectivamente.

Lo anterior se resume en la Tabla 8:

Tabla 7: Costo de producción agua permeada UF/OR entre los años 2014-2016.

Aspecto	Unidad	UF			OR		
		2014	2015	2016	2014	2015	2016
Costo anual de operación planta de RILes	USD/año	\$ 2.017.558	\$ 1.619.674	\$ 837.902	\$ 4.035.117	\$ 3.239.347	\$ 1.675.805
Producción de agua permeada	m ³ /año	264.391	201.783	165.468	123.761	100.590	76.224
Costo de 1m ³ de agua permeada	USD/m ³	\$ 7,63	\$ 8,03	\$ 5,06	\$ 32,60	\$ 32,20	\$ 21,99

8.2.2. Determinación de costos de producción aguas UF y OR respecto a las proporciones de mezclas en el diseño experimental

En el punto 5.4, se mencionó que el flujo promedio de agua de procesos utilizada en la flotación Rougher para la dilución de la pulpa al año 2016 (PI Collahuasi), es de un valor aproximado de 560.000 [m³/año]. En base a este flujo, se estiman los caudales de cada tipo de agua a utilizar, respecto a la mezcla de agua realizada en el diseño experimental.

Considerando lo anterior y los porcentajes de mezclas de aguas, en la Tabla 9 se reportan los volúmenes requeridos y los costos asociados a la producción de estos:

Tabla 8: Volúmenes requeridos de agua permeada UF/OR para cada mezcla y su costo anual de producción.

Mezcla de aguas	Volúmenes requeridos [m ³ /año]		Costo anual 2016 [USD/año]	
	UF	OR	UF	OR
20%AP/80%UF	448.212	-	\$ 2.042.699	\$ 0
60%AP/40%UF	224.106	-	\$ 1.021.350	\$ 0
100%UF	560.265	-	\$ 2.553.374	\$ 0
80%AP/20%UF	112.053	-	\$ 510.675	\$ 0
40%AP/60%UF	336.159	-	\$ 1.532.024	\$ 0
100%OR	-	560.265	\$ 0	\$ 12.317.549
80%AP/20%OR	-	112.053	\$ 0	\$ 2.463.510
40%AP/60%OR	-	336.159	\$ 0	\$ 7.390.529
60%AP/40%OR	-	224.106	\$ 0	\$ 4.927.019
20%AP/80%OR	-	448.212	\$ 0	\$ 9.854.039

8.3. Criterios de la evaluación económica

La evaluación económica en esta tesis, se realiza utilizando el valor actualizado neto (VAN) [18], el cual se calcula a través de la siguiente ecuación (4):

$$VAN = \sum_{n=1}^N \frac{F_n}{(1+r)^n} - I \quad (4)$$

Dónde:

- ✓ I : Inversión inicial.
- ✓ r : Tasa de descuento.
- ✓ F_n : Flujo acumulado en el año n .
- ✓ n : Año a evaluar.

Además, se consideran los siguientes criterios:

- ✓ Tasa de descuento del 12 [%], la cual es utilizada por la compañía al año 2017.
- ✓ Si $VAN \geq 0$: escenario es rentable para las condiciones en estudio.
- ✓ Evaluación de tiempo a 5 años (incluyendo 2023).
- ✓ Año 0: 2018.
- ✓ Inversión se asumirá igual a 0 (despreciable frente a costos asociados a la planta de RILes, ya que la inversión solo está relacionada a la instalación de líneas de transporte desde estanque almacenador de agua permeada hacia circuito de flotación Rougher).

8.4. Evaluación económica alternativa 20%AP/80%UF

8.4.1. Estimación de ingresos

En la evaluación técnica, la alternativa con mayor recuperación selectiva de Cu-Mo fue la combinación de aguas 20%AP/80%UF (aumento del 2,82% sobre la línea base 100%AP).

Para la estimación de los ingresos de dicha alternativa, se calcula el concentrado Mo final producido con la recuperación anual del año 2016, la cual fue 58,24 [%]. Considerando este valor y el incremento en la recuperación en 2,82 puntos, es decir, a un valor de 61,04 [%], es posible estimar el aumento en la producción de Mo (Tabla 28, AnexoC.1), que para este caso es de 404.000 [lb/año], obteniéndose un ingreso adicional de 1.300.000 [USD/año] aproximadamente (Tabla 10).

Para lo anterior, además se consideran los siguientes supuestos:

- ✓ Ley de Mo en la alimentación: 0,38 [%].
- ✓ Ley de Mo en el concentrado: 35 [%].
- ✓ Precio de venta de Mo: 3,35 [USD/lb].
- ✓ Se asume el valor de la recuperación Rougher como recuperación global, manteniendo constante las recuperaciones de circuitos limpiadores.

Tabla 9: Ingreso adicional por venta de Mo fino producto del aumento en la recuperación selectiva Mo.

Mezcla Aguas	Δ Recuperación	Mo fino [lb/año]	Ingreso [USD/año]
20%AP/80%UF	2,82%	404.165	1.353.953
60%AP/40%UF	2,30%	327.823	1.099.649
100%UF	2,20%	313.570	1.051.838
80%AP/20%UF	1,90%	270.810	908.405
40%AP/60%UF	1,70%	242.304	812.785
100%OR	1,60%	228.051	764.974
80%AP/20%OR	1,42%	202.395	678.914
40%AP/60%OR	1,39%	198.119	664.570
60%AP/40%OR	1,12%	159.635	535.480
20%AP/80%OR	1,05%	149.658	502.013

8.4.2. Flujo de caja

En la Tabla 29 (Anexo C.3), se reporta el flujo de caja correspondiente a la mezcla evaluada (20%AP/80%UF). De este se observa que a través de los años, el VAN acumulado se va haciendo cada vez negativo, puesto que en el horizonte de tiempo no se generan utilidades bajo los supuestos realizados, como también el costo asociado a la producción de los 450.000 [m³/año] es mayor a los ingresos.

Considerando lo anterior, se tiene un VAN de -3.621.416 [USD], por lo que el caso bajo las condiciones mencionadas, no es factible económicamente.

8.4.3. Análisis de sensibilidad

La sensibilidad del caso base se realiza modificando las siguientes variables de forma independiente: ley de alimentación de Mo, precio de venta Mo, costos planta de RILes (UF) y recuperación Rougher de Mo.

La modificación de las variables se realizan en el flujo de caja del caso base para así obtener el efecto sobre el VAN.

8.4.3.1. Ley de alimentación de Mo

De la Tabla 11 y Figura 60, se aprecia que manteniendo constante el resto de los parámetros y modificando la ley de alimentación sobre el promedio del año 2016, no genera ganancias. Sin embargo, al lograr una ley de alimentación mayor o igual al 0,57 [%], se tiene un VAN=0, es decir, se reportarían flujos positivos.

Tabla 10: Variación en la ley de alimentación de Mo y su efecto en el VAN (Caso base ley de alimentación: 0,38 [%] – Mezcla 20%AP/80%UF).

Ley de alimentación Mo [%]	VAN [USD/año]
0,4	-\$ 3.207.884
0,39	-\$ 3.388.714
0,38	-\$ 3.569.544
0,37	-\$ 3.750.373
0,36	-\$ 3.931.203
0,35	-\$ 4.112.032
0,34	-\$ 4.292.862
0,33	-\$ 4.473.691

Ley de alimentación Mo [%]	VAN [USD/año]
0,32	-\$ 4.654.521
0,31	-\$ 4.835.350
0,3	-\$ 5.016.180
0,29	-\$ 5.197.010
0,28	-\$ 5.377.839
0,27	-\$ 5.558.669
0,26	-\$ 5.739.498
0,25	-\$ 5.920.328
0,24	-\$ 6.101.157
0,23	-\$ 6.281.987
0,22	-\$ 6.462.816
0,21	-\$ 6.643.646
0,2	-\$ 6.824.476
0,19	-\$ 7.005.305

La ecuación del VAN en función de la ley de alimentación de Mo que se obtiene es la siguiente (5):

$$VAN = 1,82 \cdot 10^7 \cdot \text{Ley Mo alimentación} - 2,04 \cdot 10^7 \quad (5)$$

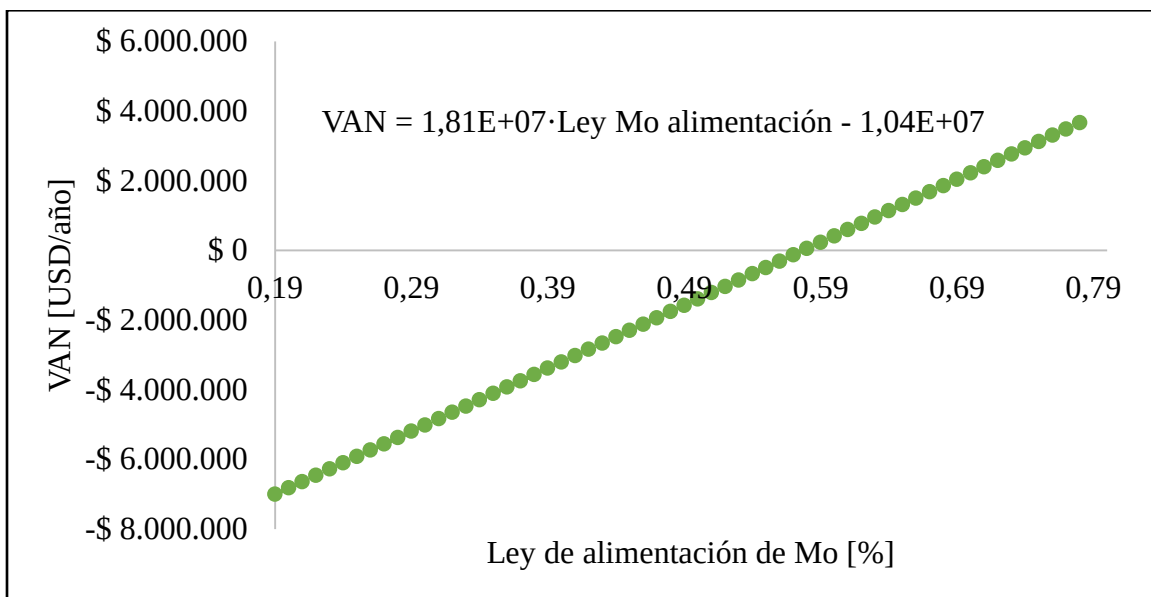


Figura 60: Cambio experimentado en el VAN al modificar la ley de alimentación de Mo.

8.4.3.2. Precio de venta del Mo.

El precio de venta del Mo está asociado al grado o ley metalúrgica de Mo en el concentrado final y otros factores comerciales. En la Tabla 12 y Figura 61, se muestra la sensibilidad realizada, en donde el escenario se hace rentable cuando el precio del Mo es mayor 5,07 [USD/lb], es decir, se debe producir un concentrado de Mo final con ley mayor al 50 [%], que en el año 2016, se comercializó en 5,051 [USD/lb].

Tabla 11: Variación en el precio de venta del Mo y su efecto en el VAN (Caso base precio de venta del Mo: 3,35 [USD/lb] – Mezcla 20%AP/80%UF).

Precio de venta del Mo [USD/lb]	VAN [USD/año]
1	-\$ 8.389.866
1,25	-\$ 7.877.065
1,5	-\$ 7.364.265
1,75	-\$ 6.851.465
2	-\$ 6.338.665
2,25	-\$ 5.825.865
2,5	-\$ 5.313.064
2,75	-\$ 4.800.264
3	-\$ 4.287.464
3,35	-\$ 3.569.544
3,5	-\$ 3.261.863
3,75	-\$ 2.749.063
4	-\$ 2.236.263
4,25	-\$ 1.723.463
4,5	-\$ 1.210.662
4,75	-\$ 697.862
5	-\$ 185.062
5,25	\$ 327.738
5,5	\$ 840.539
5,75	\$ 1.353.339
6	\$ 1.866.139

En la expresión 6, se muestra el VAN obtenido al modificar el precio del Mo:

$$VAN = 2,05 \cdot 10^6 \cdot \text{Precio Mo} - 1,04 \cdot 10^7 \quad (6)$$

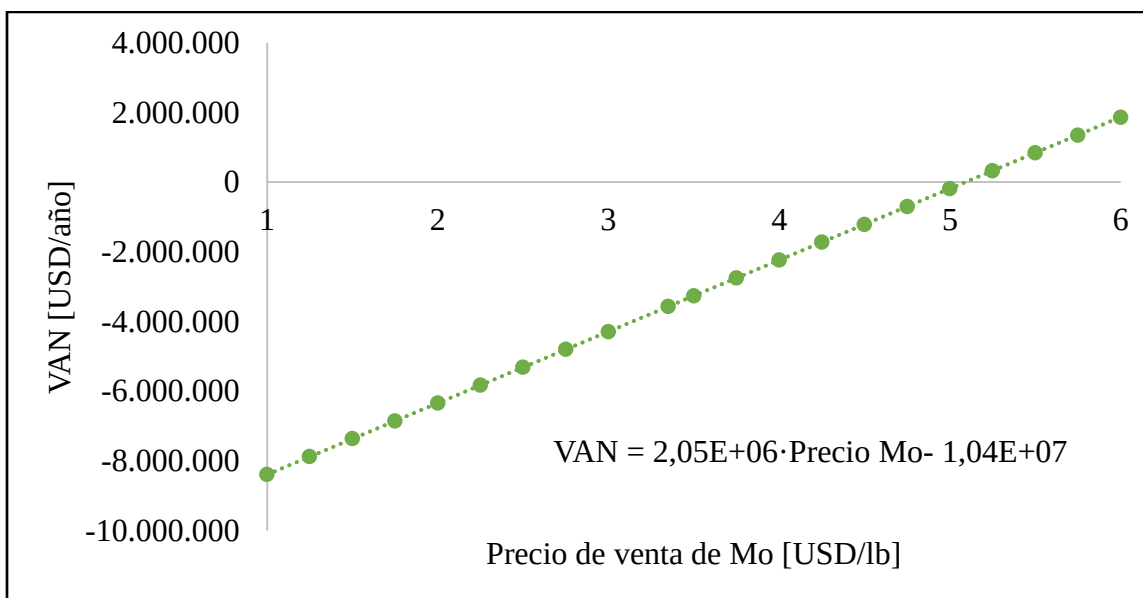


Figura 61: Cambio experimentado en el VAN al modificar el precio de venta del Mo.

8.4.3.3. Costos generales de la planta de RILes (hasta etapa UF).

El costo asociado para producir 450.000 [m³/año] de agua permeada UF requeridos en la mezcla 20%AP/80%UF es de aproximadamente \$2.000.000 [USD/año]. Sin embargo, el hecho de sensibilizar este último, impactaría en la producción del volumen de agua requerido y en consecuencia, a que no se podría alcanzar dicho caudal si es que el costo disminuye. Para obtener rentabilidad, los costos asociados a la planta de RILes deben ser menores a 1.021.444 [USD/año], los cuales son difíciles de lograr (Tabla 13).

Tabla 12: Variación en los costos totales de la planta de RILes y su efecto en el VAN (Caso base costo total: \$2.042.886 [USD/año] – Mezcla 20%AP/80%UF).

Costo total planta de RILes [USD/año]	VAN [USD/año]
\$ 510.722	\$ 4.261.015
\$ 1.021.443	\$ 1.650.512
\$ 1.532.164	-\$ 959.993
\$ 2.042.886	-\$ 3.569.544
\$ 2.553.607	-\$ 6.181.004

De la Figura 62, se obtiene la siguiente relación entre el VAN obtenido y los costos asociados a la planta de RILes (7):

$$VAN = -5,11 \cdot \text{Costo planta RILes UF} - 6,87 \cdot 10^6 \quad (7)$$

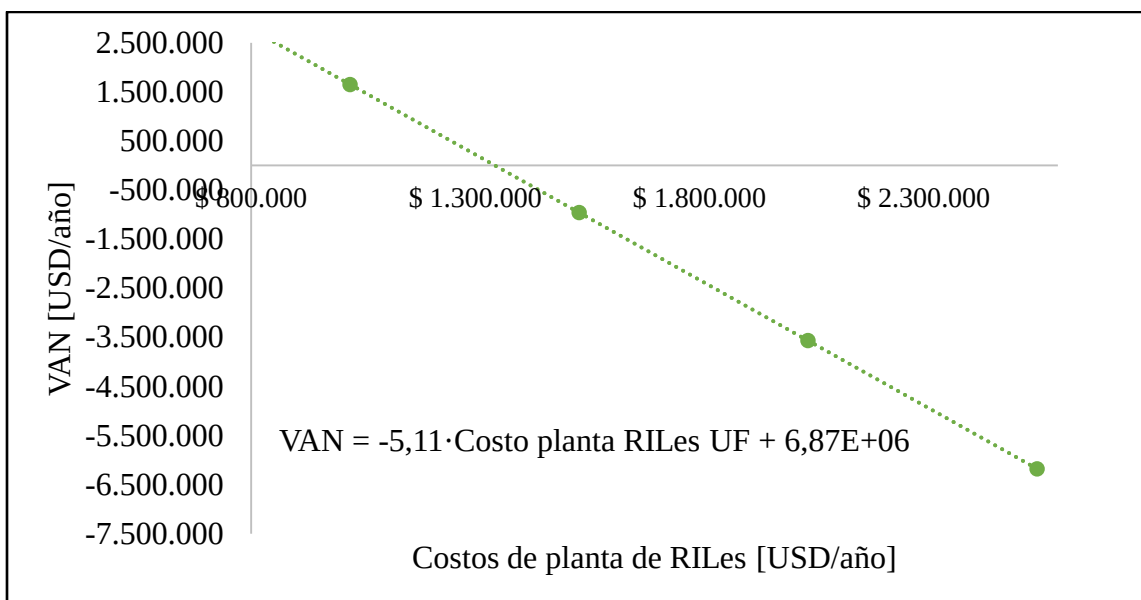


Figura 62: Cambio experimentado en el VAN al modificar los costos de la planta de RILes.

8.4.3.4. Variación de la recuperación selectiva de Mo.

La variación positiva en la recuperación selectiva de Mo se traduce en una mayor cantidad de Mo fino en el concentrado final. Para este caso, el aumento de 2,82 [%] en comparación al escenario actual, no permite generar un VAN positivo pese a que se sensibilice la recuperación hasta obtener un valor 4,24 [%], en donde el VAN es igual a 0 (Tabla 14 y Figura 63).

Tabla 13: Variación en la recuperación selectiva de Mo y su efecto en el VAN (Caso base aumento en la recuperación: 2,82 [%] – Mezcla 20%AP/80%UF).

Aumento de recuperación [%]	VAN [USD/año]
1,05	-\$ 7.865.200
1,12	-\$ 7.693.412
1,39	-\$ 7.030.801
1,42	-\$ 6.957.178
1,6	-\$ 6.515.437
1,7	-\$ 6.270.025
1,89	-\$ 5.803.743
2,2	-\$ 5.042.968
2,3	-\$ 4.797.556
2,82	-\$ 3.569.544

Complementando lo anterior, el VAN en función de la variación de la recuperación de Mo se muestra en la relación (8):

$$VAN = 2,45 \cdot 10^6 \cdot \Delta \text{Recuperación Mo} - 1,04 \cdot 10^7 \quad (8)$$

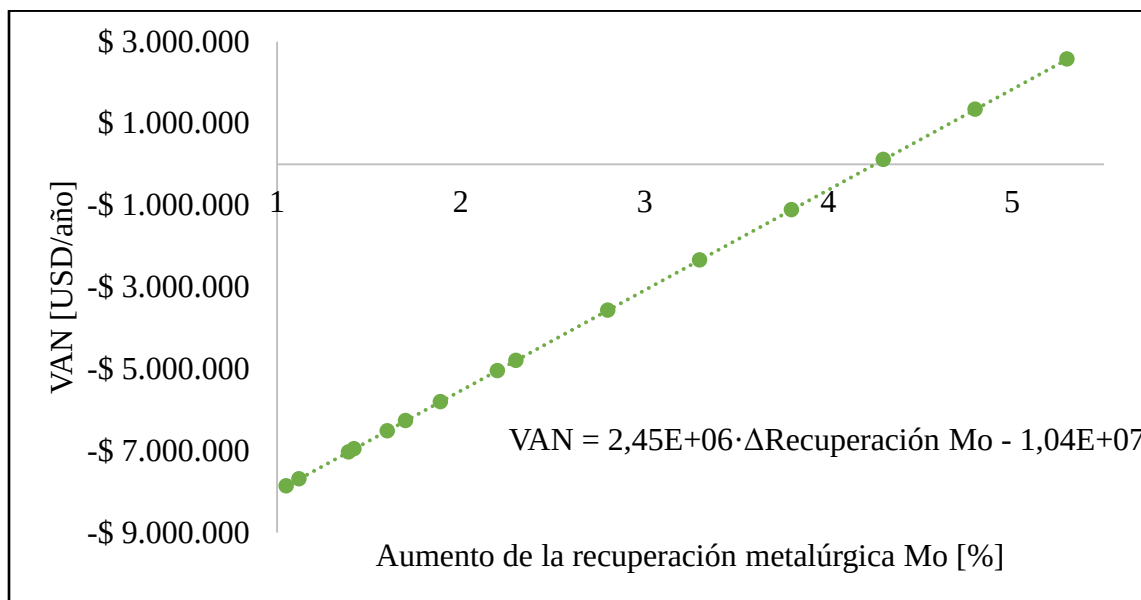


Figura 63: Efecto en el VAN al modificar la recuperación de Mo.

8.4.4. Resumen de la factibilidad económica

En la Tabla 15 se muestran para que valores de ley de alimentación de Mo, precio de venta, recuperación y costos de RILes UF cuando el VAN=0:

Tabla 14: Condiciones de parámetros sensibilizados para obtener VAN=0 (mezcla 20%AP/80%UF).

Parámetro	Valor	Unidad
Ley de alimentación del Mo	$\geq 0,57$	%
Precio de venta del Mo	$\geq 5,07$	USD/lb
Δ Recuperación	$\geq 4,24$	%
Costos RILes UF	$\leq 1.344.423$	USD/año

De lo anterior, es posible concluir que los escenarios para obtener rentabilidad son difíciles de alcanzar debido a las siguientes razones:

- ✓ *Ley de alimentación de Mo:* en promedio en el año 2016, se registró una ley de alimentación a la flotación Rougher del 0,38 [%]. Sin embargo, una ley superior al 0,57 [%] es complicado de llegar.

✓ *Precio de venta del Mo:* como supuesto, se estableció una ley del concentrado final de Mo entre 35 y 43 [%] con un precio de venta de 3,35 [USD/lb]. Para garantizar rentabilidad, la ley debe ser mayor 50 [%], lo cual por parámetros de diseño de la planta, se pueden alcanzar leyes máximas al 52 [%] con una ley de alimentación de 0,48 [%].

En base a la evaluación realizada, la alternativa 80%UF/20%AP es inviable desde el punto de vista económico. Sin embargo, en los siguientes puntos se evalúa el escenario 80%AP/20%UF, puesto que esta requiere una menor cantidad de agua permeada UF y en consecuencia, menor costo de producción total.

8.5. Evaluación económica alternativa 80%AP/20%UF

8.5.1. Estimación de ingresos

La mezcla de agua 80%AP/20%UF, reportó un aumento de 2 puntos aproximadamente sobre la recuperación selectiva (Tabla 30, Anexo C.3), lo cual se traduce en 270.000 [lb/año] de concentrado final de Mo (900.000 [USD/año]), es decir, 32 [%] menos que la proporción 80%AP/20%UF.

8.5.2. Flujo de caja

Como se mencionó anteriormente, la cantidad de concentrado de Mo producido con la mezcla 80%AP/20%UF, genera una menor cantidad de ingresos que el escenario 80%UF/20%AP. Sin embargo, en cuanto a costos de producción de agua permeada requerida para la alternativa 20%UF es cuatro veces menos que la 80%UF, por lo que la diferencia entre ingresos y costos, permitiría conseguir beneficios como se muestra en el flujo de caja para la alternativa 80%AP/20%UF (Tabla 31, Anexo C.4), obteniéndose un VAN de 2.027.769 [USD].

8.5.3. Análisis de sensibilidad

8.5.3.1. Ley de alimentación de Mo

Sensibilizar este parámetro es relevante al momento de determinar el concentrado de Mo seco en la alimentación Rougher y en efecto, el concentrado de Mo final obtenido bajo la ley de alimentación supuesta (0,38 [%]). Al modificar la ley a valores superiores a 0,38 [%] el VAN aumenta, mientras que al disminuir, también lo hace el VAN, percibiéndose rentabilidad con una ley de corte del 0,21 [%] (Tabla 16 y Figura 64), la cual es alcanzable considerando el escenario logrado en el año 2016.

Tabla 15: Variación en la ley de alimentación de Mo y su efecto en el VAN (Caso base ley de alimentación: 0,38 [%] – Mezcla 80%AP/20%UF).

Ley de alimentación Mo [%]	VAN [USD/año]
0,4	\$ 2.272.131
0,39	\$ 2.150.071
0,38	\$ 2.027.969
0,37	\$ 1.905.951
0,36	\$ 1.783.891
0,35	\$ 1.661.831
0,34	\$ 1.539.771
0,33	\$ 1.417.711
0,32	\$ 1.295.651
0,31	\$ 1.173.591
0,3	\$ 1.051.531
0,29	\$ 929.472
0,28	\$ 807.412
0,27	\$ 685.352
0,26	\$ 563.292
0,25	\$ 441.232
0,24	\$ 319.172
0,23	\$ 197.112
0,22	\$ 75.052
0,21	-\$ 47.008
0,2	-\$ 169.068
0,19	-\$ 291.128

La relación entre el VAN obtenido y la ley de alimentación de Mo es la siguiente:

$$VAN = 1,22 \cdot 10^7 \cdot \text{Ley Mo alimentación} - 2,61 \cdot 10^6 \quad (9)$$

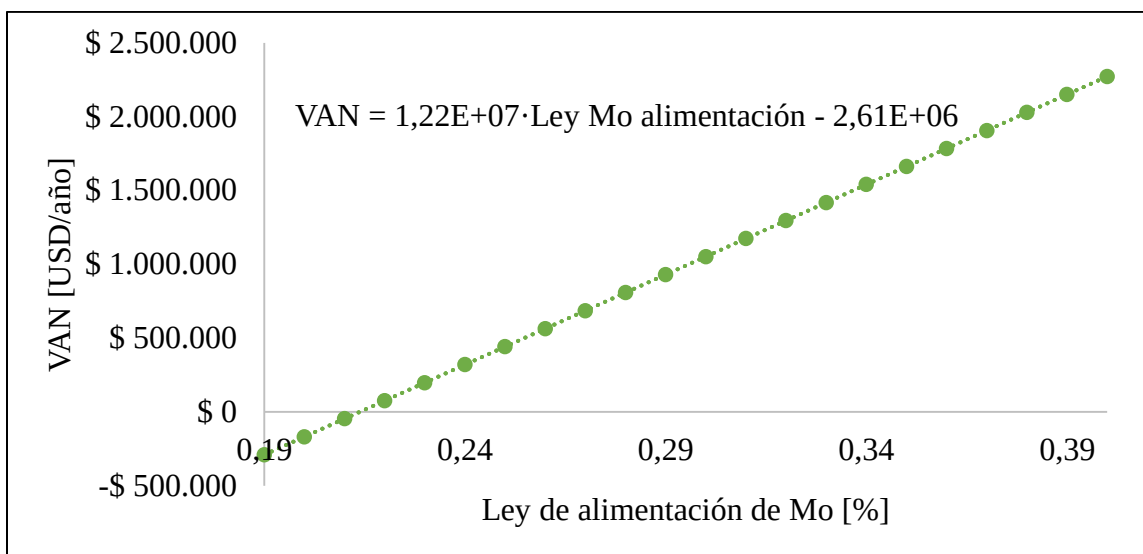


Figura 64: Cambio experimentado en el VAN al modificar la ley de alimentación de Mo.

8.5.3.2. Precio de venta del Mo.

En la Tabla 17 se muestra la sensibilidad realizada, en donde se observa que para un precio de Mo mayor a 1,9 [USD/lb] se reporta un VAN=0. Para alcanzar este precio, la ley del concentrado final de Mo debe estar entre 15 y 25 [%], el cual es percibido en 1,897 [USD/lb]. La ley de producción de la planta de Mo es mayor a 25 [%], por lo que se puede ser vendido a un precio mayor.

Tabla 16: Variación en el precio de venta del Mo y su efecto en el VAN (Caso base precio de venta del Mo: 3,35 [USD/lb] – Mezcla 80%AP/20%UF).

Precio de venta del Mo [USD/lb]	VAN [USD/año]
1	-\$ 1.225.706
1,25	-\$ 879.566
1,5	-\$ 533.426
1,75	-\$ 187.286
2	\$ 158.854
2,25	\$ 504.994
2,5	\$ 851.135
2,75	\$ 1.197.275
3	\$ 1.543.415
3,35	\$ 2.027.969
3,5	\$ 2.235.695

Precio de venta del Mo [USD/lb]	VAN [USD/año]
3,75	\$ 2.581.835
4	\$ 2.927.976
4,25	\$ 3.274.116
4,5	\$ 3.620.256
4,75	\$ 3.966.396

En la ecuación 10, se muestra el VAN obtenido en función del precio de Mo:

$$VAN = 1,22 \cdot 10^7 \cdot \text{Precio Mo} - 2,61 \cdot 10^6 \quad (10)$$

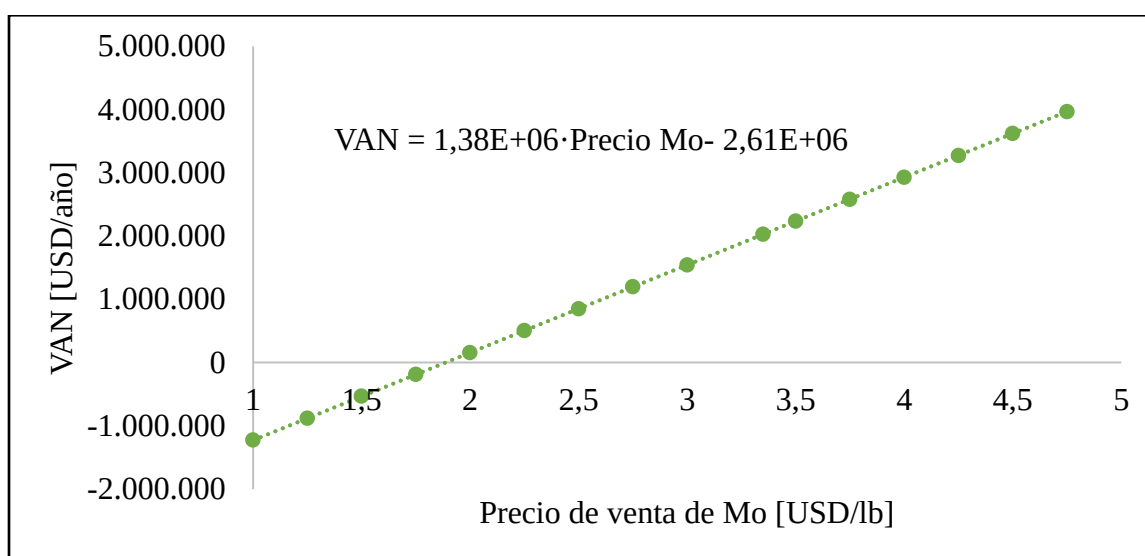


Figura 65: Cambio experimentado en el VAN al modificar el precio de venta del Mo.

8.5.3.3. Costos generales de la planta de RILes (hasta etapa UF).

Para producir el volumen requerido (112.000 [m³/año]) de agua permeada UF en la mezcla 80%AP/20%UF, es necesario asumir un costo de 510.000 [USD/año] aproximadamente. Para valores menores a este, no se alcanzaría a suministrar la cantidad de agua UF suficiente en la dilución Rougher.

Por otra parte, para obtener rentabilidad, los costos deben ser menores a 718.000 [USD/año] aproximadamente, los cuales son alcanzables para la producción del agua necesaria (Tabla 18 y Figura 66).

Tabla 17: Variación en los costos totales de la planta de RILes y su efecto en el VAN (Caso base costo total: \$510.722 [USD/año] – Mezcla 80%AP/20%UF).

Costo operación RILes [USD/año]	VAN [USD/año]
\$ 510.722	\$ 2.027.969
\$ 1.021.443	-\$ 582.733
\$ 1.532.164	-\$ 3.193.476
\$ 2.042.886	-\$ 5.804.220
\$ 2.553.607	-\$ 8.414.964

De la Figura 66, se obtiene la siguiente relación entre el VAN obtenido y los costos asociados a la planta de RILes (hasta etapa UF):

$$VAN = -5,1119 \cdot \text{Costo planta RILes UF} - 3,67 \cdot 10^6 \quad (11)$$

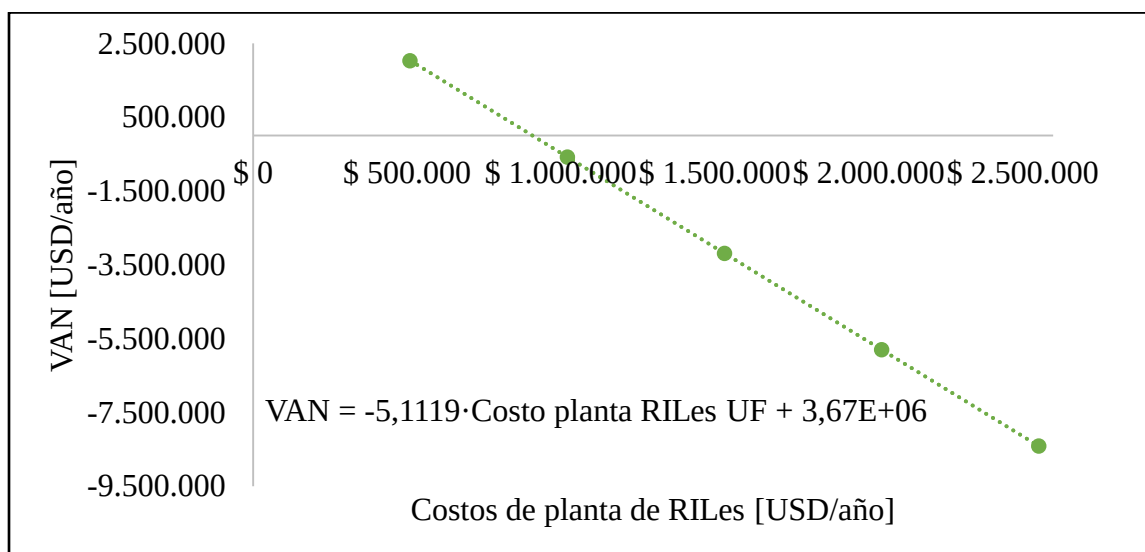


Figura 66: Cambio experimentado en el VAN al modificar los costos de la planta de RILes.

8.5.3.4. Variación de la recuperación selectiva de Mo.

En cuanto a la recuperación selectiva, en la Tabla 19 y Figura 67 se reporta que para valores mayores a 1,065[%], se obtiene rentabilidad.

Tabla 18: Variación en la recuperación selectiva de Mo y su efecto en el VAN (Caso base aumento en la recuperación: 1,89 [%] – Mezcla 80%AP/20%UF).

Aumento de recuperación [%]	VAN [USD/año]
1,05	-\$ 33.687
1,12	\$ 138.101
1,39	\$ 800.712
1,42	\$ 874.336
1,6	\$ 1.316.076
1,7	\$ 1.561.488
1,89	\$ 2.027.969
2,2	\$ 2.788.546
2,3	\$ 3.033.957
2,82	\$ 4.261.015

Complementando lo anterior, el VAN en función de la variación de la recuperación de Mo se muestra en la relación (12):

$$VAN = 2,45 \cdot 10^6 \cdot \Delta \text{Recuperación Mo} - 2,61 \cdot 10^6 \quad (12)$$

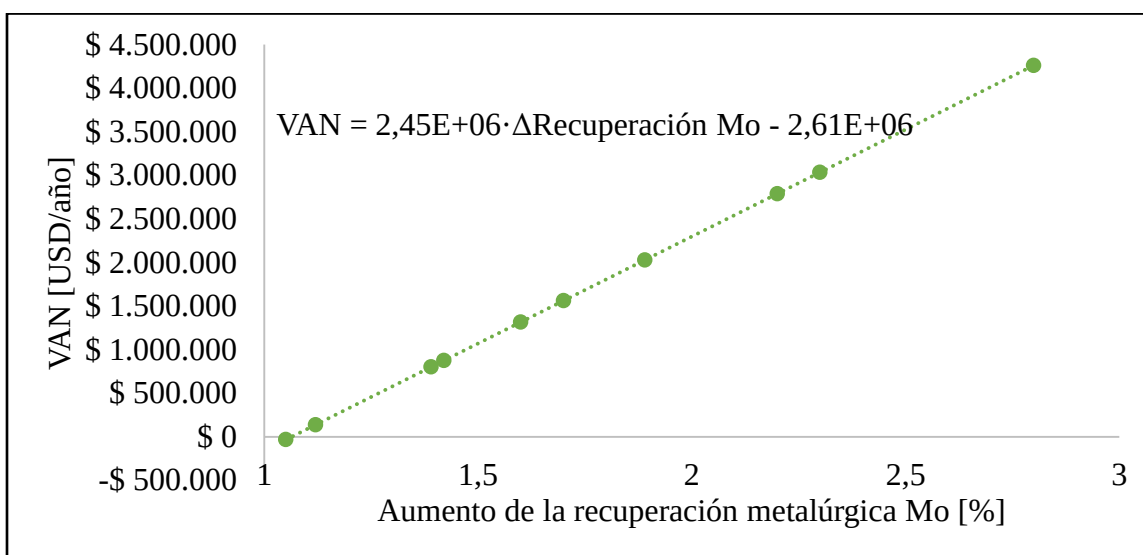


Figura 67: Cambio experimentado en el VAN al modificar la recuperación de Mo.

8.5.4. Resumen de la factibilidad económica

En la Tabla 20 se muestra para que valores de ley de alimentación de Mo, precio de venta, recuperación y costos de RILes UF cuando el VAN=0:

Tabla 19: Condiciones de parámetros sensibilizados para obtener VAN=0 (mezcla 80%AP/20%UF).

Parámetro	Valor	Unidad
Ley de alimentación Mo	$\geq 0,21$	%
Precio de venta del Mo	$\geq 1,89$	USD/lb
Δ Recuperación	$\geq 1,065$	%
Costos RILes UF	≤ 717.933	USD/año

En la Figura 68, se muestra dos tendencias: tres crecientes y una decreciente. Las tres primeras están relacionadas la recuperación selectiva, el precio de venta de Mo y ley de alimentación de Mo, mientras que la decreciente con los costos asociados a la producción de agua permeada UF. De estas, se observa que los costos de la planta de tratamiento de RILes es la más sensible que el resto de los parámetros.

Por otra parte, el precio de venta de Mo no está relacionado directamente con la recuperación de Mo, sino con la ley final del concentrado de Mo. Evidentemente, a mayor rango de ley, mayor es el precio de venta del Mo, el cual permite traducir el aumento de recuperación en ingresos. De forma similar, es lo que ocurre con la ley de alimentación de Mo, aunque esta permitiría obtener una mayor cantidad de Mo a recuperar.

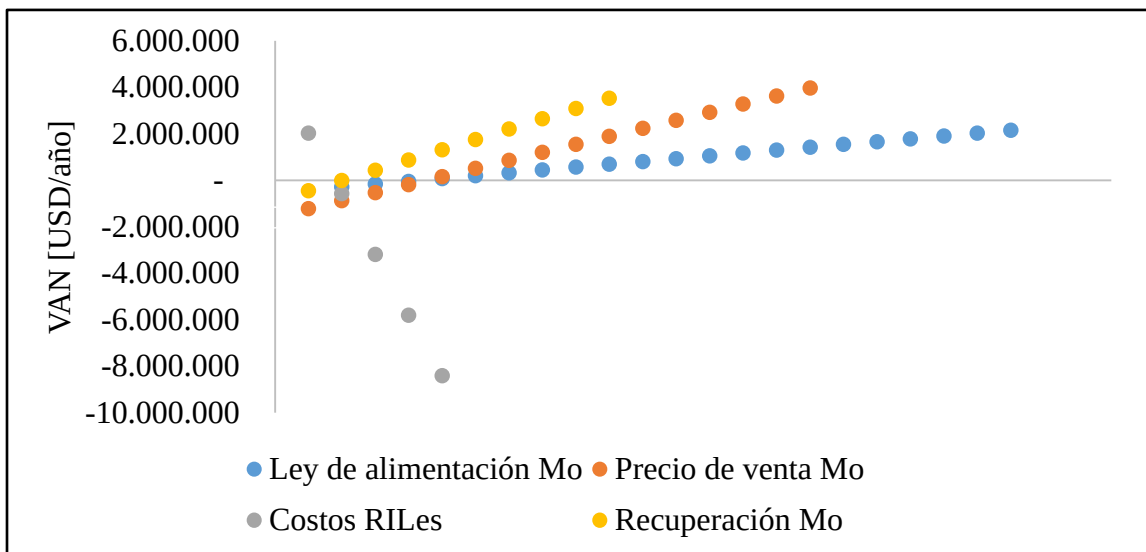


Figura 68: Resumen de curvas del VAN al modificar parámetros en estudio.

CAPÍTULO 9: CONCLUSIONES

En esta tesis se logró evaluar técnica y económicamente la implementación de agua permeada proveniente de la planta de tratamiento de RILes en la flotación selectiva Rougher.

En el aspecto técnico, se logró obtener mediante el desarrollo de pruebas de flotación que el hecho de utilizar agua permeada, ya sea UF u OR, como dilución de la pulpa Rougher, permite aumentar la recuperación selectiva y ley de Mo, en donde la mezcla de agua 20%AP/80%UF resultó ser la alternativa que permite un aumento del 2,89 [%] y 0,24 [%] respectivamente. Además se reportó que las mezclas AP/UF permiten obtener mayor recuperación selectiva que las mezclas AP/OR, lo cual resulta ser beneficioso ya que los costos asociados a la operación y mantención utilizando agua UF son menores que la OR, como también la primera permite obtener mayor cantidad de volumen de permeado que la OR aunque un agua con mayor conductividad. Sin embargo, en la evaluación económica se obtuvo que la alternativa no es viable, puesto que reporta un VAN negativo cercano a - 3.500.000 [USD].

Por otra parte, al comparar los costos totales de la planta de RILes, la alternativa que permite obtener mayor beneficio económico en comparación a las otras, fue la mezcla 80%AP/20%UF en la cual se obtuvo un VAN positivo aproximado a 2.000.000 [USD], ya que esta es la que presenta menores costos totales de operación de la planta de RILes. En este caso, se obtiene un aumento de la recuperación en 1,89 [%]. Posteriormente, mediante a un análisis de sensibilidad se concluye para asegurar rentabilidad, los parámetros de ley de alimentación, precio de venta y aumento en la recuperación selectiva de Mo, deben ser mayores a 0,21 [%], 1,89 [USD/lb] y 1,065 [%] respectivamente, como también que los costos asociados en la planta de tratamiento de RILes deben ser menores a los 715.000 [USD/año] aproximadamente.

En base a lo anterior, se recomienda a la Superintendencia de Molibdeno y Aguas de CMDIC considerar la incorporación de agua permeada UF en la flotación selectiva Rougher Cu-Mo un caudal de 13 [m³/h] y 51 [m³/h] de agua de procesos. Para aquello, es necesaria la implementación de nuevas líneas desde la etapa UF hasta la zona donde se adiciona agua de procesos actualmente en la flotación Rougher.

CAPÍTULO 10: GLOSARIO

1. *Alimentación fresca*: pulpa diluida previa al ingreso a la flotación Rougher.
2. *Alimentación Rougher*: flujo de pulpa de alimentación fresca a la flotación Rougher más recirculación de cola de la primera limpieza de flotación.
3. *Agua permeada*: agua obtenida del proceso de UF o bien OR.
4. *Cajón de traspaso*: para diferenciar un cajón de traspaso de un tanque, el primero no posee agitación.
5. *Conductividad*: variable que cuantifica la cantidad de sólidos disueltos en una solución (U.S.I: S/m).
6. *Courier*: equipo de rayos X *in situ* en la planta de Mo, que muestrea y mide leyes de Cu, Mo, As, Fe e insolubles, en diferentes puntos de la flotación selectiva.
7. *Espesador*: equipo que sólidos de una fase acuosa. Por efecto de gravedad, en el fondo se obtiene concentrado con mayor porcentaje en sólidos, mientras que por el tope, agua de procesos.
8. *Espuma*: capa formada en la superficie de la celda de flotación, que permite rebalsar el agregado partícula-burbuja a etapas posteriores.
9. *Ganga*: rocas extraídas desde un yacimiento minero, las cuales no poseen valor económico significativo, ya sea por carencia o poca cantidad de mineral valioso.
10. *Liberación*: las rocas extraídas en el yacimiento, se someten a procesos de chancado y molienda, con el fin de disminuir sus tamaños y liberar las partículas de minerales para el proceso de flotación.

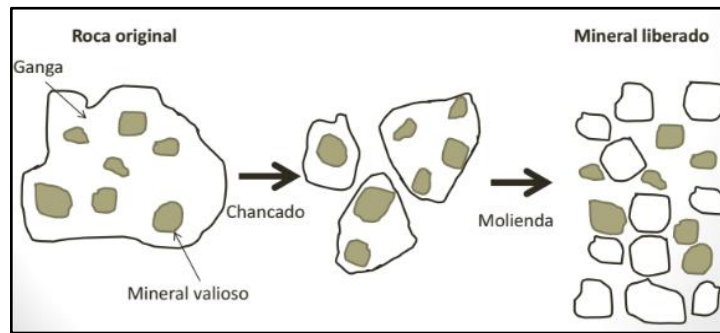


Figura 69: Liberación de mineral al realizar procesos de chancado y molienda (conminución).

11. *Limpieza CEB:* limpieza automática con reactivos, generalmente NaOH, NaOCl y H_2SO_4 , para recuperar las condiciones de las membranas de UF.
12. *Mena:* mineral de interés económico.
13. *RIL crudo:* agua de procesos que alimenta a la planta de tratamiento de residuos líquidos (RILes)
14. *Sentina:* tanque con mezclador agitado que recibe el agua de procesos de diferentes puntos de la planta.
15. *Stock pile:* almacenador de concentrado de Cu.
16. *Turbidez:* parámetro que cuantifica el grado de transparencia del agua, es decir, la presencia de sólidos en suspensión. Mientras mayor sean estos últimos, mayor será la turbidez.

CAPÍTULO 11: REFERENCIAS

- [1] Comisión Chilena del Cobre, Ministerio de Minería, Gobierno de Chile (2016). Consumo de agua en la minería del cobre al año 2015. Recuperado de http://www.revistagua.cl/wp-content/uploads/sites/7/2016/06/Informe_Consumo-de-agua-en-la-mineria-del-cobre-al-2015.pdf
- [2] Maksaev, V (2014). Pórfidos cupríferos. Recuperado de <http://www.cec.uchile.cl/~vmaksaev/PORFIDOS%20CUPRIFEROS.pdf>
- [3] Conejeros, V (2003). *Procesamientos de minerales*. Antofagasta: Universidad Católica del Norte.
- [4] MineralsWebs.com (2017). Minerales. Recuperado de www.MineralsWebs.com
- [5] Molymet.cl (2017). Uso del Molibdeno. Recuperado de <http://www.molymet.cl/es/Compania/Paginas/Applications-of-Molybdenum.aspx>
- [6] Danafloat.com (2017). Minerales de Cobre-Molibdeno. Recuperado de http://www.danafloat.com/es/mining_ores/copper_molybdenum
- [7] Alvarez, M (2014). *Curso de Flotación de minerales* [Presentación Power Point]. Departamento de Ingeniería Química y Ambiental, Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso
- [8] Yianatos, J (2005). *Flotación de minerales*. Valparaíso: Universidad Técnica Federico Santa María.
- [9] Sistema Nacional de Información Ambiental (2017). Tecnologías de flotación por aire disuelto-DAF. Recuperado de http://www.sinia.cl/1292/articles-49990_03.pdf
- [10] Leentech.com (2017). Sand Filtration. Recuperado de <http://www.lenntech.com/sandfiltration.htm>
- [11] Aguassistec.com (2017). Filtro de carbón activado proceso. Recuperado de <http://www.aguassistec.com/productos/filtro-de-carbon-activado-proceso.jpg>
- [12] AquaSolutions.com (2017). Ultrafiltración. Recuperado de <http://aquaolutionsweb.com/about-ultra-filtration.htm>
- [13] Carbotecnia.info (2014). Membrana osmosis inversa. Recuperado de <http://www.carbotecnia.info/wp-content/uploads/2014/09/membrana-osmosis-inversa-abierta.jpg>

- [14] Collahuasi.cl (2017). Sobre Collahuasi. Recuperado de <http://www.collahuasi.cl/quienes-somos/la-compania/>
- [15] Google Maps.cl (2017). Mapa Collahuasi. Recuperado de <https://www.google.cl/maps>
- [16] Dow.com (2009). Manual del producto. Recuperado de http://msdssearch.dow.com/PublishedLiteratureDOWCOM/dh_029b/0901b8038029b719.pdf?filepath=liquidseps/pdfs/noreg/795-00036.pdf&fromPage=GetDoc
- [17] Muzenda (2010). An Investigation into the Effect of Water Quality on Flotation Performance. Recuperado de <http://waset.org/publications/11755/an-investigation-into-the-effect-of-water-quality-on-flotation-performance>
- [18] Enciclopedia Financiera.com (2017). Valor Presente Neto. Recuperado <http://www.encyclopediafinanciera.com/finanzas-corporativas/valor-presente-neto.htm>

CAPÍTULO 12: ANEXOS

Los Anexos de esta memoria están estructurados de la siguiente manera: la primera sección muestra la serie de tablas relacionadas a los datos históricos de cantidad y calidad de las aguas de procesos en la entrada a la planta de RILes, agua permeada UF y OR. En la siguiente se reportan los resultados obtenidos en las pruebas de Flotación, siendo los más relevantes, la recuperación y ley selectiva de Mo Rougher. En la tercera sección de tablas, se indican las producciones y flujos de cajas para las 2 mezclas de aguas analizadas, esto es 20%AP/80%UF y 80%AP/20%UF.

El resto de los Anexos está constituido por los procedimientos de análisis químico de Cu, Mo e insolubles, e imágenes de los procesos que se realizan en la planta de RILes Puerto Collahuasi.

A. Tablas con data histórica de cantidades y calidades de aguas en los procesos en estudio planta de RILes

A.1. Parámetros de entrada de las agua de procesos

Tabla 20: Histórico de parámetros de entrada de aguas de proceso en la planta de RILes años 2013-2016.

Parámetros de entrada de agua de proceso en la planta de RILes										
Mes	Flujo [m ³ /h]		pH [-]		Conductividad [mS/cm]		Redox [mV]		Turbidez [NTU]	
	Prom	σ	Prom	σ	Prom	σ	Prom	σ	Prom	σ
ene-13	107	8,9	8,41	0,40	15,5	2,4	-65	41	83	22
feb-13	118	12,9	8,47	0,64	12,1	3,4	-63	88	61	24
mar-13	117	10,5	8,40	0,79	7,9	1,4	-13	64	67	21
abr-13	126	4,8	8,78	0,70	12,3	2,0	-50	69	45	18
may-13	123	11,9	8,66	0,62	13,1	4,2	-69	77	62	36
jun-13	126	5,0	9,36	0,31	19,9	0,6	-70	52	68	18
jul-13	126	1,8	9,48	0,33	17,1	2,2	-110	59	76	15
ago-13	119	3,8	9,49	0,19	17,8	2,1	-72	17	58	20
sep-13	115	4,4	9,49	0,15	18,4	1,3	-96	50	65	17
oct-13	110	17,5	9,26	0,26	24,3	1,3	-79	38	78	19
nov-13	122	19,2	9,48	0,32	25,5	0,8	-110	32	81	18
dic-13	126	24,1	9,63	1,65	16,7	2,0	-105	53	55	18
ene-14	137	4,6	9,40	0,71	21,4	1,4	-125	54	64	24
feb-14	130	18,1	9,55	0,55	20,6	2,2	-155	57	76	15
mar-14	125	4,3	8,98	0,40	21,1	1,3	-103	52	69	12
abr-14	101	26,8	9,47	0,49	19,4	1,6	-107	19	66	22
may-14	128	3,5	9,10	0,42	22,7	2,0	-71	14	72	14
jun-14	131	3,4	9,00	0,44	26,2	2,9	-83	23	102	28
jul-14	129	5,0	8,73	0,32	23,0	4,5	-60	30	91	19

ago-14	130	3,4	9,01	0,26	18,6	7,8	-86	39	85	21
sep-14	132	2,5	9,20	0,36	18,1	2,1	-99	32	82	23
oct-14	132	2,2	9,24	0,31	19,6	2,8	-98	29	75	15
nov-14	135	2,8	9,19	0,46	19,3	1,3	-116	35	75	19
dic-14	132	2,6	9,27	0,43	19,9	2,8	-128	41	73	16
ene-15	134	2,6	9,38	0,60	20,2	1,6	-117	24	75	18
feb-15	133	3,2	9,21	0,67	20,7	1,6	-129	52	65	6
mar-15	132	2,4	9,59	0,62	17,7	1,7	-113	40	75	18
abr-15	133	2,2	8,81	0,22	20,0	3,1	-95	24	86	18
may-15	134	4,1	9,39	0,39	18,2	2,3	-92	38	68	13
jun-15	130	2,7	9,33	0,38	21,4	1,4	-110	26	79	22
jul-15	130	0,9	9,08	0,56	19,9	2,1	-113	53	68	20
ago-15	130	0,8	9,17	0,09	18,2	0,7	-51	19	67	14
sep-15	130	1,1	9,15	0,86	18,1	1,7	-135	39	76	13
oct-15	129	2,4	8,88	0,76	20,2	0,9	-93	25	75	11
nov-15	131	5,4	9,10	0,24	19,8	1,3	-91	36	74	20
dic-15	130	2,7	9,00	0,32	19,2	1,1	-133	34	44	12
ene-16	121	8,8	8,99	0,46	16,1	2,1	-108	58	70	11
feb-16	120	7,0	8,96	0,39	17,5	1,2	-153	42	67	14
mar-16	122	8,0	8,95	0,27	22,0	0,5	-100	54	95	12
abr-16	129	6,4	8,73	0,32	17,8	4,3	-99	45	79	19
may-16	128	2,2	9,06	0,63	16,2	2,1	-111	36	65	15
jun-16	127	3,3	9,00	0,59	16,4	1,2	-117	22	55	15
jul-16	129	2,3	9,19	0,38	18,5	1,3	-109	21	74	20
ago-16	129	2,0	9,06	0,52	17,3	1,5	-62	56	65	11
sep-16	129	2,3	8,46	0,98	16,6	3,2	-94	61	64	14
oct-16	128	3,2	9,07	0,55	19,2	1,5	-89	48	58	12

nov-16	132	4,0	9,31	0,25	19,2	1,6	-89	50	79	7
dic-16	128	6,0	9,90	0,56	18,1	1,7	-95	41	91	4

A.2. Parámetros de agua permeada UF

Tabla 21: Histórico de datos en la etapa UF años 2013-2016.

Parámetros de agua ingreso y agua permeada UF.																
Mes	Flujo total de salida [m³/h]		Turbidez de entrada [NTU]		Conductividad de entrada [mS/cm]		Redox de entrada [mV]		Conductividad de salida [mS/cm]		Redox de salida [mV]		Turbidez de salida [mS/cm]		pH de salida [-]	
	Prom	σ	Prom	σ	Prom	σ	Prom	σ	Prom	σ	Prom	σ	Prom	σ	Prom	σ
ene-13	114	13	1	0	19	4	-187	55	19	4	-191	61	1,40	0,58	7,45	0,37
feb-13	112	19	6	6	12	4	-220	79	12	4	-207	112	0,49	0,26	7,20	0,54
mar-13	112	10	6	6	22	1	-169	49	22	1	-174	55	0,90	1,37	7,15	0,55
abr-13	120	10	4	3	12	2	-159	108	13	2	-160	123	0,84	0,65	7,03	0,41
may-13	110	13	6	3	18	2	-215	53	18	2	-228	36	1,23	1,28	7,24	0,20
jun-13	124	8	13	5	18	12	-192	34	20	1	-193	43	1,52	0,28	7,50	0,33
jul-13	128	6	9	5	17	2	-193	40	17	2	-204	40	1,57	0,31	7,31	0,59
ago-13	125	7	11	4	18	2	-154	31	18	2	-166	40	1,19	0,69	7,24	0,44
sep-13	118	11	9	4	18	1	-186	55	18	1	-186	51	1,82	0,45	7,22	0,51
oct-13	127	6	7	3	24	2	-176	50	24	1	-175	61	1,61	0,22	7,39	0,23
nov-13	129	8	6	2	26	1	-205	50	26	1	-212	50	1,85	0,41	7,27	0,45
dic-13	131	21	6	2	23	6	-187	56	23	5	-202	57	2,38	0,36	7,29	0,32
ene-14	140	4	8	3	22	2	-202	62	22	1	-218	40	1,72	0,17	7,32	0,41
feb-14	130	13	8	5	21	2	-181	52	21	2	-182	55	1,38	0,59	7,57	0,39
mar-14	134	7	9	3	21	2	-112	40	21	1	-103	38	1,98	0,56	7,11	0,24
abr-14	119	11	9	2	19	2	-217	35	19	2	-224	27	1,93	1,37	7,36	0,38
may-14	134	5	9	3	23	3	-83	26	23	2	-83	28	1,86	0,48	7,37	0,26
jun-14	137	4	10	10	26	2	-96	48	26	3	-107	64	2,31	0,57	7,12	0,48

14																
jul-14	130	7	15	12	23	5	-69	39	23	4	-61	35	1,70	0,54	7,23	0,42
ago-14	129	7	11	4	21	4	-105	41	20	3	-99	41	1,70	0,32	7,39	0,24
sep-14	132	7	10	4	19	3	-125	35	18	2	-111	34	2,12	1,72	7,33	0,27
oct-14	139	5	10	2	21	3	-148	41	19	3	-145	45	1,93	0,55	7,40	0,29
nov-14	130	10	10	2	20	1	-210	37	19	1	-210	45	2,15	1,11	7,12	0,27
dic-14	132	4	8	2	20	4	-231	35	20	3	-239	32	1,48	0,78	7,02	0,15
ene-15	136	7	11	4	20	2	-200	34	20	2	-207	35	1,49	0,66	7,12	0,26
feb-15	129	15	8	3	21	1	-216	44	21	2	-227	38	1,00	0,50	7,02	0,22
mar-15	134	6	12	15	18	2	-206	48	18	2	-215	41	1,84	0,97	7,32	0,24
abr-15	129	16	14	2	20	3	-184	20	21	3	-163	34	2,49	0,10	7,31	0,35
may-15	134	7	9	2	18	2	-198	32	18	3	-206	26	1,60	0,60	7,34	0,27
jun-15	132	4	10	2	22	1	-202	14	21	1	-218	19	2,06	0,60	7,20	0,25
jul-15	134	4	7	3	20	2	-191	38	19	6	-210	33	1,87	0,85	7,44	0,19
ago-15	131	7	14	4	18	1	-118	58	18	1	-105	36	1,01	0,26	7,58	0,09
sep-15	139	12	16	1	18	1	-173	25	18	1	-203	19	1,42	0,43	7,77	0,11
oct-15	130	11	9	3	20	1	-207	20	20	1	-194	24	1,93	2,60	7,31	0,31
nov-15	134	16	10	5	19	2	-193	40	20	1	-198	33	1,98	1,26	7,49	0,30
dic-15	132	5	4	4	19	1	-139	27	18	1	-129	29	0,61	0,76	7,62	0,41
ene-16	129	10	8	4	16	1	-227	23	16	2	-233	23	1,70	0,79	6,93	0,50
feb-16	120	16	8	4	17	1	-218	30	18	1	-232	22	1,23	0,93	7,42	0,27
mar-16	119	7	14	5	22	0	-216	17	22	0	-221	16	1,68	0,54	7,42	0,20
abr-16	132	6	10	3	20	1	-225	23	18	3	-236	17	1,73	0,71	7,06	0,23

may-16	135	6	9	5	16	2	-218	26	16	2	-232	19	1,19	0,38	7,17	0,34
jun-16	134	7	6	3	16	1	-187	47	16	1	-208	35	0,83	0,51	7,24	0,47
jul-16	133	5	11	4	19	1	-197	35	19	1	-210	37	1,29	0,42	7,18	0,25
ago-16	132	7	9	4	17	1	-180	36	18	1	-181	56	1,14	0,35	7,09	0,21
sep-16	126	9	10	4	16	8	-179	36	17	3	-179	36	1,56	0,83	7,15	0,26
oct-16	127	6	7	4	19	1	-185	57	19	2	-194	56	1,09	0,96	7,32	0,54
nov-16	133	11	14	6	19	2	-175	55	19	1	-202	53	1,00	0,25	7,15	0,19
dic-16	102	11	25	3	18	2	-230	32	18	2	-233	20	1,43	0,12	7,70	0,40

A.3. Parámetros de agua permeada OR

Tabla 22: Datos históricos de parámetros en la etapa OR.

Mes	Parámetros de salida del agua permeada OR.									
	Flujo Volumétrico [m ³ /h]		Conductividad de entrada [mS/cm]		Conductividad de salida [mS/cm]		Redox [mV]		Turbidez [NTU]	
	Prom	σ	Prom	σ	Prom	σ	Prom	σ	Prom	σ
ene-13	72	4,0			1,29	1,10	-191	61	1,40	0,58
feb-13	53	6,8	11,92	3,77	3,50	1,41	-207	112	0,49	0,26
mar-13	56	5,6			0,20	0,08	-174	55	0,90	1,37
abr-13	56	9,1	13,48	2,05	1,68	1,89	-160	123	0,84	0,65
may-13	45	7,1	175,55		0,72	0,48	-228	36	1,23	1,28
jun-13	44	2,2	19,89	0,62	1,07	5,08	-193	43	1,52	0,28
jul-13	54	8,5	17,15	2,15	0,68	2,44	-204	40	1,57	0,31
ago-13	55	4,6	17,87	2,01	0,77	1,24	-166	40	1,19	0,69
sep-13	57	4,1	18,45	1,27	0,80	1,56	-186	51	1,82	0,45
oct-13	47	3,2	24,29	1,42	1,29	1,11	-175	61	1,61	0,22
nov-13	49	4,4	25,54	0,86	2,01	2,30	-212	50	1,85	0,41
dic-13	58	6,8	22,55	4,51	1,49	0,80	-202	57	2,38	0,36
ene-14	63	4,6	21,54	1,33	1,33	0,22	-218	40	1,72	0,17
feb-14	60	12,1	20,64	2,17	1,23	0,32	-182	55	1,38	0,59
mar-14	68	6,0	21,06	1,36	1,08	0,25	-103	38	1,98	0,56
abr-14	65	6,3	19,36	1,53	1,09	0,17	-224	27	1,93	1,37
may-14	60	3,4	22,68	1,89	1,20	0,37	-83	28	1,86	0,48
jun-14	54	2,5	25,76	2,62	1,25	2,03	-107	64	2,31	0,57
jul-14	56	7,2	23,13	4,44	1,08	2,44	-61	35	1,70	0,54
ago-14	62	3,0	19,62	2,85	1,24	1,24	-99	41	1,70	0,32

sep-14	63	3,5	17,98	1,97	0,77	1,56	-111	34	2,12	1,72
oct-14	67	6,5	19,47	2,69	1,04	1,11	-145	45	1,93	0,55
nov-14	62	3,1	19,46	1,39	0,99	0,16	-210	45	2,15	1,11
dic-14	56	5,6	19,69	2,71	1,27	0,80	-239	32	1,48	0,78
ene-15	58	6,1	20,33	1,70	1,27	0,25	-207	35	1,49	0,66
feb-15	53	5,3	20,60	1,63	1,82	1,79	-227	38	1,00	0,50
mar-15	64	6,0	17,82	1,75	1,32	0,18	-215	41	1,84	0,97
abr-15	61	5,7	20,52	3,21	1,46	0,31	-163	34	2,49	0,10
may-15	59	6,4	17,94	2,65	1,81	0,71	-206	26	1,60	0,60
jul-15	52	3,0	19,00	5,50	3,17	2,44	-210	33	1,87	0,85
ago-15	58	3,6	18,20	0,61	2,19	1,24	-105	36	1,01	0,26
sep-15	60	7,1	18,30	1,38	2,67	1,56	-203	19	1,42	0,43
oct-15	55	1,4	20,32	0,76	3,05	1,11	-194	24	1,93	2,60
nov-15	56	2,4	19,86	1,29	3,42	1,05	-198	33	1,98	1,26
dic-15	58	2,3	18,00	1,20	4,82	0,80	-129	29	0,61	0,76
ene-16	64	3,4	16,20	2,07	4,20	1,40	-233	23	1,70	0,79
feb-16	61	4,0	17,53	0,96	4,88	1,37	-232	22	1,23	0,93
mar-16	59	1,5	22,16	0,33	4,82	1,21	-221	16	1,68	0,54
abr-16	63	2,0	18,26	2,62	5,09	0,58	-236	17	1,73	0,71
may-16	64	3,7	16,31	2,08	3,63	1,27	-232	19	1,19	0,38
jun-16	64	4,5	16,42	1,20	5,60	2,74	-208	35	0,83	0,51
jul-16	57	4,9	18,56	1,32	8,18	2,44	-210	37	1,29	0,42
ago-16	62	2,8	17,52	1,37	9,44	1,24	-181	56	1,14	0,35
sep-16	57	3,7	16,65	3,23	5,09	1,56	-179	36	1,56	0,83
oct-16	58	4,1	19,10	1,52	6,30	0,80	-194	56	1,09	0,96
nov-16	69	8,6	19,24	1,47	4,55	0,44	-202	53	1,00	0,25
dic-16	57	3,9	17,50	1,68	4,92	0,80	-233	20	1,43	0,12

B. Tablas resultados pruebas de flotación

B.1. Parámetros iniciales

Tabla 23: Parámetros iniciales en las pruebas de flotación.

Mezcla de aguas	Ley alimentación [%]	Promedio	pH [-]	Promedio	ORP [mV]	Promedio
100%AP	0,14%	0,14%	8,55	8,56	-227	-220
	0,14%		8,57		-213	
100%UF	0,14%	0,14%	8,45	8,47	-179	-195
	0,14%		8,49		-210	
100%OR	0,14%	0,14%	8,63	8,64	-231	-222
	0,14%		8,64		-213	
80%AP/20%UF	0,14%	0,14%	8,46	8,46	-173	-178
	0,14%		8,46		-183	
80%AP/20%OR	0,14%	0,14%	8,53	8,52	-191	-188
	0,14%		8,5		-185	
60%AP/40%UF	0,14%	0,14%	8,46	8,47	-183	-173
	0,14%		8,48		-163	
60%AP/40%OR	0,14%	0,14%	8,48	8,48	-180	-180
	0,14%		8,48		-179	
40%AP/60%UF	0,14%	0,14%	8,42	8,43	-176	-165
	0,14%		8,43		-154	
40%AP/60%OR	0,14%	0,14%	8,48	8,48	-189	-196
	0,14%		8,47		-203	
20%AP/80%UF	0,14%	0,14%	8,43	8,44	-184	-182
	0,14%		8,45		-179	

20%AP/80%OR	0,14%	0,14%	8,59	8,59	-234	-220
	0,14%		8,58		-206	

B.2. Consumo de reactivos

Tabla 24: Consumo de reactivos en las pruebas de flotación.

Mezcla de aguas	NaSH [mL]	Promedio	H2SO4 [mL]	Promedio	pH [-]	Promedio	ORP [mV]	Promedio
100%AP	2,6	2,5	9,3	9,65	8,61	8,68	-492	-482
	2,4		10		8,74		-472	
100%UF	2,6	2,6	13,5	13,5	8,43	8,44	-440	-443
	2,6		13,5		8,44		-445	
100%OR	2,2	2,2	10	10	8,64	8,66	-470	-465
	2,2		10		8,68		-460	
80%AP/20%UF	2,5	2,5	10	10	8,55	8,54	-487	-489
	2,5		10		8,53		-490	
80%AP/20%OR	2,6	2,6	10	10	8,47	8,50	-480	-475
	2,6		10		8,52		-470	
60%AP/40%UF	2,5	2,5	10	10	8,53	8,53	-480	-474
	2,5		10		8,53		-467	
60%AP/40%OR	2,6	2,6	10	10	8,52	8,53	-450	-462
	2,6		10		8,54		-474	
40%AP/60%UF	2,5	2,5	10	10	8,51	8,51	-452	-451
	2,5		10		8,50		-450	
40%AP/60%OR	2,6	2,6	10	10	8,49	8,49	-489	-487
	2,6		10		8,49		-485	
20%AP/80%UF	2,5	2,5	13	13	8,46	8,48	-450	-453
	2,5		13		8,50		-455	
20%AP/80%OR	2,3	2,3	10	10	8,57	8,55	-438	-439
	2,3		10		8,52		-440	

B.3. Recuperaciones selectivas

Tabla 25: Resultados finales de recuperación selectiva de Mo, insolubles y Cu.

Mezcla de aguas	Mo [%]		Insolubles [%]		Cu [%]	
	Resultados	Promedio	Resultados	Promedio	Resultados	Promedio
100%AP	89,28%	89,6%	16,12%	15,44%	2,65%	2,49%
	89,84%		14,76%		2,33%	
100%UF	91,81%	91,8%	17,68%	17,80%	2,38%	2,37%
	91,76%		17,92%		2,36%	
100%OR	91,10%	91,2%	16,88%	16,92%	2,14%	2,29%
	91,29%		16,96%		2,44%	
80%AP/20%UF	91,28%	91,5%	16,37%	16,93%	1,86%	2,06%
	91,68%		17,49%		2,26%	
80%AP/20%OR	90,92%	91,0%	16,62%	16,68%	2,33%	2,22%
	90,98%		16,73%		2,11%	
60%AP/40%UF	91,90%	91,9%	17,24%	17,14%	2,24%	2,10%
	91,88%		17,03%		1,96%	
60%AP/40%OR	90,99%	90,7%	16,17%	15,89%	1,92%	1,93%
	90,37%		15,61%		1,93%	
40%AP/60%UF	90,95%	91,3%	15,36%	15,59%	1,63%	1,61%
	91,64%		15,81%		1,58%	
40%AP/60%OR	90,80%	91,0%	15,67%	15,43%	1,77%	1,81%
	91,16%		15,18%		1,84%	
20%AP/80%UF	92,35%	92,4%	17,03%	17,48%	2,09%	2,25%
	92,41%		17,92%		2,40%	
20%AP/80%OR	91,10%	90,6%	15,96%	15,61%	2,12%	2,02%
	90,12%		15,25%		1,92%	

B.4. Leyes selectivas

Tabla 26: Resultados finales de ley selectiva de Mo, insolubles y Cu.

Mezcla de aguas	Mo [%]		Insolubles [%]		Cu [%]	
	Resultados	Promedio	Resultados	Promedio	Resultados	Promedio
100%AP	3,21%	3,33%	42,21%	44,13%	15,93%	14,86%
	3,44%		46,05%		13,78%	
100%UF	3,45%	3,44%	42,88%	43,37%	15,13%	15,11%
	3,42%		43,85%		15,09%	
100%OR	3,71%	3,67%	43,31%	42,36%	14,74%	15,39%
	3,62%		41,41%		16,04%	
80%AP/20%UF	4,12%	4,06%	47,33%	45,61%	13,89%	14,41%
	4,00%		43,88%		14,92%	
80%AP/20%OR	3,49%	3,60%	42,64%	43,46%	15,47%	15,11%
	3,70%		44,27%		14,74%	
60%AP/40%UF	3,67%	3,81%	44,48%	45,51%	14,96%	14,52%
	3,95%		46,53%		14,08%	
60%AP/40%OR	3,89%	3,94%	44,73%	44,90%	14,08%	14,26%
	3,99%		45,06%		14,43%	
40%AP/60%UF	4,19%	4,09%	47,37%	46,81%	12,89%	13,39%
	3,99%		46,25%		13,88%	
40%AP/60%OR	4,12%	4,12%	47,00%	45,55%	13,96%	13,94%
	4,11%		44,09%		13,92%	
20%AP/80%UF	3,66%	3,56%	44,73%	44,05%	14,27%	14,81%
	3,46%		43,37%		15,35%	
20%AP/80%OR	3,75%	3,94%	42,87%	44,72%	14,74%	15,03%
	4,12%		46,56%		15,32%	

C. Tablas evaluación económica

C.1. Producción de Mo año 2016 y aumento de recuperación selectiva del 2,82 [%]

Tabla 27: Parámetros de producción año 2016 y producción adicional de concentrado fino de Mo con mezcla 20%AP/80%UF.

Parámetro	Unidad	ene-16	feb-16	mar-16	abr-16	may-16	jun-16	jul-16	ago-16	sep-16	oct-16	nov-16	dic-16	ANUAL 2016
Alimentación CUCON planta Mo	tms	135.803	139.984	146.357	104.645	115.764	156.408	160.650	145.173	149.799	159.391	153.005	143.499	1.710.478
Ley de alimentación Mo	%Mo	0,51%	0,41%	0,27%	0,40%	0,52%	0,52%	0,48%	0,34%	0,29%	0,32%	0,25%	0,27%	0,38%
Masa Mo en CUCON	tmf	687	580	394	419	597	810	777	491	435	505	381	388	6.464
Recuperación en concentrado de Mo	%	72,61%	60,02%	21,46%	63,93%	61,98%	72,26%	80,04%	57,66%	21,03%	54,64%	45,69%	42,04%	58,24%
Mo recuperado real	ton	499	348	84	268	370	585	622	283	91	276	174	163	3.764
Recuperación de alternativas	%	75,43%	62,84%	24,28%	66,75%	64,80%	75,08%	82,86%	60,48%	23,85%	57,46%	48,51%	44,86%	61,06%
Mo recuperado con alternativa caso base	ton	518	365	96	280	387	608	644	297	104	290	185	174	3.947
Ley de Mo	%	38,49%	31,33%	24,08%	32,52%	35,02%	37,55%	38,61%	27,76%	26,33%	33,80%	31,93%	32,36%	34,10%
Δ Mo recuperado	ton	19,4	16,4	11,1	11,8	16,8	22,8	21,9	13,8	12,3	14,3	10,7	11,0	182,3
	lb	42.742	36.070	24.472	26.080	37.131	50.350	48.291	30.516	27.037	31.430	23.668	24.151	404.165

C.2. Flujo de caja caso 20%AP/80%UF

Tabla 28: Flujo de caja caso 20%AP/80%UF.

		2018	2019	2020	2021	2022	2023
Parámetro	Unidad	0	1	2	3	4	5
CUCON alimentación	ton/año	1.710.478	1.710.478	1.710.478	1.710.478	1.710.478	1.710.478
Ley de Mo	%	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38
Mo alimentación	tmf/año	6.500	6.500	6.500	6.500	6.500	6.500
Recuperación	factor	2,82	2,82	2,82	2,82	2,82	2,82
Precio	USD/lb	\$ 3,35	\$ 3,35	\$ 3,35	\$ 3,35	\$ 3,35	\$ 3,35
Mo producido	lb/año	404.165	404.165	404.165	404.165	404.165	404.165
Ingreso Total	USD/año	\$ 1.353.953	\$ 1.353.953	\$ 1.353.953	\$ 1.353.953	\$ 1.353.953	\$ 1.353.953
Costo operación planta RILes	USD/año	\$ 2.042.886	\$ 2.042.886	\$ 2.042.886	\$ 2.042.886	\$ 2.042.886	\$ 2.042.886
Utilidades	USD/año	-\$ 688.933	-\$ 688.933	-\$ 688.933	-\$ 688.933	-\$ 688.933	-\$ 688.933
Flujo Neto	USD/año	-\$ 688.933	-\$ 688.933	-\$ 688.933	-\$ 688.933	-\$ 688.933	-\$ 688.933
Flujo Acumulado	USD/año	-\$ 688.933	-\$ 1.377.866	-\$ 2.066.798	-\$ 2.755.731	-\$ 3.444.664	-\$ 4.133.597
VAN	USD/año	-\$ 688.933	-\$ 1.230.237	-\$ 1.647.639	-\$ 1.961.475	-\$ 2.189.146	-\$ 2.345.514
VAN Acumulado	USD/año	-\$ 688.933	-\$ 1.919.170	-\$ 3.566.809	-\$ 5.528.284	-\$ 7.717.430	-\$ 10.062.944

C.3. Producción de Mo año 2016 y aumento de recuperación selectiva del 1,89 [%]

Tabla 29: Parámetros de producción año 2016 y producción adicional de concentrado fino de Mo con mezcla 80%AP/20%UF.

Parámetro	Unidad	ene-16	feb-16	mar-16	abr-16	may-16	jun-16	jul-16	ago-16	sep-16	oct-16	nov-16	dic-16	ANUAL 2016
Alimentación CUCON planta Mo	tms	135.803	139.984	146.357	104.645	115.764	156.408	160.650	145.173	149.799	159.391	153.005	143.499	1.710.478
Ley de alimentación Mo	%Mo	0,51%	0,41%	0,27%	0,40%	0,52%	0,52%	0,48%	0,34%	0,29%	0,32%	0,25%	0,27%	0,38%
Masa Mo en CUCON	tmf	687	580	394	419	597	810	777	491	435	505	381	388	6.464
Recuperación en concentrado de Mo	%	72,61%	60,02%	21,46%	63,93%	61,98%	72,26%	80,04%	57,66%	21,03%	54,64%	45,69%	42,04%	58,24%
Mo recuperado real	ton	499	348	84	268	370	585	622	283	91	276	174	163	3.764
Recuperación de alternativas	%	74,51%	61,92%	23,36%	65,83%	63,88%	74,16%	81,94%	59,56%	22,93%	56,54%	47,59%	43,94%	60,14%
Mo recuperado con alternativa caso base	ton	512	359	92	276	381	601	636	292	100	286	181	171	3.887
Ley de Mo	%	38,49%	31,33%	24,08%	32,52%	35,02%	37,55%	38,61%	27,76%	26,33%	33,80%	31,93%	32,36%	34,10%
ΔMo recuperado	ton	13,1	11,0	7,5	8,0	11,3	15,4	14,8	9,3	8,3	9,6	7,2	7,4	122,8
	lb	28.798	24.303	16.488	17.572	25.018	33.924	32.537	20.560	18.217	21.176	15.946	16.272	270.810

C.4. Flujo de caja caso 80%AP/20%UF

Tabla 30: Flujo de caja caso 80%AP/20%UF.

		2018	2019	2020	2021	2022	2023
Parámetro	Unidad	0	1	2	3	4	5
CUCON alimentación	ton/año	1.710.478	1.710.478	1.710.478	1.710.478	1.710.478	1.710.478
Ley de Mo	%	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38
Mo alimentación	tmf/año	6.500	6.500	6.500	6.500	6.500	6.500
Recuperación	factor	1,89	1,89	1,89	1,89	1,89	1,89
Precio	USD/lb	\$ 3,35	\$ 3,35	\$ 3,35	\$ 3,35	\$ 3,35	\$ 3,35
Mo producido	lb/año	270.877	270.877	270.877	270.877	270.877	270.877
Ingreso Total	USD/año	\$ 907.437	\$ 907.437	\$ 907.437	\$ 907.437	\$ 907.437	\$ 907.437
Costo operación planta RILes	USD/año	\$ 510.722	\$ 510.722	\$ 510.722	\$ 510.722	\$ 510.722	\$ 510.722
Utilidades	USD/año	\$ 396.715	\$ 396.715	\$ 396.715	\$ 396.715	\$ 396.715	\$ 396.715
Flujo Neto	USD/año	\$ 396.715	\$ 396.715	\$ 396.715	\$ 396.715	\$ 396.715	\$ 396.715
Flujo Acumulado	USD/año	\$ 396.715	\$ 793.429	\$ 1.190.144	\$ 1.586.858	\$ 1.983.573	\$ 2.380.288
VAN	USD/año	\$ 396.715	\$ 708.419	\$ 948.775	\$ 1.129.494	\$ 1.260.597	\$ 1.350.639
VAN Acumulado	USD/año	\$ 396.715	\$ 1.105.134	\$ 2.053.909	\$ 3.183.403	\$ 4.444.000	\$ 5.794.639

D. Análisis Químico

D.1. Determinación de Cu

Reactivos.

Tabla 31: Reactivos utilizados en la determinación de Cu.

Reactivos	Densidad [g/mL]	Pureza [%]
Ácido nítrico concentrado	1,4	65
Ácido perclórico concentrado	1,68	70
Ácido clorhídrico concentrado	1,19	37
Ácido acético glacial	-	-
Solución ácido acético	-	-
Amoníaco	0,91	25
Bifloruro de amonio	-	95
Tiosulfato de sodio pentahidratado	-	-
Solución de tiosulfato de sodio	-	-
Almidón soluble	-	-
Solución de almidón 1% p/v	-	-
Tiocianato de amonio	-	-
Hidróxido de sodio	-	-
Yoduro de potasio	-	-
Cu electrolítico	-	99,99
Alcohol etílico	-	-
Ácido sulfúrico	1,84	96
Solución de ácido sulfúrico 5% v/v	-	-

Materiales.

- Balanza analítica con sensibilidad de 0,1 [mg].
- Placa calefactora con control de temperatura.
- Material de medición de volumen certificado.
- Materiales de uso común en el laboratorio.
- Sistema de extracción y captación de gases.

Procedimiento experimental.

a. Porción de muestra para análisis.

✓ Homogeneizar la muestra en su envase y luego masar aproximadamente 0,5 [g] de muestra, tomando al menos 5 incrementos (punteo de la muestra en diferentes puntos). Transferir a un vaso precipitado de 400 [mL] provisto de un vidrio reloj.

b. Digestión de la porción de muestra para análisis.

✓ Adicionar aproximadamente 10 [mL] de ácido nítrico y 2 [mL] de ácido perclórico, tapar con vidrio reloj, y calentar en placa calefactora entre 160 y 180 [°C] hasta que comience la eliminación de vapores pardos.

✓ Destapar y calentar en placa calefactora entre 160 y 200 [°C] hasta estado siruposo, evitando la tostación del residuo, a esa temperatura se debe producir la ignición del azufre formado.

✓ Enfriar, agregar aproximadamente 50 [mL] de agua destilada y calentar hasta la disolución de las sales y luego enfriar. La solución debe quedar de un color verde transparente.

c. Acondicionamiento.

✓ Agregar gota a gota amoníaco hasta la aparición incipiente del precipitado de hidróxido férrico.

✓ Agregar 1 a 2 [g] de biofluoruro de amonio. Luego adicionar 10 [mL] de ácido acético 1:1. La solución debe quedar de un color azul transparente

d. Titulación.

✓ Agregar a la muestra aproximadamente 2 [g] de yoduro de potasio.

✓ Titular de inmediato con solución estandarizada de tiosulfato de sodio hasta que esta cambie a color amarillo pálido.

✓ Adicionar 1 [mL] de solución de almidón que producirá un color azul violáceo.

✓ Continuar valorando hasta la decoloración del complejo formado.

✓ Agregar 0,5 a 1[g] de tiocianato de amonio, con la cual nuevamente la solución se tornará de color azul violáceo.

✓ Continuar valorando gota a gota hasta la desaparición total del color azul violáceo, el cual se torna color blanco lechoso.

✓ Registrar el volumen de tiosulfato gastado.

e. *Ensayo en blanco.*

✓ Efectuar un ensayo en blanco en forma paralela a las muestras, siguiendo el mismo procedimiento y utilizando cantidades iguales de todos los reactivos utilizados en la determinación. El resultado obtenido en condiciones adecuadas no deben superar la tercera parte del límite de detección establecido en el método.

f. *Estandarización de tiosulfato de sodio.*

✓ Masar alrededor de 0,2 [g] de Cu electrolítico con un 99,99 % de pureza decapado y seco en un vaso precipitado de 400 [mL] en quintuplicado. No deben de haber diferencias de más de 20 [mg] en los pesos del Cu electrolítico.

✓ Adicionar 5 [mL] de ácido nítrico y 5 [m] de agua destilada.

✓ Calentar en plancha suave hasta estado siruposo.

✓ Enfriar, agregar 25[mL] de agua destilada y calentar.

✓ Enfriar nuevamente y agregar amonio hasta la aparición incipiente del precipitado lechoso de $\text{Cu}(\text{OH})_2$.

✓ Agregar 10 [mL] de ácido acético. La solución debe quedar de un color azul celeste limpio.

✓ Continuar el procedimiento de valoración y registrar los datos.

✓ Para decapar el Cu electrolítico, se debe sumergir en una solución que contenga 20 [mL] de agua y 2 [mL] de ácido sulfúrico por unos 5 [min].

✓ Luego lavar con agua destilada por lo menos cinco veces.

✓ Continuar lavando con alcohol etílico por unas tres veces. Todos los lavados deben efectuarse con cantidades pequeñas de líquidos (aproximadamente 10 [mL]).

✓ Finalmente envolver las láminas en toalla de papel y dejar secar durante 5 [min] para luego trasladarlas a un desecador.

✓ Transcurridos 15 [min], masar hasta peso constante.

✓ Calcular la concentración de Cu expresada en porcentaje con dos cifras significativas, utilizando la siguiente expresión:

$$\%Cu = \frac{T \cdot (G - B)}{P} \cdot 100 \quad (13)$$

Dónde:

- T: Título de la solución de $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ [mg/mL].
- G: Volumen gastado de $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ [mL].
- B: Volumen gastado en el blanco [mL].
- P: Masa de la muestra [mg].

D.2. Determinación de Mo

Reactivos.

Tabla 32: Reactivos utilizados en la determinación de Mo.

Reactivos	Densidad [g/mL]	Pureza [%]
Ácido nítrico concentrado	1,4	65
Ácido perclórico concentrado	1,68	70
Ácido clorhídrico concentrado	1,19	37
Solución estándar de Mo	-	-
Sulfato de sodio anhidro	-	95
Solución de sulfato de sodio	0,91	20 (m/v)

Materiales.

- a) Balanza analítica con sensibilidad de 0,1 [mg].
- b) Espectrofotómetro de absorción atómica con lámpara de Mo y quemadores para llama de aire-acetileno y óxido nitroso-acetileno.
- c) Placa calefactora o similar, con control de temperatura
- d) Material de medición de volumen.
- e) Material de uso común en el laboratorio.
- f) Sistema de extracción y captación de gases.

Procedimiento experimental.

a. Porción de muestra para análisis.

- ✓ Dependiendo del tipo de muestra, masar 0,5 [g] tomando al menos 5 incrementos en forma aleatoria.

b. Digestión de la porción de muestra para análisis.

- ✓ Adicionar aproximadamente 10 [mL] de ácido nítrico y 2 [mL] de ácido perclórico, tapar con vidrio reloj, y calentar en placa calefactora entre 160 y 180 [°C] hasta que comience la eliminación de vapores pardos.
- ✓ Enfriar y agregar 5 [mL] de ácido perclórico, tapar con vidrio de reloj y calentar en placa calefactora entre 160 [°C] y 200 [°C] durante 20 [min] aproximadamente.
- ✓ Destapar parcialmente el vaso y calentar hasta sequedad, evitando la tostación del residuo.

c. Disolución de las sales y aforado de la muestra.

- ✓ Retirar de la placa calefactora, enfriar a temperatura ambiente y adicionar aproximadamente 20 [mL] de agua destilada y agregar 10 [mL] de ácido clorhídrico.
- ✓ Tapar con vidrio reloj y calentar hasta ebullición.
- ✓ Retirar de la placa calefactora y enfriar a temperatura ambiente.
- ✓ Transferir a un matraz aforado de 100 [mL] y aforar con agua destilada.
- ✓ Tapar y agitar vigorosamente para asegurar la homogenización.

d. Preparación de las soluciones de calibración.

- ✓ Agregar desde una bureta de 50 [mL]: 0, 5, 10, 15, 20 y 30 [mL] de solución de Mo de 100 [µg/mL] a matraces de 100 [mL].
- ✓ Agregar agua destilada hasta un volumen de 60 [mL].
- ✓ Adicionar 10 [mL] de ácido clorhídrico, 1 [mL] de solución de sulfato de sodio y enfiar.
- ✓ Aforar y homogeneizar. Se obtienen así soluciones de calibración de 0, 5, 10, 20 y 30 [µg/mL] de Mo.

e. Operación del espectrofotómetro de absorción atómica.

- ✓ Ajustar las condiciones óptimas de operación del instrumento de acuerdo a las instrucciones dadas por el fabricante en el manual de operaciones.

Tabla 33: Condiciones de operación del espectrofotómetro de absorción atómica.

Parámetros	Condiciones
Longitud de onda [nm]	313,3
Mezcla de gases	Óxido nitroso – acetileno
Tipo de llama	Reductora
Quemador [cm]	5
Intervalo de calibración [mg/L]	0-30
Matriz	HCl 10% - Na ₂ SO ₄ 0,2% p/v
Sistema de nebulización	Impact bead
Posición quemador	Longitud (0°)
Puntos de calibración	>5
Réplica de lecturas	>3

f. Calibración para la medición.

- ✓ Aspirar la solución blanco estándar y las soluciones de los estándares de calibración en el espectrofotómetro de absorción atómica en orden creciente de concentración.

g. Medición de las muestras

- ✓ Agregar una punta de espátula de sulfato de sodio.
- ✓ Aspirar las soluciones de las muestras de ensayo, medir y registrar los resultados.
- ✓ Aspirar agua destilada entre cada medición.
- ✓ Si las mediciones están fuera del intervalo de calibración, efectuar una dilución de la solución de la muestra hasta obtener una medición aproximada dentro del rango de calibración.
- ✓ Calcular la concentración de Mo expresada en porcentaje con tres cifras significativas según la siguiente expresión:

$$\%Mo = \frac{V \cdot d \cdot (A - B)}{P \cdot 10000} \cdot 100 \quad (14)$$

Dónde:

- A: concentración del elemento en la solución de la muestra [µg/mL].
- B: concentración del elemento en blanco [µg/mL].
- V: Volumen de aforo [mL].
- P: Masa de la muestra [g].
- d: factor de dilución [-]

D.3. Determinación de Insolubles

Reactivos.

Tabla 34: Reactivos utilizados en la determinación de insolubles.

Reactivos	Densidad [g/mL]	Pureza [%]
Ácido nítrico	1,4	68
Ácido perclórico	1,54	70
Ácido clorhídrico	1,19	33

Materiales.

- a) Balanza analítica con sensibilidad de 0,1 [mg].
- b) Material de uso habitual de laboratorio.
- c) Mufla con control de temperatura.
- d) Papel Whatman N°42.

Procedimiento experimental.

a. Porción de muestra para análisis.

- ✓ Masar con precisión mínima de 0,1 [mg], aproximadamente 1[g] de muestra y transferir a un vaso precipitado de 400 [mL] provisto de vidrio reloj.

b. Disolución de la porción de muestra para análisis.

- ✓ Adicionar al vaso provisto de vidrio reloj, 10 [mL] de ácido nítrico y 3 [mL] de ácido perclórico.
- ✓ Calentar suavemente sobre la plancha calefactora, evitando salpicaduras de muestra fuera del vaso.
- ✓ Llevar a sequedad sin tostar.
- ✓ Enfriar, adicionar 50 [mL] de ácido clorhídrico y calentar a ebullición durante algunos minutos con vaso tapado.

c. Filtrado del insoluble.

- ✓ Filtrar la muestra por gravedad utilizando papel filtro Whatmann. Todo el precipitado debe transferirse al papel, lavando las paredes del vaso con pequeños chorros de agua caliente y arrastrando el insoluble con una bagueta policia.
- ✓ Lavar el insoluble con agua caliente y pequeñas porciones de ácido clorhídrico, las veces que sean necesarias hasta que se elimine el hierro presente. Esto se verifica cuando no hay coloración amarilla al adicionar ácido clorhídrico.

d. Calcinación

- ✓ Transferir el filtro con el residuo a un crisol de porcelana previamente tarado y calcinar en mufla a 700 [°C] durante 45 [min].
- ✓ Pasar el crisol de porcelana con el insoluble a desecadora, hasta temperatura ambiente.

e. Medición gravimétrica.

- ✓ Masar el residuo insoluble en balanza analítica.

f. Blanco de reactivos.

- ✓ Llevar dos blancos de reactivos durante todo el desarrollo del método.

g. Medición de insoluble.

- ✓ Calcular el contenido de insolubles como un porcentaje en masa utilizando la siguiente ecuación:

$$\%Insolubles = \frac{m_2 - m_1}{m_0} \cdot 100 \quad (15)$$

Dónde:

- m_0 : Masa de la porción de muestra para análisis [g].
- m_1 : Masa de crisol [g].
- m_2 : Masa de crisol + insoluble [g].

E. Imágenes planta de RILes CMDIC Puerto

E.1. Sedimentación



Figura 70: Piscinas de sedimentación de la planta de RILes Puerto Collahuasi.

E.2. DAF



Figura 71: Celda de flotación por aire disuelto de la planta de RILes Puerto Collahuasi.

E.3. Filtros de arena



Figura 72: Batería de filtros de arena de la planta de RILes Puerto Collahuasi.

E.4. Filtros de carbón activado



Figura 73: Batería de filtros de carbón activado de la planta de RILes Puerto Collahuasi.

E.5. UF



Figura 74: Módulos UF de la planta de tratamiento de RILes Puerto Collahuasi.

E.6. OR



Figura 75: Módulo OR de la planta de tratamiento de RILes Puerto Collahuasi.

