

Universidad Técnica Federico Santa María
Sede Viña Del Mar – José Miguel Carreras.

PROPUESTA DE UN SISTEMA PARA AUMENTAR LA DISPONIBILIDAD DE
AGUA EN EL PROCESO DE FLOTACION Y MOLIENDA

Trabajo de Titulación para optar al Título de
Técnico Universitario en Minería y Metalurgia

Alumno:

Ismael Antonio Marquez Vargas

Profesor Guía:

Erik Kohnenkamp

Dedicatoria

Como Primera instancia quisiera agradecer a mi familia que siempre ha estado detrás mío dándome apoyo en todo momento de mis días a pesar de las dificultades.

Para ellos es que va esta dedicatoria, para toda la gente que me ayudo a formarme como persona y que me enseñaron los valores que hay que tener, este trabajo se los dedico a ellos, a mi maravillosa familia.

Resumen

En este trabajo de títulos realizaremos una pequeña introducción a lo que son los procesos dentro de la concentración, donde hablaremos de la molienda, la flotación, los reactivos y el agua que se consume en Chile. En el siguiente capítulo veremos un análisis del consumo de agua que realizó Cochilco para poder tener una idea más clara de hacia dónde van los consumos de agua en la minería y en la concentración, viendo como el agua continental va en descenso y el agua de más se ve cada vez más utilizada, y para finalizar, presentare la máquina de flotación por aire disuelto, la cual es la que estoy proponiendo para que se utilice en minería para evitar que continúe la crisis hídrica en nuestro país, siendo esta máquina una posible alternativa para la limpieza y recuperación de aguas.

Índice

Dedicatoria	2
Resumen	3
INTRODUCCIÓN	7
OBJETIVOS	8
CAPITULO 1: IDENTIFICAR LA UTILIZACION DE AGUA MEDIANTE DATOS INDUSTRIALES PARA DETERMINAR UNA ETAPA A MEJORAR.	9
1.1 INTRODUCCION A LA MOLIENDA	10
1.1.1 Molienda Convencional:	10
1.1.2 Molienda SAG.....	11
1.2 HIDROCICLONES	11
1.2.1 Funcionamiento de un hidrociclón	11
1.2.3 Clasificación de hidrociclones	12
1.3 INTRODUCCION A LA FLOTACIÓN	13
1.4 REACTIVOS	13
1.5 CUANTA AGUA SE UTILIZA EN LA MINERIA DE COBRE	14
1.5.1 Tipos de aguas utilizadas en la minería	15
1.5.2 Agua utilizada a nivel nacional en los años	15
1.5.3 Agua utilizada a nivel regional en Chile	16
1.5.4 Agua utilizada por procesos	17
CAPITULO 2: CARACTERIZAR EL SISTEMA DE FLOTACION POR AIRE DISUELTO MEDIANTE VARIABLES OPERACIONALES, INDICANDO VARIABLES A MEJORAR DEL PROCESO PRODUCTIVO TRADICIONAL.....	20
2.1.1 Coagulación y Flocculación	21
2.1.2 Limpieza de Fango	22
2.2 PROCEDIMIENTOS DEL SISTEMA DE FLOTACION POR AIRE DISUELTO (DAF)	22
2.3 MODELO DE MAQUINA DAF	24
2.3.1 Maquina DAF modelo 2D	26
2.3.2 Ficha técnica de modelos.....	27
2.3.3 Plano de la maquina FRC-10.....	28
2.4 REDUCCION DE AGUA DAF	29
CAPITULO 3: ANALIZAR LAS MEJORAS ALCANZABLES POR EL SISTEMA PROPUESTO, COMPARANDO CON LAS PROYECCIONES DE CONSUMO DE AGUA, PARA VALORAR LA PROPUESTA.....	30
3.1.1 Consumo unitario de agua continental por proceso minero a nivel nacional	32
3.2 RECIRCULACION DE AGUA	33
3.2.1 Recirculación en operaciones.....	33
3.2.2 Recirculación en planta concentradora	34
3.3 UTILIZACION DE AGUA DE MAR EN LA MINERIA	36
3.4 PROYECCION DEL CONSUMO DE AGUA 2020-2031	37
3.5 PROYECCION DE COBRE.....	38

3.6 AHORRO DE MAQUINA DAF	40
3.7 DESALINIZADORAS	40
3.7.1 Osmosis inversa.....	40
CONCLUSION	41
Bibliografía.....	43

Índice de Figuras

Figura 1: Agua utilizada en año 2019 a nivel nacional	Error! Bookmark not defined.
Figura 2: Agua utilizada en distintos procesos	16
Figura 3: agua utilizada en chile separadas por región del año 2019	Error! Bookmark not defined.
Figura 4: Agua utilizada el año 2018 separada por proceso.....	Error! Bookmark not defined.
Figura 5: Agua utilizada el año 2019 separada por región	Error! Bookmark not defined.
Figura 6: Modelo de maquina DAF Toro	Error! Bookmark not defined.
Figura 7: Previsualización de máquina de flotación por aire disuelto	Error! Bookmark not defined.
Figura 8: Previsualización de máquina de flotación por aire disuelto	Error! Bookmark not defined.
Figura 9: Previsualización de máquina de flotación por aire disuelto	Error! Bookmark not defined.
Figura 10: Modelo 2D maquina DAF	26
Figura 11: Ficha técnica de modelos DAF.....	Error! Bookmark not defined.
Figura 12: Plano por AutoCAD de Maquina DAF modelo FRC-10	Error! Bookmark not defined.
Figura 13: Flowsheet división andina 2011	Error! Bookmark not defined.
Figura 14: Flowsheet propuesto con la inserción de la maquina	Error! Bookmark not defined.
Figura 15: Consumo de agua en Chile 2019	Error! Bookmark not defined.
Figura 16: comparación de consumo de agua año 2013-2019.....	Error! Bookmark not defined.
Figura 17: Consumo unitario de aguas en la concentración e hidrometalurgia...	Error! Bookmark not defined.
Figura 18: Ecuación para calcular las aguas recirculadas en operaciones	33
Figura 19: Porcentaje de recirculación del año 2019.....	Error! Bookmark not defined.
Figura 20: Ecuación para recirculación de aguas en la concentración.....	Error! Bookmark not defined.
Figura 21: Porcentaje de recirculación en la concentración 2019.....	35
Figura 22: Consumo de agua Salobre y Desalada	36
Figura 23: Proyección de la demanda de agua en la minería de cobre 2020-2031	Error! Bookmark not defined.
Figura 24: Proyección de agua continental 2019-2031.....	Error! Bookmark not defined.
Figura 25: Proyección de agua de mar 2019-2031	Error! Bookmark not defined.

Figura 26: Proyección de cobre año 2019-2031 39

Figura 27: Proyección del consumo de agua total en la minería 2020-2031 .**Error! Bookmark not defined.**

Figura 28: Proyección de agua continental y agua de mar año 2020-2031 ...**Error! Bookmark not defined.**

Figura 29: Proyección de agua continental, agua de mar y total general 2020-2031 **Error! Bookmark not defined.**

Siglas

- COCHILCO: Comisión chilena de Cobre
- TORO EQUIPAMENT: Empresa de equipos
- CODELCO: Corporación Nacional Del Cobre de Chile
- DGA: Dirección General de Aguas

Simbología

- m = Metros
- m3 = Metros Cúbicos
- h = Hora
- ton = Tonelada
- % = Porcentaje
- seg = Segundos

INTRODUCCIÓN

El agua es un bien importante cuando hablamos de minería y medio ambiente, es por esto que debemos buscar una forma de utilizarla sabiamente, estamos en una escases hídrica que lleva años viéndose y la competencia por el agua sigue creciendo en el tiempo, Según el Foro Económico Mundial se reconoce una crisis mundial del recurso hídrico, incluso se clasifica como uno de los 3(tres) primeros riesgos globales. Esta situación es posible aun revertirla, pero para esto necesitamos tomar cartas en el asunto y tomar medidas necesarias para realizar una gestión correcta y más eficiente de nuestro preciado recurso hídrico.

Ya que entramos en contexto sobre la crisis hídrica a nivel mundial nos damos cuenta de que Chile también es responsable de esto. Según estimaciones de WRI (2019) en su índice estrés hídrico (Water stress), en relación a los países con más riesgo de una crisis del agua, Chile ocupa el lugar 18, calificando como un riesgo alto.

Si bien el agua utilizada en la industria de la minería solo ocupa el 3% del suministro de agua de Chile (Atlas del agua DGA, 2016), Las concesiones y operaciones mineras se ubican en donde la escasez hídrica es un factor limitante para el desarrollo de la región.

El agua es trascendental para la industria de la minería ya que los procesos que estas utilizan requiere de agua para funcionar, es por esto que los impactos en la calidad y cantidad de agua son los aspectos más polémicos en los proyectos mineros actuales.

En este trabajo de título hablaremos sobre la concentración ya que este es el proceso en el cual más agua se utiliza a nivel nacional, hablaremos sobre los procesos que conlleva la concentración, tanto como equipos que se utilizan en estas mismas.

Se realizará una identificación y comparación de los equipos de minería para proponer un sistema sustentable y viable para la minería en Chile.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Proponer un sistema para aumentar la disponibilidad de agua en el proceso de molienda y flotación. Proponer un sistema por aire disuelto para flotación, para disminuir consumo de agua, reutilizando la misma.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar la utilización de agua mediante datos industriales para determinar una etapa a mejorar.
- Caracterizar el sistema de aire disuelto, mediante variables operacionales, indicando variables a mejorar del proceso productivo tradicional.
- Analizar las mejoras alcanzables por el sistema propuesto, comparando con las proyecciones de consumo de agua, para valorar la propuesta.

**CAPITULO 1: IDENTIFICAR LA UTILIZACION DE AGUA
MEDIANTE DATOS INDUSTRIALES PARA DETERMINAR
UNA ETAPA A MEJORAR.**

1.1 INTRODUCCION A LA MOLIENDA

Para comenzar a entender el excesivo consumo de agua en estos procesos y en el país en general, es necesario introducirnos a los fundamentos de estos y profundizar en este transcurso con la finalidad de caracterizar el gasto de agua, es por esto que como primer punto daremos a conocer los principios de la molienda.

El proceso de molienda tiene como objetivo la reducción de tamaño de las partículas que provienen desde el proceso de chancado con la finalidad de poder dejarlas de un tamaño específico para permitir la liberación del material en partículas individuales, las cuales serán recuperadas en el siguiente proceso que es la flotación.

En este proceso se usan equipos giratorios o molinos cilíndricos, en la molienda existen 2 tipos, la molienda convencional y la molienda SAG que es un tipo semi autógeno de molienda.

En esta etapa el material mineralizado se le agregan grandes cantidades de agua hasta formar un fluido lechoso y los reactivos necesarios para realizar el proceso de flotación.

1.1.1 Molienda Convencional:

En esta etapa el producto obtenido de la etapa terciaria del chancado ingresa a una molienda de barras, donde la descarga de esta primera etapa de molienda está dirigida a los cajones de descarga donde es bombeada hacia la etapa de clasificación.

En la etapa de clasificación es realizada en los hidrociclones en donde el Overflow o el Flujo rebose avanza en la línea de beneficio representando la alimentación al proceso de flotación y el underflow o flujo de descarga se dirige hacia una segunda etapa de molienda que consiste en molienda de bolas, donde la descarga de esta también conocida como “molienda fina”, se envía a cajones de descarga uniéndose a la descarga de la molienda de barras, siendo bombeada nuevamente a los hidrociclones.

1.1.2 Molienda SAG

En este tipo de molienda, el molino SAG reemplaza a la molienda de barras en el proceso de molienda como tal, pero además de eso, reemplaza a las etapas de chancado secundario y terciario.

Al igual que en la molienda convencional, la descarga de molino SAG es bombeada hacia la etapa de clasificación, Retornando el underflow de los hidrociclones hacia la molienda fina de bolas.

Cabe destacar que la operación molinos SAG comúnmente van asociada con un proceso de chancado de pebbles.

1.2 HIDROCICLONES

Los hidrociclones son equipos destinados al tratamiento de pulpas solido-Líquido. Son empleados principalmente en las industrias de minería, construcción, alimentación, química y otras. Se fabrican en varios tipos de ejecución: Poliuretano, polímeros, carcasa de acero con recubrimientos interiores en elastómero y cerámica según las diferentes aplicaciones y el tipo de naturaleza de las pulpas. Tienen un sistema de construcción modular, tanto en sus geometrías cónicas o cilíndricas, esto permite el intercambio de piezas entre hidrociclones de diversos tipos de tamaños, pudiendo combinar los diferentes materiales constructivos para poder seleccionar el modelo de hidrociclón más adecuado para una aplicación específica.

1.2.1 Funcionamiento de un hidrociclón

La función principal del Hidrociclón es separar los sólidos suspendidos en un determinado flujo de alimentación, en dos fracciones, una gruesa que acompaña al flujo llamado descarga (underflow) y otra fina que acompaña al flujo denominado rebose (Overflow). La frontera entre gruesos y finos queda definida por el tamaño de corte o de separación alcanzado por el hidrociclón, que es función, por un lado, del tamaño de este (diámetro), de su configuración geométrica, de las dimensiones de sus componentes internos, y de la presión de operación y por otro lado de las características de la pulpa, viscosidad, concentración de sólidos, distribución granulométrica de los sólidos.

1.2.2 Procesos de un hidrociclón

La suspensión es bombeada bajo presión, y entrando al hidrociclón a través del tubo de alimentación se genera un movimiento de tipo espiral descendente debido a la forma del equipo y la acción de la fuerza de gravedad. A razón de este movimiento se produce una zona de muy baja presión a lo largo del eje del equipo, por lo que se desarrolla un núcleo de aire en ese lugar. A medida que la sección transversal disminuye en la parte cónica, se superpone una corriente interior que genera un flujo neto ascendente también de tipo espiral a lo largo del eje central del equipo, lo que permite que el flujo encuentre en su camino al vortex que actúa como rebalse.

Las partículas en el seno del fluido se ven afectadas en el sentido radial por dos fuerzas opositoras: una hacia la periferia del equipo debido a la aceleración centrífuga y la otra hacia el interior del equipo debido al arrastre que se mueve a través del hidrociclón. Consecuentemente, la mayor parte de las partículas finas abandonarán el equipo a través del vortex, y el resto de las partículas, mayoritariamente los gruesos, saldrán a través del apex.

Básicamente los cuatro parámetros independientes que permiten variar las condiciones de operación son: la densidad de la pulpa, la caída de presión en la alimentación, el diámetro del vortex y el diámetro del apex. El tamaño de corte y la eficiencia de la separación son controlados mediante el ajuste de estos parámetros.

1.2.3 Clasificación de hidrociclones

La batería de hidrociclones está compuesta por doce ciclones, de los cuales nueve operan y tres se mantiene de reserva. El Overflow o rebase constituye el producto final del área y se destina por gravedad hacia el área de flotación.

El underflow o descarga se conduce por gravedad hacia la molienda secundaria o molinos de bolas.

La presión de alimentación a los ciclones normalmente es de 10 a 15 psi y se controla con la velocidad de la bomba de alimentación y/o el número de ciclones en operación.

1.3 INTRODUCCION A LA FLOTACIÓN

La flotación es un proceso selectivo que se emplea para llevar a cabo separaciones específicas de minerales complejos, basándose en las diferentes propiedades superficiales de cada uno de ellos.

Es el método de procesamiento de minerales más eficaz y con mayores aplicaciones de todos los existentes, aunque en muchos aspectos, es el más complejo de ellos.

De las 3 alternativas iniciales: Flotación con aceite, por partícula o con espuma, esta última es la que se ha impuesto y ha alcanzado un notable desarrollo.

Esta técnica se fundamenta en la adhesión selectiva de los minerales en el seno de la pulpa acuosa a unas burbujas de aire que se introducen en ella. Los minerales adheridos a las burbujas se separan en forma de espuma mineralizada constituyendo el concentrado, mientras que los demás se quedan en la pulpa y constituyen el material estéril.

1.4 REACTIVOS

Los reactivos son químicos que se utilizan en la flotación, estos reactivos tienen la capacidad de realizar cambios en las propiedades físicas y químicas, creando condiciones especiales para una flotación electiva de partículas de un mineral determinado, estos son:

- Reactivos depresores: La función principal es generar condiciones aerofobias, algo inverso a los reactivos colectores en el resto de minerales de menor interés, se utiliza para separar más efectivamente los minerales como la pirita.
- Reactivos colectores: tienen como función generar hidrofobia en el mineral de interés, comúnmente cobre, se busca generar esta condición hidrofóbica para que el mineral logre separarse del agua y buscar un lugar dentro de la burbuja.
- Reactivos espumantes: la tarea de los espumantes es generar burbujas resistentes que puedan contener de manera segura el mineral de interés a flotar, una prueba visible de este reactivo es la imagen de burbujas sobresalientes de mayor espesor.
- Otros aditivos: los aditivos cumplen con la función de estabilizar en un pH determinado la acidez de la celda, con el fin de no tener problemas a la hora de llevar a cabo la flotación.

Cuando la espuma se rebaza esta cae sobre unas canaletas y es filtrada o decantada la pulpa para luego ser dirigida a estanques de almacenaje donde serán transportadas a la siguiente etapa del proceso, el proceso de flotación se debe realizar varias veces para poder cumplir con los parámetros o condiciones de la pulpa, ya que esta debe cumplir con un ley del 31%, cuando alcanza estos parámetros el concentrado final obtenido del proceso se seca mediante filtros, con el fin de que llegue sin agua al proceso de fundición

1.5 CUANTA AGUA SE UTILIZA EN LA MINERIA DE COBRE

Cuando hablamos del consumo total de agua reportado en el 2019 por la industria de minería para una obtención de 5.787,4 Miles de toneladas de cobre fino producidos, se observa que el agua de origen continental alcanzo los 12,45 m3/seg (18%), el agua de más llego a los 4,06 m3/seg (6%) y el agua recirculada fue de 53,32 m3/seg (76%) lo que en total se consumió 69,83 m3/seg de agua, esto lo veremos en la siguiente figura. (Cochilco, consumo de agua en la mineria de cobre, 2019)

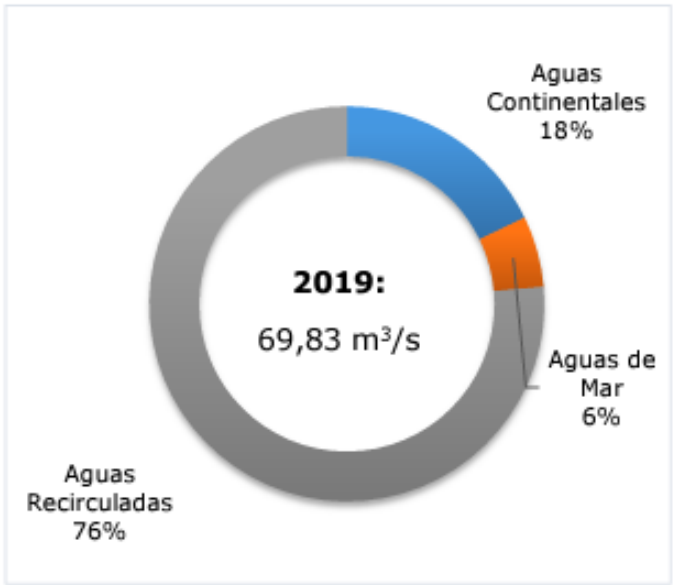


Figura 1.1: Agua utilizada en año 2019 a nivel nacional
Fuente I: Cochilco (2020)

1.5.1 Tipos de aguas utilizadas en la minería

A grandes rasgos tenemos 3 tipos de agua:

- Agua continental: considera todos los cuerpos de agua permanentes que se encuentran en el interior, alejados de las zonas costeras. Algunas aguas continentales son ríos, lagos, llanuras de inundación, reservas, humedales y sistemas salinos de interior.
- Agua de origen oceánico: las aguas de origen oceánico provienen del mar y tienen un alto contenido salobre.

- Aguas Recirculadas: corresponden a todos aquellos flujos que son reinyectados al sistema, estos pueden ser previamente tratados o no.

1.5.2 Agua utilizada a nivel nacional en los años

A lo largo de los años hemos visto que se ha presentado una disminución desde el año 2018 al año 2019 del 6,8%, por otra parte, las aguas de mar y las aguas recirculadas presentan un aumento del 1,7% y del 15%



Figura 1.2: Agua utilizada en distintos procesos
Fuente II: Cochilco (2019)

1.5.3 Agua utilizada a nivel regional en Chile

En la siguiente imagen se muestra de manera esquemática el consumo del recurso hídrico por región, mostrando la distribución porcentual por fuente durante el año 2019, cabe destacar que, en las regiones: metropolitana, O’Higgins y Coquimbo fueron las que

presentaron una mayor disminución si lo comparamos con el año anterior en la extracción de aguas continentales. (Cochilco, consumo de agua en la minería de cobre, 2019)

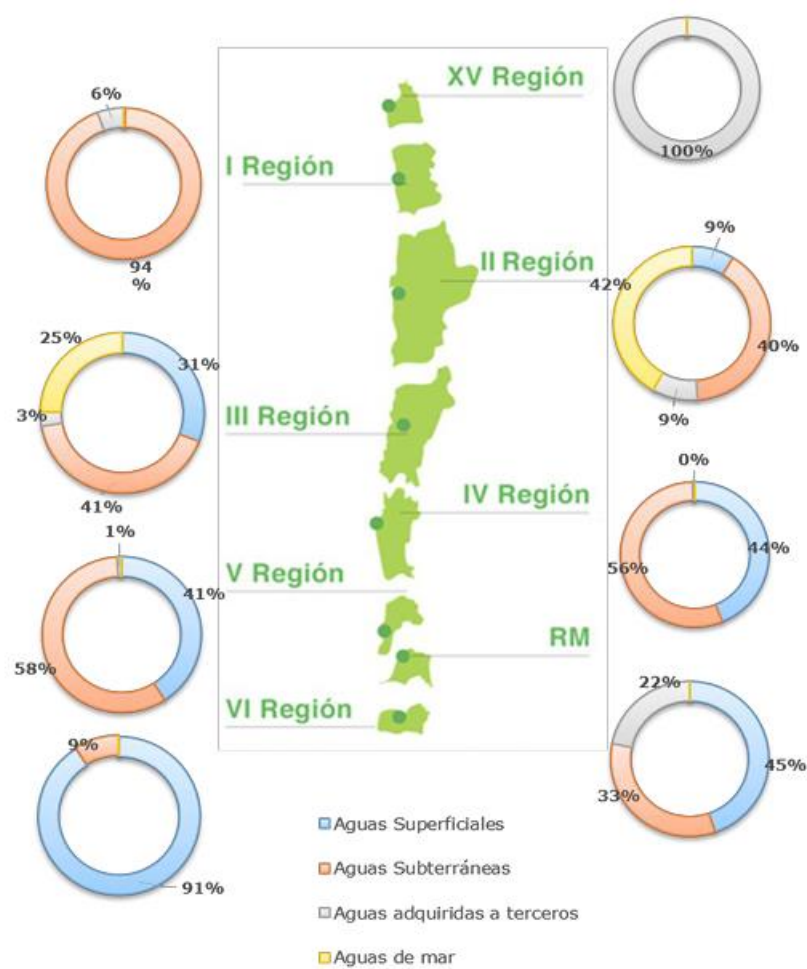


Figura 1.3: agua utilizada en Chile separadas por región del año 2019
Fuente IIIII: Cochilco (2020)

1.5.4 Agua utilizada por procesos

De los 13,36 m3/seg de aguas continentales utilizados en la minería del cobre durante el 2018, estos se pueden clasificar de acuerdo con los procesos mineros a los que son destinadas el uso del agua, según se presenta a continuación.

Durante el 2018, el principal consumo de agua en la minería del cobre fue en el proceso de concentración de minerales sulfurados para la obtención de concentrados, el cual representa el 60% de las aguas continentales utilizadas en la minería del cobre. Le sigue el ítem otros o servicios varios, que durante el 2018 llegó a representar el 16%, en este punto se contabilizan las aguas utilizadas en campamentos, para riego, y otros procesos de menor consumo de agua. En tercer lugar, se ubica el proceso de hidrometalurgia para la obtención de cátodos a partir de minerales oxidados, este proceso alcanzo el n13% del total de aguas continentales. Por otra parte, está el área mina que alcanza el 5% y finalmente el área de fundición y refinería representa el 4% del consumo de aguas continentales. (cochilco, 2018)



Figura 1.4: Agua utilizada el año 2018 separada por proceso
Fuente IV: Cochilco (2018)

En el siguiente grafico podemos apreciar que en el año 2019 el agua utilizada en la concentración ha aumentado con relación al agua utilizada en 2018 por regiones por lo tanto en la búsqueda de nuevas metodologías para reducir el consumo del recurso hídrico debemos enforcarnos en desarrollar nuevas tecnologías o soluciones que estén orientadas a la línea de minerales de sulfuros para poder así reducir el consumo de agua en este proceso de concentración.

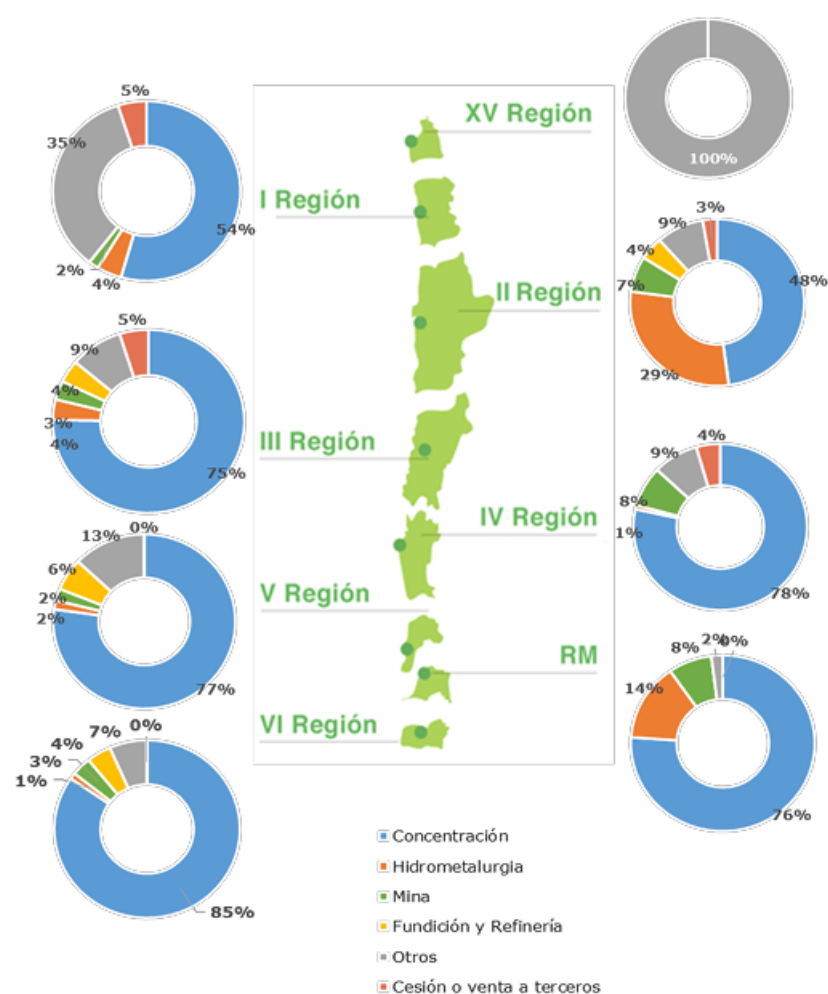


Figura 1.5: Agua utilizada el año 2019 separada por región

Fuente 5: Cochilco (2019)

El análisis por proceso minero a nivel regional nos indica que en todas las regiones, (a excepción de Arica y Parinacota, que es muy poco representativa dado el bajo volumen de producción) el principal proceso donde se utiliza el agua es en la concentración.

En la región de Antofagasta el consumo de agua continental en el proceso de concentración representa el 45%, mientras la hidrometalurgia abarca el 25% del uso de aguas continentales, sin embargo, en el resto de las regiones el uso de agua continental destinado al proceso de concentración supera el 60%, alcanzando incluso el 80% en algunas regiones. (cochilco, 2018)

Por lo tanto la búsqueda de metodologías para reducir los consumos de agua debiese ir enfocada en desarrollar tecnologías y/o soluciones orientadas a la línea de minerales de sulfuros para reducir el consumo de agua en su procesamiento.

**CAPITULO 2: CARACTERIZAR EL SISTEMA DE FLOTACION
POR AIRE DISUELTO MEDIANTE VARIABLES
OPERACIONALES, INDICANDO VARIABLES A MEJORAR
DEL PROCESO PRODUCTIVO TRADICIONAL**

2.1 SISTEMA DE FLOTACION POR AIRE DISUELTO

La flotación por aire disuelto es uno de los procesos más versátiles y eficaces en el tratamiento de las aguas, La flotación por aire disuelto o DAF (Dissolved Air Flotation) es uno de los procesos más empleados cuando hablamos de tratamientos de aguas de todo tipo, ya sean residuales, industriales, urbanas, reutilización de aguas y procesos de desalinización. El sistema de flotación DAF tiene distintos tipos de puntos en la línea de tratamiento de aguas debido a múltiples posibilidades de diseños de los flotadores.

En muchas ocasiones, La unidad de flotación por aire disuelto se coloca al final de la línea de aguas como clarificador final antes de enviar el vertido al medio natural. Cuando hablamos de desalinización donde la fibra de vidrio esta consolidándose como material de construcción, funciona también como protector de las membranas ante la presencia de algas en el agua, así mismo los flotadores por aire disuelto se pueden instalar en la cabeza de la línea de fangos como espesadores de lodos para reducir su volumen.

La flotación por aire disuelto se basa en el proceso físico-químico que separa las partículas solidas de las liquidas mediante la adición de burbujas de aire muy finas, estas burbujas se adhieren a las partículas solidas y les da la capacidad de ascensión y a una gran velocidad. Una vez que las burbujas llegan a la superficie, los solidos o fangos son arrastrados mecánicamente hasta una tolva.

Se calcula que la flotación por aire disuelto proporcione una velocidad de ascensión 5 veces mayor a la velocidad de decantación que se produce cuando tratamos con un decantador convencional, esto nos ayudaría a tener un ahorro de tiempo y espacio debido a las dimensiones del sistema de flotación por aire disuelto. (iAgua, 2018)

2.1.1 Coagulación y Floculación

El agua residual se bombea de manera constante directamente al tubo floculador, este es un tubo en forma de serpentín que facilita la mezcla de los reactivos con el agua, Allí se le añade coagulante. Este producto químico tiene la capacidad de desestabilizar las partículas suspendidas o coloides para facilitar la posterior separación Solido-Líquido.

Algunos coagulantes mas empleados en el tratamiento de aguas son el sulfato de aluminio, sulfato ferroso, sulfato ferroso, cloruro férrico o policloruro de aluminio.

Luego, en el mismo tubo se le añaden los floculantes. Esto es un polímero que tiene carga inversa a la del agua residual que atrae los flóculos o coloides de menor tamaño para formar otros mas grandes. De esta manera las microburbujas de aire se adhieren a los flóculos de mayor tamaño formando partículas con una densidad menor que la del agua y haciendo posible la flotación.

2.1.2 Limpieza de Fango

Una vez realizada la separación de los solidos y los líquidos. Una parte del agua tratada que es aproximadamente el 30%, es recirculada para ser mezclada con el agua residual. Un estudiado sistema de inyectoras reparte la presión del agua saturada en el flotador para que las burbujas generadas en la superficie tengan el tamaño optimo para que favorezcan la flotabilidad de los flóculos.

Ya en la superficie de nuestro flotador, un sistema de rasquetas arrastra la cama de fangos que se genera en la parte superior del flotador hasta la tolva, esta recoge los lodos y el agua clarificada que sale del flotador por el lado opuesto. Mientras sucede este proceso, las partículas mas pesadas o las que no hayan sido capaces de alcanzar una densidad menor que la del agua, quedan retenidas en la cámara de sedimentos desde donde son recirculadas al comienzo de la línea para recibir un tratamiento oportuno. (iAgua, 2018)

2.2 PROCEDIMIENTOS DEL SISTEMA DE FLOTACION POR AIRE DISUELTO (DAF)

El agua residual que entra en el sistema de flotación por aire disuelto es bombeada a un flujo constante al proceso de coagulación – floculación ingresando al floculador. El equipo floculador suele ser un tubo especialmente diseñado para esta labor. Es aquí donde se dosifica un coagulante justo antes del mezclador estático, el cual proporciona la superficie necesaria dentro de la tubería para que ocurra la reacción. La coagulación es la desestabilización de las partículas suspendidas y/o coloidales en el agua residual como lo

mencionamos anteriormente. El resultado de este proceso es la separación de los sólidos desde el agua para formar microflocs que generalmente tienen una carga eléctrica positiva.

Posteriormente, se le inyecta un floculante dentro de la tubería, junto antes del segundo mezclador estático. El floculante es un polímero de carga opuesta que atrae los microflocs cargados positivamente. La floculación es la aglomeración de microflocs que aumenta el tamaño del floc que son macroflocs haciendo posible la flotación al inyectarle aire disuelto

Inmediatamente después de la coagulación-floculación, el agua residual floculada es inyectada a una corriente de agua clarificada, que recircula desde la maquina DAF. Esta agua está sobresaturada de burbujas de aire, estas microburbujas se adhieren a los flocs formando partículas de menor densidad que el agua, produciendo la flotación en el sistema DAF.

Luego que se le agregaron químicos o coagulantes al DAF, se considera también un ajuste de pH previo a la entrada del sistema de la misma forma a la utilizada en el ecualizador, es decir un sensor de pH conectado a un sistema de dosificación, pero en este caso solo de base.

En el proceso de flotación se produce la fijación artificial de las burbujas de aire sobre las partículas sólidas, esto les da una velocidad de ascensión al conjunto partículas-gas formado muy rápida.

Como dijimos anteriormente, esta flotación es de al menos 5 veces más rápida que una decantación convencional. Este sistema además permite que se formen aglomerados de partículas de gas que, como racimos forman conjuntos que duplican la velocidad de la ascensión inicial. El resultado es una rápida eliminación de la carga de sólidos.

Los aglomerados de aire y partículas suben a la superficie del flotador donde tiene lugar una continua deshidratación, antes de ser descargados por el rascador superficial al interior del colector. El rascador está accionado por un motor variador. Las partículas pesadas como arenas quedan en el compartimiento de sedimentación, construido en el fondo. Una

válvula accionada neumáticamente retira el fango formado que a través de un arenero vuelve a la homogenización.

La retirada de fangos flotados puede hacerse por simple gravedad, ya que la salida de fangos esta colocada mas o menos a 1 metro de altura, pero siempre que se necesite se puede elevar el flotador mediante zapatas para poder retirar dichos fangos sin necesidad de bombeo.

2.3 MODELO DE MAQUINA DAF

A continuación, se presenta una imagen para describir el proceso de los sistemas de flotación por aire disuelto de la empresa Toro. (Equipament, 2020)

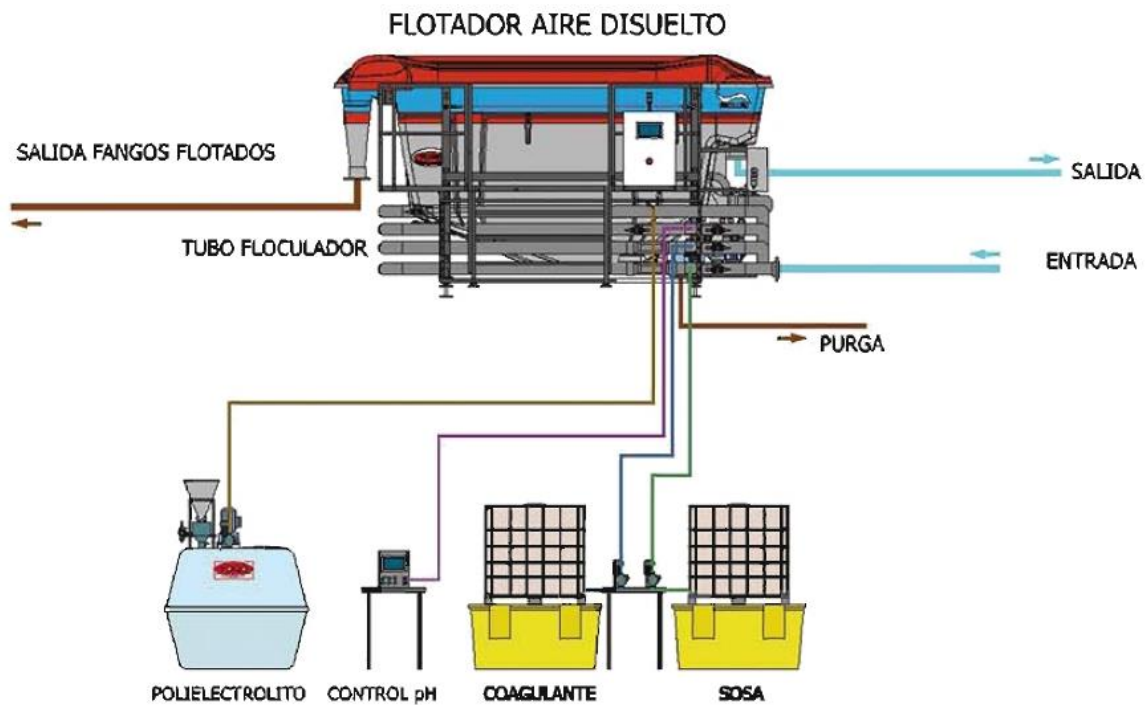


Figura 2.1: Modelo de maquina DAF Toro

Fuente VI: Toro (2020)

En la figura anterior, podemos apreciar la máquina de flotación por aire disuelto junto con sus partes como Salida, entrada, salida de fangos flotados, tubo floculador, polielectrolito, control de pH, coagulante, sosa y la purga.

A continuación, enseñare algunas imágenes reales de algunos modelos de las máquinas de flotación por aire disuelto de la empresa Toro.



Figura 2.2: Previsualización de máquina de flotación por aire disuelto
Fuente VII: Toro Equipament (2020)



Figura 2.3: Previsualización de máquina de flotación por aire disuelto
Fuente VIII: Toro Equipament (2020)



Figura 2.4: Previsualización de máquina de flotación por aire disuelto
Fuente IX: Toro Equipament (2020)

2.3.1 Maquina DAF modelo 2D

Las siguientes imágenes nos ayudan a complementar la idea de cómo es la maquina en una versión 2D a escala. (Equipament, 2020)

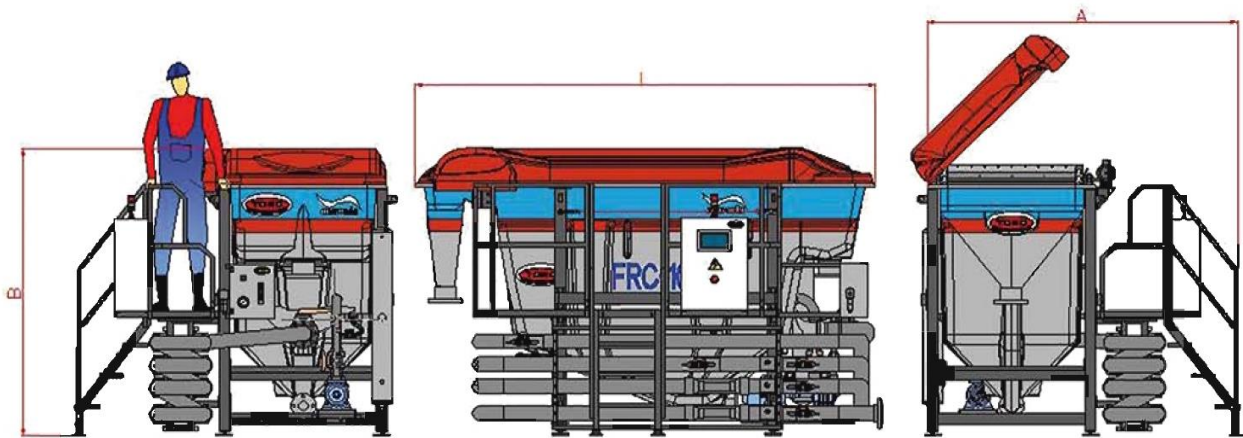


Figura 2.5: Modelo 2D Maquina DAF
Fuente X: Toro Equipament (2020)

2.3.2 Ficha técnica de modelos

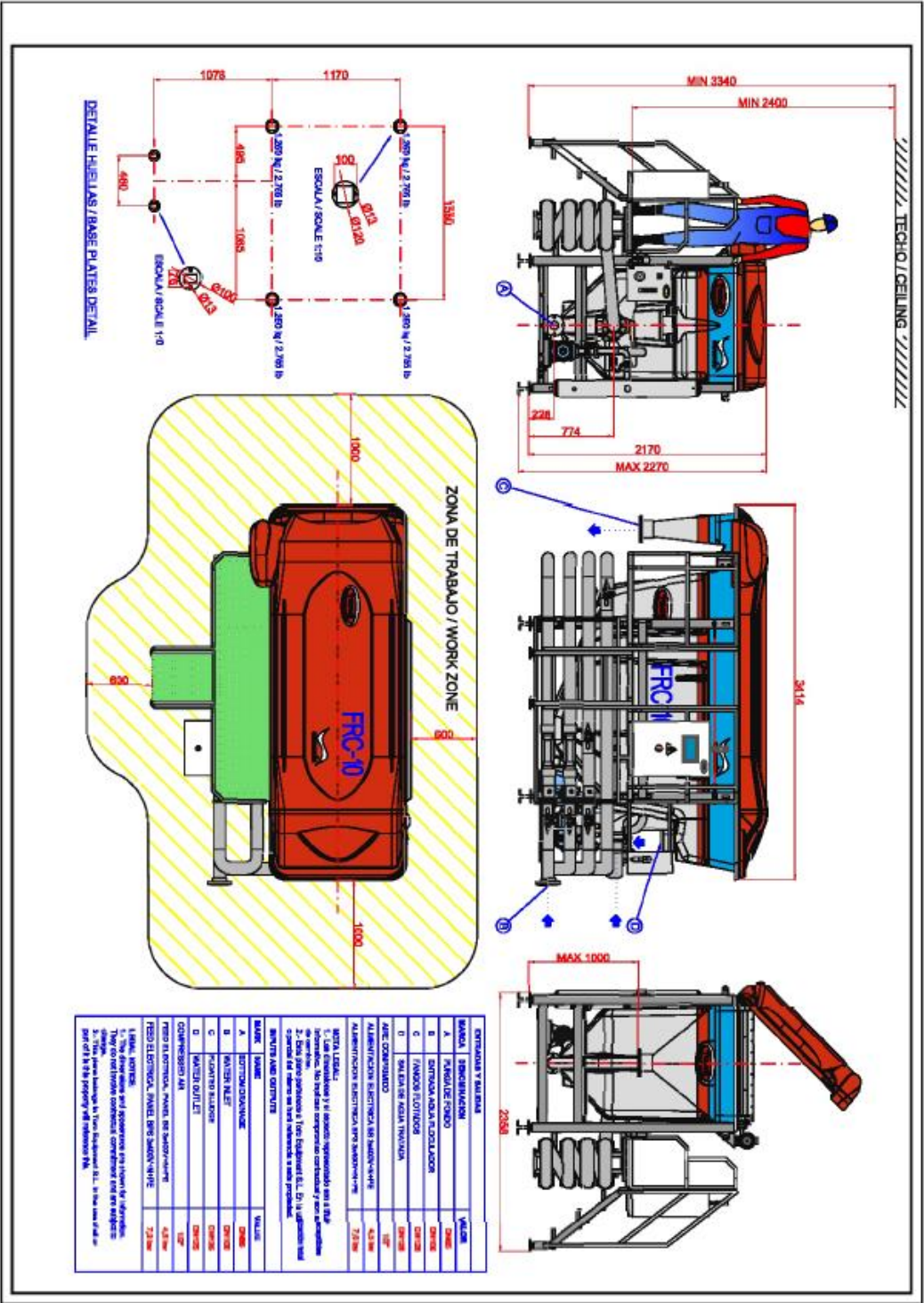
Las siguientes son fichas técnicas de los modelos de los sistemas de flotación por aire disuelto (DAF) de modelos comercializados por la empresa Toro donde vemos las dimensiones juntos a la cantidad de agua de entrada y salida.

Modelo	FRC-2	FRC-5	FRC-10	FRC-15*	FRC-20*	FRC-40*	FRC-80*
Caudal nominal m³/h 2		5	10	15	20	60	100
Dimensiones							
Anchura máxima A (mm.)	795	1.885	1.805	1.885	1.845	2.546	3.295
Altura máxima B (mm.)	1.300	2.525	2.525	2.525	2.525	2.525	2.525
Longitud L (mm.)	2.120	2.330	3.360	4.670	5.900	7.200	9.200
Espacio necesario (m)	3,5x2	3,7x3	4,7x3	6x3	7x3	8,5x4	10,5x4,6
Potencia total instalada, Kw	2,7	4,1	4,1	4,1	4,1	7,55	13,75
Diámetros							
Entrada de agua (mm.)	63	110	110	125	160	200	2x200
Salida de agua (mm.)	63	110	110	125	160	200	2x200
Salida fangos (mm.)	110	125	125	125	160	200	200
Purga de fondo (mm.)	63	75	75	90	90	2x110	200

Tabla 1: Ficha técnica de modelos DAF

Fuente XI: Toro Equipament (2020)

2.3.3 Plano de la maquina FRC-10



2.4 REDUCCION DE AGUA DAF

Esta máquina de flotación por aire disuelto (DAF) tiene una capacidad de 30-130 m³/h por lo que, si utilizamos el sistema DAF al 100% de su capacidad, veremos qué porcentaje de agua disminuye a rasgos generales, si el sistema de flotación por aire disuelto (DAF) fuera utilizado en Chile.

La maquina siendo utilizada a su máxima potencia, es capaz de procesar 130m³/h lo que en vendría siendo un aproximado de 0,04m³/s.

Si tomamos en cuenta que el agua recirculada y el agua continental utilizadas el año 2019 fue de 53,32 m³/s y 12,45 m³/s, al implementar el sistema de flotación por aire disuelto (DAF) aumentaría el agua recirculada en 53,36 m³/s.

**CAPITULO 3: ANALIZAR LAS MEJORAS ALCANZABLES
POR EL SISTEMA PROPUESTO, COMPARANDO CON LAS
PROYECCIONES DE CONSUMO DE AGUA, PARA VALORAR
LA PROPUESTA**

3.1 CONSUMO DE AGUA EN CHILE

En Chile, la industria minera es el sector más importante en la economía del país, el cual represento un 9,4% del PIB en el año 2019 y durante el mismo año las exportaciones mineras representaron un 55,2% de las exportaciones totales.

Como muchos sabemos, el agua es un recurso valioso y estratégico ya que es esencial para el procesamiento de minerales. Para que sepamos, el consumo que utiliza la minería en Chile alcanza el 3% según información oficial facilitada por dirección General de Aguas (DGA), y siendo el sector con mayor consumo de agua el agropecuario.

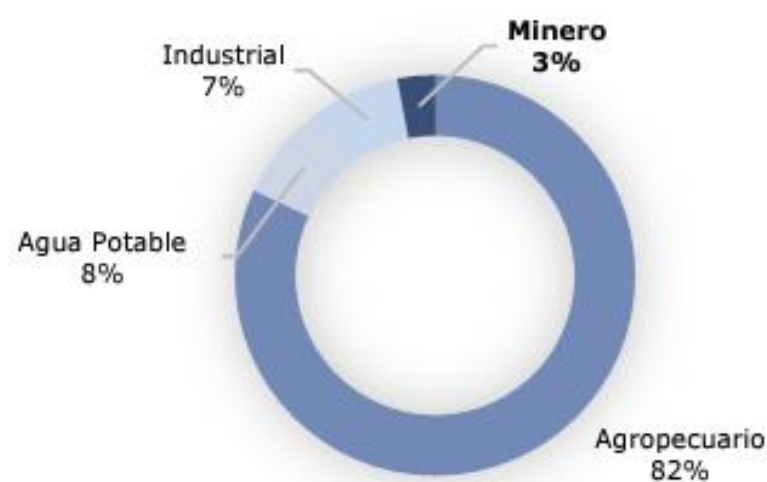


Figura 3.1: Consumo de agua en Chile 2019

Fuente XV: Cochilco (2019)

Si comparamos el consumo de agua del año 2018 con el año 2019, nos podemos dar cuenta que, en términos desagregados, las aguas continentales presentan una clara disminución del 6,8%, por otra parte, las aguas de mar y recirculadas se ven en aumento un 1,5% y 15%, respectivamente.



Figura 3.2: comparación de consumo de agua año 2013-2019
Fuente XVI: Cochilco (2019)

3.1.1 Consumo unitario de agua continental por proceso minero a nivel nacional

En el siguiente grafico podemos ver una evolución unitaria desde el año 2012 a 2019, en el año 2019 el consumo unitario en el proceso de concentración fue de 0,36 m3/ton mineral, y en cuanto al consumo de la hidrometalurgia fue un 0,11 m3/ton mineral, Ambos al igual que el año anterior.

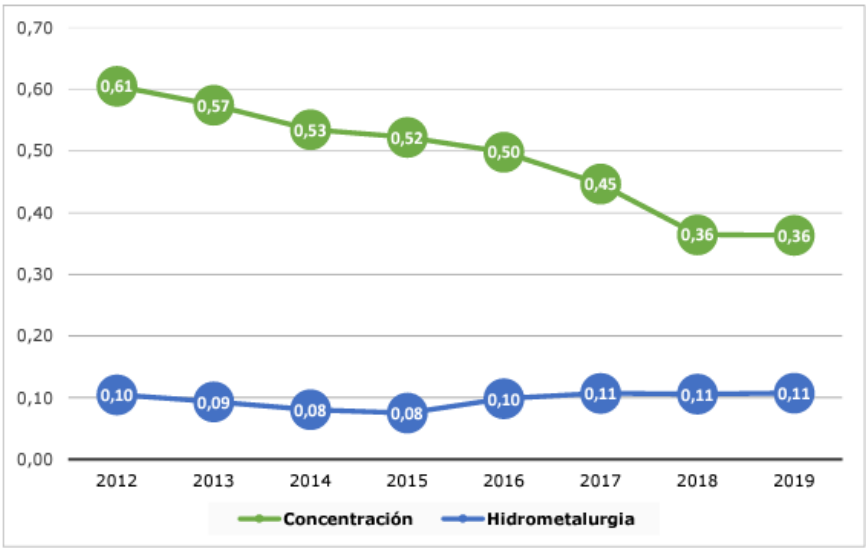


Figura 3.3: Consumo unitario de aguas en la concentración e hidrometalurgia
Fuente XVII: Cochilco (2020)

Cuando nos fijamos en la concentración, podemos darnos cuenta de que hay una fuerte disminución en el coeficiente unitario, incluso en los últimos 2 (dos) años se mantiene constante en los niveles más bajos. Esto se debe principalmente a que, aun cuando la cantidad de mineral en general ha crecido, el consumo de agua continental no lo ha hecho a su par, con esto nos referimos a que, para procesar una tonelada de mineral de sulfuros, necesita menos agua que el año anterior.

Es un punto para considerar que en los últimos años como lo hemos visto anteriormente el agua de mar ha ido en aumento, esto significa un gran porcentaje importante como fuente de abastecimiento para las empresas mineras, en consecuencia, las fuentes de aguas continentales han sido reemplazadas por el agua de mar cada vez más.

3.2 RECIRCULACION DE AGUA

Un indicador clave cuando nos referimos a la gestión de recursos hídricos en la minería de cobre, es el porcentaje de recirculación. Los excesos de agua en el procesamiento de minerales puede ser reutilizado dentro de otro proceso o en etapas diferentes donde se necesite, un ejemplo de esto sería en la molienda fina. Como resultado se produce un ahorro importante mediante la optimización del uso del recurso y reducción en los volúmenes de aguas que deben ser tratadas previo a su descarga.

A continuación, analizaremos la recirculación en las operaciones como en la concentración.

3.2.1 Recirculación en operaciones

Este porcentaje lo podemos calcular como el total de aguas recirculadas que entran a la operación, esto dividido por el flujo de aguas totales que entran, independientemente de su fuente de origen.

$$Recirculación_{total} = \frac{total\ de\ aguas\ recirculadas\ en\ la\ operación}{flujo\ total\ de\ aguas\ que\ ingresan\ a\ la\ operación} [\%]$$

Figura 3.4: Ecuación para calcular las aguas recirculadas en operaciones
Fuente XVIII: Cochilco (2020)

La tasa de recirculación a nivel nacional para las faenas del 2019 es de un 76,4% ponderado según la producción de cada región. Este porcentaje representa un 5% de aumento respecto al 2018, lo cual nos da a entender que la gestión realizada por las empresas mineras potencian la cantidad de aguas recirculadas desde sus procesos.

Para el caso de los minerales de sulfuros, se maximiza la recirculación desde los tanques de relaves y espesadores, Evitando fugas y minimizando evaporaciones es posibles alcanzar bajos valores de consumo.

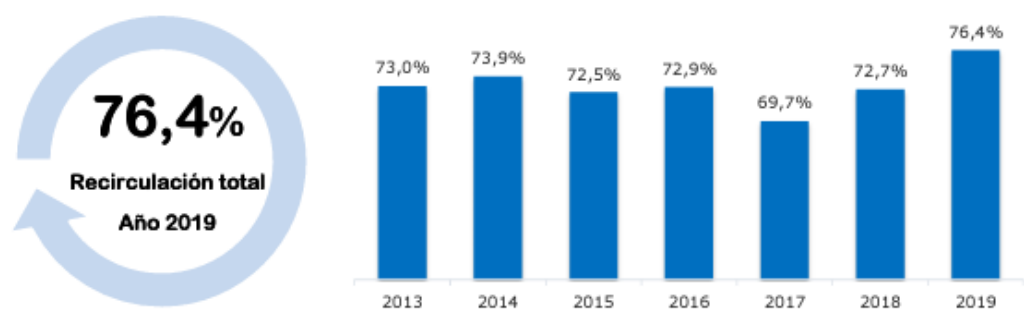


Figura 3.5: Porcentaje de recirculación del año 2019
Fuente XIX: Cochilco (2020)

3.2.2 Recirculación en planta concentradora

El indicador de recirculación en planta concentradora se calcula por el total de agua utilizada en el proceso incluyendo la recirculación y el flujo neto de las reservas de agua que se utilizan en la misma, utilizando la siguiente ecuación.

$$Recirculación_{concentración} = \frac{total\ de\ aguas\ recirculadas\ en\ el\ proceso\ de\ concentración}{flujo\ total\ de\ aguas\ utilizadas\ en\ la\ planta\ concentradora} [\%]$$

Figura 3.6: Ecuación para recirculación de aguas en la concentración
Fuente XX: Cochilco (2020)

Cuando hablamos de la recuperación de aguas en el proceso de concentración, las aguas deben de ser maximizadas en su utilización para poder minimizar el consumo total de aguas continentales y poder disminuir la cantidad de descarga de aguas, este al ser un proceso intensivo cuando hablamos de agua es necesario reutilizar la mayor cantidad de agua posible sobre todo en el proceso de flotación, en este proceso es donde mas consumo de agua se produce.

A nivel nacional la recirculación en plantas concentradoras tiene una tasa que ocupa el 74,8% representando un aumento del 0,6% haciendo una comparación con el año 2018, esto demuestra una gestión de las empresas de minería en continuar fomentando y aumentando la cantidad de aguas recirculadas en las plantas concentradoras, esto con el fin de llegar a utilizar menos agua uno de los procesos mas importantes de sulfuros. En el siguiente grafico veremos la recirculación de agua en el proceso de concentración de los años 2013 y 2019.

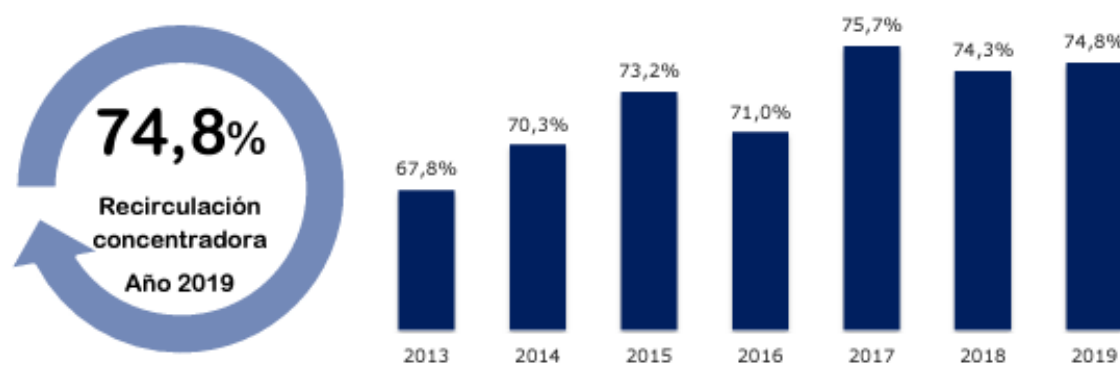


Figura 3.7: Porcentaje de recirculación en la concentración 2019
Fuente XXI: Cochilco (2020)

3.3 UTILIZACION DE AGUA DE MAR EN LA MINERIA

En Chile, Debido a la poca disponibilidad del recurso hídrico y la crisis hídrica en la zona norte de nuestro país donde se concentra la mayor actividad minera, ha motivado a las empresas mineras a utilizar otras fuentes de agua para continuar trabajando y así también mantener propuestas de valor que se les ofrecieron a las comunidades donde estas operan. La implementación de agua de mar en las empresas mineras a llegado a distintas tecnologías para poder tener una mejor utilización de este recurso hídrico, junto con una considerable disminución de las aguas continentales.

Teniendo esto claro, la utilización de agua de mar ya sea salada o de uso directo, ya es un factor a considerar en distintos tipos de evaluaciones de proyectos y una solicitud constante de la comunidad del sector para mantener la sustentabilidad en el ámbito social del mismo.

En la siguiente figura, se aprecia una gran alza en el consumo de agua de mar desalada o salobre de los años 2010 a 2019, donde tiene una tasa de crecimiento promedio anual de 43%.

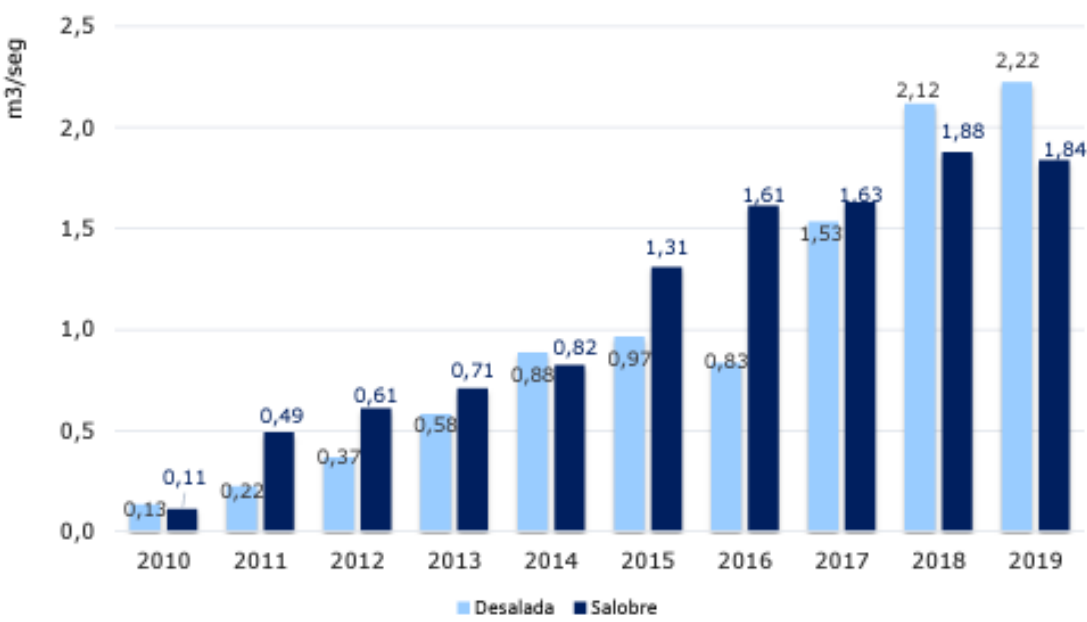


Figura 3.8: Consumo de agua Salobre y Desalada

Fuente XXII: Cochilco (2020)

En el año 2019 el agua de mar utilizada en minería alcanzo 4,06 m³/seg, esto representa un 25% del agua utilizada en la minería según la fuente de abastecimiento, del consumo anterior, 1,84 m³/seg son de aguas de mar que fueron utilizadas directamente en el proceso, estas contienen una gran cantidad de sal, por otra parte, el 2,22 m³/seg corresponde al agua utilizada previamente desalinizada, si comparamos con el año anterior (2018) el consumo de agua tiene un alza del 1,7%. Es necesario mencionar de agua de mar se concentra en las regiones de Antofagasta y Atacama, representando un 90% y un 10% respectivamente.

3.4 PROYECCION DEL CONSUMO DE AGUA 2020-2031

En este apartado mi trabajo realizare una proyección del consumo del agua tanto en consumo de agua continental como agua de mar que han ido variando en los últimos años disminuyendo cada vez más el agua continental y por otra parte aumentando el consumo de agua de mar en los procesos de la gran minería.

La proyección que se realizó en este estudio se basa en la producción de cobre que realiza Cochilco, los coeficientes unitarios de consumo de agua para obtener la demanda futura en un determinado periodo. (Cochilco, Proyecciones de consumo de agua, 2020)

Este estudio se basó en los consumos unitarios de cada faena en cada proceso; los perfiles de producción máximos determinador por las inversiones mineras, y la probabilidad de materialización de dicha cartera. Es por esto que la proyección es un elemento fundamental ya que este nos lleva a la proyección de agua, ya que determina el mineral procesado y pasa a producción de cobre fino.

Como resultados, se espera que para el año 2031 el consumo de agua total a nivel nacional sea de 23,3 m³/seg, con una tasa de crecimiento anual de 2,2%. Se estima también que el agua de origen continental sea de un 12,4m³/seg en el año 2031, lo que representaría una disminución de un 4% respecto al consumo del 2020.

En el caso del agua de mar, la situación cambia en referencia al agua continental ya que en la media el consumo de agua continental es una tasa que va decreciendo con un promedio anual cercano al -0,3%, y el agua de mar se nota un crecimiento en la tasa promedio de un 6%, alcanzando los 10,9m3/seg para el año 2031. (Cochilco, Proyecciones de consumo de agua, 2020)

También es importante mencionar que en este grafico se ve una inclinación hacia los minerales de sulfuros, estos son procesados por la flotación y este proceso es el mas intensivo en el uso agua

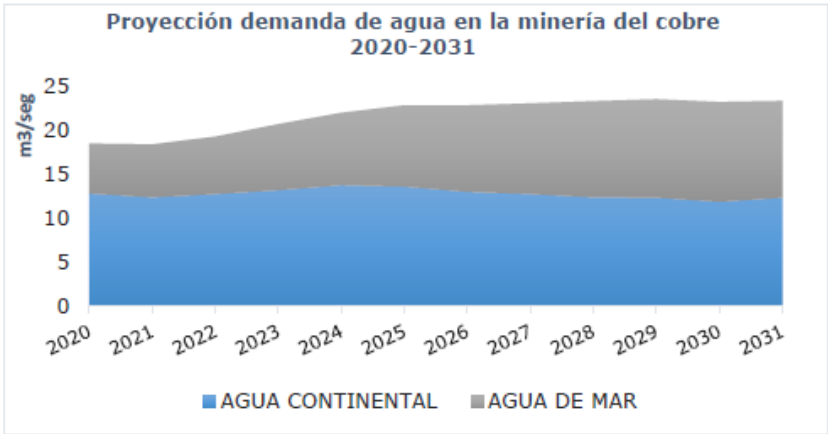


Figura 3.9: Proyección de la demanda de agua en la minería de cobre 2020-2031
Fuente XXIII: Cochilco (2020)

3.5 PROYECCION DE COBRE

Para poder realizar una correcta proyección de agua debemos también analizar la cantidad de agua que es requerida para la producción de cobre, esta proyección está fundamentada en la condicionalidad de materialización de los proyectos incluidos en la cartera de inversiones del año 2020.

Los resultados de la proyección anterior de cobre esperado para el periodo de 2020-2031 nos muestran que, en comparación con la producción real del año 2019, hay un aumento

de 22,6% hacia el cierre del periodo de análisis. Esto quiere decir que Chile alcanzaría una producción de cobre de 7,095 Millones de toneladas al año en 2031, teniendo esta una tasa de crecimiento promedio de 1,7% hasta llegar a un tope en el año 2028 de 7,35 millones de toneladas teniendo una tasa de crecimiento del 2,7% en comparación con el año 2019.

Figura 26: Proyección de cobre año 2019-2031

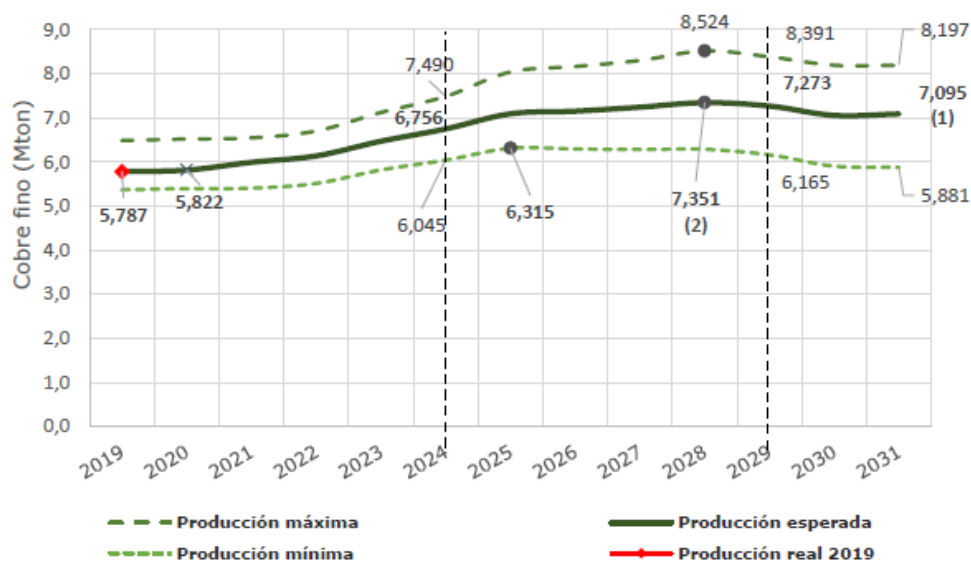


Figura 3.10: Proyección de cobre año 2019-2031

Fuente XXVI: Cochilco (2020)

Observando la proyección podemos observar la producción máxima de cobre en la parte superior, esto sin aplicar la condicionalidad de las iniciativas y sobre la base que todos los proyectos mineros considerados en esta proyección son ejecutados sin cambio en sus propuestas, alcanzaría un 8,2 millones de toneladas de cobre fino en 2031, esto equivale a un 47,35 mas de la producción real del año 2019, esta, con un aumento anual del 4,4% con respecto al año base (2019), alcanzando un máximo en el año 2028 de 8,58 millones de toneladas. (Cochilco, consumo de agua en la minería de cobre, 2019)

En la parte inferior del grafico vemos la producción mínima de cobre, esta corresponde a la producción de los proyectos que fueron considerados en la cartera, pero aplicados la ponderación mínima, lo que nos daría como resultados un 8,7% mayor hacia el año 2031 con relación a la producción del año 2019, llegando a los 5,88 millones de toneladas de cobre fino.

3.6 AHORRO DE MAQUINA DAF

Teniendo en cuenta los estudios y proyecciones mencionados anteriormente sobre el consumo de agua estimado que será utilizado en la minería para los años 2019 – 2031 podemos hablar de que nuestra maquina DAF utilizándola al 100% de capacidad será de utilidad al momento de la recirculación de las aguas en los procesos anteriores.

Como fue mencionado anteriormente, la máquina que utilizaremos de ejemplo posee una capacidad de limpieza de entre 30 – 130 m³/h esta misma maquina si fuese utilizada a nivel general en la minería chilena, lograría llegar a ser de gran ayuda con relación al agua utilizada en la mina y alivianando costos por extracción de agua dado que esta máquina logra recircular 3,120m³ diarios.

Un buen complemento para este proceso sería una desalinizadora, para aumentar la eficiencia del sistema de flotación (DAF) y así lograr tener agua potable junto con agua recirculada de los procesos de flotación o molienda.

3.7 DESALINIZADORAS

La desalinización o también conocida como desalación de agua, tiene como objetivo del proceso el tratamiento de agua tanto salobre o de mar, para convertirla en agua potable, este proceso tiene distintos métodos de empleo, pero el más utilizado Globalmente es el proceso de Osmosis inversa.

3.7.1 Osmosis inversa

La osmosis inversa es el sistema de desalinización más avanzado hasta la fecha, la osmosis es un fenómeno físico por el cual hay dos líquidos separados por una membrana semi permeable con una diferente concentración esta tiende a igualarse, el líquido con menor concentración atraviesa la membrana hacia el de mayor concentración.

osmosis inversa se le aplica una solución de gran concentración junto con una alta presión al agua de mar, así esta pasara a través de la membrana dejando así al otro lado de la membrana agua sin sal mientras que en el lado original queda la agua restante salada que la membrana evita.

CONCLUSION

Los procesos vistos anteriormente son los más comunes en la minería chilena, de los procesos previos utilizaremos el proceso de flotación, para implementar nuestra máquina de flotación por aire disuelto, la cual vemos en el capítulo dos, también podemos ver, en breves palabras, el consumo de agua a nivel nacional en el año 2019.

El sistema de flotación DAF presentado en el segundo capítulo se propone como una solución a largo plazo para disminuir gastos, recirculando el agua utilizada en el proceso de flotación que fue elegido en el primero capítulo. También observamos los planos y especificaciones técnicas de la misma, así como también vemos a rasgos generales el ahorro que puede conceder nuestro sistema de flotación por aire disuelto en un mina común.

Luego de ver las proyecciones de agua, junto con su consumo en Chile, podemos ver que, a medida que transcurren los años, la recirculación de agua junto con la utilización de agua de mar son cada vez más comunes, dado que con el transcurso tiempo van apareciendo máquinas que permiten la utilización de agua salada en la minería, una de estas es el sistema DAF que acompañado de una desalinizadora tiene la capacidad de recircular el agua de mar junto con el agua recirculada de los procesos de flotación o molienda reinsertándolos en distintos módulos.

Para concluir esta propuesta cabe destacar que el sistema de flotación por aire disuelto es un buen método, actualmente se utiliza en distintos tipos de industrias para la recuperación de aguas como mataderos, industrias de papel, lecherías etc.

La razón de la propuesta es que, dadas las condiciones mundiales, es importante tener conciencia sobre la cantidad de agua que se utiliza, es por esto que se propone un sistema para la reutilización del agua en distintos procesos mineros.

Si bien la máquina no es rentable a corto plazo, si lo es a largo plazo, ya que la capacidad de ahorrar agua permite ayudar al ambiente junto con reducir costos referidos al agua consumida por la mina, además de ser capaz de recircular el agua para ser utilizada de

forma productiva, ya sea en operaciones o en diferentes procesos donde es requerida la misma.

Actualmente nuestro país atraviesa por una crisis de escasez hídrica que podría llegar incluso a considerar racionar la cantidad de agua que se usa, debido a esta problemática la implementación de un sistema que recupere el agua perdida puede proporcionar una mejor visión a futuro de su uso tomando en cuenta las cantidades de agua que utiliza la minería.

Bibliografía

- Andino. (2015). Obtenido de <https://www.elandino.cl/division-andina-ocupa-el-equivalente-a-solo-el-3-de-agua-del-rio-aconcagua/>
- cochilco. (2018). *Agua utilizada en la minería de cobre*. Obtenido de <https://www.cochilco.cl/Listado%20Temtico/Consumo%20de%20agua%20en%20la%20mineria%20del%20cobre%20al%202018%20-%20Version%20Final.pdf>
- Cochilco. (2019). *consumo de agua en la minería de cobre*. Obtenido de https://www.cochilco.cl/Listado%20Temtico/2020%2010%2030%20Consumo%20de%20agua%20en%20la%20mineria%20del%20cobre%20al%202019_version%20final.pdf
- Cochilco. (2020). *Proyecciones de consumo de agua*. Obtenido de https://www.cochilco.cl/Listado%20Temtico/2020%2012%2024%20Proyeccion%20agua%20mineria%20del%20cobre%202020-2031_v1.0.pdf
- Codelco. (2010). Obtenido de <https://www.codelco.com/andina>
- Equipament, T. (2020). Obtenido de <https://toroequipment.com/es/dissolved-air-flotation/>
- iAgua. (2018). *iAgua*. Obtenido de <https://www.iagua.es/noticias/toro-equipment/que-es-flotacion-aire-disuelto-o-daf>