



**UNIVERSIDAD ANDRÉS BELLO
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA CIVIL EN MINAS**

“EVAPORACIÓN MECÁNICA DE SALMUERAS DE LITIO”

SEBASTIÁN ANDRÉS COLLAZO URRUTIA

PROFESOR GUÍA: Ph.D. SERGIO RIVERA OLIVARES

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL EN MINAS**

**SANTIAGO – CHILE
DICIEMBRE, 2017**



FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA CIVIL EN MINAS
DECLARACIÓN DE ORIGINALIDAD Y PROPIEDAD

Yo, **Sebastián Andrés Collazo Urrutia**, declaro que este documento no incorpora material de otros autores sin identificar debidamente la fuente.

Santiago, _ Diciembre de 2017

Firma del alumno

AGRADECIMIENTOS

Me gustaría expresar mis agradecimientos en primer lugar a mi profesor guía de memoria, profesor Sergio Rivera, con el cual hemos podido llevar a cabo la fase inicial de un proyecto de gran envergadura, para el futuro de la minería no metálica chilena.

Agradezco a mi familia el apoyo incondicional que me han brindado en esta gran etapa de mi vida e inicio de mi carrera profesional como ingeniero civil de minas.

Del mismo modo agradezco a todas las personas que participaron en mi formación como profesional, al cuerpo docente de la Universidad Andrés Bello, a mis amigos y compañeros.

Finalizando agradezco a SQM especialmente a Osvaldo Yañez y a María Teresa Petit-Laurent por el conocimiento entregado y el tiempo destinado a nuestras reuniones.

Índice general

I. INTRODUCCIÓN.....	6
Motivación	8
Contribución del trabajo	8
Objetivos	9
Objetivos Generales	9
Objetivos específicos	9
Organización y presentación de este trabajo	10
Capítulo II: Metodología y desarrollo.....	10
Capítulo III: Identificación de problemas	10
Capítulo IV: Ingeniería del proyecto	10
Capítulo V: Discusión de resultados y conclusiones generales	10
Capítulo VI: Anexos	10
II. METODOLOGÍA Y DESARROLLO	11
Problema	11
Mejoras	11
Limitaciones y alcances del proyecto	12
Limitaciones del proyecto.....	12
Alcances del proyecto	12
Principales entidades públicas presentes en la industria del litio	13
III. IDENTIFICACIÓN DE PROBLEMAS Y OPORTUNIDADES DE MEJORA	14
Oportunidades de mejora.....	14
IV. INGENIERÍA DEL PROYECTO	15
Marco teórico	15
Evaporación y saturación de salmueras	15
SQM.....	16
Rockwood	17
Ventajas y desventajas proceso actual	18
Propuesta	19
Evaporadores.....	19
Cristalizadores.....	20
Modelo de simulación de pozas	22
Poza de NaCl.....	26
Poza de NaCl + KCl.....	27
Poza carnalita + NaCl + KCl.....	28
Poza bischofita + NaCl	29
Resumen modelo de simulación.....	30
Tiempos de residencia.....	30
Tiempo de ahorro por poza	32
Diagrama ternario Mg-Na-K.....	36

V. DISCUSIÓN DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES GENERALES	38
VI. BIBLIOGRAFÍA.....	40
VII. ANEXOS	41
Áreas pozas de evaporación.....	41
Modelo de Pitzer	41

Índice de figuras

Figura 4.1: Área evaporación SQM, Fuente: SQM	16
Figura 4.2: Proceso Rockwood, Fuente: Rockwood.....	17
Figura 4.3: Evaporador sobre-alimentado, Fuente: Ciclo Formativo Grado Superior de Mantenimiento de Instalaciones Térmicas y de Fluidos	20
Figura 4.4: Cristalizador evaporador, Fuente: Textoscientificos.com	22
Figura 4.5: Modelo de Evaporación, Fuente: Elaboración propia	23
Figura 4.6: Modelo simplificado, Fuente: Elaboración propia	24
Figura 4.7: Diagrama ternario H ₂ O+-Na-K, Fuente: Elaboración propia	25
Figura 4.8: Tonelajes Poza NaCl, Fuente: Elaboración Propia	26
Figura 4.9: Tonelajes Poza NaCl+KCl, Fuente: Elaboración propia	27
Figura 4.10: Tonelaje poza de carnalita, Fuente: Elaboración propia	28
Figura 4.11: Tonelajes poza de bischofita, Fuente: Elaboración propia	29
Figura 4.12: Grafico Poza NaCl, Fuente: Elaboración propia	33
Figura 4.13: Grafico poza NaCl+KCl, Fuente: Elaboración propia	34
Figura 4.14: Grafico poza carnalita, Fuente: Elaboración propia.....	35
Figura 4.15: Grafico poza bischofita, Fuente: Elaboración propia.....	36
Figura 4.16: Diagrama ternario Mg-Na-K, Fuente: Elaboración propia	37

Índice de tablas

Tabla 4.1: Concentración diagrama ternario, Fuente: Elaboración propia	25
Tabla 4.2: Tonelajes por hora, Fuente: Elaboración propia	30
Tabla 4.3: Consideración tiempo de residencia, Fuente Elaboración propia	30
Tabla 4.4: Tiempos de residencia, Fuente: Elaboración propia	31
Tabla 4.5: Producción teórica de equipos, Fuente: Elaboración propia	31
Tabla 4.6: Cantidad de equipos, Fuente: Elaboración propia	32

Tabla 4.7: Crx poza NaCl, Fuente: Elaboración propia.....	32
Tabla 4.8: Crx poza NaCl+KCl, Fuente: Elaboración propia.....	33
Tabla 4.9: Crx poza carnalita, Fuente: Elaboración propia	34
Tabla 4.10: Crx poza bischofita, Fuente: Elaboración propia.....	35
Tabla 7.1: Áreas de evaporación, Fuente: Elaboración propia	41
Tabla 7.2: Relación magnesio-litio, Fuente: Elaboración propia	41

I. INTRODUCCIÓN

El mercado mundial del litio, se encuentra en una etapa fundamental dando perspectivas favorables en cuanto al futuro de este. Impulsado principalmente por los adelantos tecnológicos en la generación de fuentes de almacenamiento energético en relación concordante con el futuro del mercado automotriz y las fuentes de obtención de energía eléctrica renovables, mostrando directrices en cuanto a la posible demanda del metal blanco.

A nivel mundial el litio se puede obtener principalmente mediante dos tipos de procesos, minería convencional (rajo o tajo abierto) método usado en países tales como Estados Unidos, Canadá y Australia, y minería a través del proceso de evaporación natural usado en los yacimientos ubicados en Sudamérica principalmente en el triángulo del litio conformado por Chile, Bolivia y Argentina. La minería de litio por rajo abierto comprende procesos de arranque de mineral desde la mina, chancado y molienda, y concentración de mineral por medio de flotación, para luego pasar a un tratamiento térmico con ácido sulfúrico (tostación acida), la mezcla de sulfato de litio es tratada por lixiviación y mezclada con carbonato de sodio para su posterior concentración en evaporadores de triple efecto. La minería por evaporación natural se puede separar en tres etapas: extracción de salmueras de litio desde el salar, evaporación y concentración de la salmuera en pozas de evaporación y refinación en planta de tratamiento para la obtención de carbonato e hidróxido de litio, teniendo como principales subproductos la obtención de cloruro de potasio (KCl), bischofita ($MgCl_2 \cdot 6H_2O$) y carnalita ($KClMgCl_2 \cdot 6H_2O$).

La industria chilena del litio está conformada mayoritariamente por dos grandes empresas, la Sociedad Química y Minera de Chile (SQM) y la Sociedad Chilena Del Litio (RockWood) actualmente en manos de la empresa Albemarle. Ambas entidades representan el 42% de la oferta de litio a nivel mundial en el año 2016, quedándose SQM como el mayor productor de litio con un 25% de la oferta en dicho año. La demanda mundial de litio en el año 2017 se estima logre llegar a 188.000 toneladas de LCE (carbonato de litio equivalente). Se espera que a raíz de la industria automotriz y su incipiente cambio hacia la generación de automóviles con cero emisión de gases contaminantes, bajo la incorporación de baterías a base de litio para el almacenamiento de energía eléctrica, que la demanda al año 2035 logre alcanzar niveles cercanos a 600.000 ton de LCE, de la demanda esperada para ese periodo se destinara cerca de la 300.000 ton de LCE para la confección de baterías para el almacenamiento de energía eléctrica.

Dada la actual situación de la minería de litio en Chile y esperando que la participación de mercado de las empresas en nuestro país se mantenga en el tiempo, se hace necesario la implementación de un nuevo sistema para la obtención de las sales de litio que se

obtienen por la concentración de salmueras ricas en el metal, para la disminución de tiempos de proceso, la obtención de sales más puras y la posibilidad de controlar los factores que hoy en el proceso de evaporación natural son inmanejables y solo se puede tener registro de ellos. El proceso actual en la empresa líder del mercado SQM comprende cerca de 1700 hectáreas de área destinada a la evaporación solar, en las cuales el proceso total hasta la obtención de carbonato e hidróxido de litio y sus subproductos comprende una duración de 12 a 15 meses, si se espera lograr mantener la participación de mercado cuando la demanda mundial alcance los niveles mencionados, SQM tendrá que desarrollar cerca de 3400 hectáreas extras de evaporación solar. Dada la necesidad de desarrollar infraestructura para poder alcanzar las futuras producciones proponemos la utilización de un nuevo sistema centrado en el proceso de evaporación solar, el cual por medio de maquinaria preparada y especializada pueda suplir la necesidad de la creación de más pozas de evaporación, para fines de este trabajo los equipos a estudiar son evaporadores y cristalizadores industriales.

La incorporación de equipos que desarrollen la etapa de evaporación, concentración y cristalización de salmueras de litio, aportara al diferentes tipos de mejoras al proceso global, tales como: Disminución de tiempo en la etapa de evaporación y cristalización de sales; aumento en el control y posibilidad de definir el ambiente en el cual se va a introducir la salmuera para su concentración y cristalización, definiendo parámetros tales como presión interna del equipo, humedad, temperatura interna del equipo, cantidad de sal a cristalizar, etc.; mayor respuesta a cambios de demanda en el mercado, dado que se podrá dejar de operar o aumentar nuestra producción (hasta la capacidad máxima de los equipos) de manera rápida, fácil y segura; se podrá tener mayor control y certeza de la concentración de la salmuera que saldrá del proceso y será devuelta al salar al final de la etapa disminuyendo la probabilidad de tener problemas medioambientales debido a la alteración bioquímica del salar; aumenta la seguridad de los profesionales en terreno; entre otros factores que pueden mejorar el proceso y beneficiar de manera favorable los procesos posteriores (agua abajo) como la refinación del concentrado de litio dado que se podrá obtener a través de equipos cristalizadores sales con mayor grado de pureza.

El presente trabajo de tesis analiza la posibilidad de realizar la obtención de sales de litio a partir de salmueras ricas en este metal por medio de la implementación de maquinaria especializada principalmente evaporadores y/o cristalizadores. Dentro del proceso actual usado en la industria local.

Motivación

La creación de un trabajo de tesis que no está enfocado a la minería del cobre para un estudiante de ingeniería civil de minas en Chile puede sonar de alguna manera extraño, la realización de un estudio que no tenga relación con algún tipo de minería tradicional metálica para un estudiante de ingeniería civil en minas pareciera no tener sentido pero desde ya varios años la minería no metálica ha estado en el centro de la atención, la industria dirigida a la creación de baterías para almacenamiento energético ha impulsado la idea de que la minería del litio tendrá un crecimiento significativo, y desde ese punto es que un estudiante de ingeniería en minas opta por realizar un estudio de mejora a un proceso minero que no ha cambiado desde su implementación.

Si bien la minería es un proceso por el cual se arranca mineral de la mina para luego ser procesado, la minería no metálica de salmuera de litio precipita mineral para ser procesado, a modo de comparación la mina en la minería del litio por salmueras de litio sería las pozas de evaporación natural, de las cuales se obtiene el mineral a procesar.

Contribución del trabajo

En el presente trabajo se realizó una comparación entre el proceso actual de concentración de salmueras de litio y el proceso planteado en el presente documento, como contribución del trabajo se destaca la originalidad del punto de vista tratado, la creación de un modelo de simulación aplicable a la industria actual, la creación de diferentes líneas de estudios para posibles trabajos de investigación en la universidad Andrés Bello. Desde el punto de vista de la industria el presente trabajo instala la posibilidad de cambiar un proceso y hacer más eficiente la industria chilena del litio.

El estudio plantea de alguna manera la posibilidad de crear una industria extractiva de litio con menores impactos medioambientales en relación a la calidad de sales obtenidas en el proceso y a la recuperación de agua a través de los equipos en cuestión.

Objetivos

Objetivos Generales

- Realizar comparación del proceso actual de evaporación natural y el proceso evaporación por medio de equipos evaporadores y cristalizadores.

Objetivos específicos

- Estudiar el funcionamiento de los diferentes tipos de evaporadores.
- Estudiar el funcionamiento de diferentes tipos de cristalizadores.
- Crear un modelo de simulación aplicable en la industria.
- Definir ahorro de tiempo a través del modelo de simulación.

Organización y presentación de este trabajo

Capitulo II: Metodología y desarrollo

En este capítulo se describe el problema encontrado a raíz del futuro del mercado del litio y el proceso actual de evaporación de salmueras de litio, se nombran las posibles mejoras. Se detallan los límites del estudio y los alcances esperados del mismo. Se identifican las entidades públicas relacionadas con la regulación y explotación de salmueras de litio.

Capitulo III: Identificación de problemas

En este capítulo se explican y detallan las oportunidades de mejoras presentes en el estudio, entregando la visión y dirección con la que el estudio se debe realizar.

Capitulo IV: Ingeniería del proyecto

Se da a entender el marco teórico del proceso actual y se nombran las principales empresas del país en la materia tratada, se nombran los pros y contras relacionados con el proceso actual. Se definen equipos a analizar en la propuesta. Se explica la propuesta a través del análisis del modelo de simulación creado, se ajusta el modelo a los datos obtenidos de SQM-Salar de Jerome Jukes, se analizan y comparan resultados del modelo de simulación. Se desarrolla un diagrama ternario que puede explicar el proceso completo por medio de concentraciones de los distintos cloruros presentes en la salmuera.

Capítulo V: Discusión de resultados y conclusiones generales

Se realiza el análisis de los resultados obtenidos dando opiniones del tema, se entregan conclusiones generales del documento creado.

Capítulo VI: Anexos

Se explica el modelo termodinámico creado por Kenneth Pitzer usado en la práctica como validador de sistemas multi-componentes con sólidos en solución.

II. METODOLOGÍA Y DESARROLLO

Descripción de problemas y oportunidades de mejora

Problema

Aumento de área evaporación natural para lograr alcanzar la demanda creciente de litio y sus subproductos sin ver afectada la participación de mercado de empresas en Chile.

Al desear alcanzar una mayor producción para mantener la participación de mercado en el mediano plazo, bajo el mismo sistema se hace teóricamente imposible sin desarrollar un área de evaporación directamente proporcional con el aumento de demanda que se avecina, hoy en día la empresa SQM tiene cerca de 1.700 hectáreas empleadas para el proceso de evaporación solar por medio de pozas (piscinas) de evaporación, como posiblemente la demanda de sales de litio aumente por lo menos al triple en el mediano plazo, SQM tendrá que desarrollar al menos 3.400 hectáreas para poder utilizar el mismo proceso y poder alcanzar la demanda esperada. En este punto es donde se plantea el no desarrollar áreas de evaporación natural por medio de la construcción de pozas de evaporación e invertir en la mecanización del proceso de evaporación, concentración y cristalización de salmueras de litio mediante el uso de evaporadores y cristalizadores.

Mejoras

Desde el punto de vista de mejoras asociadas a la inclusión de equipos especializados en el proceso, se podrá disminuir tiempos en la obtención del producto final (sales de litio y subproductos), se podrá obtener sales de mayor pureza antes de la refinación, se podrá controlar factores termodinámicos esenciales para el proceso (temperatura, presión interna del equipo, cantidad de vapor dentro del equipo, caudal de salmuera a trabajar, etc.) y eventualmente se usará menos área (terreno) para lograr la producción deseada y mantener la participación de mercado que las empresas chilenas líderes mundiales ostentan en el presente.

Limitaciones y alcances del proyecto

Limitaciones del proyecto

Como bien se mencionó anteriormente el proceso utilizado en Chile para la obtención de sales de litio y sus subproductos lo podemos desglosar en tres grandes etapas:

- Extracción de la salmuera desde el salar
- Evaporación natural por medio de pozas de evaporación
- Refinación de sales de litio y subproductos (trabajo en planta)

De las tres etapas el estudio solo se centra en la etapa de evaporación natural por medio de pozas de evaporación, dejando como supuesto que el optimizar esta etapa mejorara el rendimiento del trabajo en la planta de refinación.

Alcances del proyecto

El proyecto busca demostrar la posibilidad de realizar la etapa de “evaporación natural por medio de pozas de evaporación” mediante la mecanización del mismo proceso a través de equipos especializados. Como fin nos hemos propuesto realizar un modelo de simulación de pozas de evaporación con el cual podremos calcular áreas requeridas, tonelaje y volumen de sales cristalizadas y en solución, volumen de vapor liberado en el proceso y volumen de agua presente en la última parte de esta etapa.

Como resultado final se desarrollara un cuadro comparativo entre el rendimiento teórico de nuestro modelo de simulación de pozas y el rendimiento de los equipos a distintas capacidades y distintas unidades de estos.

Además se desarrollara un diagrama ternario normalizado que pueda describir todo el proceso hasta la última poza de evaporación de nuestro modelo de simulación, mediante las concentraciones de Cloruro de magnesio ($MgCl_2$), Cloruro de potación (KCl) y Cloruro de sodio (NaCl).

Principales entidades públicas presentes en la industria del litio

Como principal problema que se le puede asignar al proyecto en un eventual aplicación del sistema propuesto, tiene relación con la cantidad de salmuera a tratar en un futuro escenario de demanda creciente, ya que, el litio al ser un elemento catalogado por el estado chileno como estratégico no se puede aumentar sus cuotas de extracción de manera arbitraria por la empresa productora de sales de litio.

Dentro de los organismos públicos que limitan y regularizan las cuotas de extracción de litio en el país se puede nombrar:

- **CORFO:** La corporación de fomento a la producción es dueña de las concesiones del salar de atacama anteriores al año 1979, arrendadas actualmente a las empresas SQM y Roockwood. Con límite de extracción en el tiempo y/o en cantidad.
- **SERNAGEOMIN:** El servicio nacional de geología y minería como rol principal regula la propiedad, seguridad y producción minera. Considerando como minería las producciones de litio en el territorio nacional. Además participa en la creación de catastros de recursos mineros en todo el territorio nacional.
- **CCHEN:** La comisión chilena de energía nuclear tiene la primera opción de compra sobre recursos de carácter nuclear en nuestro país, debido a la calidad y características nucleares que presenta el litio (isotopos radiactivos), la CCHEN puede tener acceso a los productos de litio siempre y cuando la CCHEN tenga necesidades de obtener litio para sus estudios y análisis de energía nuclear.
- **DGA:** la dirección general de las aguas regula y supervisa los derechos de agua que pueden existir sobre el salar, dándole sustentabilidad y compatibilidad al uso de este recurso por empresas extractoras de litio y comunidades cercanas que usan este recurso para sus vidas cotidianas.
- **Empresas del estado:** CODELCO tiene concesiones en el salar de Maricunga y pedernales, ENAMI tiene concesiones en el salar de Aguilar.

III. IDENTIFICACIÓN DE PROBLEMAS Y OPORTUNIDADES DE MEJORA

Oportunidades de mejora

Disminución de tiempos en el proceso

- Al cambiar el proceso por maquinaria especializada el tiempo de producción de sales de litio y sus subproductos tendrá directa relación con la capacidad del equipo en cuestión y la cantidad de equipos que se tengan trabajando.

Control sobre el proceso termodinámico

- Al utilizar equipos especializados estos permiten crear y controlar el ambiente en el cual se producirá la Evaporación y cristalización de la salmuera. Algunos parámetros termodinámicos involucrados en el proceso son: Temperatura, Presión (interior equipo), Humedad, Cantidad de vapor presente en el sistema, Etc.

Pureza de sal a cristalizar

- Al poder crear un ambiente de cristalización específico se podrá cristalizar solamente un tipo de sal, logrado reducir el tiempo de trabajo en la planta de refinación de las distintas sales, dejando como supuesto un ahorro en costos de operación en los procesos posteriores a la evaporación, concentración y cristalización de salmueras.

Uso de área efectiva de trabajo

- Al no desarrollar pozas de evaporación extras y eventualmente procesar las salmueras bajo la evaporación mecánica propuesta, se podrá disminuir de manera considerable la cantidad de terreno necesario para poder lograr la producción futura requerida

Mayor control sobre la salmuera que se devuelve al salar

- Llegando al final del proceso se debe devolver el remanente al salar, alterando de cierta manera el equilibrio bioquímico presente en ese medioambiente, bajo la utilización del proceso de evaporación mecánica se puede disminuir el remanente a devolver al salar cristalizando un mayor porcentaje de sales y a la vez se puede captar el agua evaporada para crear una salmuera diluida con el remanente.

IV. INGENIERÍA DEL PROYECTO

Marco teórico

Evaporación y saturación de salmueras

El proceso por el cual se debe tratar una salmuera para la obtención de sales trata de concentrar diferentes elementos por medio de la evaporación hasta el punto de sobresaturación de algún elemento o alguna sal para así poder precipitar dicho elemento o sal.

Evaporación: proceso por el cual se elimina agua en forma de vapor. Este proceso puede darse por aumento de temperatura, baja de presión atmosférica, cambios de humedad ambiental, entre otros factores asociados. En el proceso actual de evaporación solar por medio de pozas los factores que afectan en mayor medida a la evaporación de la salmuera son: la temperatura ambiental, radiación solar, masas de aire (vientos), humedad ambiental y por ende la tasa de evaporación que puede tener la evaporación natural no depende de parámetros técnicos manejables en el proceso.

Saturación y sobresaturación de sales: Se entiende como saturación de sales en una solución (salmuera) al límite soportable de soluto (sal) por el solvente (agua), por ende la sobresaturación se produce cuando la cantidad de soluto no puede ser “sostenido” por el solvente y es justo en este punto donde se produce la precipitación de sales. En el proceso actual de concentración de salmueras la precipitación de sales se lleva a cabo en diferentes pozas dependiendo al tipo de sal que se quiera precipitar.

SQM

Para poder imaginar cómo se procesa actualmente las salmueras obtenidas del salar de atacama y tratando de explicar el tamaño de las pozas de evaporación a continuación se mostrará una foto de las instalaciones de SQM ubicadas en la región de Antofagasta.

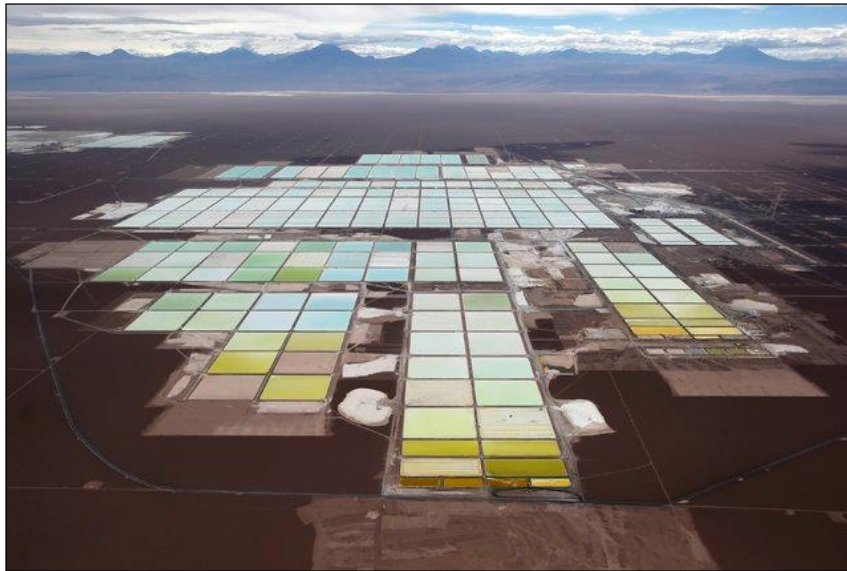


Figura 4.1: Área evaporación SQM, Fuente: SQM

El proceso explicado según SQM

Las salmueras son bombeadas desde abajo de la corteza salina, en dos áreas diferentes del salar. En una de ellas, las salmueras extraídas contienen niveles de concentración de potasio y litio sin precedentes. En la otra, las salmueras obtenidas contienen altas concentraciones de sulfato y boro.

Luego de su extracción, las salmueras son ubicadas en las lagunas de evaporación solar de SQM, que cubren 1.700 hectáreas aproximadamente. El Desierto de Atacama es el lugar más seco de la tierra, con un índice de evaporación solar de 3.200 milímetros y precipitaciones promedio de sólo 15 milímetros al año. Esto se traduce en un proceso previo de concentración de energía solar extremadamente eficiente.

De las soluciones resultantes y tras una serie de procesos, SQM produce cloruro de potasio, carbonato de litio, sulfato potásico, ácido bórico y cloruro magnésico.

Rockwood

A continuación, a modo de entender el proceso por el cual procesa la salmuera rica en litio la empresa Rockwood se mostrara una imagen que engloba el proceso completo.

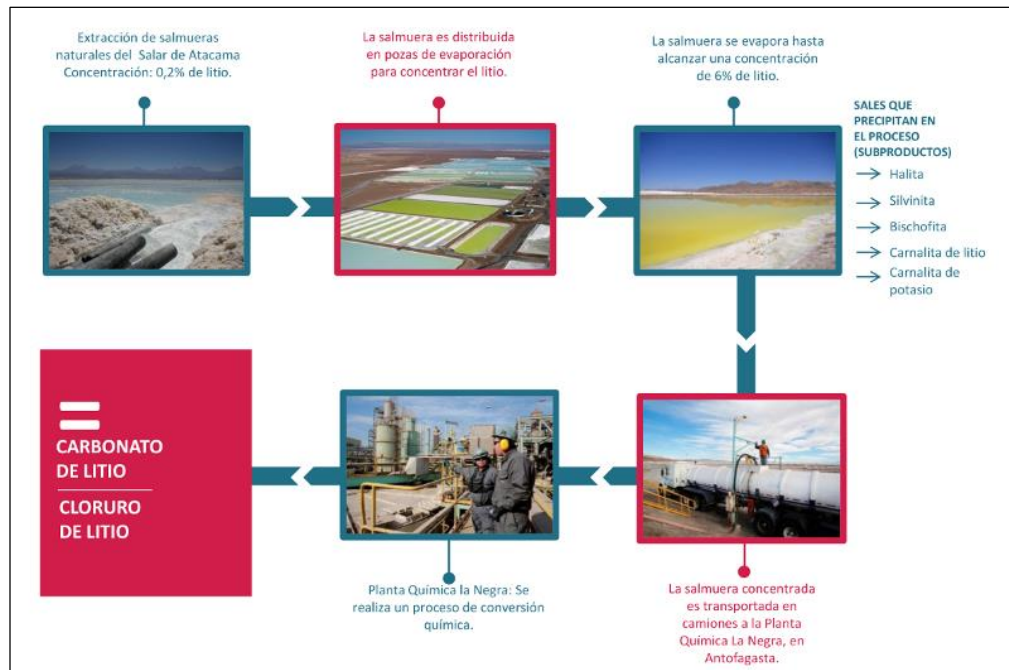


Figura 4.2: Proceso Rockwood, Fuente: Rockwood

El proceso explicado según Rockwood

El Proceso productivo comienza con el tratamiento de la salmuera natural que se obtiene por bombeo desde el núcleo del Salar de Atacama y se dispone en pozas al aire libre, que se someten a la evaporación solar.

La salmuera natural que utiliza Albemarle para su proceso contiene un 0,2% de concentración de litio. A medida que se produce evaporación, la salmuera se traspasa entre las distintas pozas hasta alcanzar una concentración de un 6% de litio. Durante el proceso de evaporación de la salmuera, se produce la precipitación de distintos tipos de sales que son consideradas un sub producto del proceso. Estas son el cloruro de potasio y el cloruro de magnesio.

Este proceso se realiza en la Planta Salar de Albemarle, en la que se ubican los sistemas de pozas de evaporación solar y la planta para el procesamiento y producción de cloruro de potasio. Además cuenta con un laboratorio químico y la infraestructura necesaria para el funcionamiento de la operación, como oficinas y bodegas.

Ventajas y desventajas proceso actual

El proceso actual de evaporación natural por medio de pozas de evaporación a estado vigente por varios años en la industria chilena, desde un punto de vista comparativo a continuación se mostrara las ventajas y desventajas del proceso actual.

Ventajas

- Bajo costo de operación
- Bajo consumo de energía
- Proceso simple en cuanto a la medición de concentraciones y control de pozas

Desventajas

- Alto tiempo de procesamiento
- Baja posibilidad de mecanizar el proceso
- Volúmenes definidos de salmuera a tratar
- Bajo control técnico del proceso (Temperatura, tasa de evaporación, humedad ambiental, etc.)
- Baja respuesta a las variaciones del mercado

Propuesta

El estudio realizado en esta propuesta comprende dos etapas, la cuales son el estudio y recopilación de información sobre evaporadores y cristalizadores; realización del modelo de simulación de pozas de evaporación mediante los parámetros operacionales de SQM-salar obtenidos por Jerome Lukes.

Recopilación de información y funcionamiento de equipos

Con el fin de cumplir con el objetivo principal del presente estudio fue necesario realizar una recopilación de información de equipos evaporadores y cristalizadores además de reconocer la existencia en la industria de equipos especializados aplicables en la propuesta.

Evaporadores

Los equipos evaporadores se usan principalmente como eliminador de solvente en una solución, en la industria en general se pueden encontrar evaporadores en reducción de humedad de barros, concentradores de soluciones, desalinización de agua, etc.

Los equipos evaporadores para la propuesta se ubicaran en la primera etapa “poza de evaporación”, la cual busca llevar salmuera no saturadas en cloruro de sodio al punto de concentración de saturación de la sal.

Los evaporadores de pueden clasificar en tres tipos

- Evaporador de expansión seca
- Evaporador inundado
- Evaporador sobre-alimentado

Para términos de esta tesis el evaporador estudiado será de tipo sobre-alimentado el cual permite un mayor flujo de solución en su interior, son evaporadores de triple efecto y permiten evaporar mayor cantidad de solvente por unidad de tiempo.

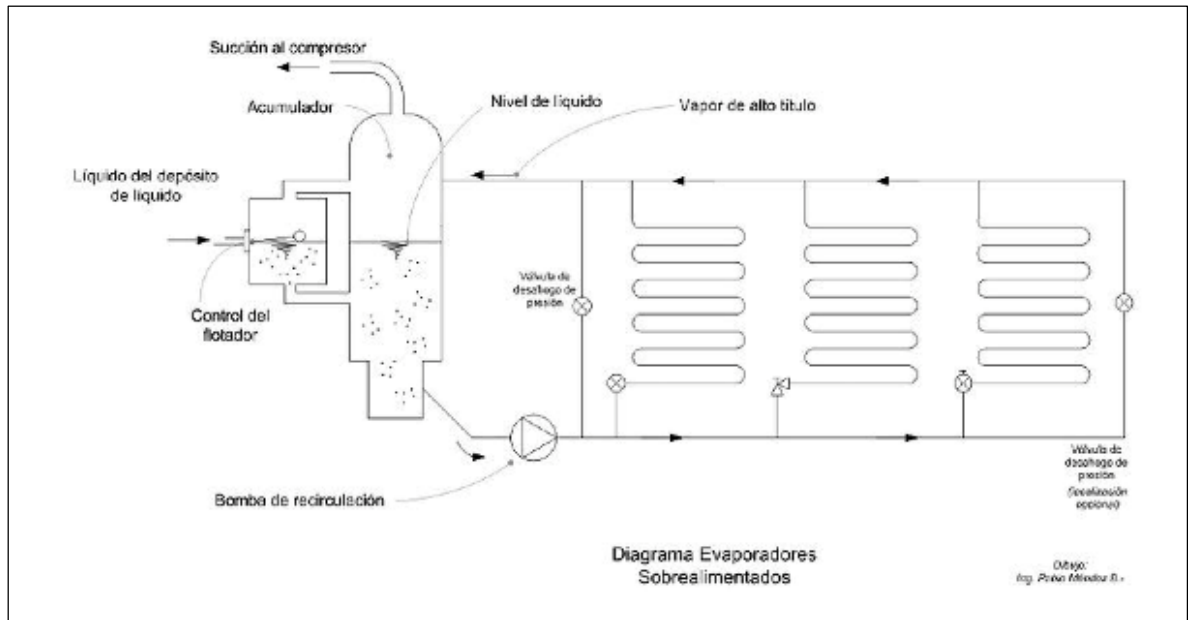


Figura 4.3: Evaporador sobre-alimentado, Fuente: Ciclo Formativo Grado Superior de Mantenimiento de Instalaciones Térmicas y de Fluidos

Cristalizadores

Los equipos cristalizadores son usados en la industria principalmente para dos procesos; para precipitar solutos (sales) de soluciones sobresaturadas, por medio de la evaporación del solvente o por medio de cambios de presiones en el sistema; para el crecimiento de cristales específicos por medio de la siembra prolongada de solutos en ambientes estables de presión y temperatura.

Los equipos a estudiar para lograr realizar la propuesta serán del primer tipo nombrado anteriormente, equipos diseñados para lograr precipitar cristales de sal desde soluciones en saturación (salmueras). En la industria existen distintos tipos de cristalizadores.

- Cristalizador Howard
- Cristalizador a tubo con raspadores
- Cristalizador tipo Swenson Walker
- Cristalizador tipo tanque agitado con serpentines
- Cristalizador de refrigeración por contacto directo
- Cristalizadores por Evaporación
- Cristalizadores Oslo
- Cristalizadores evaporadores de circulación forzada
- Cristalizadores adiabáticos al vacío

El uso de los cristalizadores dependerá esencialmente del tipo de solución a tratar, del tipo de soluto a cristalizar y de la forma en cómo se va a cristalizar (cambios en factores termodinámicos).

Dentro de los parámetros mencionados para la elección de un cristalizadores es especificara a continuación los puntos más importantes relacionados con la propuesta en cuestión.

- Tipo de soluto a cristalizar: Desde las salmueras tratadas en la industria del litio, los productos del proceso de evaporación natural con sales ,tales como, Cloruro de sodios y cloruro de potasio, sales hidratadas tales como, la carnalita y la bischofita.
- Mezcla de solutos cristalizados: en el proceso de evaporación y concentración natural de salmueras ricas es litio la precipitación de más de una sal a la vez es normal en algunos casos, como por ejemplo la cristalización conjunta se cloruro de sodio y cloruro de potasio; estos procesos se observan de manera clara el diagramas ternarios utilizados en la industria.
- Cantidad de agua a evaporar: la evaporación natural tiene como principio la concentración de salmuera por medio de la eliminación de agua en forma de vapor, lo que genera un estado de sobresaturación constante en el sistema, por ende se hace lógico comprar el proceso de manera que la concentración de salmueras se inicie con la eliminación de agua del sistema.
- Tipo de cristalización: el proceso de cristalización se puede generar por medio de varios cambios de estabilidad de una solución (salmuera); cambios de temperatura, cambios de presión y cambios de concentraciones iniciales a través de siembre de solutos (sales).

A partir de los parámetros nombrados anteriormente y esperando imitar de manera integrar el proceso actual de evaporación natural, la propuesta tendrá como base de estudios la comparación del proceso actual y el proceso bajo un cristalizador evaporador.

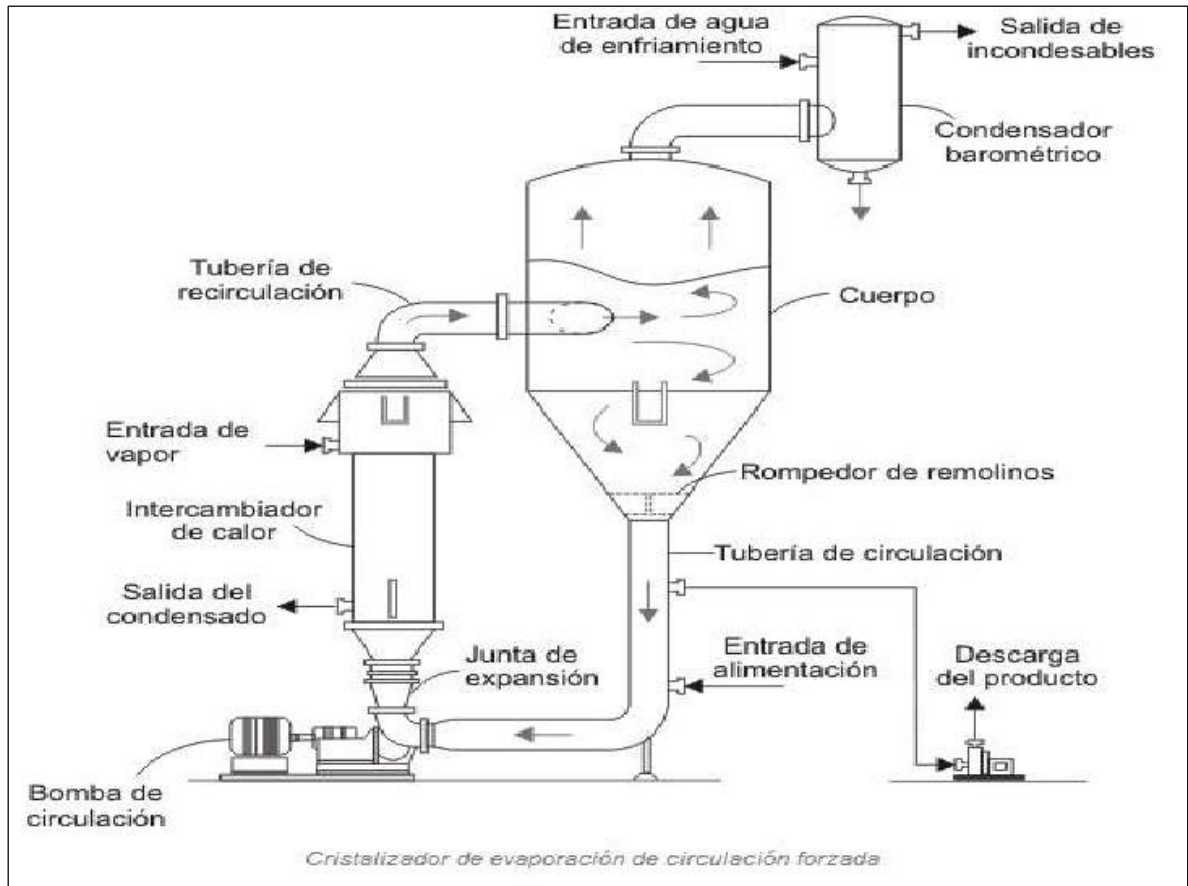


Figura 4.4: Cristalizador evaporador, Fuente: Textoscientificos.com

Modelo de simulación de pozas

El modelo de simulación de pozas creado para desarrollar la propuesta se basa en los parámetros operacionales de SQM-Salar obtenidos por el señor Jerome Jukes y validados bajo el modelo de Pitzer.

El modelo de simulación se compone de cinco pozas de evaporación natural en las cuales se evaporara agua y se cristalizaran distintas sales, en la imagen 4.5 se podrá observar la secuencia lógica que sigue el modelo de Evaporación creado, partiendo por la poza de evaporación, poza de NaCl, poza de NaCl + KCL, poza de Carnalita + NaCl + KCL y poza de Bischofita + NaCl, luego de la última poza se obtiene una salmuera concentrada en sales de litio las cuales se lleva a la planta de refinación para su posterior tratamiento y purificación.

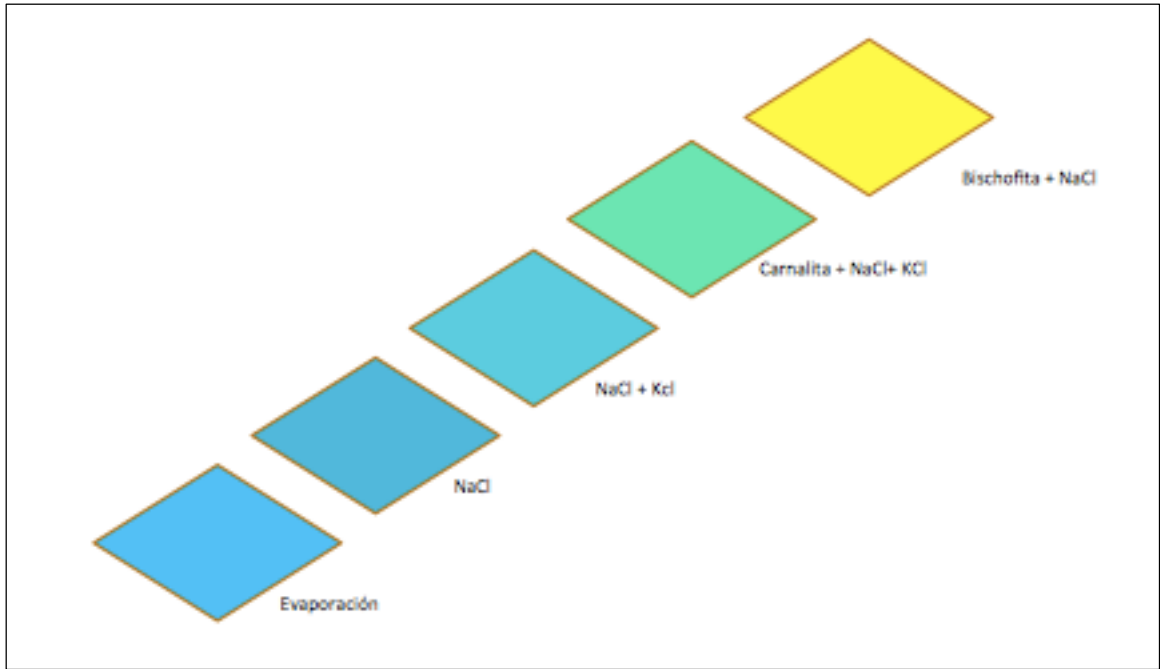


Figura 4.5: Modelo de Evaporación, Fuente: Elaboración propia

El modelo de evaporación mostrado en la figura 4.5 sugiere el tratamiento de salmueras no saturadas en la primera sal a cristalizar, por lo tanto es necesario llevar dicha solución a un punto de concentración tal que permita la cristalización de la primera sal en el modelo, en este caso el cloruro de sodio (NaCl).

Al comprender el tipo salmuera con la que trabaja SQM, se evidencia un error en el modelo por lo que no lo hace aplicable, ya que a diferencia de otras posibles salmueras las tratadas en SQM vienen con un punto de concentración tal que no es necesaria la primera poza (poza de evaporación), por lo tanto el modelo de aplicación en ese proceso en particular será un modelo simplificado representado en la figura 4.6.

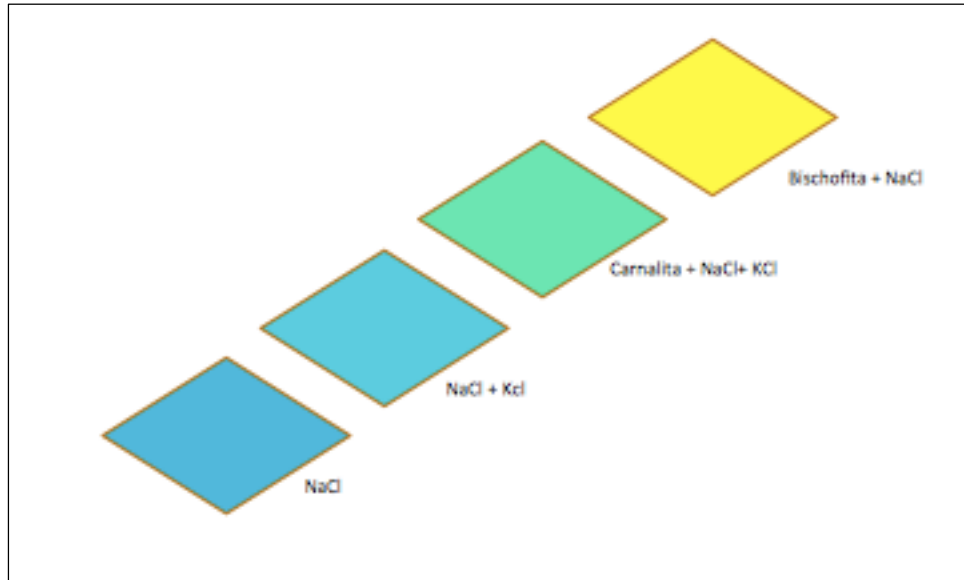


Figura 4.6: Modelo simplificado, Fuente: Elaboración propia

A partir de los parámetros operaciones de SQM-Salar calculados por Jerome Lukes se puede realizar un diagrama ternario que puede explicar el proceso, relacionando la concentración de cloruro de sodio (NaCl), cloruro de potasio y H_2O+ (concentración de agua y otros elementos) representado en la figura 4.7.

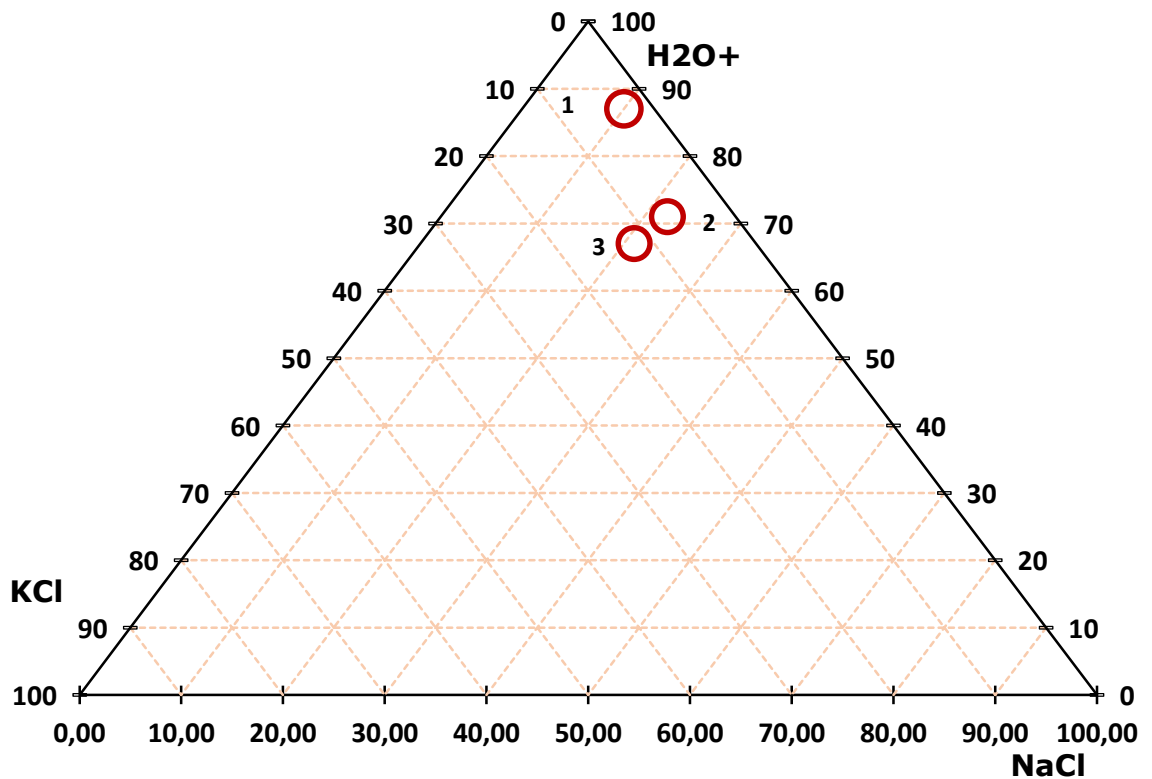


Figura 4.7: Diagrama ternario H₂O+-Na-K, Fuente: Elaboración propia

La figura 4.7 nos muestra las concentración con las cuales ingresa la salmuera a las distintas pozas de evaporación, en la tabla 4.1 se mostraran las concentraciones representadas en la figura 4.7

	Poza evaporación	Poza NaCl	Poza KCl+NaCl
KCl%	3,0	6,7	12
NaCl%	10,0	22,3	21
H ₂ O+%	87,0	69,9	65

Tabla 4.1: Concentración diagrama ternario, Fuente: Elaboración propia

A partir de los datos mostrados en la tabla 4.1 se calculó el tonelaje de sales cristalizadas y volumen de agua evaporada para las distintas pozas siguiendo el orden del modelo simplificado en la figura 4.6. Para el desarrollo y con fines prácticos se usó como base de cálculo caudales ingresados a cada piscina en un día de operación.

Poza de NaCl

Para el cálculo en de modelo de simulación se decidió usar un flujo de entrada 151,63 m³/día con una masa de 177,87 ton/día, dando como resultado una masa de agua evaporada de 60,52 toneladas al día y una masa cristalizada de cloruro de sodio de 19,05 toneladas al día. La figura 4.8 da a entender el proceso.

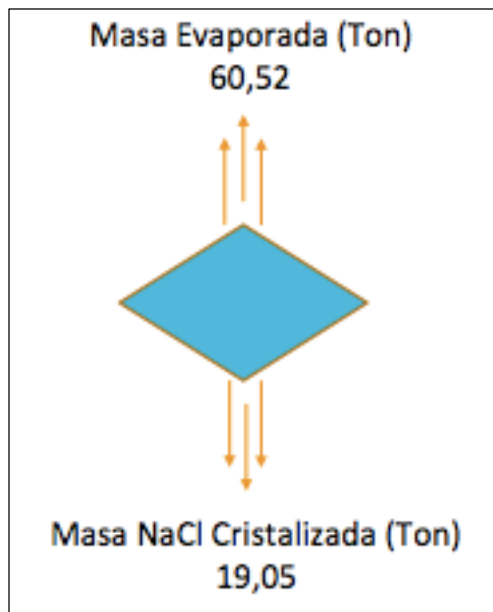


Figura 4.8: Tonelajes Poza NaCl, Fuente: Elaboración Propia

Poza de NaCl + KCl

Siguiendo la secuencia del modelo de simulación simplificado el flujo de entrada para esta poza de evaporación es de 77,35 m³/día con una masa de 100,28 ton/día, dando como resultado una masa de agua evaporada de 37,33 toneladas al día, una masa cristalizada de 11,70 toneladas de cloruro de sodio al día y una masa cristalizada de 6,69 toneladas de cloruro de potasio al día. La figura 4.9 da a entender el proceso

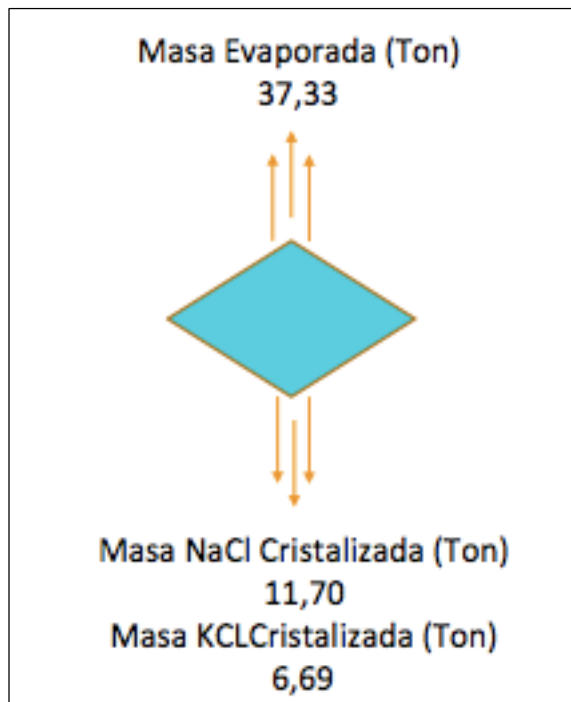


Figura 4.9: Tonelajes Poza NaCl+KCl, Fuente: Elaboración propia

Poza carnalita + NaCl + KCl

A partir de esta poza el diagrama ternario de la figura 4.7 mantiene constante la concentración en el punto 3, esto quiere decir que la relación entre la precipitación de sales de NaCl y KCl mantendrá constante su proporción. Por lo tanto para fines de cálculo tendremos como base la relación de MgLi (magnesio litio) obtenida en los estudios de Jerome Lukes, esta relación nos indica que desde la poza de NaCl + KCl el porcentaje de MgLi es 4,5% y se concentra hasta un 7%, teniendo en cuenta que la Carnalita contiene magnesio en su estructura química necesitamos saber un valor extra para poder realizar los balances de masas en esta poza, para ello utilizaremos los porcentajes de concentración de Litio (Li) en la salmuera, sabiendo que la relación de MgLi es 10:1 la concentración de litio dentro de la salmuera será de 0,41% y se concentrara hasta llegar a 1,23%. Entendiendo lo anterior el cálculo para esta poza tendrá un flujo de entrada de 25,88 m³/día con una masa de 44,57 ton/día, dando como resultado una masa de agua evaporada de 13,27 toneladas al día, una masa cristalizada de 11,04 toneladas de carnalita al día, una masa cristalizada de 5,02 toneladas de cloruro de sodio al día y una masa cristalizada de 0,38 toneladas de cloruro de potasio al día. En esta etapa del proceso se precipita la totalidad de potasio en forma de carnalita y cloruro de potasio. La figura 4.10 da a entender el proceso.

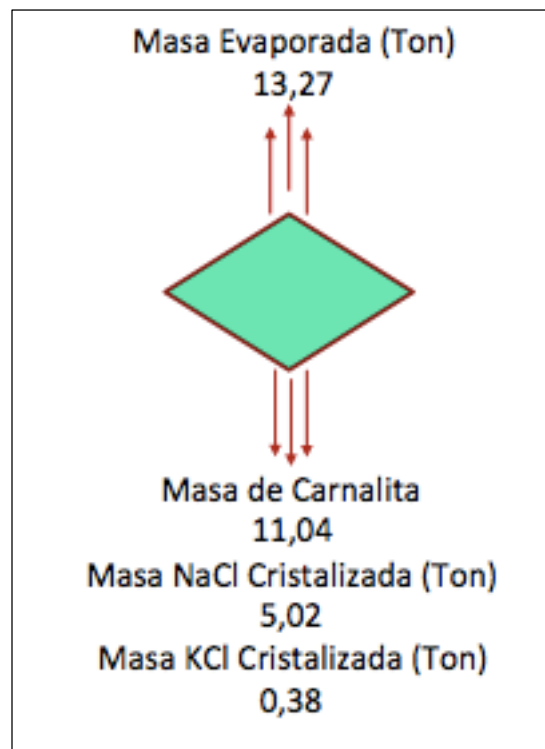


Figura 4.10: Tonelaje poza de carnalita, Fuente: Elaboración propia

Poza bischofita + NaCl

Siguiendo el ejemplo de la poza anterior para poder realizar el balance de masa dentro de la salmuera e tendrá como guía la relación de MgLi y la concentración de Li en la salmuera, desde la poza anterior se obtuvo una concentración de Li de 1,23% y se concentrara hasta llegar al 4,91% de la solución, relación de MgLi desde la poza anterior fue de un 7% y llegara hasta un 9%. El flujo de entrada a esta poza es de 6,26 m³/día y una masa de 14,86 ton/día, dando como resultado una masa de agua evaporada de 4,41 toneladas día, una masa cristalizada de 5,90 toneladas de bischofita al día y una masa cristalizada de 0,83 toneladas de cloruro de sodio al día. La figura 4.11 da a entender el proceso.

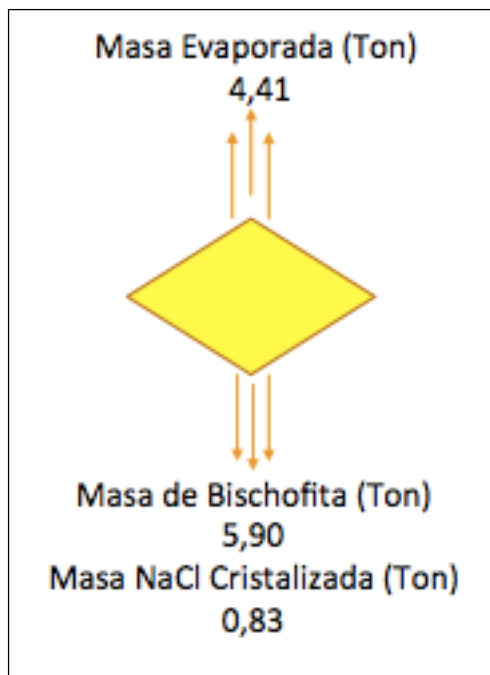


Figura 4.11: Tonelajes poza de bischofita, Fuente: Elaboración propia

Resumen modelo de simulación

Luego de realizar el cálculo en cada una de las pozas del modelo de simulación se obtendrá los tonelajes de agua evaporada y sales cristalizadas, indicando la producción de la poza por día.

Una vez conocidos los tonelajes a producir por día se podrá calcular la producción promedio por hora en cada poza del modelo de simulación representada en la tabla 4.2.

Tipo de poza	Evaporación (m ³ /hr)	Cristalización (Ton/hr)
Poza NaCl	2,44	0,79
Poza NaCl+KCl	1,56	0,77
Poza Carnalita	0,55	0,69
Poza Bischofita	0,18	0,28

Tabla 4.2: Tonelajes por hora, Fuente: Elaboración propia

Tiempos de residencia

En el sistema de evaporación natural el tiempo de residencia de la salmuera en cada poza depende de la cantidad de agua a evaporar y la cantidad de sales a cristalizar por metro cuadrado de poza, por lo tanto es correcto decir que el área de evaporación es determinante en la estimación del tiempo que se demorara la salmuera en pasar de una poza a otra. Otro factor importante a tomar en cuenta es la tasa de evaporación promedio que se tiene en el salar de atacama, ya que esta es la que determina cuánta agua se evapora por unidad de área. En la tabla 4.3 se muestran las consideraciones para el cálculo de tiempo de residencia y en la tabla 4.4 se muestran los tiempos de residencia en cada poza del modelo de simulación.

Tipo de poza	Ancho de poza (m)	Evaporación promedio (mm/m ² día)	Profundidad de poza (m)	Factor de evaporación
Poza NaCl	150,00	8	0,7	0,7
Poza NaCl+KCl	150,00	8	0,7	0,6
Poza Carnalita	150,00	8	0,7	0,5
Poza Bischofita	150,00	8	0,7	0,4

Tabla 4.3: Consideración tiempo de residencia, Fuente Elaboración propia

Tipo de poza	Tiempo de residencia (días)
Poza NaCl	48,26
Poza NaCl+KCl	70,38
Poza Carnalita	89,74
Poza Bischofita	123,22

Tabla 4.4: Tiempos de residencia, Fuente: Elaboración propia

Observando la tabla 4.4 se puede estimar la duración del proceso de evaporación y cristalización del modelo de simulación en 1 año de duración, en comparación con la industria actual el modelo se encuentra en el límite inferior de tiempo.

Estimación número de equipos

El modelo de simulación simplificado no requiere de la primera poza de evaporación para llevar la salmuera a un punto de saturación de sales en este caso cloruro de sodio, como el modelo de simulación simplificado trabaja con salmueras saturadas en NaCl solo se necesitaran equipos cristalizadores en el proceso, los cuales por medio de la evaporación de un porcentaje de agua podrán cristalizar sales teniendo siempre la solución en un estado de sobresaturación de sales.

El primer paso para estimar la cantidad de equipos necesarios para poder lograr la producción día obtenida a través del modelo de simulación, logrando así obtener la misma cantidad de sales en el mismo periodo de tiempo. Para ello compararemos los datos de la tabla 4.2 y distintas capacidades de equipos cristalizadores. Para lograr una comparación racional utilizaremos capacidades teóricas de equipo cristalizadores. En la tabla 4.5 se mostraran los equipos y capacidades a estudiar.

Equipo	Producción (Ton/hr)
CrX 1	0.40
CrX 2	0.80
CrX 3	1.20
CrX 4	1.60

Tabla 4.5: Producción teórica de equipos, Fuente: Elaboración propia

Como se mencionó antes se debe reconocer la cantidad de equipos necesarios para lograr la producción diaria del modelo de simulación simplificado, la tabla 4.6 mostrara la relación de los datos encontrado en la tabla 4.5 y la tabla 4.2, dando como resultado la cantidad de equipos necesarios para lograr la producción día calculada anteriormente.

Tipo de poza	Crx 1 (N°)	Crx 2 (N°)	Crx 3 (N°)	Crx 4 (N°)
Poza NaCl	1.98	0.99	0.66	0.50
Poza NaCl+KCl	1.92	0.96	0.64	0.48
Poza Carnalita	1.71	0.86	0.57	0.43
Poza Bischofita	0.70	0.35	0.23	0.18

Tabla 4.6: Cantidad de equipos, Fuente: Elaboración propia

Tiempo de ahorro por poza

Uno de los principales puntos de este trabajo es analizar el ahorro de tiempo posible por pozas, a partir de las capacidades teóricas de los equipos cristalizadores mostrados en la tabla 4.5. El tiempo disminuirá de manera proporcional al aumento en el número de equipos y la capacidad de estos.

Con el fin de disminuir el tiempo de manera considerable se calculará el número de equipos necesarios para lograr la producción del modelo de simulación simplificado en un mes de trabajo, dejando reducido el tiempo por poza a una semana de trabajo.

Poza NaCl

De manera comparativa con el objetivo propuesto de desarrollar la producción de esta poza en una semana de trabajo, se deberá realizar un análisis comparativo entre la producción de la poza y el número necesario de cada tipo de equipo para lograr el objetivo propuesto. En la tabla 4.7 se mostrará la cantidad de equipos necesarios para cumplir con lo anterior.

Equipo	Cantidad de equipos
Crx 1	13.68
Crx 2	6.84
Crx 3	4.56
Crx 4	3.42

Tabla 4.7: Crx poza NaCl, Fuente: Elaboración propia

Con el fin de determinar el ahorro de tiempo por poza en la figura 4.12 se mostrará la relación de días y cantidad de equipos en la poza de NaCl.

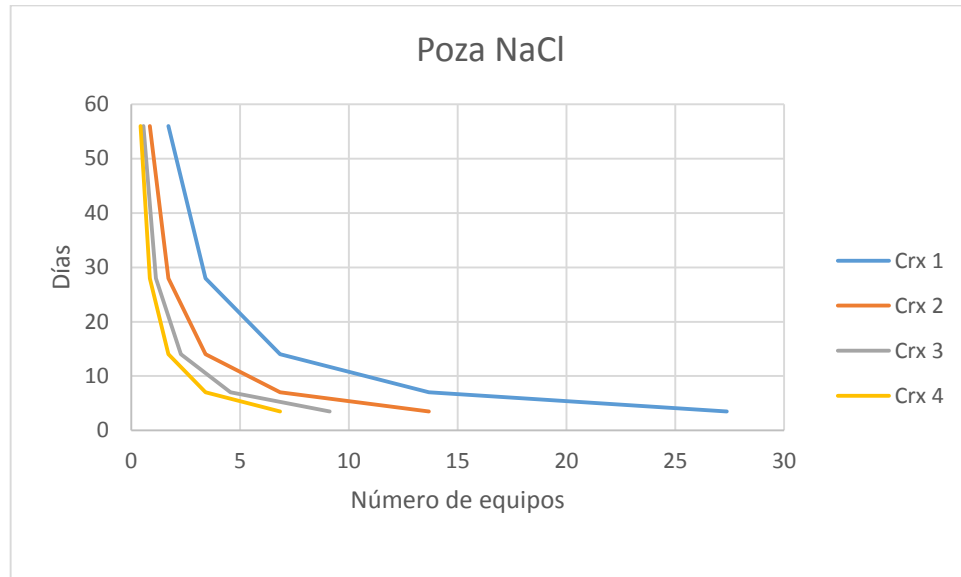


Figura 4.12: Grafico Poza NaCl, Fuente: Elaboración propia

Poza NaCl + KCl

De manera comparativa con el objetivo propuesto de desarrollar la producción de esta poza en una semana de trabajo, se deberá realizar un análisis comparativo entre la producción de la poza y el número necesario de cada tipo de equipo para lograr el objetivo propuesto. En la tabla 4.8 se mostrara la cantidad de equipos necesarios para cumplir con lo anterior.

Equipo	Cantidad de equipos
Crx 1	19.25
Crx 2	9.63
Crx 3	6.42
Crx 4	4.81

Tabla 4.8: Crx poza NaCl+KCl, Fuente: Elaboración propia

Con el fin de determinar el ahorro de tiempo por poza en la figura 4.13 se mostrara la relación de días y cantidad de equipos en la poza de NaCl + KCl.

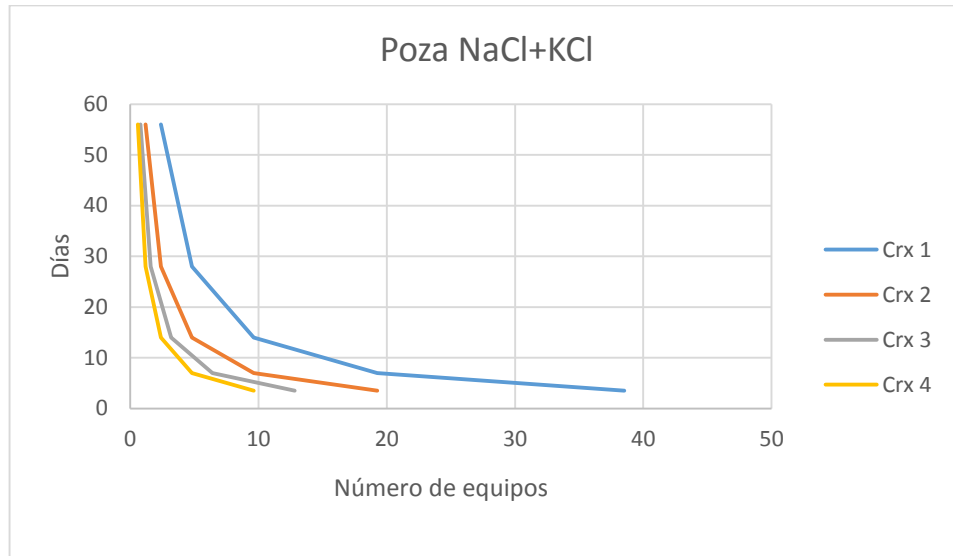


Figura 4.13: Grafico poza NaCl+KCl, Fuente: Elaboración propia

Poza Carnalita

De manera comparativa con el objetivo propuesto de desarrollar la producción de esta poza en una semana de trabajo, se deberá realizar un análisis comparativo entre la producción de la poza y el número necesario de cada tipo de equipo para lograr el objetivo propuesto. En la tabla 4.9 se mostrara la cantidad de equipos necesarios para cumplir con lo anterior.

Equipo	Cantidad de equipos
Crx 1	21.96
Crx 2	10.98
Crx 3	7.32
Crx 4	5.49

Tabla 4.9: Crx poza carnalita, Fuente: Elaboración propia

Con el fin de determinar el ahorro de tiempo por poza en la figura 4.14 se mostrara la relación de días y cantidad de equipos en la poza de carnalita.

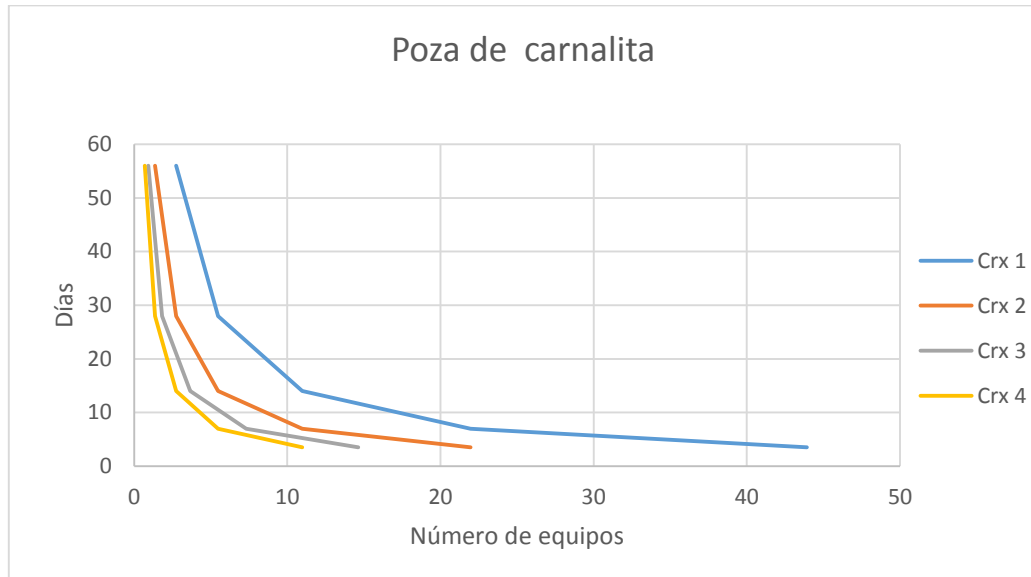


Figura 4.14: Grafico poza carnalita, Fuente: Elaboración propia

Poza bischofita

De manera comparativa con el objetivo propuesto de desarrollar la producción de esta poza en una semana de trabajo, se deberá realizar un análisis comparativo entre la producción de la poza y el número necesario de cada tipo de equipo para lograr el objetivo propuesto. En la tabla 4.10 se mostrara la cantidad de equipos necesarios para cumplir con lo anterior.

Equipo	Cantidad de equipos
Crx 1	12.34
Crx 2	6.17
Crx 3	4.11
Crx 4	3.09

Tabla 4.10: Crx poza bischofita, Fuente: Elaboración propia

Con el fin de determinar el ahorro de tiempo por poza en la figura 4.15 se mostrara la relación de días y cantidad de equipos en la poza de bischofita.

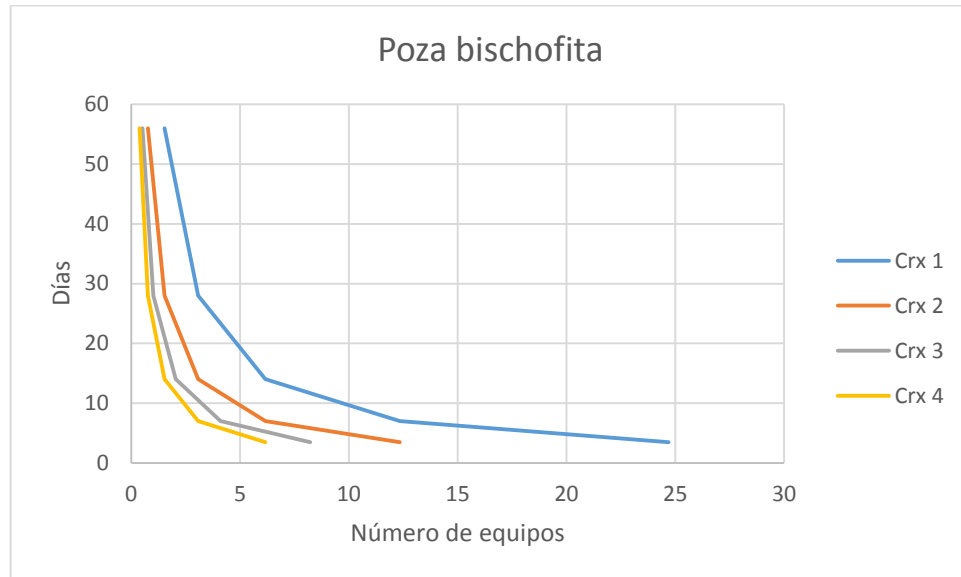


Figura 4.15: Grafico poza bischofita, Fuente: Elaboración propia

Diagrama ternario Mg-Na-K

El diagrama ternario usado para la realización de modelo de simulación analiza las concentraciones de H_2O , NaCl y KCl, teniendo tres puntos graficados, punto de salmuera diluida, punto de saturación de cloruro de sodio y punto de saturación de cloruro de potasio dejando este último punto constante hasta que una de la sales precipite por completo y salga del sistema. Esto limita la representación del modelo de simulación completo, ya que al final de la poza de carnalita el cloruro de potación cristaliza completamente dejando al diagrama ternario sin forma alguna de medir las futuras concentraciones de sales.

A raíz de la limitación planteada del diagrama ternario anterior se creó un diagrama ternario que analiza las concentraciones de cloruro de magnesio, cloruro de sodio y cloruro de potasio, dejando como punto pivote para todo el sistema la concentración de magnesio. Dentro de tratamiento de salmueras existe un concepto llamado relación de magnesio-litio (MgLi) el cual sirve para poder saber el punto de concentración necesario para qua la salmuera pase de una poza a otra, a través del se podrá correlacionar la relación de MgLi y la concentración de magnesio dentro del cloruro de magnesio utilizado para la creación del diagrama.

Para confeccionar el diagrama ternario representado en la figura 4.16, se utilizaron las concentraciones de los distintos elementos calculadas en el modelo de simulación y se

normalizaron para definir un parámetro porcentual correcto entre los tres tipos de cloruros analizados.

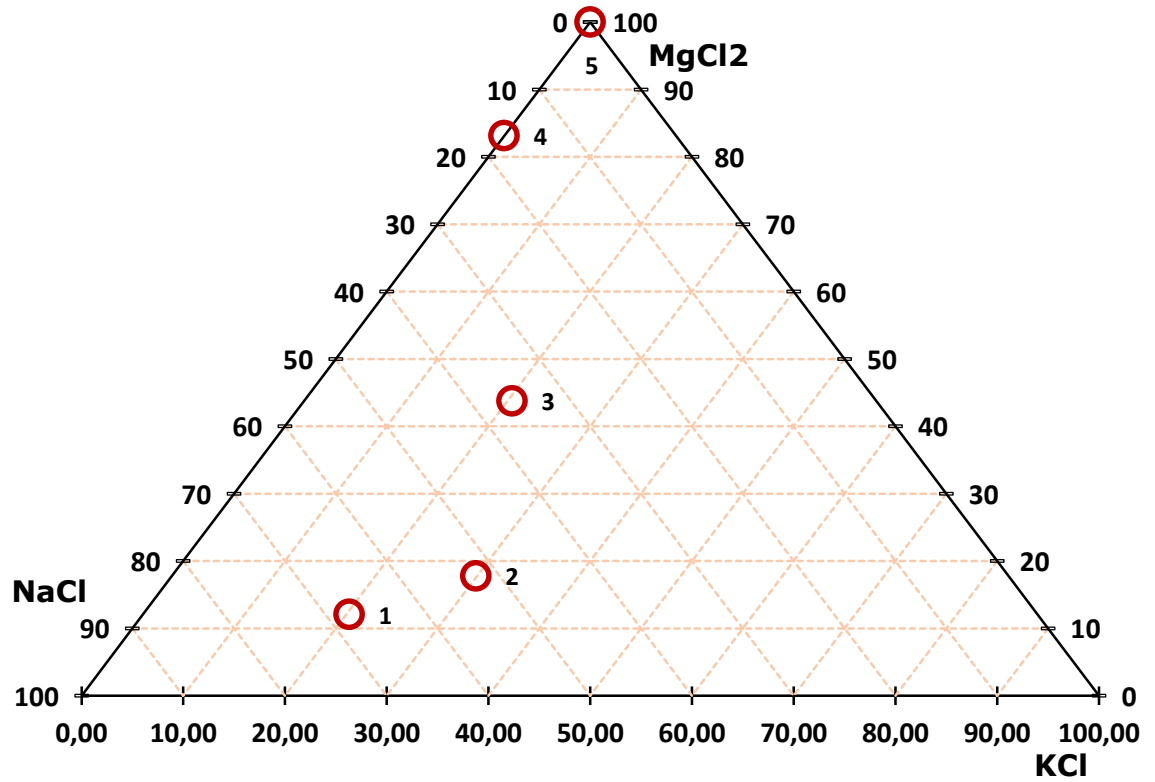


Figura 4.16: Diagrama ternario Mg-Na-K, Fuente: Elaboración propia

V. DISCUSIÓN DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES GENERALES

El modelo de simulación se ajustó a un ancho y una profundidad operativa igual para cada poza por lo tanto el área de cada poza depende del largo que tenga, el cual es distinto en cada caso.

El modelo de simulación creado puede operar con distintos parámetros y puede ser aplicado a la industria para posteriores cálculos de pozas, tanto para el cálculo de tonelajes a evaporar y cristalizar como para el cálculo de áreas para lograr tiempos específicos de trabajo

Analizando las tablas 4.7, 4.8, 4.9 y 4.10 se demuestra que el proceso de evaporación solar se puede realizar de manera global en una duración cercana a un mes a través de la inclusión de cristalizadores en la etapa, la cantidad de equipos depende de la capacidad de estos y de la eficiencia que tengas estos en el trabajo con salmueras con alto contenido de solutos.

El diagrama presentado por la figura 4.16 garantiza un seguimiento de la totalidad del proceso de evaporación solar, aplicable a la industria actual y puede ser relacionado directamente con la relación de magnesio-litio manejada por la industria.

La propuesta no es aplicable en el estado actual de la industria, ya que la implementación de equipos supone un gran gasto como inversión y un aumento considerable en los costos de operación. Del mismo modo se entiende que la propuesta podrá ser aplicable en momentos de aumentos bruscos en la demanda de litio.

El proceso actual de evaporación mecánica tiene un gasto intensivo de agua para lograr la funcionalidad de las pozas y el paso de salmueras entre pozas, el uso de equipos supone una posible recuperación de agua a partir del vapor generado por la evaporación de la salmuera la cual puede ser usada en el mismo proceso de evaporación. Dado que hoy en día las empresas destinadas a la producción de litio tienen acceso al agua no les es llamativa la posibilidad de recuperación de agua en el proceso, entendiendo que el futuro de la industria extractiva es reducir el impacto ambiental provocado por sus procesos se crearan normativas más estrictas conforme al consumo de agua, lo cual daría pie a la utilización de otro tipo de tratamientos industriales.

Recomendaciones

Se recomienda considerar esta propuesta como pie inicial a futuros proyectos en la universidad, el presente trabajo abre la puerta para futuros estudios relacionados con el tema en cuestión. La universidad Andrés Bello puede convertirse en un potencial

proveedor de información para la industria del litio chilena a través de trabajos y estudios de tesis y prácticas, además se podrá crear un área destinada a estudios de laboratorio de concentración de salmueras de litio, con el fin de engrosar el estudio y avances de información para el futuro del mercado.

VI. BIBLIOGRAFÍA

Albermale. (s.f.). <http://www.albemarlelitio.cl>.

comision chilena del cobre. (2013). *Mercado internacional del litio*.

gobierno de aragon, d. d. (s.f.).

http://iesvp.educa.aragon.es/tutores/jcsantolaria_27/file/Teoria/Ficha-Evaporadores.pdf.

<http://www.minmineria.gob.cl/extraccion-del-litio-desde-el-mineral/>. (s.f.).

<https://www.textoscientificos.com/quimica/cristales/cristalizadores>. (14 de 1 de 2006).

Jerome Lukes, SQM-Salar. (s.f.). *Parametros operacionales- SQM-Salar*.

Seidell, A. (1941). *Solubilities of organic compounds*. Washington D.C.

SQM. (2016). *Presentacion SQM*. <http://www.sqm.com>

VII. ANEXOS

Áreas pozas de evaporación

En el modelo de simulación creado el tiempo de residencia de la salmuera en cada poza de evaporación se determina relacionando la evaporación promedio (tabla 4.3) y los parámetros de poza específicamente las áreas de evaporación de cada poza, las áreas de evaporación de cada poza serán mostradas en la tabla 7.1.

Tipo de poza	Área de poza mt ²
Poza NaCl	10453,49
Poza NaCl+KCl	7776,34
Poza Carnalita	3317,48
Poza Bischofita	1102,44

Tabla 11: Áreas de evaporación, Fuente: Elaboración propia

Relación de MgLi

Para los cálculos del modelo de evaporación se utilizó las concentraciones mostradas en el diagrama ternario de la figura 4.7 y las concentraciones objetivos de Magnesio-litio manejadas en el mercado, representadas en la tabla 7.2.

Tipo de poza	MgLi (%)
Poza NaCl	1,1
Poza NaCl+KCl	2
Poza Carnalita	4,5
Poza Bischofita	7
Salmuera de litio	9

Tabla 12: Relación magnesio-litio, Fuente: Elaboración propia

Modelo de Pitzer

Modelo termodinámico formulado por Kenneth Pitzer en 1973, utilizo como base la ley de Debye-Huckel adicionando una serie dependiente de la concentración del electrolito para representar las interacciones de este en un medio acuoso.

El modelo ha alcanzado alta aceptación, aplicado con éxito en diversos sistemas geoquímico multicomponentes como por ejemplo salmueras o en estudios de solubilidad de gases atmosféricos en agua de mar.

Pitzer desarrollo un sistema de ecuaciones para explicar la termodinámica de electrolitos en solución. Las ecuaciones de carácter semi-empirico han tenido éxito para electrolitos en solución con coeficientes de actividad iónico sea medio. Estas ecuaciones son las siguientes:

$$\ln \gamma_{MX}^{\pm} = |z_M z_X| f^{\gamma} + \left(\frac{2\nu_M \nu_X}{\nu_{MX}} \right) m_{MX} B_{MX}^{\gamma} + \left(\frac{2(\nu_M \nu_X)^{3/2}}{\nu_{MX}} \right) m_{MX}^2 C_{MX}^{\gamma}$$

$$f^{\gamma} = -A_{\phi} \left[\frac{I^{1/2}}{1 + bI^{1/2}} + \left(\frac{2}{b} \right) \ln(1 + bI^{1/2}) \right]$$

$$B_{MX}^{\gamma} = 2\beta_{MX}^{(0)} + \frac{2\beta_{MX}^{(1)}}{\alpha^2 I} g(I)$$

$$g(I) = \left[1 + \frac{1}{2} \left(2 - \alpha^2 I + 2\alpha I^{1/2} \right) \exp(-\alpha I^{1/2}) \right]$$

$$C_{Mx}^{\gamma} = 3 |z_M z_X|^{1/2} C_{MX}$$

La metodología creada por Pitzer ayudara a predecir concentraciones a las cuales se pueden encontrar distintos elementos o compuestos (sales) en un sistema multi-componente a través del cálculo de las constantes de solubilidad por medio de coeficientes de actividad dados por la energía libre de Gibbs de cada compuesto.