

**UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA METALÚRGICA  
Y DE MATERIALES**



**“Simulación computacional para la obtención de una enmienda agrícola enriquecida en magnesio a partir de agua de mar”**

**Trabajo de propuesta de memoria de titulación presentado en conformidad a los requisitos y reglamentos requeridos para obtener el título de Ingeniera Civil Metalúrgica**

**Profesor Guía: Jesús Casas de Prada**

**IRIDE AIMEE SANTIBÁÑEZ TORRES  
2024**

## DEDICATORIA

*A mis padres, por ser pilar fundamental en mi vida,  
inculcarme buenos valores e impulsarme a ser mejor.*

## **AGRADECIMIENTOS**

Gracias a mis padres Iride y Sergio y a mi hermano Martin, sin ellos no podría haber superado mi etapa universitaria y no podría estar haciendo este trabajo.

Gracias a toda mi familia, mis abuelos, tíos y primos, que estuvieron presente de todas las formas posibles en esta experiencia, en llamadas, mensajes, visitas y regalos. Salir de mi ciudad no fue fácil, pero jamás me sentí sola.

Gracias a todo el equipo docente del Departamento de Ingeniería Metalúrgica y Materiales, que entregaron experiencias y aprendizajes que ayudaron a forjar mis conocimientos durante la carrera, en particular a mi profesor guía Jesús Casas de Prada, por facilitar espacios de conversación, de trabajo, aclarar dudas y ayudar en cada oportunidad que lo requería. Además, agradecer a los apoyos académicos del departamento, en especial a Leticia Guerra y Claudia Morales, que sin ellos no hubiese sido posible desarrollar experiencias en laboratorio, facilitar equipos y reactivos, y realizar análisis químicos de mi proyecto.

Gracias a Lucia y Mattias, amigos de toda la vida que desde casa me apoyaron en todo momento. Gracias a mis amigos que hice en la Universidad, Catalina Olivares, Catalina Carrazana, Sebastián Jorquera, Fabian Barrios, Rocío Farias y Pili Zaida, con quienes compartimos días y noches de estudio, momentos de felicidad y tristeza, fuimos una familia estando lejos de nuestras casas.

Finalmente, gracias a las personas que empezaron esta aventura conmigo pero lamentablemente no pudieron estar en el final. Mami Rosa, Tata Sergio, me hubiese encantado que estuvieran conmigo en estos momentos, pero los planes fueron otros. Estoy segura de que donde sea que estén, me ven y se sienten orgullosos de mí.

## RESUMEN

En un contexto de escasez hídrica, se ha favorecido el desarrollo integral de la industria de la desalinización como fuente alternativa y sostenible a las aguas continentales. Los procesos convencionales de desalación separan el agua de mar en dos corrientes principales, una que contiene una baja concentración de sales disueltas, y otra de salmuera concentrada, que sería el desecho del proceso. Ésta última presenta una concentración de magnesio entre 1,9 a 3,3 g/L, por lo que se presenta como una potencial alternativa para la producción de una enmienda agrícola enriquecida en magnesio.

En este estudio, se utilizó un enfoque de simulación computacional con el programa HSC Chemistry 6.0 para modelar y analizar el proceso de obtención de la enmienda agrícola a partir de agua de mar. Para esto, se llevaron a cabo experimentos de laboratorio, obteniendo variables fundamentales para la precisión de la simulación, variando el agente precipitante de la enmienda para seleccionar aquella con la que se obtengan mejores resultados. Finalmente, se evalúa un caso de estudio a nivel de ingeniería de perfil, para así estimar los costos operacionales y el orden de magnitud de la inversión asociado al proceso propuesto.

Respecto a los agentes precipitantes, éstos fueron cal viva, cal apagada, caliza y cal hidráulica. Fueron probadas en el laboratorio para evaluar con cuál de ellas se llega a pH mayor a 11, que es el requerido para la etapa de precipitación y además presente menor costo operacional. Los pH obtenidos fueron 12,71; 12,34; 8,77 y 8,74 respectivamente, por lo tanto, para este proceso, se selecciona la cal viva como alcalinizante del sistema.

Los resultados obtenidos a través de las simulaciones indican que en base al proceso planteado, se obtiene un precipitado compuesto principalmente por hidróxido de magnesio ( $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ), carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) y sulfato de calcio ( $\text{CaSO}_4$ ), los cuales son propicios para la obtención de una enmienda agrícola enriquecida en magnesio. Sin embargo, al realizar un ensayo de DRX a la muestra final por elemento presente, ésta sólo cumple con la proporción de calcio y magnesio, que son 7,496% y 6,757% respectivamente, por lo tanto, se requiere de un acondicionamiento del producto final para que cumpla la composición de una enmienda agrícola enriquecida en magnesio como tal.

Respecto al balance de masa y energía desarrollado, en el cual se considera como base de cálculo un caudal de salmuera de 4464 [ $\text{m}^3/\text{h}$ ] con una concentración de magnesio de 2,345 g/L se puede producir 81,44 t/h de una enmienda agrícola enriquecida en magnesio. Cabe destacar que para lograr la producción de esta enmienda, se requieren 2043 t/h de lechada de cal, esto

equivale a 304,26 t/h de cal viva y 1738,84 t/h de agua de preparación. Desde el punto de vista energético, se requieren de 33.505 MJ en la etapa de secado para lograr que el producto final presente un 1% de humedad.

Finalmente en el desarrollo de la ingeniería de perfil, una vez definido el lugar de implementación de la planta se pudo obtener el capex y el opex, los cuales son \$USD 6.029.060 y \$USD 4.432.241 respectivamente, en donde el principal costo asociado a la producción de enmienda agrícola enriquecida en magnesio es el uso del reactivo óxido de calcio. Por otro lado, el ingreso por venta de tonelada de enmienda agrícola alcanza los \$USD 1137,405, por lo cual se obtiene un PayBack de 2 años, 4 meses y 9 días, por lo cual el proyecto se considera rentable y se sugiere continuar con la etapa de Ingeniería conceptual.

## TABLA DE CONTENIDOS

|                                                                                 |    |
|---------------------------------------------------------------------------------|----|
| DEDICATORIA .....                                                               | 2  |
| AGRADECIMIENTOS.....                                                            | 3  |
| RESUMEN.....                                                                    | 4  |
| TABLA DE CONTENIDOS.....                                                        | 6  |
| Índice de Figuras.....                                                          | 8  |
| Índice de Tablas .....                                                          | 10 |
| CAPITULO I: INTRODUCCIÓN .....                                                  | 11 |
| 1.1 Introducción general.....                                                   | 11 |
| CAPITULO II: ANTECEDENTES Y REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....                         | 13 |
| 2.1 Enmiendas agrícolas.....                                                    | 13 |
| 2.1.1 Tecnologías de producción de enmiendas agrícolas.....                     | 13 |
| 2.1.2. Tipos de enmiendas inorgánicas en el mercado.....                        | 15 |
| 2.1.3 Producción y demanda de enmiendas agrícolas .....                         | 15 |
| 2.2. Salmuera. ....                                                             | 18 |
| 2.3. Magnesio y sus compuestos. ....                                            | 19 |
| 2.3.1. Hidróxido de magnesio.....                                               | 20 |
| 2.3.2. Carbonato de magnesio .....                                              | 21 |
| 2.4. Proceso de obtención de enmiendas agrícolas enriquecidas en magnesio ..... | 22 |
| 2.4.1 Precipitación.....                                                        | 23 |
| 2.4.2 Separación y purificación .....                                           | 27 |
| 2.4.3 Secado y obtención del producto final.....                                | 27 |
| 2.5 Simulación .....                                                            | 27 |
| 2.5.1 HSC Chemistry 6.0.....                                                    | 28 |
| 2.6 Ingeniería de perfil del proyecto. ....                                     | 28 |
| CAPITULO III: OBJETIVOS Y ALCANCES.....                                         | 29 |
| 3.1 Definición del problema.....                                                | 29 |
| 3.2 Hipótesis .....                                                             | 29 |
| 3.3 Objetivos.....                                                              | 29 |
| 3.3.1 Objetivo general .....                                                    | 29 |
| 3.3.2 Objetivos específicos .....                                               | 29 |

|                                                                          |    |
|--------------------------------------------------------------------------|----|
| CAPITULO IV: METODOLOGÍA .....                                           | 30 |
| 4.1 Trabajo experimental para la obtención de enmienda agrícola.....     | 30 |
| 4.1.1. Obtención de agua de rechazo experimental.....                    | 31 |
| 4.1.2 Preparación agente precipitante.....                               | 31 |
| 4.1.3. Obtención de enmienda agrícola.....                               | 32 |
| 4.2 Simulaciones.....                                                    | 35 |
| 4.2.1 Definición del proceso del caso de estudio.....                    | 35 |
| 4.2.2. Especies obtenidas en el sólido precipitado .....                 | 38 |
| 4.2.3. Balance de masa.....                                              | 38 |
| 4.2.4. Balance de energía .....                                          | 38 |
| 4.3. Desarrollo de ingeniería conceptual. ....                           | 39 |
| 4.3.1 Orden de magnitud de inversión.....                                | 39 |
| 4.3.2 Costos Operacionales .....                                         | 40 |
| CAPITULO V: RESULTADOS Y DISCUSIONES.....                                | 41 |
| 5.1. Experiencia en Laboratorio. ....                                    | 41 |
| 5.2. Balance de masa y energía.....                                      | 45 |
| 5.2.1. Balance Global.....                                               | 45 |
| 5.3.2. Balances por etapas.....                                          | 48 |
| 5.3 Estimación de costos de operación e inversión.....                   | 53 |
| 5.3.3. Capex.....                                                        | 54 |
| 5.3.4. Opex .....                                                        | 55 |
| CAPITULO VI: CONCLUSIONES .....                                          | 59 |
| CAPITULO VII: Recomendaciones .....                                      | 61 |
| CAPITULO VI: REFERENCIAS .....                                           | 62 |
| CAPITULO VII: ANEXOS.....                                                | 70 |
| ANEXO A. Resultados DRX muestra final.....                               | 70 |
| ANEXO B. Simulaciones .....                                              | 71 |
| B.1. Simulaciones de balances de masa en HSC Chemistry.....              | 71 |
| B.2. Simulación balance de energía etapa de secado en HSC Chemistry..... | 79 |
| ANEXO C. Cálculo de costos operacionales. ....                           | 81 |
| C.1 Especificación de equipos. ....                                      | 81 |
| C.2. Resultados CAPEX mediante método Peters & Timmerhaus .....          | 82 |
| C.3. Resultados OPEX.....                                                | 83 |

## Índice de Figuras

|                                                                                                                                   |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 Tipos de enmiendas agrícolas en el mercado [9].....                                                                      | 13 |
| Figura 2 Desaladora Enapac.....                                                                                                   | 14 |
| Figura 3 Yacimiento "Magnesium do Brasil" .....                                                                                   | 14 |
| Figura 4 Materia prima enmiendas orgánicas.....                                                                                   | 14 |
| Figura 5 Ranking de los principales países productores agrícolas a nivel mundial [10] .....                                       | 16 |
| Figura 6 Solubilidad de óxidos e hidróxidos de distintas especies químicas [27]. .....                                            | 21 |
| Figura 7 Solubilidad carbonatos [27] .....                                                                                        | 22 |
| Figura 8 Variación de pH según concentración de cal en el sistema .....                                                           | 24 |
| Figura 9 Simulador HSC Chemistry 6.0.....                                                                                         | 28 |
| Figura 10 Obtención salmuera experimental .....                                                                                   | 31 |
| Figura 11 Preparación lechada de cal .....                                                                                        | 32 |
| Figura 12 Desarrollo proceso de precipitación.....                                                                                | 33 |
| Figura 13 Sólido decantado.....                                                                                                   | 33 |
| Figura 14 Producto etapa centrifugado.....                                                                                        | 34 |
| Figura 15 Producto final .....                                                                                                    | 34 |
| Figura 16 Diagrama de flujo para obtención de enmienda agrícola .....                                                             | 36 |
| Figura 17 Factores de Peter y Timmerhaus (expresados en % del valor del equipo) .....                                             | 39 |
| Figura 18 DRX a precipitado obtenido con cal viva .....                                                                           | 43 |
| Figura 19 DRX a precipitado obtenido con cal apagada.....                                                                         | 44 |
| Figura 20 Diagrama de flujo para obtención de enmienda agrícola .....                                                             | 46 |
| Figura 21 Balance de masa proceso de precipitación de hidróxido de magnesio .....                                                 | 48 |
| Figura 22 Balance de masa proceso de Decantación.....                                                                             | 49 |
| Figura 23 Balance de masa proceso Centrifugado .....                                                                              | 50 |
| Figura 24 Balance de masa proceso de secado.....                                                                                  | 50 |
| Figura 25 Balance de masa preparación lechada de cal .....                                                                        | 51 |
| Figura 26 Balance de masa piscina agua sobrenadante .....                                                                         | 52 |
| Figura 27 Ubicación planta desaladora "La Chimba" .....                                                                           | 53 |
| Figura 28 Distribución costos de inversión .....                                                                                  | 54 |
| Figura 29 Distribución costos de operación .....                                                                                  | 57 |
| Figura 30 Resultado DRX muestra final .....                                                                                       | 70 |
| Figura 31 Diagrama de flujos de proceso de obtención de enmienda agrícola enriquecida en magnesio simulado en HSC Chemistry ..... | 71 |

|                                                                                             |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 32 Simulador balance de masa proceso de precipitación .....                          | 72 |
| Figura 33 Simulador balance de masa reacciones involucradas en proceso de precipitación ... | 73 |
| Figura 34 Simulador balance de masa proceso de Decantación .....                            | 74 |
| Figura 35 Simulador balance de masa proceso Centrifugado.....                               | 75 |
| Figura 36 Simulador balance de masa Secado .....                                            | 76 |
| Figura 37 Simulador balance de masa preparación lechada de cal.....                         | 77 |
| Figura 38 Simulador balance de masa piscina agua para procesos .....                        | 78 |
| Figura 39 Input simulación balance de energía proceso de secado.....                        | 79 |
| Figura 40 Output simulación balance de energía proceso de secado.....                       | 79 |
| Figura 41 Balance global de energía del proceso de secado .....                             | 80 |

## Índice de Tablas

|                                                                                                 |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 1 Composición mínima enmienda agrícola enriquecida en magnesio [13] .....                 | 18 |
| Tabla 2 Composición de agua de mar vs salmuera [16]. .....                                      | 19 |
| Tabla 3 Propiedades físicas y químicas cal viva.....                                            | 25 |
| Tabla 4 Propiedades físicas y químicas cal apagada .....                                        | 25 |
| Tabla 5 Propiedades físicas y químicas caliza .....                                             | 26 |
| Tabla 6 Propiedades físicas y químicas cal hidráulica .....                                     | 26 |
| Tabla 7 Equipos utilizados en laboratorio .....                                                 | 30 |
| Tabla 8 Proporción preparación lechada de cal.....                                              | 32 |
| Tabla 9 Parámetros salmuera experimental .....                                                  | 41 |
| Tabla 10 Concentración de elementos en salmuera experimental.....                               | 41 |
| Tabla 11 Parámetros de preparación de lechada de cal.....                                       | 42 |
| Tabla 12 pH resultantes con los distintos tipos de cal .....                                    | 42 |
| Tabla 13 Resultados DRX elementos presentes en producto final .....                             | 45 |
| Tabla 14 Balance global proceso de obtención de enmienda agrícola enriquecida en magnesio ..... | 46 |
| Tabla 15 Cargos operativos y remuneraciones planta.....                                         | 55 |
| Tabla 16 Detalle de ingreso por venta .....                                                     | 57 |
| Tabla 17 Equipos seleccionados para el proceso de obtención de enmienda agrícola.....           | 81 |
| Tabla 18 Detalle Capex .....                                                                    | 82 |
| Tabla 19 Detalle OPEX .....                                                                     | 83 |

## CAPITULO I: INTRODUCCIÓN

### 1.1 Introducción general

Según la ley 21.349 que establece normas sobre composición, etiquetado y comercialización de los fertilizantes y bioestimulantes, define como enmienda agrícola a todo producto o mezcla de sustancias de carácter inorgánico, orgánico o biológico que, incorporadas al suelo, modifican o mejoran sus características físicas, química o biológicas, sin perjuicio de su valor como fertilizantes. [1]

Actualmente en el mercado existen enmiendas de tipo orgánicas e inorgánicas, enfocándonos en las últimas mencionadas, ya que se pueden fabricar con nutrientes de origen mineral obtenidos a través de procesos industriales de carácter físico y químico. [2]

A lo largo de su vida útil es necesario un reacondicionamiento de los suelos agrícolas, ya que el contenido de los nutrientes va disminuyendo a medida que la tierra genera productos agrícolas, por lo que la corrección de dicho problema permite mantener la productividad de las plantas. [2]

Para generar las enmienda que reparen estos suelos, se requieren múltiples elementos para su composición, siendo los más importantes el magnesio y el calcio, que son los componentes básicos utilizados para la fabricación de éstas. [3]

Si bien el magnesio, uno de los componentes principales de las enmiendas, se obtiene a partir del procesamiento del mineral de magnesita y brucita, de igual forma es posible precipitar este elemento a partir de salmueras obtenidas desde una planta desalinizadora. [4] .

La obtención de este elemento a partir de una solución acuosa implica un proceso de extracción y purificación del magnesio. A continuación, se describen los pasos generales involucrados en este proceso:

**Captación de agua de mar:** Se recolecta una cantidad adecuada de agua de mar de fuentes cercanas al área de producción. Es importante considerar la calidad y la ubicación de la fuente para evitar contaminaciones indeseadas.

**Filtración y eliminación de impurezas gruesas:** El agua de mar se somete a un proceso de filtración para eliminar partículas y sedimentos gruesos. Esto puede realizarse mediante tamices o filtros de tamaño apropiado.

**Desalinización:** El agua de mar se desaliniza para eliminar el exceso de sales y obtener como producto principal una corriente de agua dulce y como desecho o rechazo se obtiene salmuera, un subproducto hipersalino que es la misma agua de entrada, pero con una mayor concentración

de sales, ya que están diluidas en una menor cantidad de agua [5], por lo que su concentración puede llegar a valores entre 1,6 y 2,5 la salinidad del agua de mar [6]. Esto se puede lograr a través de técnicas de desalinización, como la ósmosis inversa o la destilación, que permiten separar el agua de mar de las sales disueltas.

**Concentración y purificación del magnesio:** La salmuera se concentra y purifica para obtener una mayor concentración de magnesio. Se pueden utilizar diferentes métodos, como la precipitación química o la extracción por solventes, para aislar y recuperar el magnesio presente en la solución.

**Secado y obtención del producto final:** El magnesio obtenido se seca para eliminar la humedad y obtener una enmienda agrícola en forma de polvo o gránulos.

Como ya se mencionó anteriormente, la salmuera está compuesta por los mismos elementos que el agua de mar, aunque su concentración se ve aumentada casi al doble, por lo que sus elementos principales son el cloro y el sodio, seguidos por sulfatos, magnesio, calcio y potasio [7], razón por la cual se evaluará una extracción de material potencialmente rentable del agua de rechazo, enfocado en la obtención de una enmienda agrícola enriquecida en magnesio por medio del proceso de precipitación.

En esta propuesta de memoria se va a determinar una metodología de trabajo mediante experiencias de laboratorio y simulaciones computacionales para obtener un precipitado a partir de un agua de rechazo experimental, el cual va a ser analizado para determinar la composición de éste, esperando que el compuesto obtenido sea un producto sólido con alto contenido de hidróxido de magnesio con la calidad necesaria para ser utilizada como enmienda agrícola, estableciendo parámetros operacionales para desarrollar balances de masa y energía para el desarrollo del proceso a escala industrial simulado en el programa HSC Chemistry, estimando el costo operacional y la inversión que implica la ejecución de este proyecto.

## CAPITULO II: ANTECEDENTES Y REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Enmiendas agrícolas

Una enmienda agrícola es un producto compuesto de magnesio y calcio, además de otros elementos, utilizado para la corrección y mejora de una condición física, química o biológica de un suelo, favoreciendo las condiciones para las plantas sembradas o por sembrar en éste. [8]

Como podemos ver en la Figura 1, las enmiendas se pueden clasificar en 2 grandes grupos, enmiendas orgánicas e inorgánicas o minerales. La función principal de las enmiendas orgánicas, como su nombre lo dice, es aportar materia orgánica al suelo, con el fin de generar humus para mejorar la fertilidad del suelo. Por otro lado, las enmiendas inorgánicas o minerales son aquellas compuestas principalmente por magnesio y calcio, pero además están compuestas por otros minerales, que se puedan encontrar deficientes en los suelos, siendo éstas últimas en las que nos vamos a centrar. [9]

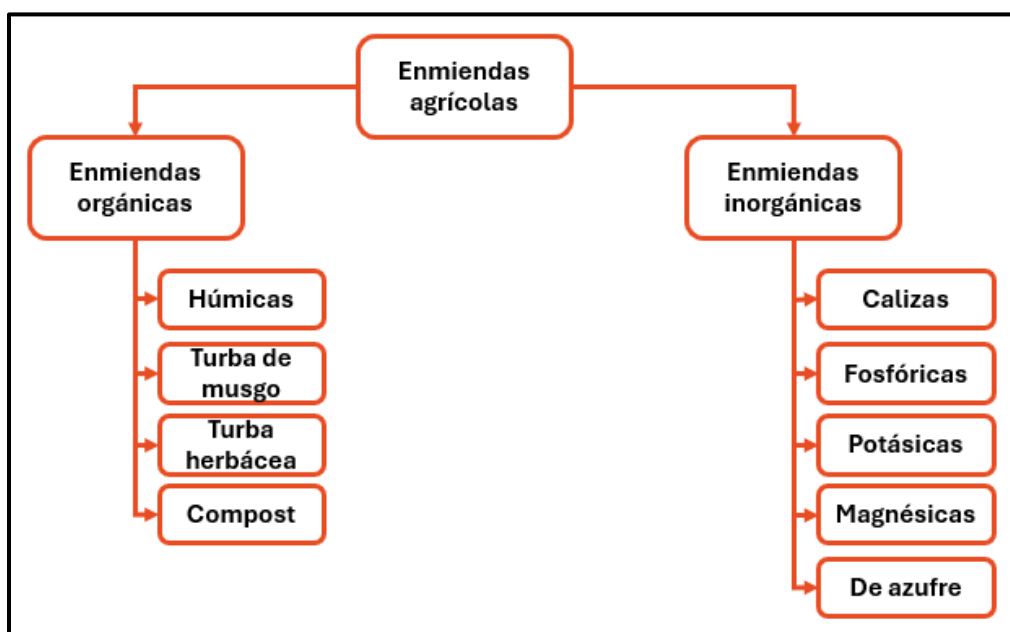


Figura 1 Tipos de enmiendas agrícolas en el mercado [9]

#### 2.1.1 Tecnologías de producción de enmiendas agrícolas

Existen diversas tecnologías y procesos utilizados en la producción de compuestos utilizados para la fabricación de enmiendas agrícolas. A continuación, se describen algunas de éstas y los procesos más comunes:

- **Extracción de compuestos a partir de agua de mar:** Esta tecnología implica extraer y concentrar el magnesio presente en el agua de mar para su posterior uso en la producción de enmiendas agrícolas. Se utilizan procesos de desalinización y concentración para separar el magnesio de otros componentes del agua de mar, como el cloruro de sodio. Los métodos de extracción pueden incluir la precipitación química, la adsorción o la electrodiálisis.



Figura 2 Desaladora Enapac

- **Procesamiento de minerales:** Otra fuente de magnesio para la producción de enmiendas es el procesamiento de minerales ricos en magnesio, como brucita o magnesita. Estos minerales se trituran y se someten a procesos químicos para obtener compuestos de magnesio.



Figura 3 Yacimiento "Magnesium do Brasil"

- **Fertilizantes y aditivos enriquecidos:** Una forma común de producir enmiendas agrícolas es mediante la formulación de fertilizantes y aditivos específicos que contienen magnesio en forma soluble o quelada. Estos productos se pueden mezclar con otros nutrientes y materiales orgánicos para crear una enmienda agrícola lista para su aplicación en el suelo.



Figura 4 Materia prima enmiendas orgánicas

Es importante tener en cuenta que las tecnologías y procesos específicos pueden variar según la disponibilidad de recursos, la ubicación geográfica y las regulaciones locales. Cada tecnología tiene sus ventajas y desafíos, y es fundamental evaluar su viabilidad económica y ambiental antes de su implementación.

### **2.1.2. Tipos de enmiendas inorgánicas en el mercado**

Existen cinco grandes grupos de enmiendas inorgánicas en el mercado, los cuales son: [9]

#### ***Calizas***

Este tipo de enmienda está compuesta de productos y materiales que aportan calcio y magnesio de múltiples orígenes, como el carbonato de calcio de origen natural, carbonato de magnesio, cloruro cálcico, incluso algas ricas en calcio, entre otros, utilizadas tanto para aportar este elemento al suelo como para elevar el pH del suelo.

#### ***Fosfórica***

Estas enmiendas pueden estar hechas a base fosfato natural blando, el cual debe contener Cadmio en niveles inferiores a 90 mg/kg de  $P_2O_5$ . También se puede usar como materia prima el fosfato aluminio cálcico con un contenido inferior o igual a 90 mg/kg de  $P_2O_5$ , siendo su utilización limitada a los suelos básicos.

#### ***Potásica***

Para obtener esta enmienda se pueden utilizar como base la sal potásica en bruto (Kainita, Silvinita, entre otros), y el sulfato de potasio con sal de magnesio.

#### ***Magnésicas***

Enmienda hecha a base de magnesio en su formato de carbonato, sulfato, óxido e hidróxido.

#### ***De azufre***

Enmienda de azufre elemental

### **2.1.3 Producción y demanda de enmiendas agrícolas**

Los productores de enmiendas agrícolas varían dependiendo de la región y del tipo de enmienda en cuestión. Sin embargo, algunos de los principales productores de enmiendas agrícolas a nivel mundial son aquellos que presentan una gran base agrícola y una industria desarrollada en el sector. Algunos de ellos son Estados Unidos, China, India, Brasil, Argentina y algunos países europeos como Alemania y Holanda. Estos países producen una amplia gama de enmiendas agrícolas, desde compost hasta fertilizantes orgánicos e inorgánicos, para satisfacer las necesidades de sus sectores agrícolas. [10]

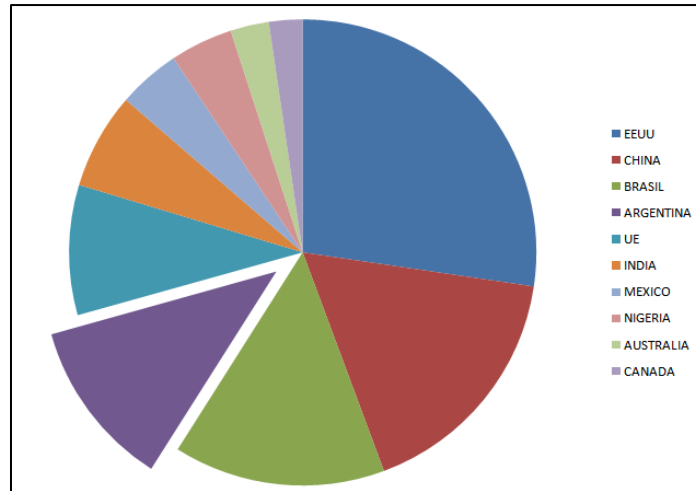


Figura 5 Ranking de los principales países productores agrícolas a nivel mundial [10]

La producción de enmiendas puede presentar diversas dificultades, en donde las más comunes incluyen [10]:

- **Disponibilidad y obtención de materias primas:** Como vimos anteriormente, el magnesio puede obtenerse de diferentes fuentes, como agua de mar, minerales ricos en magnesio o residuos de otras industrias. Sin embargo, la disponibilidad y la obtención de estas materias primas pueden ser un desafío en algunas regiones. Por ejemplo, la extracción de magnesio del agua de mar puede requerir tecnologías y procesos costosos, mientras que la disponibilidad de minerales ricos en magnesio puede ser limitada en ciertos lugares.
- **Procesamiento y extracción eficientes:** Los procesos de extracción y procesamiento del magnesio deben ser eficientes y rentables para garantizar la viabilidad económica de la producción de enmiendas agrícolas. Esto implica la implementación de tecnologías adecuadas y optimizadas que permitan una extracción y purificación eficientes del magnesio, así como una gestión adecuada de subproductos y residuos.
- **Calidad y estabilidad del producto final:** Es importante garantizar la calidad y la estabilidad del producto final, especialmente en términos de contenido de magnesio y su disponibilidad para las plantas. La forma en que se presente el magnesio en la enmienda agrícola (por ejemplo, como sales solubles, quelatos o compuestos orgánicos) puede influir en su disponibilidad y eficacia para las plantas. También es crucial considerar la estabilidad del producto frente a factores como la humedad, la exposición a la luz y la temperatura.

- **Regulaciones y requisitos legales:** La producción de enmiendas agrícolas está sujeta a regulaciones y requisitos legales que varían según las regiones y los países. Estos pueden incluir estándares de calidad, etiquetado, buenas prácticas de producción y requisitos de seguridad y medioambientales. Cumplir con estas regulaciones puede suponer desafíos adicionales y costos asociados.
- **Aceptación y adopción en el mercado:** La aceptación y adopción de las enmiendas agrícolas en el mercado agrícola pueden ser desafiantes. Es necesario crear conciencia y educar a los agricultores sobre los beneficios y la eficacia de estas enmiendas para promover su uso. También puede ser necesario superar la competencia con otros productos y enmiendas existentes en el mercado.

Por otro lado, la demanda de enmiendas agrícolas está impulsada por varios factores, incluyendo el tamaño y la salud del sector agrícola, la disponibilidad de tierras cultivables, las prácticas agrícolas sostenibles y las regulaciones ambientales. A medida que la población mundial continúa, la demanda de alimentos también aumenta, lo que impulsa la necesidad de mejorar la productividad y la calidad de los cultivos [11].

Además, la creciente conciencia sobre la importancia de la salud del suelo y la sostenibilidad agrícola ha llevado a un aumento en la demanda de enmiendas agrícolas orgánicas e inorgánicas, siendo ésta última de gran importancia, especialmente en regiones donde se practica la agricultura intensiva, buscando maximizar los rendimientos de los cultivos [11].

Si bien, el precio de una tonelada de enmienda agrícola varía considerablemente dependiendo de factores como el tipo de enmienda, calidad del producto, ubicación geográfica de la planta de producción, entre otros, a continuación se presentan algunos rangos de valores para enmiendas [11]:

- Enmiendas orgánicas como compost o estiércol: El precio puede variar entre \$20 USD a \$100 USD por tonelada, dependiendo de factores como la calidad del compost, los costos de producción y la disponibilidad de materia prima.
- Enmiendas inorgánicas como fertilizantes químicos: Los precios pueden variar ampliamente según la fórmula y la concentración de nutrientes, por ende, estos pueden variar entre \$200 USD a \$1000 USD por tonelada
- Enmiendas específicas enriquecidas en nutrientes: El precio se eleva puesto que se requieren más nutrientes para que adquieran cierta característica específica. Dado esto,

su precio puede variar entre \$200 USD a \$1500 USD, todo esto asociado al tipo y concentración de nutrientes.

Para este caso de estudio, nos enfocaremos en las enmiendas de tipo magnésicas, en donde su composición mínima es la que se indica en la Tabla 1, la cual tiene un precio de \$1137,405 USD [12], obteniendo los compuestos a través de la extracción de éstos a partir de salmuera generada por el proceso de desalinización de agua de mar.

Tabla 1 Composición mínima enmienda agrícola enriquecida en magnesio [13]

| Elemento        | Composición mínima [%] |
|-----------------|------------------------|
| Nitrógeno total | 0,88                   |
| Fósforo total   | 0,082                  |
| Potasio         | 1,9                    |
| Sodio           | 5,16                   |
| Calcio          | 2,53                   |
| Magnesio        | 2,72                   |
| Azufre          | 5,19                   |
| Silicio Soluble | 3                      |
| Manganeso       | 0,01                   |

## 2.2. Salmuera.

La salmuera es un subproducto hipersalino generado en el proceso de desalinización, presenta concentraciones entre 1,6 a 2,5 la salinidad del agua de mar, además de productos químicos propios del proceso, la cual es devuelta al mar, afectando el equilibrio osmótico del medio que rodea el área de descarga. [14]

Inicialmente, se consideraba que el impacto de la salmuera era despreciable por poseer bajas concentraciones y su volumen no era exagerado en comparación a la cantidad de agua potable que genera el proceso. Sin embargo, actualmente se conoce que las aguas residuales resultantes del proceso de desalinización presentan un aumento en el contenido de sales y diferencias de temperatura, pH y alcalinidad. [15]

A continuación, se presenta la Tabla 2 en la cual se comparan las composiciones del agua de mar y la salmuera.

Tabla 2 Composición de agua de mar vs salmuera [16].

| Elemento    | Agua de mar [g/L] | Salmuera [g/L] |
|-------------|-------------------|----------------|
| Cloruro     | 19,888            | 32,319         |
| Sodio       | 11,11             | 17,687         |
| Magnesio    | 1,413             | 2,345          |
| Calcio      | 0,391             | 0,727          |
| Potasio     | 0,389             | 0,799          |
| Bicarbonato | 0,137             | 0,262          |
| Fluoruro    | 0,000888          | 0,00182        |

Según la Tabla 2 la salmuera presenta aproximadamente el doble de salinidad que el agua de mar, en donde destacan elementos como el cloruro, sodio y magnesio.

Actualmente, la recuperación de especies de alto valor agregado a partir de la salmuera obtenida de las plantas desaladoras convierte este flujo en un valioso recurso, sumado a los grandes avances de la tecnología de los últimos tiempos en términos de recuperación de recursos, han pavimentado un camino de investigación cada vez más relevante en la industria de la desalación a nivel mundial [17].

En base a lo anteriormente mencionado, es que entra el concepto de minería de la salmuera (o Brine Mining) en donde se reconoce a esta corriente como un yacimiento líquido, del cual se pueden extraer elementos y compuestos químicos, tales como cloruros, potasio, calcio, fósforo, magnesio, entre otros, siendo el último mencionado la especie de interés de este trabajo [17].

### **2.3. Magnesio y sus compuestos.**

El magnesio es un metal liviano, constituyente de especies esenciales para el desarrollo de la vida. Ocupa el séptimo lugar entre los elementos más abundante de la Tierra, que en su estado basal es insoluble y presenta una alta reactividad, por lo que en la naturaleza se puede encontrar como compuestos y sales. [18]

Este elemento es de suma importancia en la industria debido a su alta resistencia, baja densidad y gran capacidad para disipar el calor. Es por esto que posee múltiples aplicaciones, como la fabricación de piezas de maquinaria que requieren resistencia y ligereza, como en la industria automotriz y aeroespacial, en la industria agrícola para la fabricación de fertilizantes y enmiendas agrícolas, siendo un elemento esencial para las plantas ya que forma parte fundamental en el proceso de fotosíntesis como átomo central de la clorofila y la activación de enzimas en las

plantas, afectando directamente en el crecimiento, desarrollo y la síntesis de compuestos indispensables para la vida vegetal [19].

La deficiencia de magnesio se presenta frecuentemente durante la fase de mayor crecimiento en los cultivos y por ende, existe una mayor demanda de este elemento en esta etapa, la cual puede ser sustentada con la adición de fertilizantes o enmiendas con alto contenido de magnesio en su composición [19].

A pesar de que el magnesio puede ser encontrado en más de 60 minerales en la naturaleza, sólo algunos tienen importancia comercial debido a que contienen mayor proporción del elemento en su composición, por lo que se puede obtener magnesio de alta pureza a partir de ellos, como la brucita, magnesita y dolomita [19], cuyo proceso de obtención tradicional consiste en la extracción de la roca, reducción de tamaño y finalmente el magnesio como producto final, mediante reducción en hornos eléctricos o cloruración y electrólisis [20].

Por otro lado, y considerando que el magnesio es el tercer elemento más abundante en el mar [18], estos compuestos también se pueden obtener a partir del agua de mar, salmueras y lagos [11]. Según Manzoor Qadir, un litro de salmuera posee cerca de 60 gramos de sales minerales [21], y actualmente es posible recuperar estos elementos de alto valor agregado basándose en el concepto de Brine mining.

Entre los compuestos que son posibles de obtener desde aguas naturales están la brucita (hidróxido de magnesio), la magnesita (carbonato de magnesio) y diversos tipos de carbonatos hidratados, siendo el primero de éstos el menos soluble y en el cual nos vamos a enfocar en obtener a partir de salmuera. [22].

### **2.3.1. Hidróxido de magnesio**

Es un compuesto inorgánico de fórmula  $Mg(OH)_2$ , que en su forma pura es un sólido blanco amorfo, el cual con un pequeño contenido de impurezas, se transforma en un mineral conocido como brucita, el cual se puede encontrar en la naturaleza. [23]

Si bien el hidróxido de magnesio es altamente conocido por su aplicación en el campo de la medicina como antiácido, presenta otras aplicaciones como en la industria alimentaria en el refinamiento del azúcar, en la industria de la construcción como agente no inflamable y en la industria de la agronomía como ingrediente en los fertilizantes para plantas [24], en donde su precio por kilogramo ronda los USD\$552 [25]

A continuación, la Ec. 1 muestra la reacción de solubilidad con su respectiva constante de equilibrio, en donde se expone la escasa solubilidad en agua que este compuesto presenta [26]



Esto, sumado a la información que nos entrega la Figura 6 podemos identificar que el hidróxido de magnesio va a comenzar su precipitación en un pH cercano a 9.5, según la concentración del magnesio en el medio desde el cual se quiere obtener, la cual en este caso es la salmuera.

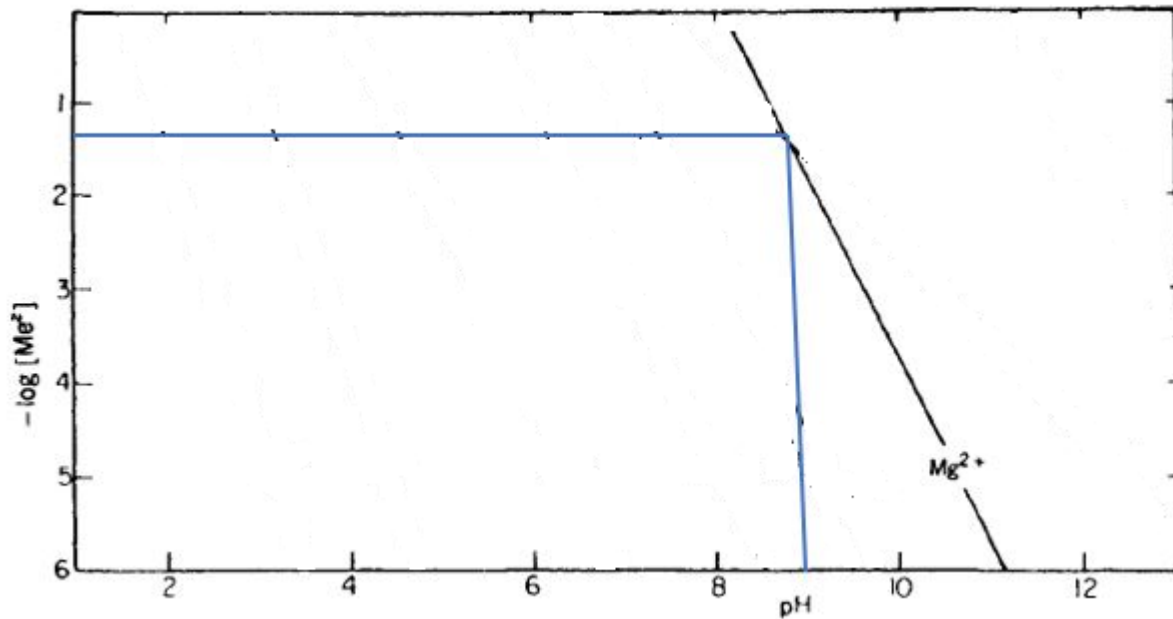


Figura 6 Solubilidad de óxidos e hidróxidos de distintas especies químicas [27].

### 2.3.2. Carbonato de magnesio

Es una sal mineral orgánica de color blanco, que en la naturaleza se puede encontrar como el mineral de magnesita. Sus principales aplicaciones radican en la industria cosmética en cremas por sus propiedades antiácidas y ligeramente abrasivas, en la fabricación de explosivos por su alto poder de absorción de nitroglicerina y en la industria agrícola como agente reparador de suelos [28]. El precio por kilogramo de este compuesto en el mercado se encuentra en USD\$68 [29].

El carbonato de magnesio precipita según la Ec. 2, lo cual va a suceder cuando el sistema se encuentre en un pH entre 7 y 8, esto según la concentración de magnesio presente en el medio, que al igual que el caso anterior, es salmuera.

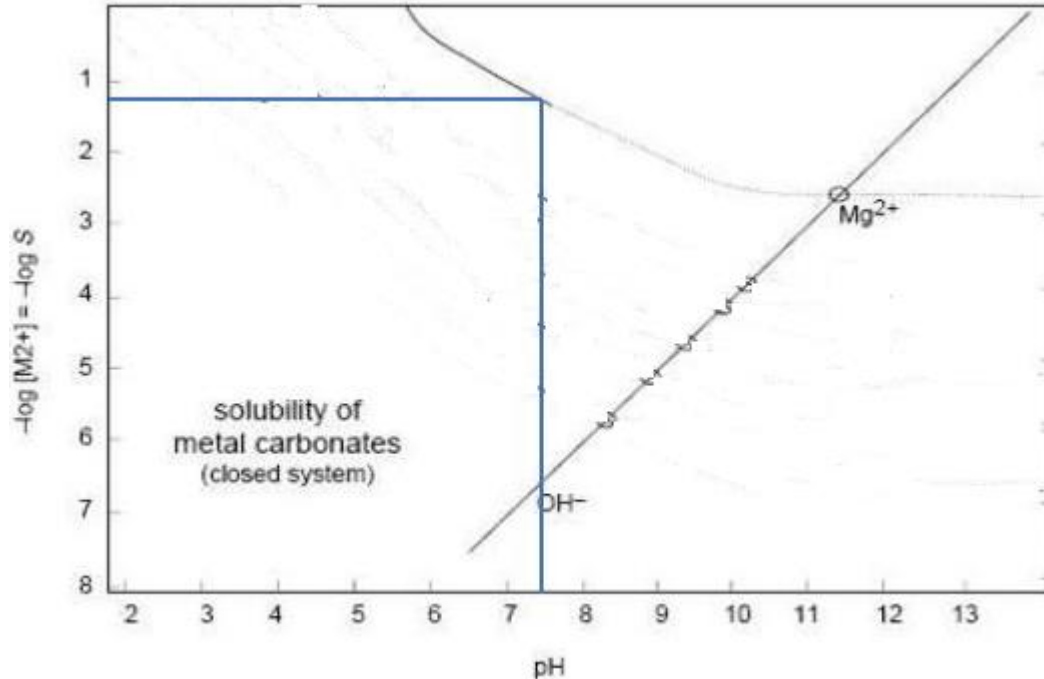


Figura 7 Solubilidad carbonatos [27]

#### 2.4. Proceso de obtención de enmiendas agrícolas enriquecidas en magnesio

El proceso de obtención de compuestos de magnesio a partir de salmuera para su utilización en la fabricación de enmiendas agrícolas implica etapas de precipitación y de separación sólido – líquido.

A grandes rasgos, el proceso consiste en cuatro pasos [30]:

- Paso 1: Adición del agente precipitante y ajuste de pH.

Etapla inicial en la cual se adiciona el agente precipitante óptimo para el proceso, que en la mayoría de los casos es hidróxido de calcio en forma de lechada de cal, con el cual se ajusta el pH para maximizar la precipitación. Generalmente, en este paso se agita la mezcla para asegurar una concentración uniforme del precipitante en la solución.

- Paso 2: Floculación

Consiste en permitir que los pequeños sólidos que se van formando en la primera etapa de la precipitación se unan entre sí para formar partículas o flóculos de mayor tamaño, buscando que el siguiente paso se desarrolle de manera más rápida, por lo que se baja la velocidad de agitación.

- Paso 3: Sedimentación

Aquí se busca dejar reposar la solución en un recipiente para permitir que las partículas sólidas sedimenten.

- Paso 4: Separación sólido – líquido

Finalmente, la separación sólido – líquido consiste en una decantación de la solución que queda sobre el sedimento, la cual puede incluir una etapa de centrifugado si se requiere.

#### **2.4.1 Precipitación**

La precipitación es un proceso en el cual se forma un sólido a partir de una solución, esto puede ocurrir mediante la cristalización de una sustancia disuelta o por la formación de un compuesto insoluble por medio de una reacción química [31]. La insolubilidad puede estar asociada a variaciones en la temperatura, pH o agregar agentes precipitantes al sistema de trabajo [31]

La precipitación ocurre en dos etapas, que son nucleación y crecimiento. Durante la nucleación se forman pequeñas partículas de precipitado, las cuales reciben el nombre de núcleo. Luego, durante el crecimiento, los núcleos formados crecen hasta que el proceso de precipitación culmina. [31]

Este proceso se fundamenta en el equilibrio de solubilidad de los compuestos iónicos y en la constante del producto de solubilidad. En la mayoría de los casos, los precipitados que se generan son hidróxidos poco solubles. [30]

Una vez que este compuesto precipita, se requiere llevar a cabo una serie de pasos para separar la fase sólida generada de la solución, como la floculación, sedimentación y separación sólido – líquido [30].

#### **Precipitación de hidróxido de magnesio**

Como vimos anteriormente, los compuestos de magnesio van a precipitar cuando el medio que contiene los iones  $Mg^{2+}$  sea alcalino.

Como podemos ver en la Figura 8 el uso de cal favorece el aumento de pH del sistema, por lo tanto, se generan las condiciones propicias para el desarrollo de esta etapa [32].

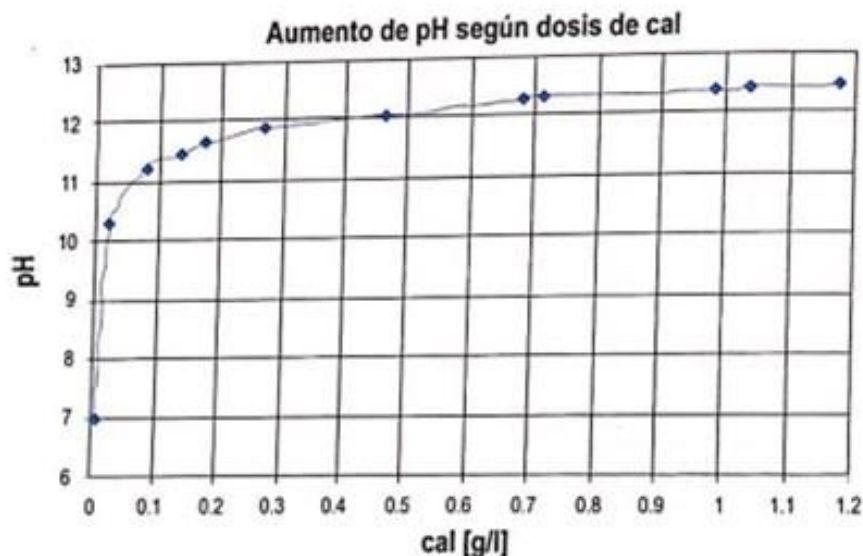


Figura 8 Variación de pH según concentración de cal en el sistema

### Potenciales agentes precipitantes

Usualmente, la precipitación de compuestos de magnesio en medios básicos (como lo es el agua de mar o la salmuera) se realiza a partir de hidróxido de calcio, el cual se forma como lo indica la Ec. 3 [22]:



Para este caso de estudio, se probarán cuatro tipos de cales, ellas son:

### Cal viva

La cal viva es un compuesto conocido por su nombre químico como óxido de calcio (CaO).

Este reactivo se forma mediante una reacción de descomposición térmica, es decir, una reacción en que una sustancia se descompone en sustancias simples y un solo reactivo produce dos o más productos junto con la emisión de calor. En este caso, el reactivo que se usa es la piedra caliza o carbonato de calcio, formando óxido de calcio y dióxido de carbono, como se muestra en la Ec. 4 [33].



El precio de adquisición de este reactivo es de 200 USD/ton [34].

A continuación, algunas propiedades físicas y químicas son [35]:

Tabla 3 Propiedades físicas y químicas cal viva

| Propiedad                      | Parámetro                     |
|--------------------------------|-------------------------------|
| Estado físico                  | Sólido                        |
| Apariencia                     | Blanco                        |
| Olor                           | Inodoro                       |
| pH concentración y temperatura | 12,6 a 20°C                   |
| T° de ebullición               | 2850 °C                       |
| T° de fusión                   | 2580 °C                       |
| T° de inflamación              | No se inflama                 |
| Densidad                       | 3,37 g/cm <sup>3</sup> a 20°C |
| Óxido de calcio total          | 93%                           |
| Óxido de calcio activo         | 86%                           |
| Granulometría                  | 94% pasante #100.             |

### Cal apagada

La cal apagada o Hidróxido de calcio (Ca(OH)<sub>2</sub>) es un polvo básico cristalino y blanco.

El hidróxido de calcio se consigue mediante la hidratación del óxido de calcio. Este proceso se lleva a cabo en equipos llamados hidratadores y se puede representar mediante la Ec. 5 [36].



El precio de adquisición de este reactivo es de 300 USD/ton [37].

A continuación, algunas propiedades físicas y químicas son [38]:

Tabla 4 Propiedades físicas y químicas cal apagada

| Propiedad                      | Parámetro              |
|--------------------------------|------------------------|
| Estado físico                  | Sólido                 |
| Apariencia                     | Blanco                 |
| Olor                           | Inodoro                |
| pH concentración y temperatura | 12,6 a 20°C            |
| T° de ebullición               | -                      |
| T° de fusión                   | 550°C (descomposición) |
| T° de inflamación              | -                      |
| Densidad                       | 2,24 g/cm <sup>3</sup> |
| Óxido de calcio total          | 68%                    |
| Granulometría                  | 93% pasante #200.      |

## Caliza

La caliza es una roca sedimentaria compuesta en un 90% por carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ), especialmente calcita y aragonita. Este mineral es uno de los más comunes en la corteza terrestre, razón por la cual es considerada un recurso natural no renovable [39].

Si ésta es sometida a altas temperaturas, da origen al óxido de calcio, como lo indicado en la Ec. 4.

El precio de adquisición de este reactivo es de 120 USD/ton [40].

A continuación, algunas propiedades físicas y químicas son [41]:

Tabla 5 Propiedades físicas y químicas caliza

| Propiedad                      | Parámetro              |
|--------------------------------|------------------------|
| Estado físico                  | Sólido                 |
| Apariencia                     | Gris claro             |
| Olor                           | Inodoro                |
| pH concentración y temperatura | 9,5 – 10,5             |
| T° de ebullición               | -                      |
| T° de fusión                   | 825°C (descomposición) |
| T° de inflamación              | -                      |
| Densidad                       | -                      |
| Óxido de calcio total          | 32%                    |
| Granulometría                  | 85% pasante #200.      |

## Cal hidráulica

La cal hidráulica es un aglutinante obtenido mediante la cocción de piedra caliza con alto contenido de arcilla. Este proceso da lugar a la formación de silicatos y aluminatos hidráulicos en la cal, lo que le confiere la propiedad de endurecer en presencia de agua, convirtiéndose en un material valioso para trabajos de construcción en ambientes húmedos [42].

Este tipo de cal es ampliamente utilizada en el área de la construcción, sobre todo en condiciones de alta humedad, por su capacidad de fraguar bajo el agua. También tiene aplicación en la jardinería y agricultura, ya que ayuda a mejorar la estructura del suelo y la retención de nutrientes [42].

El precio de adquisición de este reactivo es de 160 USD/ton [43].

A continuación, algunas de sus propiedades físicas y químicas [44]:

Tabla 6 Propiedades físicas y químicas cal hidráulica

| Propiedad     | Parámetro  |
|---------------|------------|
| Estado físico | Sólido     |
| Apariencia    | Gris claro |

|                                |                   |
|--------------------------------|-------------------|
| Olor                           | Inodoro           |
| pH concentración y temperatura | 10 – 10,5         |
| T° de ebullición               | -                 |
| T° de fusión                   | -                 |
| T° de inflamación              | -                 |
| Densidad                       | -                 |
| Óxido de calcio total          | 25%               |
| Granulometría                  | 80% pasante #200. |

Estos agentes precipitantes se utilizarán para generar el ambiente alcalinizante en el sistema y así favorecer la precipitación de sólidos, esto con el objetivo de definir con cuál de ellas se obtienen mejores resultados en cuanto a cantidad de hidróxido de magnesio en el precipitado final y precio de adquisición del reactivo.

#### **2.4.2 Separación y purificación**

Después de la precipitación, es necesario separar el precipitado de hidróxido de magnesio de la solución. Esto se puede lograr mediante técnicas de filtración, centrifugación u otros métodos de separación sólido-líquido.

#### **2.4.3 Secado y obtención del producto final**

El producto final en forma sólida obtenido se seca para eliminar la humedad residual y obtener la enmienda agrícola enriquecida en magnesio en forma de polvo o gránulos listos para su aplicación en el suelo.

### **2.5 Simulación**

La simulación de procesos consiste en el uso de softwares para probar virtualmente los métodos y procedimientos de fabricación de un producto en particular.

Una simulación imita el funcionamiento de los procesos o sistemas del mundo real con el uso de modelos. El modelo representa los comportamientos y las características clave del proceso o sistema seleccionado, mientras que la simulación representa cómo evoluciona el modelo en diferentes condiciones a lo largo del tiempo. [45]

### 2.5.1 HSC Chemistry 6.0

Este software realiza cálculos tanto termodinámicos como de procesamiento de minerales de forma rápida y sencilla, en donde es posible desarrollar nuevos procesos y mejorar los existentes mediante modelado y simulaciones, aplicando la teoría de procesos y cálculos complejos en un formato fácil de usar. [46]

Utilizar esta herramienta para simular el proceso a escala industrial permite aproximarse a la producción posible de obtener en un proceso real, obteniendo parámetros para determinar los costos operacionales asociados al proceso [47]

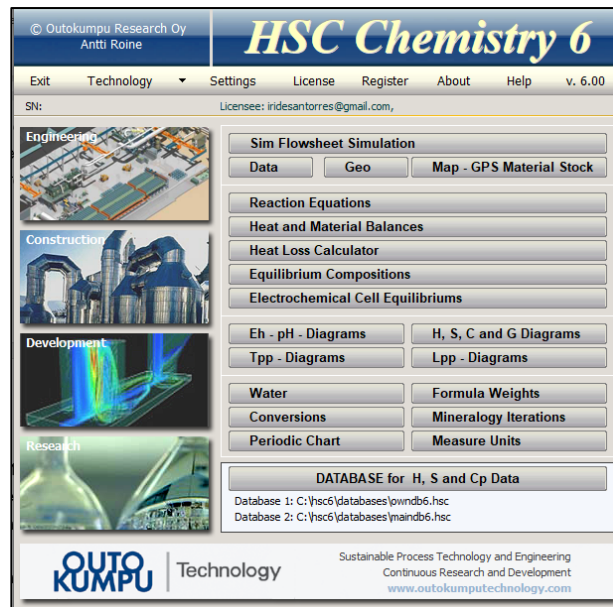


Figura 9 Simulador HSC Chemistry 6.0

Para realizar un balance de masa y energía utilizando el software HSC Chemistry para la producción de enmiendas agrícolas se utilizará el módulo “Sim Flowsheet Simulation” y “Heat and Material Balances”

### 2.6 Ingeniería de perfil del proyecto.

La ingeniería de perfil es necesaria para asegurar el éxito de un proyecto. Cuando hablamos sobre el desarrollo de esta etapa, se hace alusión a la ejecución de un análisis y evaluación sobre la implementación de un proyecto, en donde se abarcan los siguientes tópicos [48]:

- Las características generales del proyecto y el potencial de oportunidad del negocio.
- Evaluar las potenciales fallas que pudiesen afectar el éxito de la ejecución y operación del proyecto.
- Orden de magnitud de los costos del proyecto conceptual propuesto para la oportunidad de negocio (Capex y Opex)
- Realizar una clara recomendación de avanzar o no a la fase siguiente del estudio.

En esta etapa es en donde se realizan estimaciones gruesas sobre los beneficios y costos, considerando información previamente existente. Estas estimaciones pueden variar entre un 35 – 50% respecto al valor real de la inversión [48].

## **CAPITULO III: OBJETIVOS Y ALCANCES**

### **3.1 Definición del problema**

A causa de la aplicación de la tecnología de desalinización en Chile, se generan grandes cantidades de salmuera, la cual afecta directamente a la flora y fauna presente en el sector de descarga [49] debido a que presenta concentraciones entre 1,6 a 2,5 veces la salinidad de agua de mar [6], razón por la cual se aprecia este desecho del proceso como una alternativa para la obtención de productos en base a los elementos presentes en éste, enfocados en la reparación de suelos agrícolas.

### **3.2 Hipótesis**

Debido a las altas concentraciones de magnesio que presenta el agua de rechazo de las plantas desalinizadoras, es posible obtener hidróxido de magnesio y otros compuestos para su uso en la composición de enmiendas agrícolas inorgánicas.

### **3.3 Objetivos**

#### **3.3.1 Objetivo general**

Simular computacionalmente un proceso de producción de enmienda agrícola magnésica a partir de salmuera de rechazo de una planta desalinizadora de agua de mar.

#### **3.3.2 Objetivos específicos**

- Determinar las propiedades y parámetros operacionales del proceso de obtención de enmienda magnésica a escala de laboratorio a partir de salmuera sintética utilizando cuatro tipos de cales: cal viva, cal apagada, caliza y cal hidráulica.
- Simular el proceso de obtención de enmienda utilizando el programa HSC Chemistry 6.0 de un caso de estudio para planta desalinizadora Aguas Antofagasta.
- Evaluar un caso de estudio a nivel de Ingeniería de perfil, para determinar costos operacionales y orden de magnitud de la inversión.

## CAPITULO IV: METODOLOGÍA

En este capítulo se presenta la metodología con que se ejecutará este trabajo, abarcando los experimentos desarrollados en laboratorio, la simulación y los costos asociados al proceso.

### 4.1 Trabajo experimental para la obtención de enmienda agrícola.

Al ser el objetivo principal de este trabajo la simulación del proceso de obtención de una enmienda agrícola magnésica es necesario determinar ciertos parámetros para que la simulación sea lo más acertada posible, como la dosificación del agente precipitante, comprobar que efectivamente el sólido generado contenga especies de magnesio, entre otros. Es por esto que inicialmente se desarrolló el proceso seleccionado a escala de laboratorio para obtener esta información.

Para el desarrollo de este trabajo experimental se utilizaron los equipos descritos en la Tabla 7.

Tabla 7 Equipos utilizados en laboratorio

| Equipo               | Proceso                         | Marca         | Modelo         |
|----------------------|---------------------------------|---------------|----------------|
| Placa calefactora    | Obtención agua de rechazo       | Inspected     | 64144          |
| Sensor conductividad |                                 | Pasco Pasport | PS-2116A       |
| Sensor salinidad     |                                 | Pasco Pasport | PS-2195        |
| Agitador mecánico    | Preparación agente precipitante | Laborglas     | LGI SCIENTIFIC |
| Sensor temperatura   |                                 | Pasco Pasport | PS-2125        |
| Balanza digital      |                                 | Vimaroni      | PTQ-A30        |
| Placa agitadora      | Proceso precipitación           | Inspected     | 64144          |
| Sensor pH            |                                 | Pasco Pasport | PS-2102        |
| Máquina centrífuga   | Proceso centrifugado            | Cotecno       | BKC-TL4IV      |
| Estufa Dryng Oven    | Proceso secado                  | BIOBASE       | BOV-V70F       |

#### 4.1.1. Obtención de agua de rechazo experimental.

Para comenzar con el trabajo de laboratorio, es necesario comenzar con la obtención de agua de rechazo experimental, la cual simula la salmuera producida por una planta desalinizadora.

Para esto, se obtienen 24 [L] agua de mar desde la Caleta Portales en la región de Valparaíso, la cual va a ser dividida en vasos precipitados y calentada por medio de placas calefactoras hasta que reduzca su volumen en un 50%, como se muestra en la Figura 10.



Figura 10 Obtención salmuera experimental

#### 4.1.2 Preparación agente precipitante

Como se mencionó en el capítulo anterior, para favorecer la precipitación de los componentes principales de la enmienda agrícola, se requiere de un ambiente alcalino, el cual se va a lograr mediante la adición de lechada de cal al sistema.

Cabe destacar que para lograr una correcta preparación de la lechada y considerando que la reacción es de tipo exotérmica, en el proceso se alcanzó una temperatura de 80°C con una velocidad de agitación de 340 RPM como se ve en la Figura 11.

Como se mencionó anteriormente, las lechadas de cal se prepararon con cuatro tipos de cal (cal viva, cal apagada, caliza y cal hidráulica) en la proporción indicada en la Tabla 8.

Tabla 8 Proporción preparación lechada de cal

| Preparación lechadas de cal |     |
|-----------------------------|-----|
| Cal [g]                     | 150 |
| Agua [ml]                   | 850 |
| T [°C]                      | 80  |



Figura 11 Preparación lechada de cal

#### 4.1.3. Obtención de enmienda agrícola

Una vez obtenidos los dos flujos principales para el desarrollo del experimento, se comienza el proceso de precipitación de la enmienda agrícola. Éste se desarrolló de manera agitada en un vaso precipitado utilizado como reactor y se hizo control mediante la medición de pH del sistema salmuera – lechada, adicionando de manera controlada ésta última, como se muestra en la Figura 12.



Figura 12 Desarrollo proceso de precipitación

Una vez logrado el precipitado, se retira toda la instrumentación involucrada en el proceso y se deja decantar el producto final en el mismo vaso precipitado durante 24 [hr] para lograr una correcta separación de fase sólido – líquido, como se muestra en la Figura 13.



Figura 13 Sólido decantado

El agua sobrenadante fue retirada del reactor y el sólido resultante fue centrifugado.

Producto del centrifugado, se sigue generando fase acuosa, la cual es retirada de los tubos y se centrifuga por 30 minutos más, a la misma velocidad que el primer centrifugado, generando un producto final gelatinoso como se presenta en la Figura 14.



Figura 14 Producto etapa centrifugado

El sólido obtenido en la etapa de centrifugado se dejó secar en una estufa de laboratorio a 150°C en un vidrio reloj. El tiempo de secado fue el necesario para que la masa sea constante, esto quiere decir que cada 20 minutos se fue controlando la masa del producto en secado.

Finalmente, el producto del secado fue enfriado a temperatura ambiente y luego fue disgregado en un mortero, obteniendo un polvo blanquecino como se muestra en la Figura 15.



Figura 15 Producto final

## **4.2 Simulaciones**

Una vez obtenidos los parámetros operacionales de los experimentos de laboratorio, se genera la información necesaria para comenzar con las simulaciones del proceso, en donde se pueden determinar los balances de masa y energía.

### **4.2.1 Definición del proceso del caso de estudio**

El proceso propuesto fue definido en base a un proceso de obtención de Hidróxido de magnesio, el cual considera etapas de precipitación, decantación, centrifugado y lavado, sin embargo, ambos se diferencian en el agente precipitante utilizado. En este caso de estudio, la precipitación se va a generar a partir de lechada de cal, considerando que el flujo principal (salmuera) es un desecho, por lo que se requiere que este proceso sea económicamente viable.

Como supuestos para el desarrollo de esta simulación tenemos que la reacción de precipitación y la reacción de preparación de lechada de cal tiene un 100% de rendimiento. Además se utiliza como flujo inicial de salmuera con un caudal de 4464 m<sup>3</sup>/h, esto resultado de la cantidad de salmuera que se genera en el proceso de la planta desalinizadora La Chimba ubicada en la región de Antofagasta, entendiendo que la concentración de elementos de interés son los obtenidos en la lectura por absorción atómica de la salmuera sintética obtenida en laboratorio. El agua restante de los procesos de separación sólido – líquido van a ser utilizados como agua de procesos mineros, esto debido al pH que va a presentar (mayor a 11) y finalmente la enmienda en la etapa final de secado pasará de un 10% a 1% de humedad para efectos del balance energético.

A continuación, en la Figura 16 se presenta el diagrama de flujo del proceso de obtención de una enmienda agrícola.

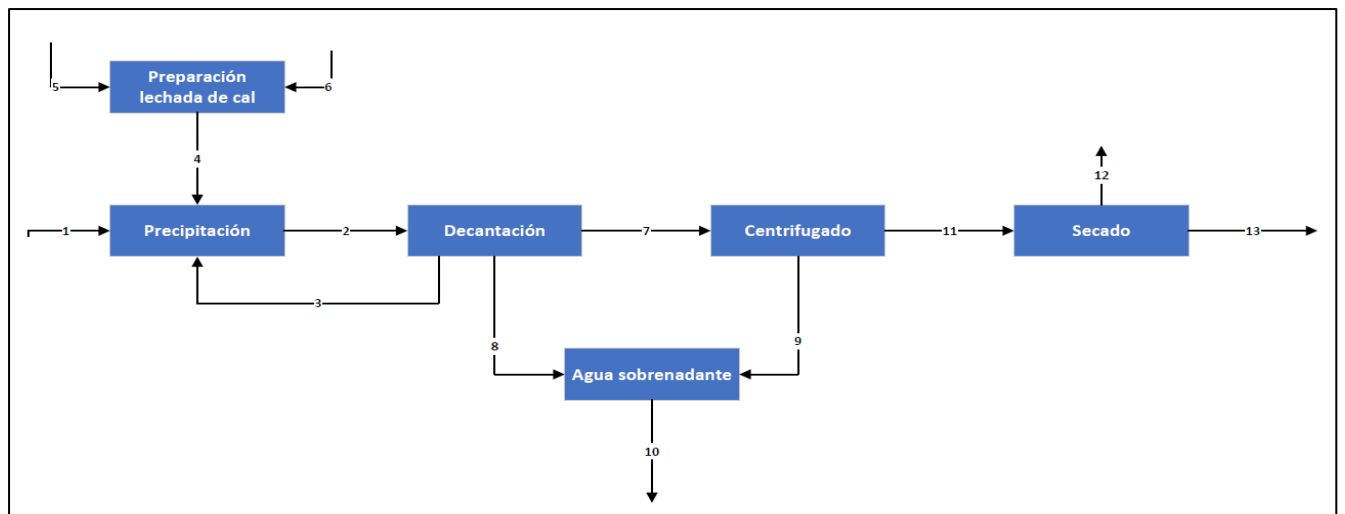


Figura 16 Diagrama de flujo para obtención de enmienda agrícola

Donde:

- 1: Salmuera.
- 2: Solución alcalina.
- 3: Agua sobrenadante recirculada.
- 4: Lechada de cal.
- 5: Cal.
- 6: Agua para preparación de lechada de cal.
- 7: Precipitado húmedo.
- 8: Agua sobrenadante.
- 9: Agua sobrenadante centrifugada.
- 10: Agua para procesos.
- 11: Precipitado con 10% de humedad.
- 12: Vapor.
- 13: Enmienda agrícola enriquecida en magnesio.

Según el diagrama de flujos mostrado en la Figura 16, la salmuera ingresa al circuito junto con la lechada de cal y agua sobrenadante del proceso de decantación para comenzar el proceso de precipitación. El último flujo mencionado se recircula para favorecer la precipitación de sólidos a partir de un sólido previamente existente. El flujo resultante de esta etapa es una solución alcalina que será decantada para lograr la separación de fases sólido – líquido, obteniendo un flujo de agua sobrenadante almacenada como agua de procesos, y por otro lado tenemos el precipitado húmedo que ingresa al proceso de centrifugado.

En la etapa de centrifugado, se reduce la humedad del sólido, por lo que de igual forma que en la etapa anterior, se obtiene agua sobrenadante que de igual manera será almacenada para su uso como agua de procesos.

Finalmente, el sólido centrifugado pasa a la etapa de secado, para eliminar la humedad restante como vapor de agua y obtener el producto final de enmienda agrícola.

Como ya se mencionó anteriormente, la información utilizada para realizar los balances de masa y energía fueron obtenidos teóricamente a partir de la experiencia de laboratorio, para finalmente realizar la simulación a escala industrial en el programa HSC, los cuales fueron:

Se define una base de cálculo de  $4464 \text{ m}^3/\text{h}$  de salmuera, correspondiente al caudal de salmuera producido por la planta desalinizadora ubicada en La Chimba, comuna de Antofagasta [50]. Los parámetros definidos para este flujo, como concentración de elementos, salinidad, conductividad eléctrica, etc, fueron obtenidas a partir de las mediciones realizadas al agua de rechazo experimental, cuyos resultados se muestran en la Tabla 9 y Tabla 10 del Capítulo 5.

Además, para el desarrollo del balance se considera la disolución completa de la cal para generar la lechada.

El volumen de agua utilizado para la preparación del agente precipitante, en este caso la lechada, se obtiene a partir de la masa de  $\text{CaO}$  resultante del balance de masa.

Los sólidos generados en la etapa de precipitación son el hidróxido de magnesio, carbonato de calcio y sulfato de calcio, especies que son insolubles a pH superiores a 11. Tener en consideración que a esta etapa ingresa un flujo de recirculación, el cual corresponde a al 30% del agua sobrenadante obtenida del proceso de decantación, el cuál contiene aproximadamente un 10% de sólido, lo cual favorece la precipitación de nuevos sólidos en el sistema.

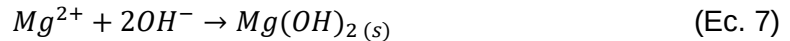
Para el balance de energía, sólo se considera la etapa de secado del producto desde temperatura ambiente hasta los  $150^\circ\text{C}$ , en el cual se llega a una humedad final del 1%.

Las reacciones implicadas en la formación de la enmienda agrícola enriquecida en magnesio son las siguientes para cada etapa.

Preparación lechada de cal



Precipitación:



Secado:



El agente precipitante utilizado permite que el producto final generado contenga distintas especies de magnesio y calcio, como lo son el carbonato de calcio y el hidróxido de magnesio, este último siendo el más relevante ya que es el compuesto principal de las enmiendas agrícolas enriquecidas en magnesio.

#### **4.2.2. Especies obtenidas en el sólido precipitado**

Mediante difracción de rayos X, se verifica la composición del producto final y así poder comprobar que mediante este proceso se puede obtener una enmienda agrícola enriquecida en magnesio.

#### **4.2.3. Balance de masa**

El diagrama del proceso fue ingresado al programa HSC Chemistry en la sección Heat and Materials Balance, en el cual se consideran como inputs de cada etapa del proceso los parámetros obtenidos de forma experimental para así ejecutar el programa y generar el balance. Cabe destacar que para el desarrollo de este balance, se consideró estado estacionario y sin pérdidas por etapa.

#### **4.2.4. Balance de energía**

Como se mencionó anteriormente, el balance de energía se realizó en la etapa de secado del producto final. Para esto, se utilizó el módulo Heat and Material Balance del simulador, también considerando estado estacionario y sin pérdidas, ingresando la composición del producto de entrada y las temperaturas correspondientes al proceso.

### 4.3. Desarrollo de ingeniería conceptual.

Es importante tener en cuenta que los costos asociados a una planta de producción de enmienda agrícola pueden variar dependiendo de varios factores, como la escala de producción, la ubicación geográfica, la tecnología utilizada y los costos de los insumos y la energía, es por esto que para el desarrollo de la ingeniería de perfil se considerarán dos aspectos importantes, los costos operacionales y el orden de magnitud de la inversión.

#### 4.3.1 Orden de magnitud de inversión

El orden de magnitud de inversión está constituido por todos los recursos y facilidades necesarios para la instalación y puesta en marcha de los medios de producción de bienes y servicios.

Para esto, se utilizarán los índices de estimación establecidos por el método de Peters y Timmerhaus [51] considerando factores para una planta de pulpa o semifluidos como lo indicado en la Figura 17.

| Ítem                                    | Tipos de proceso |             |         |
|-----------------------------------------|------------------|-------------|---------|
|                                         | Sólidos          | Semifluidos | Fluidos |
| <b>A. Costo directo</b>                 |                  |             |         |
| A.1 Equipo comprado                     | 100              | 100         | 100     |
| A.2 Instalación de equipo               | 45               | 39          | 47      |
| A.3 Instrumentos y control (instalados) | 9                | 13          | 18      |
| A.4 Tuberías (instalados)               | 16               | 31          | 66      |
| A.5 Eléctricos (instalados)             | 10               | 10          | 11      |
| A.6 Edificios (incluye servicios)       | 25               | 29          | 18      |
| A.7 Mejoras del terreno                 | 13               | 10          | 10      |
| A.8 Servicios auxiliares (instalados)   | 40               | 55          | 70      |
| A.9 Terreno                             | 6                | 6           | 6       |
| Total directos                          | 264              | 293         | 346     |
| <b>B. Costo indirecto</b>               |                  |             |         |
| B.1 Ingeniería de supervisión           | 33               | 32          | 33      |
| B.2 Gastos de construcción              | 39               | 34          | 41      |
| B.3 Contratista                         | 17               | 18          | 21      |
| B.4 Contingentes                        | 34               | 36          | 42      |
| Total indirectos                        | 123              | 120         | 137     |
| Capital fijo para la inversión (A+B)    | 387              | 413         | 483     |
| C. Capital de trabajo                   | 68               | 74          | 86      |
| Inversión total (A+B+C)                 | 455              | 487         | 569     |

Figura 17 Factores de Peter y Timmerhaus (expresados en % del valor del equipo)

#### **4.3.2 Costos Operacionales**

Para el cálculo de los costos operacionales del proceso se consideran el costo por consumo de los distintos reactivos necesarios para el desarrollo de éste, como el agua y la energía, además de la mano de obra requerida y sus respectivas remuneraciones, utilización de terreno, y servicios extras.

Es importante realizar un estudio de viabilidad económica detallado que tome en consideración los costos específicos de cada componente y la producción estimada. Además, los precios y costos pueden variar según la ubicación geográfica y las condiciones del mercado, por lo que es fundamental realizar un análisis específico para el contexto particular del proyecto.

## CAPITULO V: RESULTADOS Y DISCUSIONES

En este capítulo se presentan los resultados y discusiones asociados a los resultados obtenidos de los experimentos de laboratorio y simulaciones desarrolladas para determinar las especies formadas en el proceso de precipitación y los balances de masa y energía realizados para la obtención de una enmienda agrícola enriquecida en magnesio.

### 5.1. Experiencia en Laboratorio.

- Obtención de salmuera experimental

La salmuera experimental utilizada para el desarrollo de los experimentos de laboratorio fue obtenida a partir de la evaporación de agua de mar tomada desde Caleta Portales, en la región de Valparaíso, la cual presenta las siguientes características indicadas en la Tabla 9 y Tabla 10.

Tabla 9 Parámetros salmuera experimental

| Parámetros                      | Salmuera |
|---------------------------------|----------|
| Temperatura [°C]                | 20       |
| pH                              | 8,71     |
| Conductividad eléctrica [μs/cm] | 89758    |
| Salinidad [ppm]                 | 55000    |

Tabla 10 Concentración de elementos en salmuera experimental

| Elemento | Concentración [g/L] | Medición                              |
|----------|---------------------|---------------------------------------|
| Calcio   | 0,82                | Cuantificación por absorción atómica. |
| Magnesio | 2,345               |                                       |
| Sodio    | 23,53               |                                       |
| Potasio  | 0,82                |                                       |
| Cloruro  | 41,44               | Método de Mohr.                       |

- Obtención de enmienda agrícola enriquecida en magnesio

Para lograr la precipitación de las especies que forman la enmienda agrícola enriquecida en magnesio, es necesario generar un ambiente alcalino. Esto se logra añadiendo lechada de cal al sistema, preparada en la siguiente proporción indicada en la Tabla 11.

Tabla 11 Parámetros de preparación de lechada de cal

| Reactivo | Valor | Unidad |
|----------|-------|--------|
| Cal      | 150   | g      |
| Agua     | 850   | mL     |
| Agua     | 850   | g      |
| %cal p/p | 15    | %      |

Para el desarrollo de este experimento, se prepararon lechadas con 4 tipos distintos de cal, todas preparadas en la proporción indicada en la Tabla 11. Éstas son Cal Viva, Cal Apagada, Caliza y Cal Hidráulica.

A continuación en la Tabla 12 se muestran los resultados de el volumen adicionado de lechada y el pH logrado en el sistema:

Tabla 12 pH resultantes con los distintos tipos de cal

| Cal                                            | Volumen [mL] | pH    |
|------------------------------------------------|--------------|-------|
| Cal Viva (CaO)                                 | 100          | 12,71 |
| Cal Apagada (Ca(OH) <sub>2</sub> )             | 100          | 12,34 |
| Caliza (CaCO <sub>3</sub> )                    | 100          | 8,77  |
| Cal Hidráulica (CaCO <sub>3</sub> + impurezas) | 100          | 8,74  |

Podemos ver que con las primeras cales se logra un pH superior a 12, básicamente porque la cal apagada es el resultado de la hidratación de la cal viva, por lo cual se obtienen resultados similares respecto a su capacidad alcalinizante.

Por otro lado, las lechadas preparadas con Caliza y Cal hidráulica no logran superar un pH de 9, esto debido a que para obtener lechada, se tiene como punto de partida el carbonato de calcio, el cual debe ser convertido primeramente en óxido de calcio (CaO), para esto se realiza un proceso que se llama calcinación, para luego pasar por etapas de Hidratación o Apagado, obteniendo finalmente el Hidróxido de Calcio (Ca(OH)<sub>2</sub>).

Como el compuesto de calcio presente en la caliza y en la cal hidráulica es en su mayoría carbonato de calcio, al no ser oxidado, no es capaz de formar Hidróxido de magnesio, sin embargo, en su composición presentan un 32% y un 25% de óxido de calcio respectivamente, razón por lo cuál presentan un alza de pH, pero no lo suficiente ya que esta proporción no existen la cantidad suficiente de iones hidroxilos para generar el ambiente alcalino en el sistema.

Por lo tanto, como con la caliza y la cal hidráulica no se generan las condiciones necesarias para generar un precipitado con características de una enmienda agrícola, las siguientes etapas del proceso productivo sólo se desarrollarán con el precipitado generado con Óxido de Calcio e Hidróxido de Calcio.

Una vez definidos los precipitados con los que se va a continuar el estudio, se presentan los resultados de los análisis de difracción de rayos X para el producto obtenido con óxido de calcio e hidróxido de calcio.

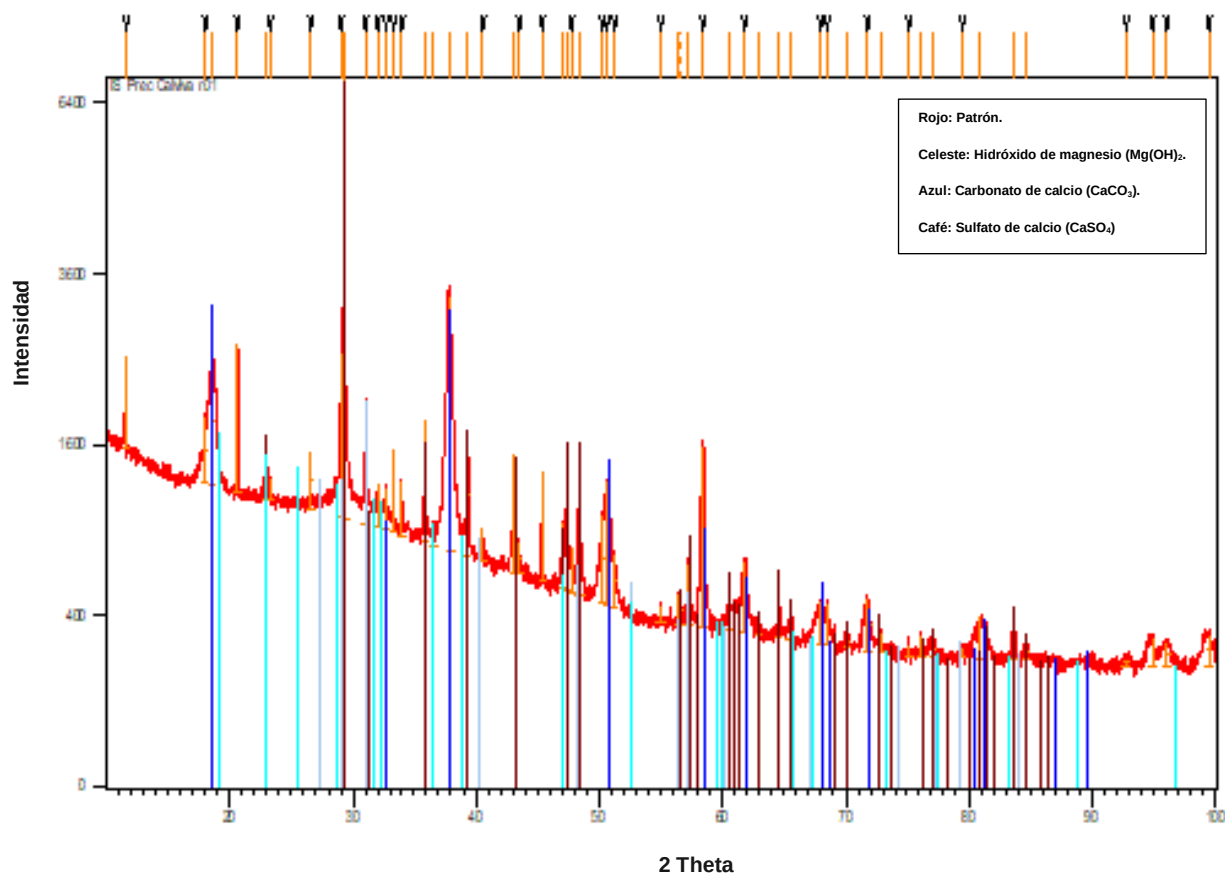


Figura 18 DRX a precipitado obtenido con cal viva

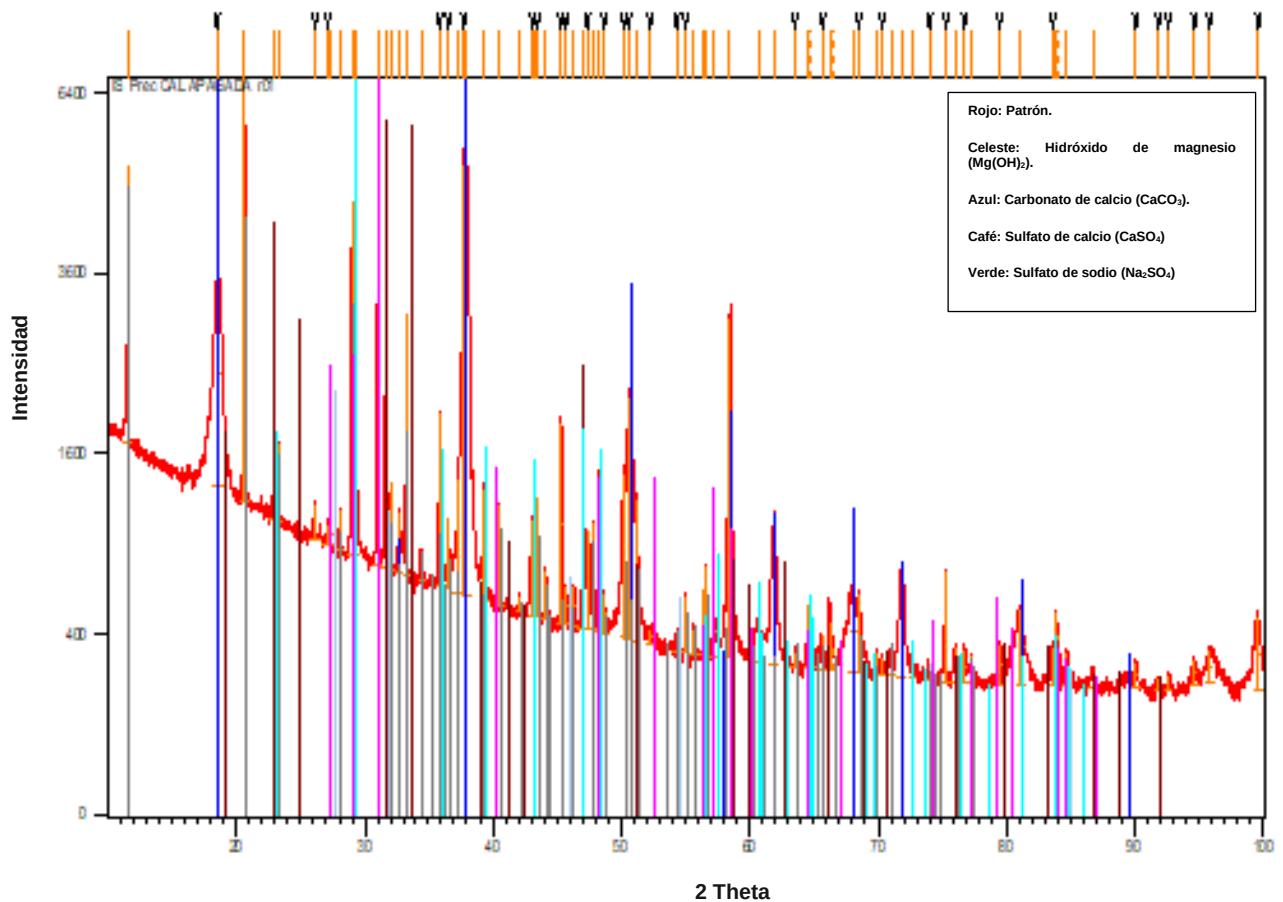


Figura 19 DRX a precipitado obtenido con cal apagada

Según lo representado en la Figura 18 se obtiene que el precipitado obtenido a partir de la adición de lechada preparada con cal viva ( $\text{CaO}$ ) presenta especies como Hidróxido de magnesio ( $\text{Mg(OH)}_2$ ), Carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) y Sulfato de calcio ( $\text{CaSO}_4$ ).

Por otro lado, la Figura 19 que muestra los resultados del precipitado generado con la lechada preparada con cal apagada ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) presenta Hidróxido de magnesio ( $\text{Mg(OH)}_2$ ), Sulfato de calcio hidratado ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), Sulfato de sodio ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) y Carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ).

Por lo tanto, ambos productos presentan especies propicias para ser utilizados como enmienda agrícola enriquecida en magnesio, sin embargo, económicamente es más viable utilizar cal viva como agente precipitante para este proceso.

Una vez definido a la cal viva como reactivo para lograr la precipitación en el proceso de obtención de enmienda agrícola, se realiza una prueba de DRX para identificar los elementos existentes en el precipitado final, en donde sus resultados se muestran en la Tabla 13

Tabla 13 Resultados DRX elementos presentes en producto final

| Elemento      | Composición mínima para enmienda agrícola enriquecida en magnesio en el mercado [%] | Composición de precipitado obtenido con cal viva [%] |
|---------------|-------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| Nitrógeno     | 0,88                                                                                | 0                                                    |
| Fósforo total | 0,082                                                                               | 0                                                    |
| Potasio       | 1,9                                                                                 | 0,186                                                |
| Sodio         | 5,16                                                                                | 0                                                    |
| Calcio        | 2,53                                                                                | 7,496                                                |
| Magnesio      | 2,72                                                                                | 6,757                                                |
| Azufre        | 5,19                                                                                | 3,473                                                |
| Silicio       | 3                                                                                   | 0,62                                                 |
| Manganeso     | 0,01                                                                                | 0,004                                                |

Según los resultados obtenidos, el producto final contiene las proporciones adecuadas de calcio y magnesio, sin embargo, en el resto de elementos no cumple con las cantidades apropiadas para ser una enmienda como tal, calificando éste como un producto intermedio entre un precipitado con alto contenido en magnesio y una enmienda agrícola enriquecida en magnesio, por lo tanto se requiere acondicionar este producto para que pueda ser utilizado como un reparador de suelos.

## 5.2. Balance de masa y energía.

A continuación se presentan los resultados del balance de masa y energía obtenidos del programa HSC Chemistry.

Cabe destacar que los inputs para generar esta simulación fueron obtenidos desde la experiencia de laboratorio y bibliografía.

### 5.2.1. Balance Global

Para el balance global, considerando el diagrama de procesos definido en el capítulo anterior, es que se obtienen los flujos másicos involucrados para cada una de las etapas asociadas a la obtención de la enmienda agrícola.

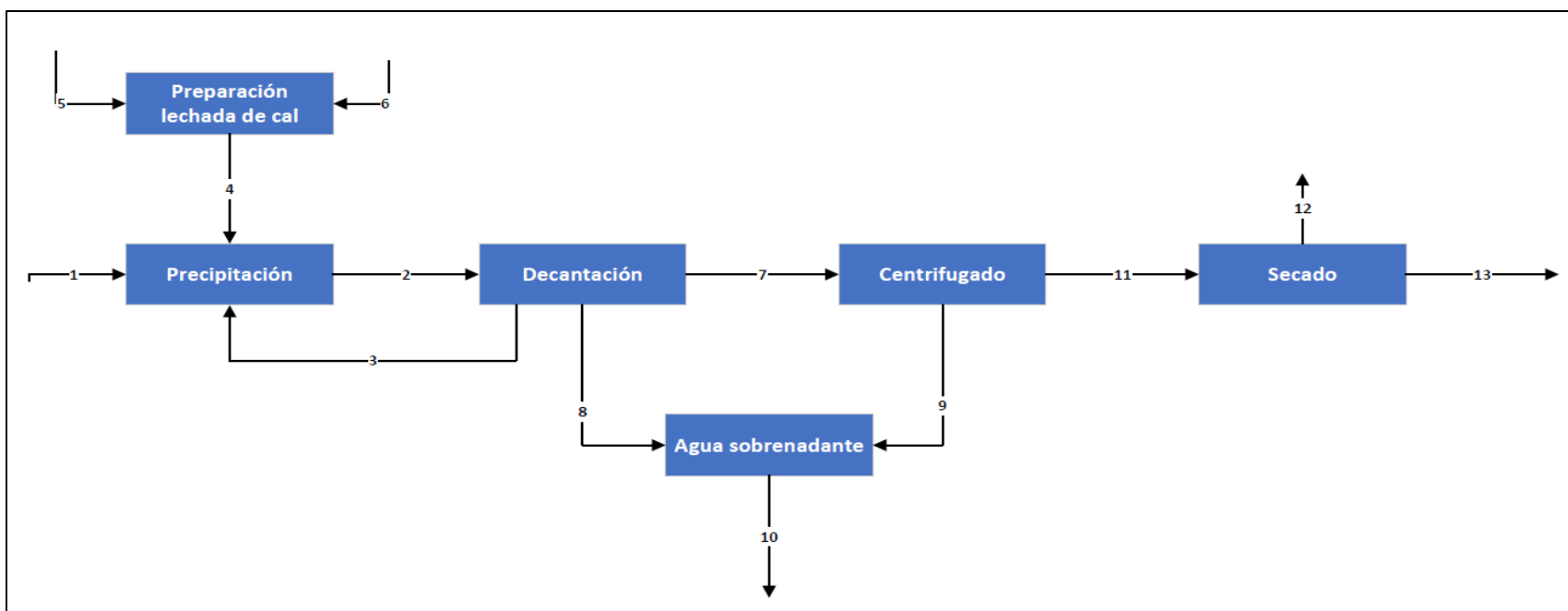


Figura 20 Diagrama de flujo para obtención de enmienda agrícola

Tabla 14 Balance global proceso de obtención de enmienda agrícola enriquecida en magnesio

| Corriente     | 1        | 2                 | 3                             | 4              | 5      | 6                                       | 7                  | 8                 | 9                              | 10                 | 11                             | 12    | 13                                         |
|---------------|----------|-------------------|-------------------------------|----------------|--------|-----------------------------------------|--------------------|-------------------|--------------------------------|--------------------|--------------------------------|-------|--------------------------------------------|
|               | Salmuera | Solución alcalina | Agua sobrenadante recirculada | Lechada de cal | Cal    | Agua para preparación de lechada de cal | Precipitado húmedo | Agua sobrenadante | Agua sobrenadante centrifugada | Agua para procesos | Precipitado con 10% de humedad | Vapor | Enmienda agrícola enriquecida en magnesio. |
| Flujo [t/h]   | 4687,2   | 9149,57           | 2419,27                       | 2043,1         | 304,26 | 1738,84                                 | 1085,34            | 5644,97           | 995,48                         | 6640,45            | 89,86                          | 8,43  | 81,44                                      |
| Ca(OH)2 [t/h] | -        | 382,48            | 113,6                         | -              | -      | -                                       | 3,82               | 265,06            | 3,78                           | 271,52             | 0,04                           | -     | 0,04                                       |
| Mg(OH)2 [t/h] | -        | 30,81             | -                             | -              | -      | -                                       | 30,81              | -                 | -                              | -                  | 30,81                          | -     | 30,81                                      |
| CaCO3 [t/h]   | -        | 12,73             | -                             | -              | -      | -                                       | 12,73              | -                 | -                              | -                  | 12,73                          | -     | 12,73                                      |
| CaSO4 [t/h]   | -        | 37,3              | -                             | -              | -      | -                                       | 37,3               | -                 | -                              | -                  | 37,3                           | -     | 37,3                                       |

Según los resultados obtenidos por simulación para la producción de enmienda agrícola enriquecida en magnesio, un flujo de 4687,2 [t/h] de salmuera (flujo 1) y 2419,27 [t/h] de agua sobrenadante recirculada del proceso de decantación (flujo 3) es mezclada con 2043 [t/h] de lechada de cal (flujo 4) para generar la precipitación de un sólido con características de enmienda agrícola. Como resultado de la etapa de precipitación, se obtiene un flujo aproximado de 9150 [t/h] de solución alcalina (flujo 2), la cual contiene 37,3 [t/h] de sulfato de calcio ( $\text{CaSO}_4$ ) 30,81 [t/h] de hidróxido de magnesio ( $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ) y 12,73 [t/h] de carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ). Cabe destacar que para la obtención del flujo 4, se requieren 304,26 [t/h] de cal viva y 1738,8 [t/h] de agua de preparación.

La solución alcalina obtenida del proceso de precipitación pasa a la etapa de decantación para reducir el volumen de salmuera (identificado como agua sobrenadante) y poder aumentar el porcentaje de sólidos a un 10% aproximadamente.

Del flujo total de agua sobrenadante, un 30% fue recirculado a la etapa de precipitación (flujo 3) para favorecer la precipitación de nuevos sólidos a partir de sólidos preexistentes, esto equivale a 2419,27 [t/h] de agua recirculada y 5644,97 [t/h] de agua sobrenadante (flujo 8) pasan a una piscina de agua alcalina para procesos.

Como producto del proceso de decantación tenemos 1085,34 [t/h] de precipitado húmedo (flujo 7) el cual es centrifugado para reducir aún más la humedad, resultando 995,48 [t/h] más de agua sobrenadante (flujo 9), la cual también va a ser recepcionada en la piscina de agua alcalina para procesos y 89,86 [t/h] de precipitado con humedad de 10% (flujo 11).

Finalmente el flujo 11 pasa por la etapa de secado desde 25 a 150 °C, obteniendo 81,44 [t/h] de una enmienda agrícola enriquecida en magnesio (flujo 13).

### 5.3.2. Balances por etapas.

A continuación se presenta el balance de las cuatro etapas principales del proceso de obtención de una enmienda agrícola enriquecida en magnesio, además de la etapa de preparación de lechada de cal y la obtención de agua para procesos, detallando flujos y su composición.

- Precipitación.

Según lo indicado en la Figura 21, para comenzar el proceso de precipitación, ingresa a la etapa el flujo 1 y el flujo 4, que corresponden a salmuera y lechada de cal respectivamente, en donde la función de este último es aumentar el pH del sistema favoreciendo así la precipitación de Hidróxido de magnesio presente en el flujo 2 de solución alcalina, obteniendo 30,81 t/h de este compuesto principal para la enmienda.

Además como ingreso al proceso tenemos el flujo 3 el cual de igual forma favorece el aumento del pH del proceso debido a la presencia de hidróxido de calcio y la presencia de magnesio en el flujo funciona como sólido preexistente para la formación del compuesto de hidróxido de magnesio.

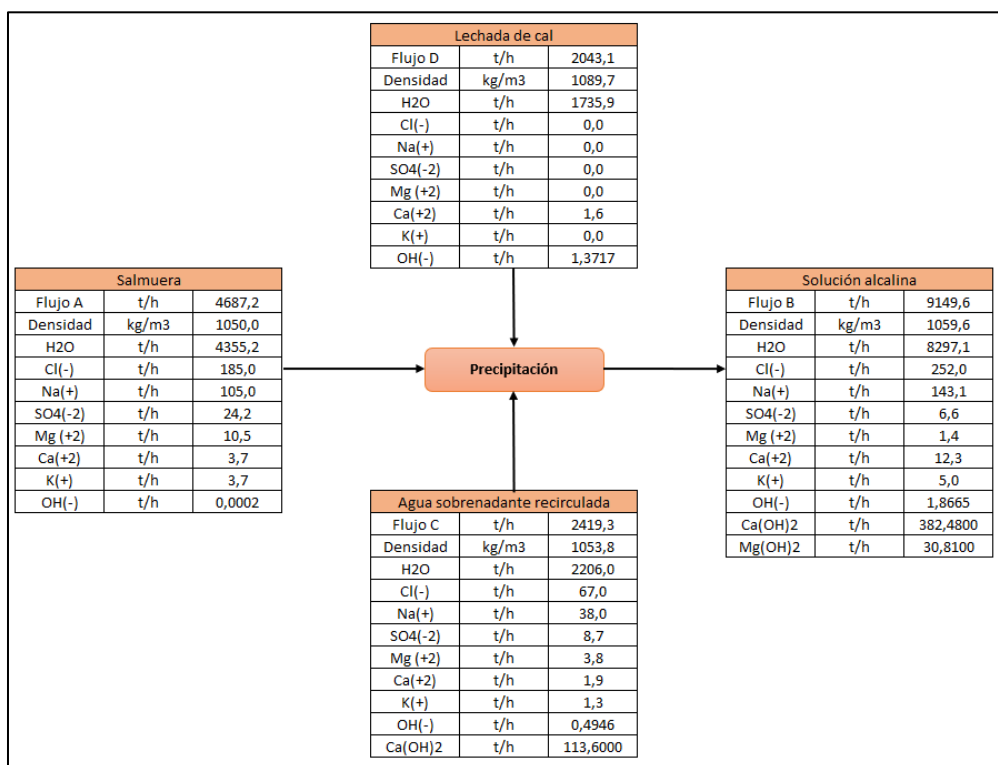


Figura 21 Balance de masa proceso de precipitación de hidróxido de magnesio

- Decantación.

La solución alcalina obtenida del proceso de precipitación se deja decantar para así reducir el volumen de agua del flujo.

Según lo indicado en la Figura 22, de la etapa de decantación obtenemos dos flujos, un precipitado húmedo (Flujo 7) el cual contiene 3,82 t/h de hidróxido de calcio y 30,81 t/h de hidróxido de magnesio y agua sobrenadante (Flujo 8).

Cabe destacar que el flujo 8 es dividido en 2, en donde aproximadamente un 40% de éste es recirculado a la etapa de precipitación (Flujo 3) y el resto es recepcionado en una piscina de agua para procesos.

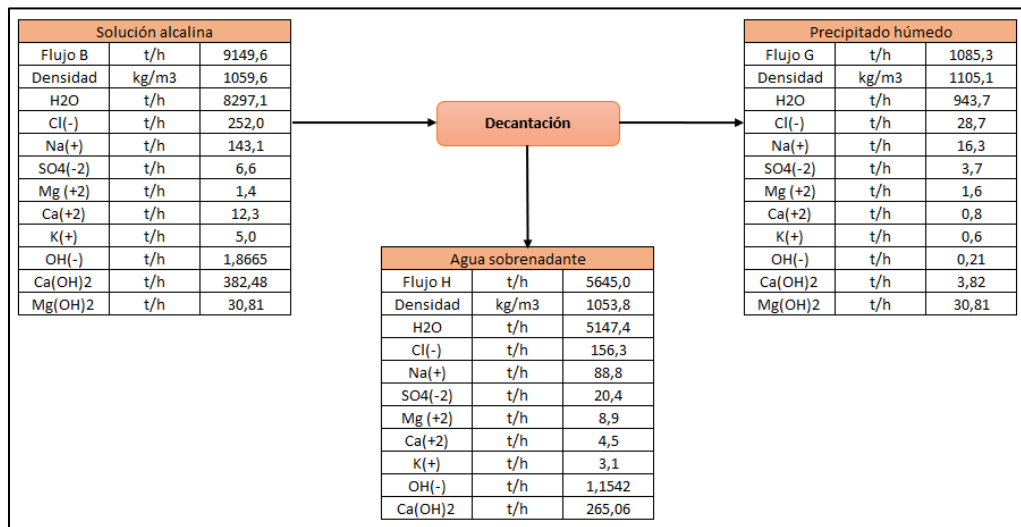


Figura 22 Balance de masa proceso de Decantación

- Centrifugado.

El objetivo de esta etapa es reducir lo máximo posible la humedad en el precipitado resultante de la etapa de decantación (Flujo 7) mediante la fuerza centrífuga aplicada al flujo. Según lo indicado en la Figura 23, como resultado de esta etapa se obtiene como producto un precipitado con aproximadamente un 10% de humedad (flujo 11) el cual contiene 30,81 t/h de hidróxido de magnesio y el flujo I de agua sobrenadante centrifugada es llevada a la piscina de agua para procesos.

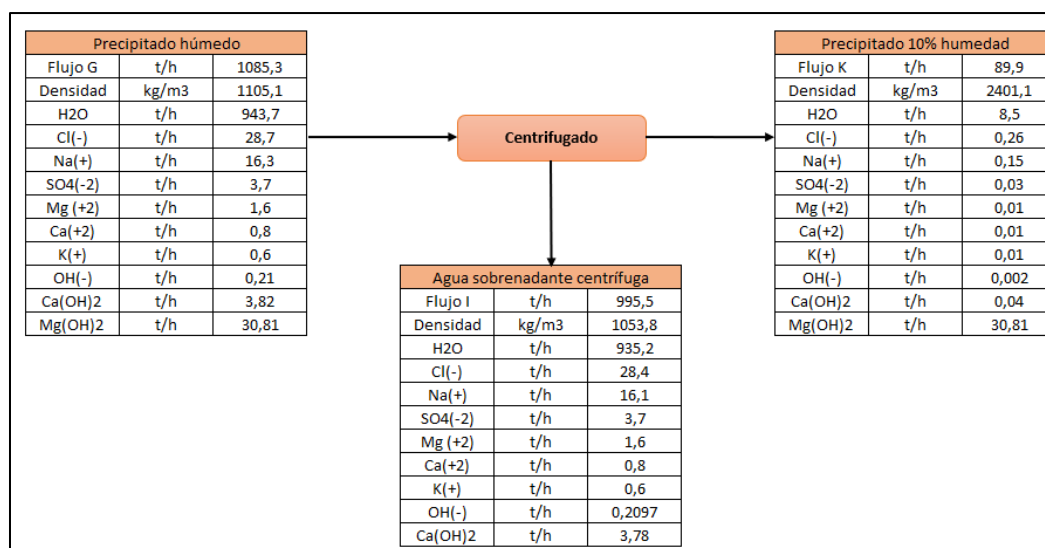


Figura 23 Balance de masa proceso Centrifugado

- Secado.

Para obtener finalmente la enmienda agrícola, el precipitado resultante de la etapa de centrifugado es llevado a la etapa de secado, en donde se remueve el agua remanente presente en el producto final.

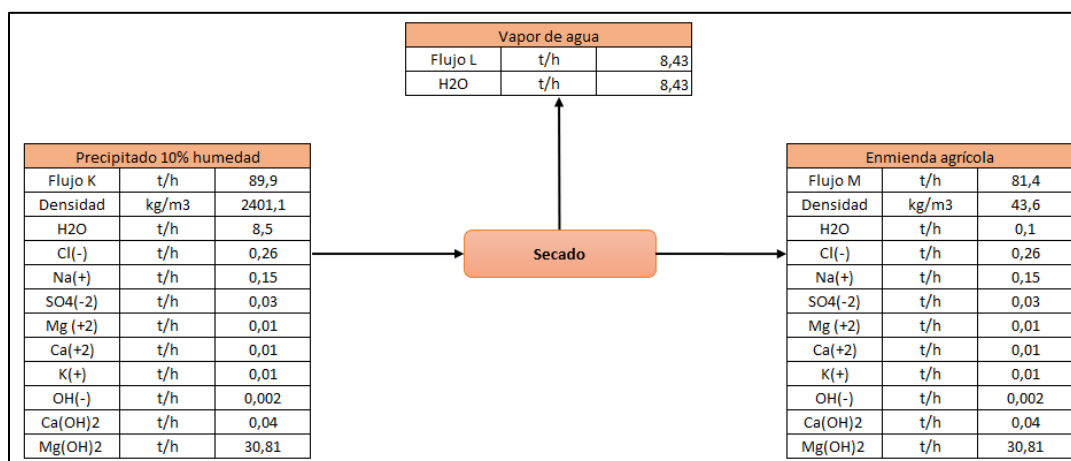


Figura 24 Balance de masa proceso de secado

Según lo indicado en la Figura 24, el producto proveniente del proceso de centrifugado (Flujo 11) es secado a una temperatura cercana a los 150°C, con lo cual se obtienen 81,4 t/h de enmienda agrícola (Flujo 13) el cual contiene 30,81 t/h de hidróxido de magnesio y 0,04 t/h de hidróxido de calcio y 8,43 t/h de vapor de agua (Flujo 12).

El balance de energía realizado para este proceso abarca la energía necesaria para subir la temperatura del flujo 11 desde temperatura ambiente hasta 150 °C y así reducir la humedad del producto a un valor cercano al 1%, arrojando un valor aproximado de 33.505 MJ

- Preparación lechada de cal.

Para la preparación del agente precipitante, se seleccionó la cal viva por sus resultados en la enmienda y el costo asociado a la compra del reactivo, obteniendo 2043,1 t/h de lechada de cal (Flujo 4) según lo indicado en la Figura 25.

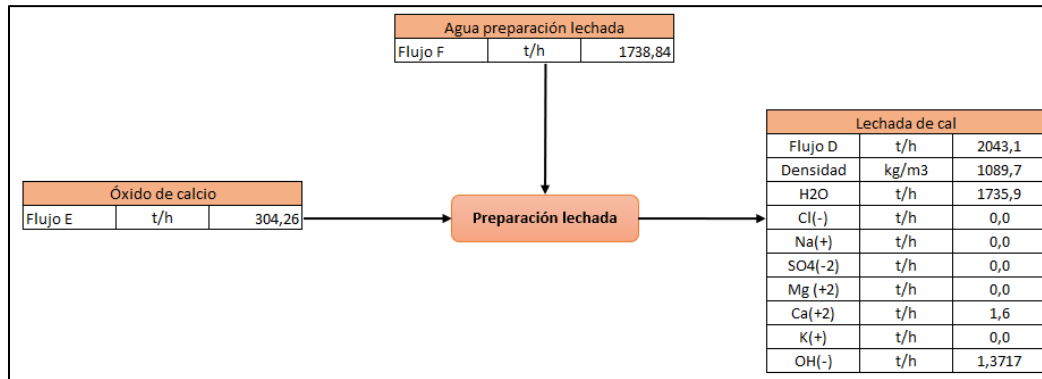


Figura 25 Balance de masa preparación lechada de cal

- Piscina agua sobrenadante.

Como resultado de las aguas obtenidas de los procesos de separación sólido – líquido de los procesos de decantación y centrifugado (Flujo 8 y Flujo 9 respectivamente) es que se hace necesario la construcción de una piscina que pueda contener estos flujos como lo indica la Figura 26, ya que al presentar un pH alcalino, se pueden destinar a procesos que requieran de estas condiciones de trabajo, obteniendo un flujo de 5645 t/h.

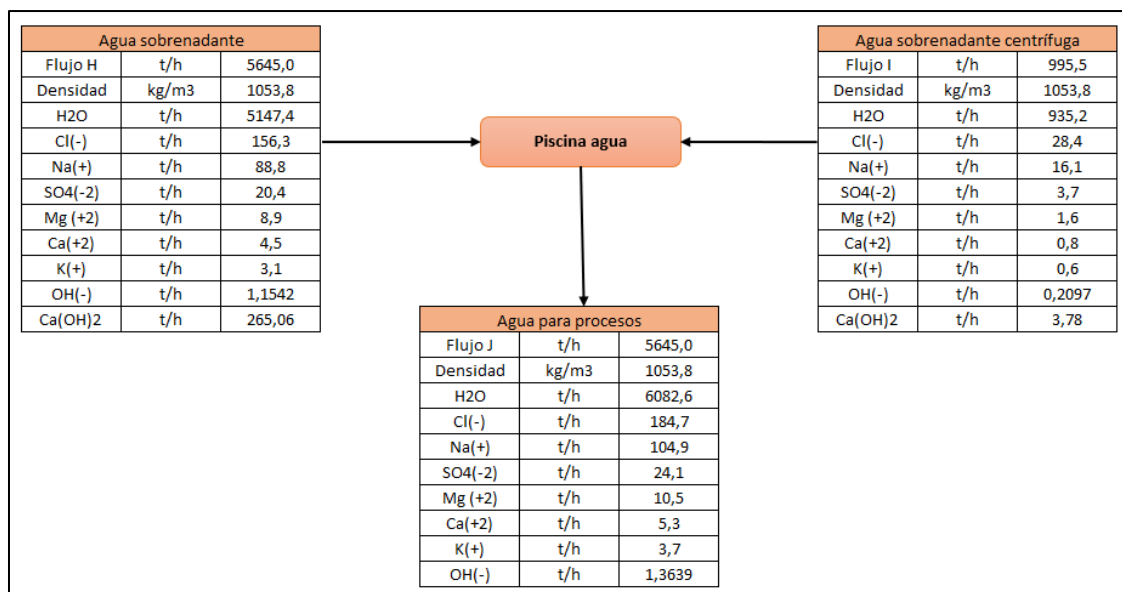


Figura 26 Balance de masa piscina agua sobrenadante

### 5.3 Estimación de costos de operación e inversión.

Es de conocimiento que los recursos de energía y agua son vitales para el desarrollo de este proyecto, ya que están asociados a uno de los mayores gastos para la ejecución de un proyecto, razón por la cual es necesario definir la ubicación geográfica de la planta de forma estratégica de manera que el acceso al lugar, distancia a lugares urbanos y puertos, y disponibilidad eléctrica sea sencilla.

En la Figura 27 se indica la ubicación de la planta desaladora “La Chimba”.

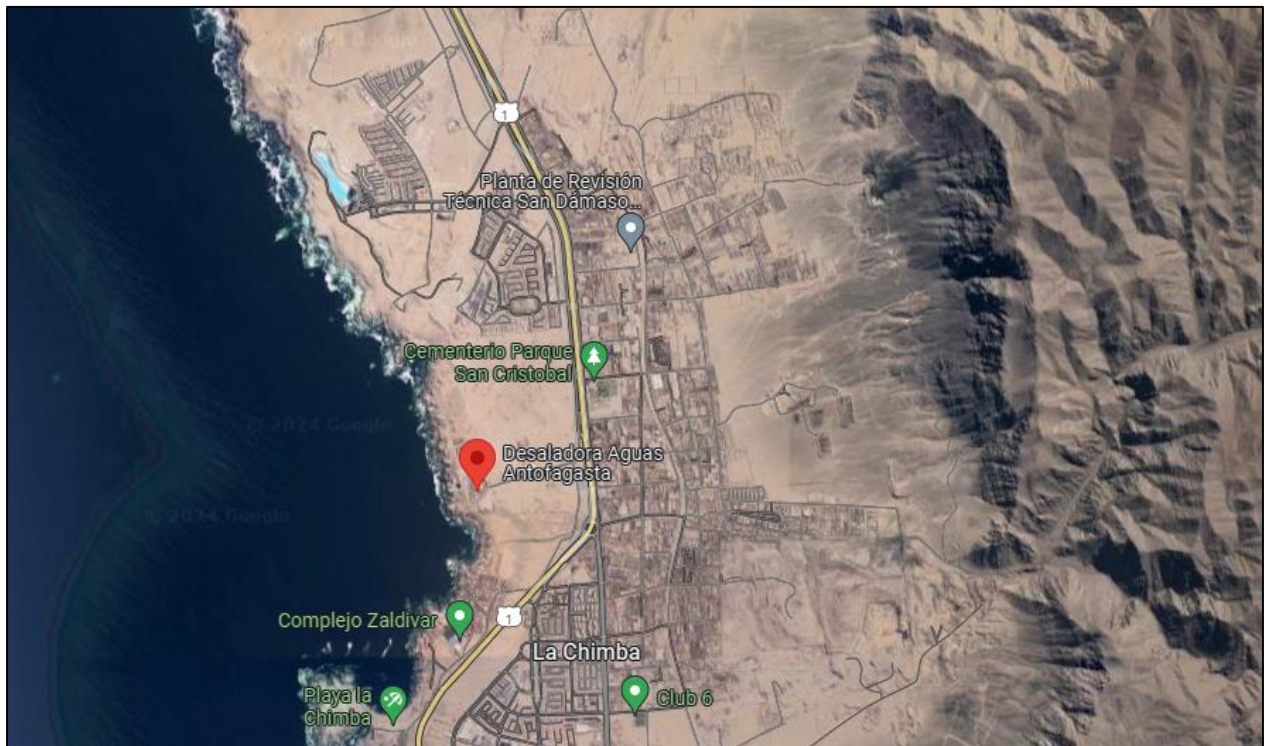


Figura 27 Ubicación planta desaladora "La Chimba"

La planta se implementará en la comuna de Antofagasta, región de Antofagasta, en las cercanías de la planta desaladora, debido a que ésta proveerá de la materia prima para el desarrollo del proceso, la salmuera.

Cabe destacar que además de la región de Antofagasta, es posible el desarrollo de este proyecto en la región de Coquimbo o la región de Valparaíso, debido a los proyectos de plantas desaladoras que se estarán desarrollando en esas regiones. Sin embargo, como aún están en etapa de construcción, se prefirió la planta La Chimba debido a que ésta ya está en funcionamiento.

El abastecimiento de agua y energía eléctrica de la región está en manos de las empresas Aguas Antofagasta y CGE respectivamente. Debido a la ubicación seleccionada, es que se cuenta con acceso de estos dos insumos vitales para el correcto desarrollo de este proyecto.

Una vez definida la locación, es que ya se comienza con la evaluación de costos asociados a la operación de la planta, los cuales son un factor clave para definir la viabilidad económica de un proyecto. Es aquí en donde se definen los recursos económicos para el desarrollo del proyecto, los cuales incluyen equipos, materias primas, arriendos, etc. todo esto para que la estimación sea lo más realista posible.

### 5.3.3. Capex

Capex es el acrónimo de Capital Expenditures, es decir, gastos o inversiones de capital. En otras palabras, capex hace referencia a los gastos que una empresa realiza para la adquisición o mantenimiento de bienes físicos con el fin de invertir en el crecimiento de la compañía.

Además, este es un indicador del ciclo de vida de una empresa, por lo cual se convierte en un factor de prioridad para analizar dentro de las proyecciones financieras debido a que provee información útil para simular escenarios, definir si es que es necesario financiamiento adicional y requisitos para el capital de trabajo.

Debido a lo anteriormente mencionado, es que se utiliza el método de Peters & Timmerhaus para la estimación de costos de inversión, ya que la estimación mantiene la clasificación de procesos de sólidos, líquidos o mixtos, asociados al valor de los equipos instalados, en donde el detalle de este método se muestra en el Anexo C.2, donde los factores utilizados corresponden a un flujo mixto, resultando un coste de inversión de [USD] \$6.029.060, siendo la adquisición de los equipos el mayor costo asociado a la inversión con un 21% del total según lo indicado en la Figura 28.

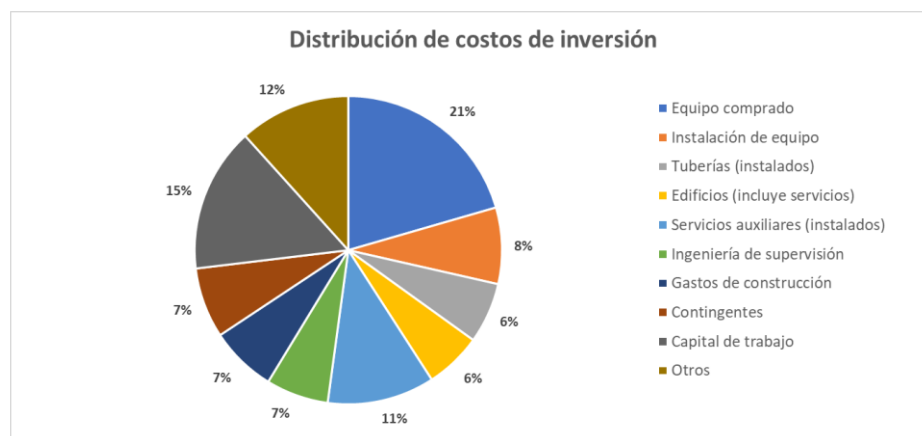


Figura 28 Distribución costos de inversión

#### 5.3.4. Opex

Opex u Operating Expenses hace referencia a los gastos operativos, es decir, todos los gastos fijos del día que hacen que una empresa funcione, como las remuneraciones de los trabajadores, costos de consumos de reactivos, materias primas, entre otros.

El opex es importante para conocer el capital de trabajo que una empresa requiere, y así poder optimizar los costos. Para lograr esto, es necesario tener en cuenta la totalidad de los gastos básicos que la empresa maneja para definir el presupuesto operativo y no tener inconvenientes con éste.

Además, este indicador económico también refleja todos los gastos de producción y entrega del producto final.

Para obtener el Opex, inicialmente se definieron los funcionarios para la operación de la planta, lo cual se ve en la Tabla 15.

Tabla 15 Cargos operativos y remuneraciones planta

| Cargo                                                          | Cantidad | Sueldo Mensual | Costo Operación |
|----------------------------------------------------------------|----------|----------------|-----------------|
| Gerente General                                                | 1        | \$ 3.000.000   | \$ 3.000.000    |
| Gerente Unidad de Especialistas                                | 1        | \$ 2.500.000   | \$ 2.500.000    |
| Gerente Unidad de Procesos Planta                              | 1        | \$ 2.500.000   | \$ 2.500.000    |
| Gerente Unidad de Automatización y Control de Procesos         | 1        | \$ 2.500.000   | \$ 2.500.000    |
| Gerente Unidad de Administración                               | 1        | \$ 2.500.000   | \$ 2.500.000    |
| Ing. Especialista Procesos                                     | 1        | \$ 1.800.000   | \$ 1.800.000    |
| Ing. Especialista Gestión de Inversiones                       | 1        | \$ 1.800.000   | \$ 1.800.000    |
| Ing. Especialista Desmantelamiento y Procesos Pirometalúrgicos | 1        | \$ 1.800.000   | \$ 1.800.000    |

|                                                 |               |              |               |
|-------------------------------------------------|---------------|--------------|---------------|
| Ing. Especialista Prevención de Riesgos         | 1             | \$ 1.800.000 | \$ 1.800.000  |
| Analista Control de Pérdidas                    | 1             | \$ 1.200.000 | \$ 1.200.000  |
| Jefe Control Planta                             | 1             | \$ 1.200.000 | \$ 1.200.000  |
| Jefe de área Laboratorio Metalúrgico            | 1             | \$ 1.200.000 | \$ 1.200.000  |
| Ingeniero Plataforma                            | 1             | \$ 1.200.000 | \$ 1.200.000  |
| Coordinador de Contratos y logística de insumos | 1             | \$ 1.150.000 | \$ 1.150.000  |
| Contador                                        | 1             | \$ 1.150.000 | \$ 1.150.000  |
| Ing. Gestión de calidad                         | 1             | \$ 1.150.000 | \$ 1.150.000  |
| Operadores Control Planta                       | 10            | \$ 850.000   | \$ 8.500.000  |
| Operadores Laboratorio Metalúrgico              | 2             | \$ 850.000   | \$ 1.700.000  |
| Analistas Laboratorio Metalúrgico               | 2             | \$ 850.000   | \$ 1.700.000  |
| Operadores Desmantelamiento                     | 14            | \$ 675.000   | \$ 9.450.000  |
| Operadores Procesos                             | 28            | \$ 675.000   | \$ 18.900.000 |
| Total                                           | \$ 40.350.000 |              |               |
| Total USD                                       | \$ 42.563     |              |               |

Tomando en cuenta el costo del personal operativo de la planta, sumado a los gastos administrativos, licencias, permisos, entre otros, es que se obtiene un OPEX de \$188.133.274 USD/año cuyo detalle se muestra en el Anexo C.3, en donde los mayores gastos operativos son el servicio de transporte del producto (12%), el consumo del reactivo para la etapa de precipitación (25%) y la adquisición de los elementos faltantes para que el acondicionar el producto final como enmienda agrícola (36%) como lo indica la Figura 29.

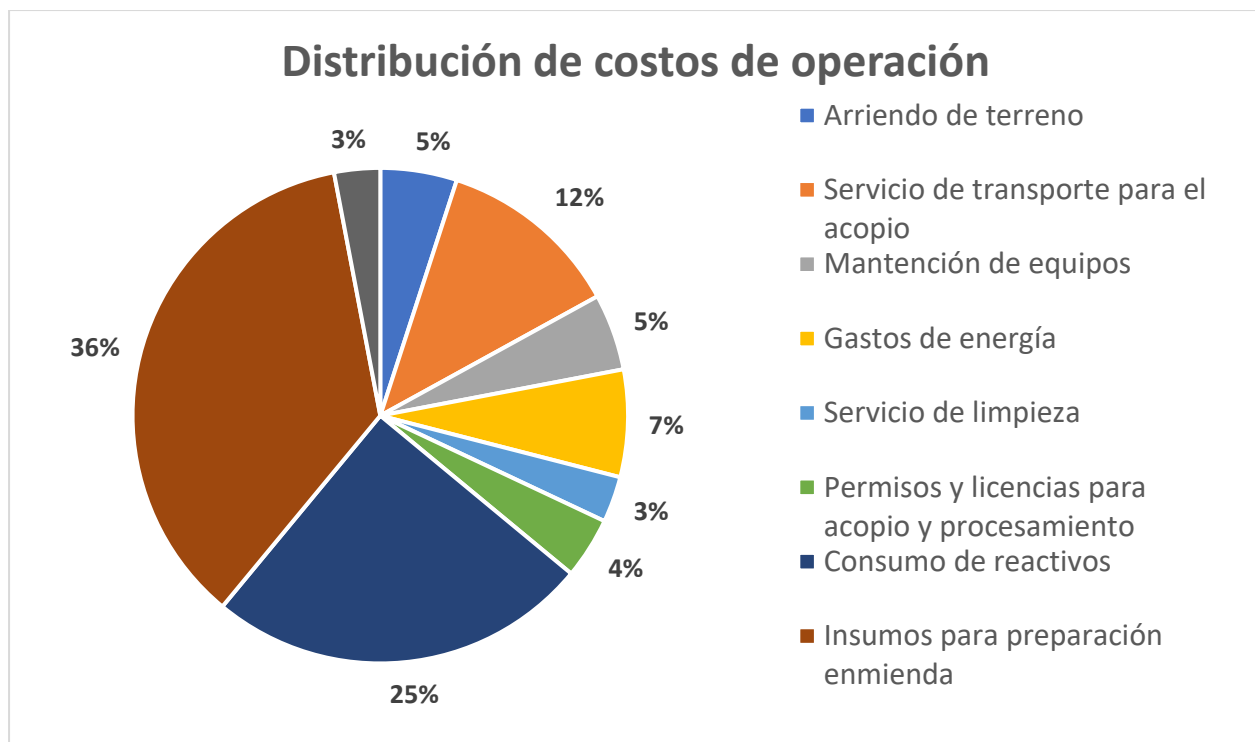


Figura 29 Distribución costos de operación

Cabe destacar que para el ítem de consumo de reactivos, se considera sólo la cal viva como reactivo del proceso, ya que para la etapa de secado el equipo considerado para el proceso es eléctrico.

Una vez definidos los costos de inversión y operación, se considera los ingresos por venta del producto final del proceso, en este caso la enmienda agrícola enriquecida en magnesio, la cual está detallada en la Tabla 16.

Tabla 16 Detalle de ingreso por venta

| Producto                                  | Flujo [ton/h] | [USD/Ton] | Ingreso [USD/año] |
|-------------------------------------------|---------------|-----------|-------------------|
| Enmienda agrícola enriquecida en magnesio | 81,44         | \$1.137   | \$811.441.106     |

En base a esto, se estima un Payback de 2 años, 4 meses y 9 días, considerando costos de operación constantes a lo largo del tiempo, esto implica no ajuste de remuneración e insumos, por lo cual se considera un proyecto rentable.

Cabe destacar que el desarrollo de este proyecto es más sensible al Opex, esto debido a que el consumo de reactivo es alto y se requiere de otros productos para lograr obtener una enmienda agrícola enriquecida en magnesio, así es que esto conlleva un gasto mayor para la ejecución de la planta.

## CAPITULO VI: CONCLUSIONES

En función de los resultados obtenidos y plasmados en el informe, se concluye lo siguiente.

Según el producto obtenido mediante el proceso propuesto para la obtención de una enmienda agrícola, sumado a los resultados de las simulaciones, se genera un sólido cuya composición presenta hidróxido de magnesio ( $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ), Carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) y Sulfato de Calcio ( $\text{CaSO}_4$ ). Sin embargo, al realizar un ensayo de DRX a la muestra final, ésta sólo cumple con la proporción de calcio y magnesio, que son 7,496% y 6,757% respectivamente, por lo tanto, se requiere de un acondicionamiento del producto final para que cumpla la composición de una enmienda agrícola enriquecida en magnesio como tal.

Respecto a la evaluación del agente precipitante asociado a las lechadas de cal preparadas con cuatro tipos de cales, se descartan la caliza y la cal hidráulica ya que no poseen en proporción considerable el compuesto principal para la formación de la lechada, es decir que el óxido de calcio está presente en estas cales en un 32% y 25% respectivamente, debido a que éstas no han pasado por la etapa de calcinación, que es en donde se genera el agente reactivo. Finalmente se selecciona la cal viva como la apropiada para el proceso, ya que se obtienen resultados similares en comparación con la cal apagada, sin embargo, la cal viva tiene un costo de \$USD 200 en comparación con la cal apagada que tiene un costo asociado de \$USD 300, por lo tanto se selecciona la primera mencionada ya que es de adquisición más económica.

Para el balance de masa realizado en HSC Chemistry, se obtiene que para un caudal de 4464 t/h de salmuera producida, con una concentración de 2,345 g/L de magnesio, se producen 81,44 t/h de enmienda agrícola enriquecida en magnesio, compuesta por hidróxido de magnesio ( $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ), carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ), sulfato de calcio ( $\text{CaSO}_4$ ) y con hidróxido de calcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) por arrastre de la lechada. Para lograr la producción, fueron necesarias 2043,1 t/h de lechada de cal, lo que implica 304,26 t/h de cal viva y 1738,84 t/h de agua de preparación, generando 6640 t/h de agua para procesos obtenidas a partir de la etapa de decantación y centrifugado y 8,43 t/h de vapor producto de la etapa de secado. En base a estos resultados, es que se obtiene un consumo de 3,73 ton de cal y 21,35 ton de agua de preparación de lechada por cada tonelada de enmienda producida y un balance energético de 33,505 MJ para que el producto final obtenga 1% de humedad.

Respecto al desarrollo de la ingeniería de perfil, una vez definido el lugar de implementación de la planta se pudo obtener el capex y el opex, los cuales son \$6.029.060 USD y \$188.130.000

USD/año respectivamente, en donde el principal costo asociado a la producción es el uso del reactivo óxido de calcio y la adquisición de otros elementos para el acondicionamiento de la enmienda final, elevando los costos operacionales del proceso. Sin embargo, el ingreso por venta anual del producto es de \$USD 811.441.106, esto conlleva a un Payback de 2 años, 4 meses y 9 días, por lo cual se considera un proyecto rentable, por lo que se sugiere continuar con la ingeniería conceptual del proyecto.

## **CAPITULO VII: Recomendaciones**

Respecto al producto final, como no se obtiene una enmienda agrícola enriquecida en magnesio según los resultados obtenidos por ensayo DRX, se recomienda evaluar mediante el mismo proceso la venta de un producto final con alto contenido en magnesio y así no abarcar el costo del acondicionamiento del precipitado como enmienda.

Ya que este proceso utiliza como flujo inicial 4464 m<sup>3</sup>/h de salmuera resultante del proceso de desalinización proveniente de la planta de Aguas Antofagasta, es asertivo evaluar alternativas para no requerir el flujo total de éste para la producción de enmienda agrícola y que no se vea afectado económicamente el negocio, ya que el flujo a tratar es considerable y por ende, los costos asociados al proceso aumentan.

Como alternativa, se plantea el uso de las aguas residuales de los procesos de separación sólido – líquido para procesos de obtención de cobre sulfurado, esto debido al pH alcalino que éstas presentan dado a que el proceso de obtención de la enmienda requiere de esta característica para ser exitosa.

## CAPITULO VI: REFERENCIAS

- [1] Ministerio de agricultura, «Biblioteca del Congreso Nacional de Chile,» 9 Junio 2021. [En línea]. Available: <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1162023>. [Último acceso: 6 diciembre 2021].
- [2] Agroactivo, «Las enmiendas del suelo,» [En línea]. Available: <https://agroactivocol.com/nutricion-vegetal/las-enmiendas-del-suelo/>. [Último acceso: 6 diciembre 2021].
- [3] D. L. Cruzado Medina, «Efecto de la aplicación de enmiendas de origen mineral en el pH del suelo en plantaciones de cacao (Theobroma cacao), distrito de Pólvora- Tocache-San Martín,» Tarapoto, 2017.
- [4] CRU consulting, «Magnesio,» Santiago de Chile, 2018.
- [5] «AEDyR,» 15 Octubre 2019. [En línea]. Available: <https://aedyr.com/que-es-salmuera/>. [Último acceso: 16 Noviembre 2021].
- [6] D. Nuevo, «Tecpa,» 23 Noviembre 2020. [En línea]. Available: <https://www.tecpa.es/salmuera-desaladora/>. [Último acceso: 16 Noviembre| 2021].
- [7] R. D. Chanta Montalvo, «Composición del agua de mar,» 2018.
- [8] Rio claro, «Rio claro,» [En línea]. Available: <https://www.rioclaro.com.co/-que-es-una-enmienda-agricolar-content-66.html>. [Último acceso: 1 diciembre| 2021].
- [9] Portal Fruticola, «Encalados y aplicación de eniendas orgánicas y minerales al suelo. Tipos, características, productos y dosis,» 14 Septiembre 2017. [En línea]. Available: <https://www.portalfruticola.com/noticias/2017/09/14/encalados-y-aplicacion-de-enmiendas-organicas-y-minerales-al-suelo-tipos-caracteristicas-productos-y-dosis/>.
- [10] A. Orús, «Statista,» 9 mayo 2023. [En línea]. Available: <https://es.statista.com/estadisticas/613401/principales-paises-productores-de-tomates-en-el-mundo/>. [Último acceso: 12 marzo 2024].

- [11] Centro Nacional de información de Minerales, «Estadística e información sobre la oferta, la demanda y el flujo mundial del magnesio como producto básico mineral.,» USGS, 2020. [En línea]. Available: <https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/magnesium-statistics-and-information>. [Último acceso: 2022].
- [12] Terra Petra, «Ficha técnica Pampa 34,» Medellín.
- [13] Empresas IANSA, insumos agrícolas, «Empresas Iansa,» [En línea]. Available: <https://empresasiansa.cl/insumos-agricolas/wp-content/uploads/sites/3/2020/02/Enmiendas-Pampa-34.pdf>. [Último acceso: 10 12 2023].
- [14] D. Nuevo, «La salmuera en el vertido de desaladoras,» 23 noviembre 2020. [En línea]. Available: <https://www.tecpa.es/salmuera-desaladora/>.
- [15] E. Gacía y E. Ballesteros, «El impacto de las plantas desalinizadoras sobre el medio marino: la salmuera en las comunidades bentónicas mediterráneas,» Blanes, España.
- [16] Aguas Antofagasta S.A, «Declaración de Impacto Ambiental Planta Desaladora Sur Antofagasta,» GHD, Antofagasta. , 2011.
- [17] AEDyR, «Minería de salmuera: la recuperación de minerales en la desalación de agua,» 26 octubre 2022. [En línea]. Available: <https://aedyr.com/mineria-salmuera-recuperacion-minerales-desalacion-agua/>. [Último acceso: 2 abril 2023].
- [18] J. M. Uriarte, «Características.co,» 30 septiembre 2021. [En línea]. Available: <https://www.caracteristicas.co/magnesio/>. [Último acceso: 17 junio 2022].
- [19] Y. Maldonado, «Los 10 usos del magnesio más importantes y sus beneficios,» Geología web, 18 diciembre 2021. [En línea]. Available: <https://geologiaweb.com/elementos-quimicos/usos-del-magnesio/>. [Último acceso: 2022].
- [20] Reciclajes López, «¿Cómo se obtiene el magnesio en la industria minera?,» 3 marzo 2022. [En línea]. Available: <https://reciclajeslopez.com/como-se-obtiene-el-magnesio-en-la-industria-minera/>. [Último acceso: 23 abril 2023].
- [21] M. Á. Criado, «Las desaladoras generan tanta salmuera como para cubrir España,» El país, 15 enero 2019. [En línea]. Available:

[https://elpais.com/elpais/2019/01/14/ciencia/1547446264\\_496342.html](https://elpais.com/elpais/2019/01/14/ciencia/1547446264_496342.html). [Último acceso: 2022].

- [22] P. Crespo, H. Palma, J. Quintanilla y L. Quispe, «Tratamiento químico de salmueras del Salar de Uyuni-Potosí,» Instituto de investigaciones químicas-FCPN, Potosí, 1987.
- [23] G. Bolívar, «Hidróxido de magnesio: estructura, propiedades, nomenclatura, usos,» Lifeder, 12 agosto 2019. [En línea]. Available: <https://www.lifeder.com/hidroxido-de-magnesio/>. [Último acceso: 2022].
- [24] Química industrial, «Química industrial - Hidróxido de magnesio,» 2020. [En línea]. Available: <https://quimicaindustrial.cl/producto/hidroxido-de-magnesio/>. [Último acceso: 22 abril 2023].
- [25] Merck, «Magnesium hydroxide,» Sigma Aldrich, 01 junio 2022. [En línea]. Available: [https://www.sigmaaldrich.com/CL/es/search/1309-42-8?focus=products&gclid=Cj0KCQiAybaRBhDtARIsAIEG3klU3gkEWkmXrGNya2UJVPF1zYIWN01-J-zPufZGC4w\\_iFu0gk1q-lgaAvGrEALw\\_wcB&page=1&perpage=30&sort=relevance&term=1309-42-8&type=cas\\_number](https://www.sigmaaldrich.com/CL/es/search/1309-42-8?focus=products&gclid=Cj0KCQiAybaRBhDtARIsAIEG3klU3gkEWkmXrGNya2UJVPF1zYIWN01-J-zPufZGC4w_iFu0gk1q-lgaAvGrEALw_wcB&page=1&perpage=30&sort=relevance&term=1309-42-8&type=cas_number). [Último acceso: 2022].
- [26] Universidad de Salamanca, «Solubilidad de calcio y magnesio en agua,» Salamanca, España, 2020.
- [27] W. Stumm y J. J. Morgan, Aquatic Chemistry 3rd ed., Wiley-interscience, 1996.
- [28] Blumos, «¿Qué es el carbonato de magnesio?,» 23 abril 2021. [En línea]. Available: <https://www.blumos.cl/que-es-el-carbonato-de-magnesio/>. [Último acceso: 2022].
- [29] Merck, «Magnesium carbonate basic,» Sigma Aldrich, 1 junio 2022. [En línea]. Available: [https://www.sigmaaldrich.com/CL/es/search/39409-82-0?focus=products&gclid=Cj0KCQiAybaRBhDtARIsAIEG3kkGrwtN2Dsdps\\_AA1H36CwmkQB16mBvADj4h-D6nl4iAZysb164mRYaAocgEALw\\_wcB&page=1&perpage=30&sort=relevance&term=39409-82-0&type=cas\\_number](https://www.sigmaaldrich.com/CL/es/search/39409-82-0?focus=products&gclid=Cj0KCQiAybaRBhDtARIsAIEG3kkGrwtN2Dsdps_AA1H36CwmkQB16mBvADj4h-D6nl4iAZysb164mRYaAocgEALw_wcB&page=1&perpage=30&sort=relevance&term=39409-82-0&type=cas_number). [Último acceso: 2022].

- [30] Lifeder, «Precipitación química,» 29 marzo 2021. [En línea]. Available: <https://www.lifeder.com/precipitacion-quimica/>. [Último acceso: 2 abril 2023].
- [31] Cromtek, «¿Qué es un precipitado y para qué sirve?,» 2019. [En línea]. Available: <https://www.cromtek.cl/2021/04/23/que-es-un-precipitado-y-para-que-sirve/>. [Último acceso: 2022].
- [32] G. Coloma Álvarez, La cal ¡Es un reactivo químico!, 2008.
- [33] Arquitectura pura, «Arquitectura pura,» [En línea]. Available: <https://www.arquitecturapura.com/construccion/cal-viva-8601/>.
- [34] Mercado Libre, «Cal viva 5 kg,» [En línea]. Available: [https://articulo.mercadolibre.cl/MLC-983022827-cal-viva-5kg-\\_JM#position=1&search\\_layout=stack&type=item&tracking\\_id=116bd1a9-6d8c-4392-8177-c140f95876ca](https://articulo.mercadolibre.cl/MLC-983022827-cal-viva-5kg-_JM#position=1&search_layout=stack&type=item&tracking_id=116bd1a9-6d8c-4392-8177-c140f95876ca). [Último acceso: 22 marzo 2024].
- [35] Calidra, «Especificación interna de producto CaO,» Santiago, Chile.
- [36] Vadequímica, «Vadequímica,» 19 junio 2023. [En línea]. Available: <https://www.vadequimica.com/blog/todos-los-articulos/cal-apagada.html>. [Último acceso: 22 marzo 2024].
- [37] Materias primas, «Cal hidratada 1 kg,» [En línea]. Available: <https://materiasprimas.cl/producto/cal-hidratada-1-kg/>. [Último acceso: 22 marzo 2024].
- [38] Calidra, «Especificación interna de producto Ca(OH)<sub>2</sub>,» Santiago, Chile.
- [39] Rocas y Minerales, «Rocas y Minerales,» [En línea]. Available: <https://www.rocasyminerales.net/caliza/>. [Último acceso: 22 marzo 2024].
- [40] Mercado Libre, «Carbonato de calcio 1 kg,» [En línea]. Available: [https://articulo.mercadolibre.cl/MLC-1180023097-carbonato-de-calcio-malla-500-1k-blanco-extrafino-\\_JM#position=52&search\\_layout=stack&type=item&tracking\\_id=86d8acd5-369c-4aa5-a479-013156121697](https://articulo.mercadolibre.cl/MLC-1180023097-carbonato-de-calcio-malla-500-1k-blanco-extrafino-_JM#position=52&search_layout=stack&type=item&tracking_id=86d8acd5-369c-4aa5-a479-013156121697). [Último acceso: 22 marzo 2024].
- [41] Calidra, «Especificación interna del producto CaCO<sub>3</sub>,» Santiago, Chile.

- [42] Spiegato, «¿Qué es la cal hidráulica?,» [En línea]. Available: <https://spiegato.com/es/que-es-la-cal-hidraulica>. [Último acceso: 22 marzo 2024].
- [43] Easy, «Cal hidráulica soprocal,» [En línea]. Available: <https://www.easy.cl/cal-hidraulica-25-kilos-soprocal-6-soprocal-119078/p>. [Último acceso: 22 marzo 2024].
- [44] Calidra, «Especificación interna de producto Cal hidráulica,» Santiago, Chile.
- [45] Centro de formación técnica para la industria, «¿Qué es la simulación de procesos industriales?,» [En línea]. Available: <https://www.cursosaula21.com/que-es-la-simulacion-de-procesos-industriales/>. [Último acceso: 22 marzo 2024].
- [46] Metso: Outotec, «Software HSC Chemistry,» 2021. [En línea]. Available: <https://www.mogroup.com/es/portafolio/hsc-chemistry/>. [Último acceso: 5 diciembre 2021].
- [47] Metso, «Software HSC Chemistry,» [En línea]. Available: <https://www.metso.com/es/portafolio/hsc-chemistry/>. [Último acceso: 22 marzo 2024].
- [48] Empírica, «Ingeniería de perfil,» 2 agosto 2022. [En línea]. Available: <https://empiricaconsultores.cl/ingenieria-de-perfil/>. [Último acceso: 22 marzo 2024].
- [49] Reuters, «Plantas desalinizadoras de agua provocan daño ambiental, según la ONU,» *América*, 14 Enero 2019.
- [50] GHD, «Aguas Antofagasta S.A. Planta desaladora Antofagasta. Declaración de Impacto Ambiental,» Antofagasta, 2011.
- [51] J. Zumaeta, «Estimación de costes y rentabilidad de equipos,» Santiago, Chile.
- [52] Tecpromin, «Planta de cal,» [En línea]. Available: <https://www.tecpromin.cl/new/planta-de-cal/>. [Último acceso: 22 marzo 2024].
- [53] Alibaba, «Reactor de tanque agitado continuo,» [En línea]. Available: [https://spanish.alibaba.com/p-detail/3000l-1600325422682.html?spm=a2700.galleryofferlist.normal\\_offer.d\\_title.54af62303pv4Eq](https://spanish.alibaba.com/p-detail/3000l-1600325422682.html?spm=a2700.galleryofferlist.normal_offer.d_title.54af62303pv4Eq). [Último acceso: 22 marzo 2024].
- [54] Alibaba, «Espesador por gravedad,» [En línea]. Available: <https://spanish.alibaba.com/p-detail/Low->

1600112455676.html?spm=a2700.galleryofferlist.p\_offer.d\_title.2e16733fWeIYOf&s=p.  
[Último acceso: 22 marzo 2024].

[55] Alibaba, «Centrífuga industrial,» [En línea]. Available: [https://spanish.alibaba.com/p-detail/Industrial-1600426790889.html?spm=a2700.galleryofferlist.normal\\_offer.d\\_image.7bc76389ZnmZ8C&s=p](https://spanish.alibaba.com/p-detail/Industrial-1600426790889.html?spm=a2700.galleryofferlist.normal_offer.d_image.7bc76389ZnmZ8C&s=p). [Último acceso: 22 marzo 2024].

[56] Alibaba, «Horno eléctrico industrial,» [En línea]. Available: [https://spanish.alibaba.com/p-detail/Truck-1600948659217.html?spm=a2700.galleryofferlist.p\\_offer.d\\_title.5c016f6aCNsSId&s=p](https://spanish.alibaba.com/p-detail/Truck-1600948659217.html?spm=a2700.galleryofferlist.p_offer.d_title.5c016f6aCNsSId&s=p). [Último acceso: 22 marzo 2024].

[57] «l'mnovation,» 2017. [En línea]. Available: [https://www.imnovation-hub.com/es/agua/un-nuevo-concepto-de-desalinizacion-proyecto-life-dreamer/?gclid=Cj0KCQiAys2MBhDOARIsAFf1D1fz\\_RuVUNyXOWaP7HG9C6tQnpMU5W9dnKOHwVayH1ZJLV3TlgPUgVgaApVrEALw\\_wcB&\\_adin=02021864894](https://www.imnovation-hub.com/es/agua/un-nuevo-concepto-de-desalinizacion-proyecto-life-dreamer/?gclid=Cj0KCQiAys2MBhDOARIsAFf1D1fz_RuVUNyXOWaP7HG9C6tQnpMU5W9dnKOHwVayH1ZJLV3TlgPUgVgaApVrEALw_wcB&_adin=02021864894).

[58] G. Bolivar, «Hidróxido de magnesio: estructura, propiedades, nomenclatura, usos,» 12 Agosto 2019. [En línea]. Available: <https://www.lifeder.com/hidroxido-de-magnesio/>. [Último acceso: 18 Noviembre 2021].

[59] V. Ruiz, «Química inorgánica: Hidróxido de magnesio,» Monterrey, 2014.

[60] M. D. C. Rojas Espinoza, «Simulación computacional de un procesode obtención de hidróxido de magnesio a partir del rechazo de una planta desalinizadora de agua de mar,» Valparaíso, 2020.

[61] T. Paim, S. Rocha y B. Ribedeiro, «Utilización de hidróxido de magnesio en la precipitación de metales pesados,» *Revista de la facultad de ingeniería*, p. 27.

[62] L. E. Pérez Farrás, «Teoría de la sedimentación,» 2005.

[63] Material Docente Multimedia en las Áreas de Ingeniería Química y Tecnologías del Medio Ambiente , «Sedimentación».

[64] H. R. Flores, «Recuperación de  $Mg(OH)_2$  de salmueras,» Salta.

- [65] Ditecsa, «Funcionamiento de la centrifugación y aplicación en limpiezas de tanques en crudo,» Sevilla , 2018.
- [66] I. Angurell, N. Casamitjana, A. Caubet, I. Dinarés, N. Llor, D. Muñoz-Torrero, E. Nicolás, M. Pérez-García, M. D. Pujol, G. Rosell, M. Seco y D. Velasco, «Ub.edu,» [En línea]. Available: <http://www.ub.edu/oblq/oblq%20castellano/index1.html#>. [Último acceso: 1 Diciembre 2021].
- [67] M. Fernández Arévalo, «Secado».
- [68] Departamento de Metalurgia, Universidad de Concepción, «Metalurgia extractiva de metales no ferrosos. Metalurgia del Magnesio,» Concepción , 2013.
- [69] Qonto, «Gastos operativos: fórmula de cálculo y más claves,» 23 November 2021. [En línea]. Available: <https://qonto.com/es/tips/team/gastos-operativos-formula>. [Último acceso: 1 Diciembre 2021].
- [70] J. Martínez, «¿Cómo calcular los costos de operación de una empresa?,» Nubox, [En línea]. Available: <https://blog.nubox.com/empresas/costos-de-operacion-de-una-empresa>. [Último acceso: 1 Diciembre 2021].
- [71] J. A. Ludeña, «Margen operativo.,» Economipedia.com, 30 Junio 2021. [En línea]. Available: <https://economipedia.com/definiciones/margen-operativo.html>. [Último acceso: 1 Diciembre 2021].
- [72] J. V., «Qué es, cómo se calcula y para qué se usa el margen operacional,» Bursitia.com, 25 Julio 2021. [En línea]. Available: <https://www.bursitia.com/2021/07/25/que-es-como-se-calcula-y-para-que-se-usa-el-margen-operacional/>. [Último acceso: 1 Diciembre 2021].
- [73] M. Casanova Pinto, W. Vera Elizondo, W. Luzio Leighton y O. Salazar Guerrero, «Edafología,» Santiago de Chile, 2004.
- [74] Fundación Economía Circular , «Economía circular,» 2017. [En línea]. Available: <https://economiacircular.org/economia-circular/>. [Último acceso: 3 diciembre 2021].
- [75] Noticias Parlamento Europeo, «Economía circular: definición, importancia y beneficios,» 02 diciembre 2015. [En línea]. Available:

<https://www.europarl.europa.eu/news/es/headlines/economy/20151201STO05603/economia-circular-definicion-importancia-y-beneficios>. [Último acceso: 3 diciembre 2021].

- [76] Aladyr, «Red de Oficinas Económicas y Comerciales de España en el Exterior,» Octubre 2019. [En línea]. Available: <https://www.icex.es/icex/es/navegacion-principal/todos-nuestros-servicios/informacion-de-mercados/paises/navegacion-principal/noticias/NEW2019833806.html?idPais=CL>. [Último acceso: 6 diciembre 2021].
- [77] Malvern Panalytical, «Fluorescencia de rayos X (XRF),» 2021. [En línea]. Available: <https://www.malvernpanalytical.com/es/products/technology/xray-analysis/x-ray-fluorescence>. [Último acceso: 5 diciembre 2021].
- [78] H. R. Flores, S. K. Valdez y A. M. Orce, «Recuperación de hidróxido de magnesio en salmueras de la puna argentina,» Salta, Argentina, 2018.

## CAPITULO VII: ANEXOS

### ANEXO A. Resultados DRX muestra final.

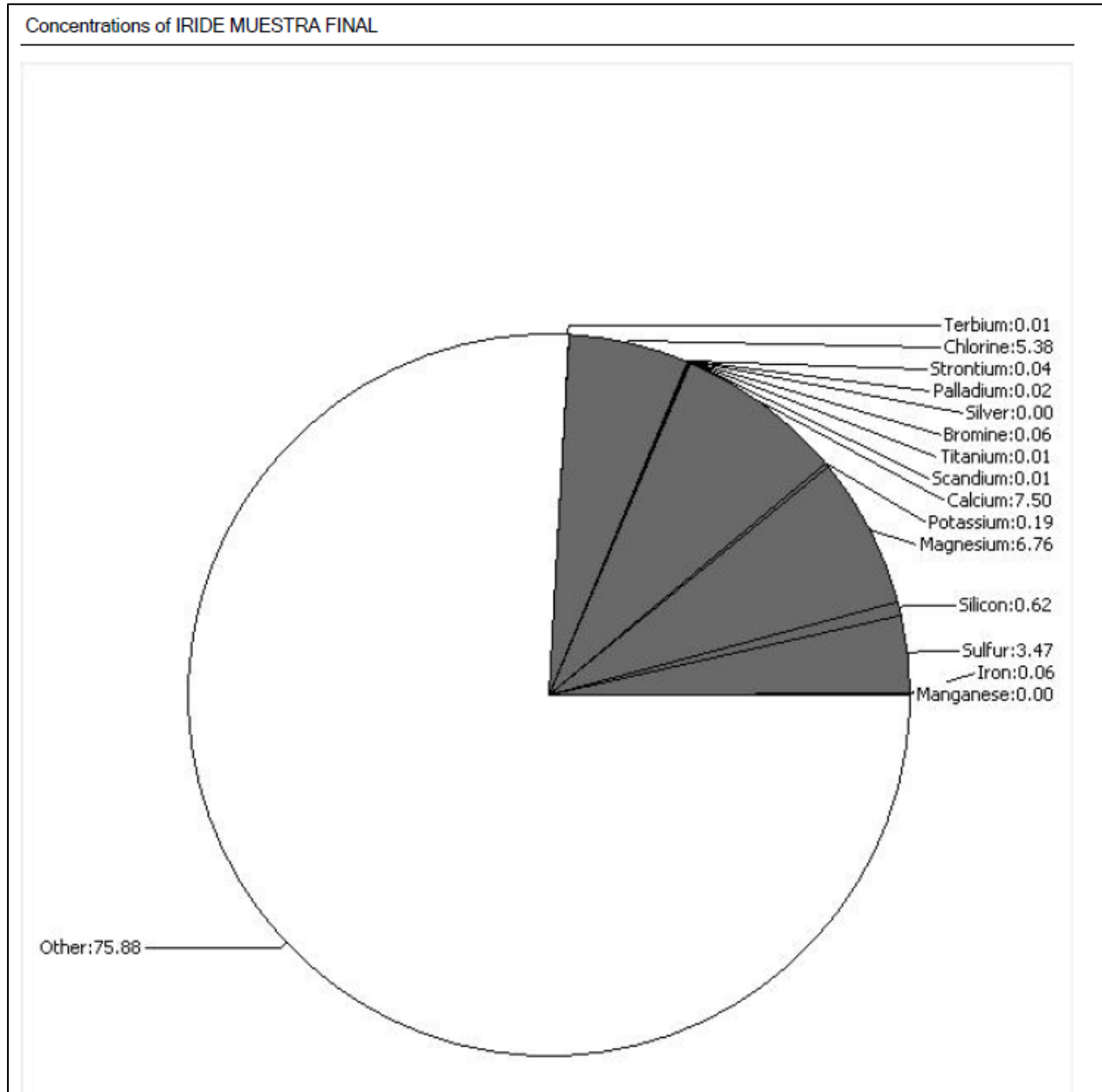


Figura 30 Resultado DRX muestra final

## ANEXO B. Simulaciones

### B.1. Simulaciones de balances de masa en HSC Chemistry.

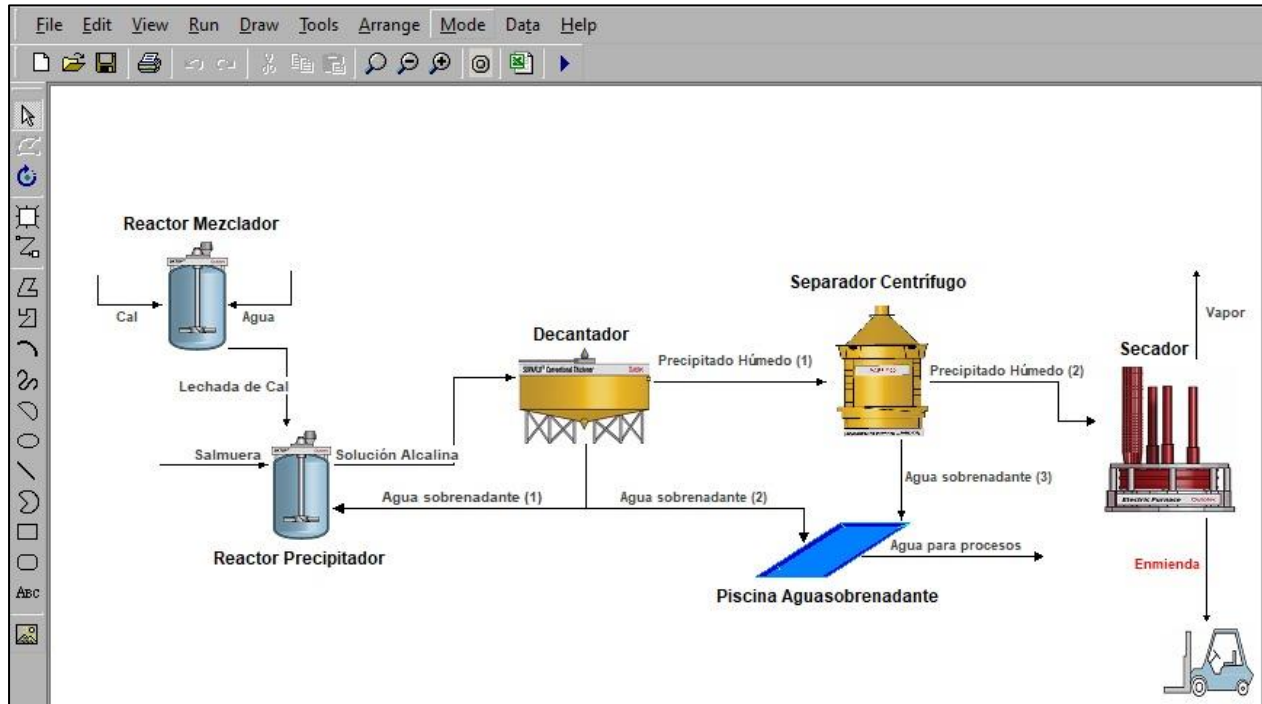


Figura 31 Diagrama de flujos de proceso de obtención de enmienda agrícola enriquecida en magnesio simulado en HSC Chemistry

| Reactor Precipitador |                            |                    |           |                       |                |           |           |                   |
|----------------------|----------------------------|--------------------|-----------|-----------------------|----------------|-----------|-----------|-------------------|
| Authors:             |                            |                    |           |                       |                |           |           |                   |
| Date:                |                            |                    |           |                       |                |           |           |                   |
| INPUT STREAMS        |                            |                    |           | OUTPUT STREAMS        |                |           |           |                   |
| Type                 | INPUT Variables            | Units              | Total Sum | Agua sobrenadante (1) | Lechada de Cal | Salmuera  | Total Sum | Solución Alcalina |
| A1                   | Flujo Másico               | t/h                | 18299,14  | 2.419,27              | 2.043,10       | 4.687,20  | 9149,57   | 9149,57           |
| A2                   | Flujo volumétrico          | m <sup>3</sup> /h  | 17269,30  | 2.295,77              | 1.874,88       | 4.464,00  | 8634,65   | 8634,65           |
| O                    | Propiedades fisicoquímicas |                    |           |                       |                |           |           |                   |
| T                    | Temperatura                | °C                 | 25,00     | 25,00                 | 25,00          | 25,00     | 25        | 25                |
| Pr                   | Presión                    | bar                | 1,02      | 1,02                  | 1,02           | 1,02      | 1,02      | 1,02              |
| D                    | Densidad                   | kg/m <sup>3</sup>  | -         | 1.053,79              | 1.089,72       | 1.050,00  | -         | 1059,63           |
| V10                  | Porcentaje sólidos         | m <sup>3</sup> /h  | -         |                       | 15,04          |           | -         | 5,06              |
| W                    | Humedad p/p                | %                  | -         |                       |                |           | -         |                   |
| O                    | pH                         | [-]                | -         |                       | 12,34          | 8,40      | -         | 11,81             |
| O                    | Conductividad eléctrica    | uS/cm              |           |                       |                | 89.758,00 |           |                   |
| O                    | Salinidad                  | ppm                |           |                       |                | 55.000,00 |           |                   |
| P1                   | Sólidos                    | t/h                | 421,62    | 117,36                | 304,26         | 0,00      | 463,32    | 463,32            |
| A3                   | Ca(OH)2                    | t/h                | 421,62    | 117,36                | 304,26         |           | 382,48    | 382,48            |
| A4                   | Mg(OH)2                    | t/h                | 0,00      |                       | 0,00           |           | 30,81     | 30,81             |
| A5                   | CaSO4                      | t/h                | 0,00      |                       | 0,00           |           | 37,30     | 37,30             |
| A6                   | CaCl2                      | t/h                | 0,00      |                       | 0,00           |           | 0,00      | 0,00              |
| A7                   | CaCO3                      | t/h                | 0,00      |                       | 0,00           |           | 12,73     | 12,73             |
| C1                   | Impurezas                  | wt-%               |           |                       |                |           |           |                   |
| C2                   | Cl                         | wt-%               |           |                       |                |           |           |                   |
| C3                   | Na                         | wt-%               |           |                       |                |           |           |                   |
| C4                   | SO4                        | wt-%               |           |                       |                |           |           |                   |
| C5                   | Mg                         | wt-%               |           |                       |                |           |           |                   |
| C6                   | Ca                         | wt-%               |           |                       |                |           |           |                   |
| C7                   | K                          | wt-%               |           |                       |                |           |           |                   |
| P2                   | Fase Acuosa                | t/h                | 8727,96   | 2.301,92              | 1.738,84       | 4.687,20  | 8686,26   | 8686,26           |
| A8                   | Flujo volumétrico          | m <sup>3</sup> /h  | 8456,47   | 2.248,40              | 1.744,07       | 4.464,00  | 8456,47   | 8456,47           |
| C8                   | Concentración de especies  | g/l                |           |                       |                |           |           |                   |
| C9                   | Cl(-a)                     | g/l                | 29,80     | 29,80                 | 0,00           | 41,44     | 29,80     | 29,80             |
| C10                  | Na(+a)                     | g/l                | 16,92     | 16,92                 | 0,00           | 23,53     | 16,92     | 16,92             |
| C11                  | SO4(-2a)                   | g/l                | 3,89      | 3,89                  | 0,00           | 5,41      | 0,78      | 0,78              |
| C12                  | Mg(+2a)                    | g/l                | 1,69      | 1,69                  | 0,00           | 2,35      | 0,17      | 0,17              |
| C13                  | Ca(+2a)                    | g/l                | 0,85      | 0,85                  | 0,93           | 0,82      | 1,45      | 1,45              |
| C14                  | K(+a)                      | g/l                | 0,59      | 0,59                  | 0,00           | 0,82      | 0,59      | 0,59              |
| C15                  | OH(-a)                     | g/l                | 0,22      | 0,22                  | 0,79           | 4,27E-05  | 0,22      | 0,22              |
| A9                   | Cl(-a)                     | t/h                | 251,99    | 67,00                 | 0,00           | 184,99    | 251,99    | 251,99            |
| A10                  | Na(+a)                     | t/h                | 143,08    | 38,04                 | 0,00           | 105,04    | 143,08    | 143,08            |
| A11                  | SO4(-2a)                   | t/h                | 32,90     | 8,75                  | 0,00           | 24,15     | 6,58      | 6,58              |
| A12                  | Mg(+2a)                    | t/h                | 14,27     | 3,80                  | 0,00           | 10,47     | 1,43      | 1,43              |
| A13                  | Ca(+2a)                    | t/h                | 7,19      | 1,91                  | 1,62           | 3,66      | 12,28     | 12,28             |
| A14                  | K(+a)                      | t/h                | 4,99      | 1,33                  | 0,00           | 3,66      | 4,99      | 4,99              |
| A15                  | OH(-a)                     | t/h                | 1,87      | 0,49                  | 1,37           | 1,91E-04  | 1,87      | 1,87              |
| A16                  | H2O(l)                     | t/h                | 24.891,31 | 2.206,02              | 1.735,85       | 4.355,23  | 8297,10   | 8297,10           |
| P3                   | Gases                      | Nm <sup>3</sup> /h |           |                       |                | 0,00      |           |                   |
| A17                  | H2O(g)                     | t/h                |           |                       |                |           |           |                   |

Figura 32 Simulador balance de masa proceso de precipitación

| MODEL                                                            |                              |       |                |                 |                  | CHEMICAL REACTIONS                  |           |          |          |         |
|------------------------------------------------------------------|------------------------------|-------|----------------|-----------------|------------------|-------------------------------------|-----------|----------|----------|---------|
| WIZARD: Chemical Re. NOTE: Rerun Wizard if you change reactions! |                              |       |                |                 |                  |                                     |           |          |          |         |
| Type                                                             | VARIABLES:<br>Phases/Species | Units | INPUT<br>Total | OUTPUT<br>Total | BALANCE<br>Total | Progress<br>%                       | REACTANTS |          | PRODUCTS |         |
| A1                                                               | Flujo Másico                 | t/h   | 9149,57        | 9149,57         | 0,00             | 90                                  | Mg(+2a)   | *OH(-a)  | =        | Mg(OH)2 |
| A2                                                               | Flujo volumétrico            | m3/h  | 8634,65        | 8634,65         | 0,00             | Coef.                               | 1         | 2        |          | 1       |
| O                                                                | Propiedades físicoquímicas   |       | 0,00           | 0,00            | 0,00             | kmol/h                              | 528,334   | 1056,667 |          | 528,334 |
| T                                                                | Temperatura                  | °C    | 25,00          | 25,00           |                  | t/h                                 | 12,841    | 17,971   |          | 30,812  |
| Pr                                                               | Presión                      | bar   | 1,02           | 1,02            |                  |                                     |           |          |          |         |
| D                                                                | Densidad                     | kg/m3 | -              | -               |                  |                                     |           |          |          |         |
| V10                                                              | Porcentaje sólidos           | m3/h  | -              | -               |                  |                                     |           |          |          |         |
| W                                                                | Humedad p/p                  | %     | -              | -               |                  |                                     |           |          |          |         |
| O                                                                | pH                           | [-]   | -              | -               |                  |                                     |           |          |          |         |
| O                                                                | Conductividad eléctrica      | uS/cm |                |                 |                  |                                     |           |          |          |         |
| O                                                                | Salinidad                    | ppm   |                |                 |                  |                                     |           |          |          |         |
| P1                                                               | Sólidos                      | t/h   | 421,62         | 463,32          | 41,70            | Cal apagada que reacciona con el Mg |           |          |          |         |
| A3                                                               | Ca(OH)2                      | t/h   | 421,62         | 382,48          | -39,14           | Rendimiento reaccion                | Ca(OH)2   | =Ca+2    | +2OH-    |         |
| A4                                                               | Mg(OH)2                      | t/h   | 0,00           | 30,81           | 30,81            | 100                                 | 1         | 1        | 2        |         |
| A5                                                               | CaSO4                        | t/h   | 0,00           | 37,30           | 37,30            | PM g/mol                            | 74,09     | 40,08    | 17,01    |         |
| A6                                                               | CaCl2                        | t/h   | 0,00           | 0,00            | 0,00             | kmol/h ini                          | 528,33    | 528,33   | 1.056,67 |         |
| A7                                                               | CaCO3                        | t/h   | 0,00           | 12,73           | 12,73            | t/h ini                             | 39,14     | 21,18    | 17,97    |         |
| C1                                                               | Impurezas                    | w t-% | 0,00           | 0,00            | 0,00             | Formacion de CaSO4                  | Ca+2      | +SO4     | =CaSO4   |         |
| C2                                                               | Cl                           | w t-% | 0,00           | 0,00            | 0,00             | 80                                  | 1         | 1        | 1        |         |
| C3                                                               | Na                           | w t-% | 0,00           | 0,00            | 0,00             | PM g/mol                            | 40,08     | 96,06    | 136,14   |         |
| C4                                                               | SO4                          | w t-% | 0,00           | 0,00            | 0,00             | kmol/h ini                          | 528,33    | 342,46   |          |         |
| C5                                                               | Mg                           | w t-% | 0,00           | 0,00            | 0,00             | t/h ini                             | 21,18     | 32,90    |          |         |
| C6                                                               | Ca                           | w t-% | 0,00           | 0,00            | 0,00             | kmol/h rx                           | 273,97    | 273,97   | 0,00     |         |
| C7                                                               | K                            | w t-% | 0,00           | 0,00            | 0,00             | t/h rx                              | 10,98     | 26,32    |          |         |
|                                                                  |                              |       |                |                 |                  | kmol/h fin                          | 254,37    | 68,49    | 273,97   |         |
| P2                                                               | Fase Acuosa                  | t/h   | 8727,96        | 8686,26         | -41,70           | t/h rx fin                          | 10,20     | 6,58     | 37,30    |         |
| A8                                                               | Flujo volumétrico            | m3/h  | 8456,47        | 8456,47         | 0,00             | Formacion CaCO3                     | Ca+2      | +CO3-2   | =CaCO3   |         |
| C8                                                               | Concentración de espec       | g/l   | 0,00           | 0,00            | 0,00             | 50                                  | 1         | 1        | 1        |         |
| C9                                                               | Cl(-a)                       | g/l   | 29,80          | 29,80           | 0,00             | PM g/mol                            | 40,08     | 60,01    | 100,09   |         |
| C10                                                              | Na(+a)                       | g/l   | 16,92          | 16,92           | 0,00             | kmol/h ini                          | 254,37    | 254,37   |          |         |
| C11                                                              | SO4(-2a)                     | g/l   | 3,89           | 0,78            | -3,11            | t/h ini                             | 10,20     | 15,26    |          |         |
| C12                                                              | Mg(+2a)                      | g/l   | 1,69           | 0,17            | -1,52            | kmol/h rx                           | 127,18    | 127,18   | 0,00     |         |
| C13                                                              | Ca(+2a)                      | g/l   | 0,85           | 1,45            | 0,60             | t/h rx                              | 5,10      | 7,63     |          |         |
| C14                                                              | K(+a)                        | g/l   | 0,59           | 0,59            | 0,00             | kmol/h fin                          | 127,18    | 127,18   | 127,18   |         |
| C15                                                              | OH(-a)                       | g/l   | 0,22           | 0,22            | 0,00             | t/h fin                             | 5,10      | 7,63     | 12,73    |         |
| A9                                                               | Cl(-a)                       | t/h   | 251,99         | 251,99          | 0,00             |                                     |           |          |          |         |
| A10                                                              | Na(+a)                       | t/h   | 143,08         | 143,08          | 0,00             |                                     |           |          |          |         |
| A11                                                              | SO4(-2a)                     | t/h   | 32,90          | 6,58            | -26,32           |                                     |           |          |          |         |
| A12                                                              | Mg(+2a)                      | t/h   | 14,27          | 1,43            | -12,84           |                                     |           |          |          |         |
| A13                                                              | Ca(+2a)                      | t/h   | 7,19           | 12,28           | 5,10             |                                     |           |          |          |         |
| A14                                                              | K(+a)                        | t/h   | 4,99           | 4,99            | 0,00             |                                     |           |          |          |         |
| A15                                                              | OH(-a)                       | t/h   | 1,87           | 1,87            | 0,00             |                                     |           |          |          |         |
| A16                                                              | H2O(l)                       | t/h   | 8297,10        | 8297,10         | 0,00             |                                     |           |          |          |         |

Figura 33 Simulador balance de masa reacciones involucradas en proceso de precipitación

| Decantador |                            |                   |               |                   |                |                        |                       |                       |
|------------|----------------------------|-------------------|---------------|-------------------|----------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|
| Authors:   |                            |                   |               |                   |                |                        |                       |                       |
| Date:      |                            |                   |               |                   |                |                        |                       |                       |
|            |                            |                   | INPUT STREAMS |                   | OUTPUT STREAMS |                        |                       |                       |
| Type       | INPUT Variables            | Units             | Total Sum     | Solución Alcalina | Total Sum      | Precipitado Húmedo (1) | Agua sobrenadante (1) | Agua sobrenadante (2) |
| A1         | Flujo Másico               | t/h               | 9149,58       | 9149,58           | 9149,58        | 1085,34                | 2419,27               | 5644,97               |
| A2         | Flujo volumétrico          | m <sup>3</sup> /h | 8634,65       | 8634,65           | 8634,65        | 982,08                 | 2295,77               | 5356,80               |
| O          | Propiedades fisicoquímicas |                   |               |                   |                |                        |                       |                       |
| T          | Temperatura                | °C                | 25,00         | 25,00             | 25,00          | 25,00                  | 25,00                 | 25,00                 |
| Pr         | Presión                    | bar               | 1,02          | 1,02              | 1,02           | 1,02                   | 1,02                  | 1,02                  |
| D          | Densidad                   | kg/m <sup>3</sup> | -             | 1059,64           | -              | 1105,14                | 1053,80               | 1053,80               |
| V10        | Porcentaje sólidos         | m <sup>3</sup> /h | -             | 5,06              | -              | 7,80                   | 4,70                  | 4,70                  |
| W          | Humedad p/p                | %                 | -             |                   | -              |                        |                       |                       |
| O          | pH                         | [-]               | -             | 11,81             | -              |                        |                       |                       |
| O          | Conductividad eléctrica    | uS/cm             |               |                   |                |                        |                       |                       |
| O          | Salinidad                  | ppm               |               |                   |                |                        |                       |                       |
| P1         | Sólidos                    | t/h               | 463,32        | 463,32            | 463,32         | 84,66                  | 113,60                | 265,06                |
| A3         | Ca(OH) <sub>2</sub>        | t/h               | 382,48        | 382,48            | 382,48         | 3,82                   | 113,60                | 265,06                |
| A4         | Mg(OH) <sub>2</sub>        | t/h               | 30,81         | 30,81             | 30,81          | 30,81                  |                       |                       |
| A5         | CaSO <sub>4</sub>          | t/h               | 37,30         | 37,30             | 37,30          | 37,30                  |                       |                       |
| A6         | CaCl <sub>2</sub>          | t/h               | 0,00          | 0,00              | 0,00           |                        |                       |                       |
| A7         | CaCO <sub>3</sub>          | t/h               | 12,73         | 12,73             | 12,73          | 12,73                  |                       |                       |
| C1         | Impurezas                  | wt-%              |               |                   |                |                        |                       |                       |
| C2         | Cl                         | wt-%              |               |                   |                |                        |                       |                       |
| C3         | Na                         | wt-%              |               |                   |                |                        |                       |                       |
| C4         | SO <sub>4</sub>            | wt-%              |               |                   |                |                        |                       |                       |
| C5         | Mg                         | wt-%              |               |                   |                |                        |                       |                       |
| C6         | Ca                         | wt-%              |               |                   |                |                        |                       |                       |
| C7         | K                          | wt-%              |               |                   |                |                        |                       |                       |
| P2         | Fase Acuosa                | t/h               | 8686,26       | 8686,26           | 8686,26        | 1000,68                | 2305,68               | 5379,91               |
| A8         | Flujo volumétrico          | m <sup>3</sup> /h | 8456,47       | 8456,47           | 8456,47        | 961,81                 | 2248,40               | 5246,26               |
| C8         | Concentración de especies  | g/l               |               |                   |                |                        |                       |                       |
| C9         | Cl(-a)                     | g/l               | 29,80         | 29,80             | 29,80          | 29,80                  | 29,80                 | 29,80                 |
| C10        | Na(+a)                     | g/l               | 16,92         | 16,92             | 16,92          | 16,92                  | 16,92                 | 16,92                 |
| C11        | SO <sub>4</sub> (-2a)      | g/l               | 3,89          | 3,89              | 3,89           | 3,89                   | 3,89                  | 3,89                  |
| C12        | Mg(+2a)                    | g/l               | 1,69          | 1,69              | 1,69           | 1,69                   | 1,69                  | 1,69                  |
| C13        | Ca(+2a)                    | g/l               | 0,85          | 0,85              | 0,85           | 0,85                   | 0,85                  | 0,85                  |
| C14        | K(+a)                      | g/l               | 0,59          | 0,59              | 0,59           | 0,59                   | 0,59                  | 0,59                  |
| C15        | OH(-a)                     | g/l               | 0,22          | 0,22              | 0,22           | 0,22                   | 0,22                  | 0,22                  |
| A9         | Cl(-a)                     | t/h               | 252,00        | 252,00            | 252,00         | 28,66                  | 67,00                 | 156,34                |
| A10        | Na(+a)                     | t/h               | 143,08        | 143,08            | 143,08         | 16,27                  | 38,04                 | 88,77                 |
| A11        | SO <sub>4</sub> (-2a)      | t/h               | 32,90         | 32,90             | 32,90          | 3,74                   | 8,75                  | 20,41                 |
| A12        | Mg(+2a)                    | t/h               | 14,29         | 14,29             | 14,29          | 1,63                   | 3,80                  | 8,87                  |
| A13        | Ca(+2a)                    | t/h               | 7,19          | 7,19              | 7,19           | 0,82                   | 1,91                  | 4,46                  |
| A14        | K(+a)                      | t/h               | 4,99          | 4,99              | 4,99           | 0,57                   | 1,33                  | 3,10                  |
| A15        | OH(-a)                     | t/h               | 1,86          | 1,86              | 1,86           | 0,21                   | 0,49                  | 1,15                  |
| A16        | H <sub>2</sub> O(l)        | t/h               | 8297,10       | 8297,10           | 8297,10        | 943,69                 | 2206,02               | 5147,39               |

Figura 34 Simulador balance de masa proceso de Decantación

| Separador Centrifugo<br>Authors:<br>Date: |                            |       |               |                        |                |                        |                       |
|-------------------------------------------|----------------------------|-------|---------------|------------------------|----------------|------------------------|-----------------------|
|                                           |                            |       | INPUT STREAMS |                        | OUTPUT STREAMS |                        |                       |
| Type                                      | INPUT Variables            | Units | Total Sum     | Precipitado Húmedo (1) | Total Sum      | Precipitado Húmedo (2) | Agua sobrenadante (3) |
| A1                                        | Flujo Másico               | t/h   | 1085,34       | 1085,34                | 1085,34        | 89,86                  | 995,48                |
| A2                                        | Flujo volumétrico          | m3/h  | 982,08        | 982,08                 | 982,08         | 37,43                  | 944,65                |
| O                                         | Propiedades fisicoquímicas |       |               |                        |                |                        |                       |
| T                                         | Temperatura                | °C    | 25,00         | 25,00                  | 25,00          | 25,00                  | 25,00                 |
| Pr                                        | Presión                    | bar   | 1,02          | 1,02                   | 1,02           | 1,02                   | 1,02                  |
| D                                         | Densidad                   | kg/m3 | -             | 1105,14                | -              | 2401,07                | 1053,80               |
| V10                                       | Porcentaje sólidos         | m3/h  | -             | 7,80                   | -              | 90,00                  |                       |
| W                                         | Humedad p/p                | %     | -             |                        | -              | 10,00                  |                       |
| O                                         | pH                         | [-]   | -             |                        | -              |                        |                       |
| O                                         | Conductividad eléctrica    | uS/cm |               |                        |                |                        |                       |
| O                                         | Salinidad                  | ppm   |               |                        |                |                        |                       |
|                                           |                            |       |               |                        |                |                        |                       |
| P1                                        | Sólidos                    | t/h   | 84,66         | 84,66                  | 84,66          | 80,88                  | 3,78                  |
| A3                                        | Ca(OH)2                    | t/h   | 3,82          | 3,82                   | 3,82           | 0,04                   | 3,78                  |
| A4                                        | Mg(OH)2                    | t/h   | 30,81         | 30,81                  | 30,81          | 30,81                  |                       |
| A5                                        | CaSO4                      | t/h   | 37,30         | 37,30                  | 37,30          | 37,30                  |                       |
| A6                                        | CaCl2                      | t/h   | 0,00          |                        | 0,00           | 0,00                   |                       |
| A7                                        | CaCO3                      | t/h   | 12,73         | 12,73                  | 12,73          | 12,73                  |                       |
| C1                                        | Impurezas                  | wt-%  |               |                        |                |                        |                       |
| C2                                        | Cl                         | wt-%  |               |                        |                |                        |                       |
| C3                                        | Na                         | wt-%  |               |                        |                |                        |                       |
| C4                                        | SO4                        | wt-%  |               |                        |                |                        |                       |
| C5                                        | Mg                         | wt-%  |               |                        |                |                        |                       |
| C6                                        | Ca                         | wt-%  |               |                        |                |                        |                       |
| C7                                        | K                          | wt-%  |               |                        |                |                        |                       |
|                                           |                            |       |               |                        |                |                        |                       |
| P2                                        | Fase Acuosa                | t/h   | 1000,68       | 1000,68                | 1000,68        | 8,99                   | 991,69                |
| A8                                        | Flujo volumétrico          | m3/h  | 961,81        | 961,81                 | 961,81         | 8,64                   | 953,17                |
| C8                                        | Concentración de especies  | g/l   |               |                        |                |                        |                       |
| C9                                        | Cl(-a)                     | g/l   | 29,80         | 29,80                  | 29,80          | 29,80                  | 29,80                 |
| C10                                       | Na(+a)                     | g/l   | 16,92         | 16,92                  | 16,92          | 16,92                  | 16,92                 |
| C11                                       | SO4(-2a)                   | g/l   | 3,89          | 3,89                   | 3,89           | 3,89                   | 3,89                  |
| C12                                       | Mg(+2a)                    | g/l   | 1,69          | 1,69                   | 1,69           | 1,69                   | 1,69                  |
| C13                                       | Ca(+2a)                    | g/l   | 0,85          | 0,85                   | 0,85           | 0,85                   | 0,85                  |
| C14                                       | K(+a)                      | g/l   | 0,59          | 0,59                   | 0,59           | 0,59                   | 0,59                  |
| C15                                       | OH(-a)                     | g/l   | 0,22          | 0,22                   | 0,22           | 0,22                   | 0,22                  |
| A9                                        | Cl(-a)                     | t/h   | 28,66         | 28,66                  | 28,66          | 0,26                   | 28,40                 |
| A10                                       | Na(+a)                     | t/h   | 16,27         | 16,27                  | 16,27          | 0,15                   | 16,13                 |
| A11                                       | SO4(-2a)                   | t/h   | 3,74          | 3,74                   | 3,74           | 0,03                   | 3,71                  |
| A12                                       | Mg(+2a)                    | t/h   | 1,63          | 1,63                   | 1,63           | 0,01                   | 1,61                  |
| A13                                       | Ca(+2a)                    | t/h   | 0,82          | 0,82                   | 0,82           | 0,01                   | 0,81                  |
| A14                                       | K(+a)                      | t/h   | 0,57          | 0,57                   | 0,57           | 0,01                   | 0,56                  |
| A15                                       | OH(-a)                     | t/h   | 0,21          | 0,21                   | 0,21           | 0,00                   | 0,21                  |
| A16                                       | H2O(l)                     | t/h   | 943,69        | 943,69                 | 943,69         | 8,52                   | 935,17                |

Figura 35 Simulador balance de masa proceso Centrifugado

| Secador<br>Authors:<br>Date: |                            |       |           |                        |           |          |         |
|------------------------------|----------------------------|-------|-----------|------------------------|-----------|----------|---------|
| INPUT STREAMS                |                            |       |           | OUTPUT STREAMS         |           |          |         |
| Type                         | INPUT Variables            | Units | Total Sum | Precipitado Húmedo (2) | Total Sum | Enmienda | Vapor   |
| A1                           | Flujo Másico               | t/h   | 89,87     | 89,87                  | 89,87     | 81,44    | 8,43    |
| A2                           | Flujo volumétrico          | m3/h  | 1874,88   | 1874,88                | 6908,05   | 1866,33  | 5041,72 |
| O                            | Propiedades fisicoquímicas |       |           |                        |           |          |         |
| T                            | Temperatura                | °C    | 25,00     | 25,00                  | 25,00     | 25,00    | 100,00  |
| Pr                           | Presión                    | bar   | 1,02      | 1,02                   | 1,02      | 1,02     | 1,02    |
| D                            | Densidad                   | kg/m3 | -         | 47,93                  | -         | 43,63    | 1,67    |
| V10                          | Porcentaje sólidos         | m3/h  | -         | 90,00                  | -         |          |         |
| W                            | Humedad p/p                | %     | -         | 10,00                  | -         | 1,00     |         |
| O                            | pH                         | [-]   | -         |                        | -         |          |         |
| O                            | Conductividad eléctrica    | uS/cm |           |                        |           |          |         |
| O                            | Salinidad                  | ppm   |           |                        |           |          |         |
| P1                           | Sólidos                    | t/h   | 80,88     | 80,88                  | 80,88     | 80,88    | 0,00    |
| A3                           | Ca(OH)2                    | t/h   | 0,04      | 0,04                   | 0,04      | 0,04     | 0,00    |
| A4                           | Mg(OH)2                    | t/h   | 30,81     | 30,81                  | 30,81     | 30,81    |         |
| A5                           | CaSO4                      | t/h   | 37,30     | 37,30                  | 37,30     | 37,30    |         |
| A6                           | CaCl2                      | t/h   | 0,00      | 0,00                   | 0,00      | 0,00     |         |
| A7                           | CaCO3                      | t/h   | 12,73     | 12,73                  | 12,73     | 12,73    |         |
| C1                           | Impurezas                  | wt-%  |           |                        |           | 0,57     |         |
| C2                           | Cl                         | wt-%  |           |                        |           | 0,32     |         |
| C3                           | Na                         | wt-%  |           |                        |           | 0,18     |         |
| C4                           | SO4                        | wt-%  |           |                        |           | 0,04     |         |
| C5                           | Mg                         | wt-%  |           |                        |           | 0,02     |         |
| C6                           | Ca                         | wt-%  |           |                        |           | 0,01     |         |
| C7                           | K                          | wt-%  |           |                        |           | 0,01     |         |
| P2                           | Fase Acuosa                | t/h   | 8,99      | 8,99                   | 0,56      | 0,56     | 0,00    |
| A8                           | Flujo volumétrico          | m3/h  | 8,64      | 8,64                   | 0,09      | 0,09     | 0,00    |
| C8                           | Concentración de especies  | g/l   |           |                        |           |          |         |
| C9                           | Cl(-a)                     | g/l   | 29,80     | 29,80                  | 29,80     | 29,80    |         |
| C10                          | Na(+a)                     | g/l   | 16,92     | 16,92                  | 16,92     | 16,92    |         |
| C11                          | SO4(-2a)                   | g/l   | 3,89      | 3,89                   | 3,89      | 3,89     |         |
| C12                          | Mg(+2a)                    | g/l   | 1,69      | 1,69                   | 1,69      | 1,69     |         |
| C13                          | Ca(+2a)                    | g/l   | 0,85      | 0,85                   | 0,85      | 0,85     |         |
| C14                          | K(+a)                      | g/l   | 0,59      | 0,59                   | 0,59      | 0,59     |         |
| C15                          | OH(-a)                     | g/l   | 0,22      | 0,22                   | 0,22      | 0,22     |         |
| A9                           | Cl(-a)                     | t/h   | 0,26      | 0,26                   | 0,26      | 0,26     |         |
| A10                          | Na(+a)                     | t/h   | 0,15      | 0,15                   | 0,15      | 0,15     |         |
| A11                          | SO4(-2a)                   | t/h   | 0,03      | 0,03                   | 0,03      | 0,03     |         |
| A12                          | Mg(+2a)                    | t/h   | 0,01      | 0,01                   | 0,01      | 0,01     |         |
| A13                          | Ca(+2a)                    | t/h   | 0,01      | 0,01                   | 0,01      | 0,01     |         |
| A14                          | K(+a)                      | t/h   | 0,01      | 0,01                   | 0,01      | 0,01     |         |
| A15                          | OH(-a)                     | t/h   | 0,00      | 0,00                   | 0,00      | 0,00     |         |
| A16                          | H2O(l)                     | t/h   | 8,52      | 8,52                   | 0,09      | 0,09     |         |
| P3                           | Gases                      | Nm3/h |           |                        |           |          | 6887,49 |
| A17                          | H2O(g)                     | t/h   |           |                        |           |          | 8,43    |

Figura 36 Simulador balance de masa Secado

| Reactor Mezclador |                            |       |           |                |         |           |                |
|-------------------|----------------------------|-------|-----------|----------------|---------|-----------|----------------|
| Authors:          |                            |       |           |                |         |           |                |
| Date:             |                            |       |           |                |         |           |                |
| INPUT STREAMS     |                            |       |           | OUTPUT STREAMS |         |           |                |
| Type              | INPUT Variables            | Units | Total Sum | Cal            | Agua    | Total Sum | Lechada de Cal |
| A1                | Flujo Másico               | t/h   | 2043,10   | 307,25         | 1735,85 | 2043,10   | 2043,10        |
| A2                | Flujo volumétrico          | m3/h  | 1874,88   | 133,80         | 1741,08 | 1874,88   | 1874,88        |
| O                 | Propiedades fisicoquímicas |       |           |                |         |           |                |
| T                 | Temperatura                | °C    | 25,00     | 25,00          | 25,00   | 25,00     | 25,00          |
| Pr                | Presión                    | bar   | 1,02      | 1,02           | 1,02    | 1,02      | 1,02           |
| D                 | Densidad                   | kg/m3 | -         | 2210,00        | 997,00  | -         | 1089,72        |
| V10               | Porcentaje sólidos         | m3/h  | -         | 100,00         | 0,00    | -         | 15,04          |
| W                 | Humedad p/p                | %     | -         | 0,00           | 100,00  | -         | 84,96          |
| O                 | pH                         | [-]   | -         |                |         | -         | 12,34          |
| O                 | Conductividad eléctrica    | uS/cm |           |                |         |           |                |
| O                 | Salinidad                  | ppm   |           |                |         |           |                |
|                   |                            |       |           |                |         |           |                |
| P1                | Sólidos                    | t/h   | 307,25    | 307,25         |         | 304,26    | 304,26         |
| A3                | Ca(OH)2                    | t/h   | 307,25    | 307,25         |         | 304,26    | 304,26         |
| A4                | Mg(OH)2                    | t/h   | 0,00      | 0,00           |         | 0,00      |                |
| A5                | CaSO4                      | t/h   | 0,00      | 0,00           |         | 0,00      |                |
| A6                | CaCl2                      | t/h   | 0,00      | 0,00           |         | 0,00      |                |
| A7                | CaCO3                      | t/h   | 0,00      | 0,00           |         | 0,00      |                |
| C1                | Impurezas                  | wt-%  |           |                |         |           |                |
| C2                | Cl                         | wt-%  |           |                |         |           |                |
| C3                | Na                         | wt-%  |           |                |         |           |                |
| C4                | SO4                        | wt-%  |           |                |         |           |                |
| C5                | Mg                         | wt-%  |           |                |         |           |                |
| C6                | Ca                         | wt-%  |           |                |         |           |                |
| C7                | K                          | wt-%  |           |                |         |           |                |
|                   |                            |       |           |                |         |           |                |
| P2                | Fase Acuosa                | t/h   | 1735,85   |                | 1735,85 | 1738,84   | 1738,84        |
| A8                | Flujo volumétrico          | m3/h  | 1741,08   |                | 1741,08 | 1744,07   | 1744,07        |
| C8                | Concentración de especies  | g/l   |           |                |         |           |                |
| C9                | Cl(-a)                     | g/l   | 0,00      |                |         | 0,00      | 0,00           |
| C10               | Na(+a)                     | g/l   | 0,00      |                |         | 0,00      | 0,00           |
| C11               | SO4(-2a)                   | g/l   | 0,00      |                |         | 0,00      | 0,00           |
| C12               | Mg(+2a)                    | g/l   | 0,00      |                |         | 0,00      | 0,00           |
| C13               | Ca(+2a)                    | g/l   | 0,00      |                |         | 0,93      | 0,93           |
| C14               | K(+a)                      | g/l   | 0,00      |                |         | 0,00      | 0,00           |
| C15               | OH(-a)                     | g/l   | 0,00      |                |         | 0,79      | 0,79           |
| A9                | Cl(-a)                     | t/h   | 0,00      |                | 0,00    | 0,00      | 0,00           |
| A10               | Na(+a)                     | t/h   | 0,00      |                | 0,00    | 0,00      | 0,00           |
| A11               | SO4(-2a)                   | t/h   | 0,00      |                | 0,00    | 0,00      | 0,00           |
| A12               | Mg(+2a)                    | t/h   | 0,00      |                | 0,00    | 0,00      | 0,00           |
| A13               | Ca(+2a)                    | t/h   | 0,00      |                | 0,00    | 1,62      | 1,62           |
| A14               | K(+a)                      | t/h   | 0,00      |                | 0,00    | 0,00      | 0,00           |
| A15               | OH(-a)                     | t/h   | 0,00      |                | 0,00    | 1,37      | 1,37           |
| A16               | H2O(l)                     | t/h   | 1735,85   |                | 1735,85 | 1735,85   | 1735,85        |

Figura 37 Simulador balance de masa preparación lechada de cal

| Piscina Aguasobrenadante<br>Authors:<br>Date: |                            |       |           |                       |                       |           |                    |
|-----------------------------------------------|----------------------------|-------|-----------|-----------------------|-----------------------|-----------|--------------------|
| INPUT STREAMS                                 |                            |       |           | OUTPUT STREAMS        |                       |           |                    |
| Type                                          | INPUT Variables            | Units | Total Sum | Agua sobrenadante (3) | Agua sobrenadante (2) | Total Sum | Agua para procesos |
| A1                                            | Flujo Másico               | t/h   | 6640,45   | 995,48                | 5644,97               | 6640,45   | 6640,45            |
| A2                                            | Flujo volumétrico          | m3/h  | 6301,45   | 944,65                | 5356,80               | 6301,45   | 6301,45            |
| O                                             | Propiedades fisicoquímicas |       |           |                       |                       |           | 0,00               |
| T                                             | Temperatura                | °C    | 25,00     | 25,00                 | 25,00                 | 25,00     | 25,00              |
| Pr                                            | Presión                    | bar   | 1,02      | 1,02                  | 1,02                  | 1,02      | 1,02               |
| D                                             | Densidad                   | kg/m3 | -         | 1053,81               | 1053,80               | -         | -                  |
| V10                                           | Porcentaje sólidos         | m3/h  | -         |                       |                       | -         | -                  |
| W                                             | Humedad p/p                | %     | -         |                       |                       | -         | -                  |
| O                                             | pH                         | [-]   | -         |                       |                       | -         | -                  |
| O                                             | Conductividad eléctrica    | uS/cm |           |                       |                       |           |                    |
| O                                             | Salinidad                  | ppm   |           |                       |                       |           |                    |
|                                               |                            |       |           |                       |                       |           |                    |
| P1                                            | Sólidos                    | t/h   | 271,52    | 3,78                  | 267,74                | 271,52    | 271,52             |
| A3                                            | Ca(OH)2                    | t/h   | 271,52    | 3,78                  | 267,74                | 271,52    | 271,52             |
| A4                                            | Mg(OH)2                    | t/h   | 0,00      |                       |                       | 0,00      | 0,00               |
| A5                                            | CaSO4                      | t/h   | 0,00      |                       |                       | 0,00      | 0,00               |
| A6                                            | CaCl2                      | t/h   | 0,00      |                       |                       | 0,00      | 0,00               |
| A7                                            | CaCO3                      | t/h   | 0,00      |                       |                       | 0,00      | 0,00               |
| C1                                            | Impurezas                  | wt-%  |           |                       |                       |           |                    |
| C2                                            | Cl                         | wt-%  |           |                       |                       |           |                    |
| C3                                            | Na                         | wt-%  |           |                       |                       |           |                    |
| C4                                            | SO4                        | wt-%  |           |                       |                       |           |                    |
| C5                                            | Mg                         | wt-%  |           |                       |                       |           |                    |
| C6                                            | Ca                         | wt-%  |           |                       |                       |           |                    |
| C7                                            | K                          | wt-%  |           |                       |                       |           |                    |
|                                               |                            |       |           |                       |                       |           |                    |
| P2                                            | Fase Acuosa                | t/h   | 6368,92   | 991,69                | 5377,23               | 6368,92   | 6368,92            |
| A8                                            | Flujo volumétrico          | m3/h  | 6199,43   | 953,17                | 5246,26               | 6199,43   | 6199,43            |
| C8                                            | Concentración de especies  | g/l   |           |                       |                       |           |                    |
| C9                                            | Cl(-a)                     | g/l   | 29,80     | 29,80                 | 29,80                 | 29,80     | 29,80              |
| C10                                           | Na(+a)                     | g/l   | 16,92     | 16,92                 | 16,92                 | 16,92     | 16,92              |
| C11                                           | SO4(-2a)                   | g/l   | 3,89      | 3,89                  | 3,89                  | 3,89      | 3,89               |
| C12                                           | Mg(+2a)                    | g/l   | 1,69      | 1,69                  | 1,69                  | 1,69      | 1,69               |
| C13                                           | Ca(+2a)                    | g/l   | 0,85      | 0,85                  | 0,85                  | 0,85      | 0,85               |
| C14                                           | K(+a)                      | g/l   | 0,59      | 0,59                  | 0,59                  | 0,59      | 0,59               |
| C15                                           | OH(-a)                     | g/l   | 0,22      | 0,22                  | 0,22                  | 0,22      | 0,22               |
| A9                                            | Cl(-a)                     | t/h   | 184,74    | 28,40                 | 156,34                | 184,74    | 184,74             |
| A10                                           | Na(+a)                     | t/h   | 104,89    | 16,13                 | 88,77                 | 104,89    | 104,89             |
| A11                                           | SO4(-2a)                   | t/h   | 24,12     | 3,71                  | 20,41                 | 24,12     | 24,12              |
| A12                                           | Mg(+2a)                    | t/h   | 10,48     | 1,61                  | 8,87                  | 10,48     | 10,48              |
| A13                                           | Ca(+2a)                    | t/h   | 5,27      | 0,81                  | 4,46                  | 5,27      | 5,27               |
| A14                                           | K(+a)                      | t/h   | 3,66      | 0,56                  | 3,10                  | 3,66      | 3,66               |
| A15                                           | OH(-a)                     | t/h   | 1,36      | 0,21                  | 1,15                  | 1,36      | 1,36               |
| A16                                           | H2O(l)                     | t/h   | 6082,56   | 935,17                | 5147,39               | 6082,56   | 6082,56            |

Figura 38 Simulador balance de masa piscina agua para procesos

## B.2. Simulación balance de energía etapa de secado en HSC Chemistry.

| AI12         |                              |               |                |              |               |                 |                |       |          |         |       |      |       |       |                |              |               |                 |                 |
|--------------|------------------------------|---------------|----------------|--------------|---------------|-----------------|----------------|-------|----------|---------|-------|------|-------|-------|----------------|--------------|---------------|-----------------|-----------------|
|              | INPUT SPECIES (1)<br>Formula | Temper.<br>°C | Amount<br>kmol | Amount<br>kg | Amount<br>Nm³ | Latent H<br>kWh | Total H<br>kWh | Lat H | Tot H    | MW      | Dens  | DBNo | FRec  | LRec  | Stream<br>kmol | Stream<br>kg | Stream<br>Nm³ | Stream<br>Lat H | Stream<br>Tot H |
| 1            | Solución acuosa              | 25,000        | 487,882        | 8986,640     | 9,291         | 0,00            | -38516,99      |       |          |         |       | P    |       |       | 487,882        | 8986,640     | 9,291         | 0,000           | -38516,988      |
| 2            | H2O                          | 25,000        | 472,934        | 8520,000     | 9,291         | 0,00            | -37549,64      | 0,000 | -79,397  | 18,015  | 0,917 | 2    | 23664 | 23669 |                |              |               |                 |                 |
| 3            | Cl(-a)                       | 25,000        | 7,334          | 260,000      | 0,000         | 0,00            | -340,36        | 0,000 | -46,411  | 35,454  | ***** | 2    | 20048 | 20049 |                |              |               |                 |                 |
| 4            | Na(+a)                       | 25,000        | 6,351          | 146,000      | 0,000         | 0,00            | -423,92        | 0,000 | -66,750  | 22,989  | ***** | 2    | 28285 | 28286 |                |              |               |                 |                 |
| 5            | SO4(-2a)                     | 25,000        | 0,350          | 33,600       | 0,000         | 0,00            | -88,38         | 0,000 | -252,667 | 96,059  | ***** | 2    | 32175 | 32176 |                |              |               |                 |                 |
| 6            | Mg(+2a)                      | 25,000        | 0,601          | 14,600       | 0,000         | 0,00            | -77,93         | 0,000 | -129,722 | 24,304  | ***** | 2    | 26175 | 26176 |                |              |               |                 |                 |
| 7            | Ca(+2a)                      | 25,000        | 0,183          | 7,340        | 0,000         | 0,00            | -27,63         | 0,000 | -150,856 | 40,079  | ***** | 2    | 19107 | 19108 |                |              |               |                 |                 |
| 8            | K(+a)                        | 25,000        | 0,130          | 5,100        | 0,000         | 0,00            | -9,14          | 0,000 | -70,047  | 39,098  | ***** | 2    | 24887 | 24888 |                |              |               |                 |                 |
| 9            | Enmienda                     | 25,000        | 930,010        | 80880,000    | 30,372        | 0,00            | -287883,94     |       |          |         |       | P    |       |       | 930,010        | 80880,000    | 30,372        | 0,000           | -287883,937     |
| 10           | Mg(OH)2                      | 25,000        | 528,296        | 30810,000    | 13,055        | 0,00            | -135693,36     | 0,000 | -256,851 | 58,320  | 2,360 | 2    | 26423 | 26423 |                |              |               |                 |                 |
| 11           | Ca(OH)2                      | 25,000        | 0,540          | 40,000       | 0,018         | 0,00            | -147,84        | 0,000 | -273,861 | 74,095  | 2,240 | 2    | 19407 | 19408 |                |              |               |                 |                 |
| 12           | CaSO4                        | 25,000        | 273,987        | 37300,000    | 12,601        | 0,00            | -109414,04     | 0,000 | -399,340 | 136,138 | 2,960 | 2    | 19495 | 19497 |                |              |               |                 |                 |
| 13           | CaCO3                        | 25,000        | 127,187        | 12730,000    | 4,697         | 0,00            | -42628,69      | 0,000 | -335,167 | 100,089 | 2,710 | 2    | 19219 | 19220 |                |              |               |                 |                 |
| 14           | Extra Heat                   |               |                |              |               |                 | 9307,15        |       |          |         |       |      |       |       |                |              |               |                 |                 |
| BAL IN1 OUT1 |                              |               |                |              |               |                 |                |       |          |         |       |      |       |       |                |              |               |                 |                 |
| Exit Stream  |                              |               | kmol           | kg           | Nm³           | kWh             | kWh            |       |          |         |       |      |       |       |                |              |               |                 |                 |
| BALANCE (1)  |                              |               | 0,000          | 0,000        | 10478,986     | 3587,39         | 0,00           |       |          |         |       |      |       |       |                |              |               |                 |                 |

Figura 39 Input simulación balance de energía proceso de secado

| AE15         |                               |               |                |              |               |                 |                |        |          |         |       |      |       |       |                |              |               |                 |                 |
|--------------|-------------------------------|---------------|----------------|--------------|---------------|-----------------|----------------|--------|----------|---------|-------|------|-------|-------|----------------|--------------|---------------|-----------------|-----------------|
|              | OUTPUT SPECIES (1)<br>Formula | Temper.<br>°C | Amount<br>kmol | Amount<br>kg | Amount<br>Nm³ | Latent H<br>kWh | Total H<br>kWh | Lat H  | Tot H    | MW      | Dens  | DBNo | FRec  | LRec  | Stream<br>kmol | Stream<br>kg | Stream<br>Nm³ | Stream<br>Lat H | Stream<br>Tot H |
| 1            | Vapor de agua                 | 150,000       | 467,938        | 8430,000     | 10488,180     | 551,98          | -30881,24      |        |          |         |       | P    |       |       | 467,938        | 8430,000     | 10488,180     | 551,983         | -30881,245      |
| 2            | H2O(g)                        | 150,000       | 467,938        | 8430,000     | 10488,180     | 551,98          | -30881,24      | 1,180  | -65,994  | 18,015  | 0,001 | 2    | 23675 | 23679 |                |              |               |                 |                 |
| 3            | Enmienda final                | 150,000       | 930,010        | 80880,000    | 30,372        | 3047,05         | -284836,88     |        |          |         |       | P    |       |       | 930,010        | 80880,000    | 30,372        | 3047,055        | -284836,882     |
| 4            | Mg(OH)2                       | 150,000       | 528,296        | 30810,000    | 13,055        | 1589,45         | -134103,92     | 3,009  | -253,842 | 58,320  | 2,360 | 2    | 26423 | 26423 |                |              |               |                 |                 |
| 5            | Ca(OH)2                       | 150,000       | 0,540          | 40,000       | 0,018         | 1,74            | -146,10        | 3,229  | -270,632 | 74,095  | 2,240 | 2    | 19407 | 19408 |                |              |               |                 |                 |
| 6            | CaSO4                         | 150,000       | 273,987        | 37300,000    | 12,601        | 1048,22         | -108365,82     | 3,826  | -395,514 | 136,138 | 2,960 | 2    | 19495 | 19497 |                |              |               |                 |                 |
| 7            | CaCO3                         | 150,000       | 127,187        | 12730,000    | 4,697         | 407,64          | -42221,05      | 3,205  | -331,962 | 100,089 | 2,710 | 2    | 19219 | 19220 |                |              |               |                 |                 |
| 8            | Solución Acuosa (Humedad)     | 150,000       | 19,944         | 556,640      | 0,098         | -11,65          | -1375,64       |        |          |         |       | P    |       |       | 19,944         | 556,640      | 0,098         | -11,649         | -1375,644       |
| 9            | Cl(-a)                        | 150,000       | 7,334          | 260,000      | 0,000         | -31,57          | -371,93        | -4,305 | -50,716  | 35,454  | ***** | 2    | 20048 | 20049 |                |              |               |                 |                 |
| 10           | Na(+a)                        | 150,000       | 6,351          | 146,000      | 0,000         | 10,35           | -413,56        | 1,630  | -65,120  | 22,989  | ***** | 2    | 28285 | 28286 |                |              |               |                 |                 |
| 11           | SO4(-2a)                      | 150,000       | 0,350          | 33,600       | 0,000         | -2,90           | -91,28         | -8,282 | -260,949 | 96,059  | ***** | 2    | 32175 | 32176 |                |              |               |                 |                 |
| 12           | Mg(+2a)                       | 150,000       | 0,601          | 14,600       | 0,000         | -0,50           | -78,43         | -0,833 | -130,555 | 24,304  | ***** | 2    | 26175 | 26176 |                |              |               |                 |                 |
| 13           | Ca(+2a)                       | 150,000       | 0,183          | 7,340        | 0,000         | -0,29           | -27,91         | -1,558 | -152,415 | 40,079  | ***** | 2    | 19107 | 19108 |                |              |               |                 |                 |
| 14           | K(+a)                         | 150,000       | 0,130          | 5,100        | 0,000         | 0,06            | -9,07          | 0,480  | -69,567  | 39,098  | ***** | 2    | 24887 | 24888 |                |              |               |                 |                 |
| 15           | H2O                           | 150,000       | 4,996          | 90,000       | 0,098         | 13,19           | -383,46        | 2,640  | -76,758  | 18,015  | 0,917 | 2    | 23664 | 23669 |                |              |               |                 |                 |
| BAL IN1 OUT1 |                               |               |                |              |               |                 |                |        |          |         |       |      |       |       |                |              |               |                 |                 |
| Exit Stream  |                               |               | kmol           | kg           | Nm³           | kWh             | kWh            |        |          |         |       |      |       |       |                |              |               |                 |                 |
| BALANCE (1)  |                               |               | 0,000          | 0,000        | 10478,986     | 3587,39         | 0,00           |        |          |         |       |      |       |       |                |              |               |                 |                 |

Figura 40 Output simulación balance de energía proceso de secado

| File Edit View Insert Delete Format Units Calculate Target Diagram Options Help |         |               |                |              |               |                 |                |
|---------------------------------------------------------------------------------|---------|---------------|----------------|--------------|---------------|-----------------|----------------|
| A10                                                                             |         |               |                |              |               |                 |                |
|                                                                                 | BALANCE | Temper.<br>°C | Amount<br>kmol | Amount<br>kg | Amount<br>Nm³ | Latent H<br>kWh | Total H<br>kWh |
| 1                                                                               | IN1     |               | 1417,892       | 89866,640    | 39,663        | 0,00            | -317093,77     |
| 2                                                                               | OUT1    |               | 1417,892       | 89866,640    | 10518,649     | 3587,39         | -317093,77     |
| 3                                                                               | BALANCE |               | 0,000          | 0,000        | 10478,986     | 3587,39         | 0,00           |
| ◀ ▶ \ BAL / IN1 / OUT1 /                                                        |         |               |                |              |               |                 |                |
|                                                                                 |         |               | kmol           | kg           | Nm³           | kWh             | kWh            |
| Exit                                                                            | Stream  | < >           | BALANCE (1)    | 0,000        | 0,000         | 10478,986       | 3587,39        |
|                                                                                 |         |               |                |              |               |                 | 0,00           |

Figura 41 Balance global de energía del proceso de secado

## ANEXO C. Cálculo de costos operacionales.

### C.1 Especificación de equipos.

Tabla 17 Equipos seleccionados para el proceso de obtención de enmienda agrícola

| Área          | Equipo                                  | Cantidad | Precio [USD] | Peso [kg] | Precio [USD/kg] | Costo de envío | Precio final |
|---------------|-----------------------------------------|----------|--------------|-----------|-----------------|----------------|--------------|
| Precipitación | Planta cal [52]                         | 1        | \$30.000     | 50000     | 2               | \$100.000      | \$130.000    |
|               | Reactor de tanque agitado continuo [53] | 2        | \$30.000     | 50000     | 2               | \$100.000      | \$260.000    |
| Sedimentación | Espesador por gravedad [54]             | 10       | \$10.000     | 30000     | 2               | \$60.000       | \$700.000    |
| Centrifugado  | Centrífuga industrial [55]              | 5        | \$15.000     | 1600      | 2               | \$3.200        | \$91.000     |
| Secado        | Horno eléctrico secador industrial [56] | 3        | \$15.000     | 2000      | 2               | \$4.000        | \$57.000     |

## C.2. Resultados CAPEX mediante método Peters & Timmerhaus

Tabla 18 Detalle Capex

| Costo directo                       |             |
|-------------------------------------|-------------|
| Equipo comprado                     | \$1.238.000 |
| Instalación de equipo               | \$482.820   |
| Instrumentos y control (instalados) | \$160.940   |
| Tuberías (instalados)               | \$383.780   |
| Eléctricos (instalados)             | \$123.800   |
| Edificios (incluye servicios)       | \$359.020   |
| Mejoras del terreno                 | \$123.800   |
| Servicios auxiliares (instalados)   | \$680.900   |
| Terreno                             | \$74.280    |
| Total                               | \$3.627.340 |
| Costo indirecto                     |             |
| Ingeniería de supervisión           | \$396.160   |
| Gastos de construcción              | \$420.920   |
| Contratista                         | \$222.840   |
| Contingentes                        | \$445.680   |
| Total                               | \$1.485.600 |
| Capital fijo para la inversión      |             |
| Capital de trabajo                  | \$916.120   |
| Inversión total (CAPEX) [USD]       | \$6.029.060 |

### C.3. Resultados OPEX

Tabla 19 Detalle OPEX

| Costos de operación                              |               |           |
|--------------------------------------------------|---------------|-----------|
| Variable                                         | [USD/año]     | [USD/ton] |
| Arriendo de terreno                              | \$25.316      | \$0,035   |
| Servicio de transporte para el acopio            | \$18.987      | \$0,027   |
| Mantenimiento de equipos                         | \$15.190      | \$0,021   |
| Remuneración de funcionarios                     | \$510.759     | \$0,716   |
| Gastos de agua                                   | \$6.329       | \$0,009   |
| Gastos de energía                                | \$25.316      | \$0,035   |
| Servicio de limpieza                             | \$15.190      | \$0,021   |
| Servicio de empaque y envío                      | \$6.329       | \$0,009   |
| Permisos y licencias para acopio y procesamiento | \$18.987      | \$0,027   |
| Consumo de reactivos                             | \$52.576.128  | \$73,696  |
| Elementos preparación enmienda                   | \$134.858.274 | \$189,032 |
| Total Opex                                       | \$53.218.533  | \$74,597  |