

ORSTOM en BOLIVIE

MISSION DE LA PAZ

CONVENIO UMSA-ORSTOM

INSTITUTO DE INVESTIGACIONES

QUIMICAS - FCPN

**TRATAMIENTO QUIMICO
DE SALINERAS
DEL
SALAR DE UYUNI - POTOSI**

P. CRESPO

H. PALMA

J. QUINTANILLA

L. QUISPE

INSTITUT FRANÇAIS DE RECHERCHE SCIENTIFIQUE

59 M

777

POUR LE DÉVELOPPEMENT EN COOPÉRATION

ORSTOM

Fol 1

4-11-67

INFORME N° 5

A G R A D E C I M I E N T O S

El desarrollo de la ciencia y su implementación por la tecnología ha sido un objetivo natural en la evolución del hombre, durante mucho tiempo lo ha sido para nosotros y creemos haber alcanzado esta meta en parte.

NUESTRO AGRADECIMIENTO:

Al Convenio UMSA - ORSTOM; Al Dr. Francois Risacher por el incesante apoyo técnico y logístico que permitió el logro del presente trabajo, al Ing. Oscar Ballivian por su apoyo bibliográfico y consejos que encausaron la presente investigación.

Al Ing. Marcelo Arduz, Director Ejecutivo de CIRESU, por su valiosa y desinteresada cooperación.

A la Carrera de Ciencias Químicas en la persona de la Lic. Luisa B. de Jimenez, por el constante apoyo y colaboración al desarrollo del proyecto.

A todas aquellas personas e instituciones que de una u otra manera intervinieron en la realización del estudio.

" EL CAMINO AUN NO ACABA "

ORSTOM Fonds Documentaire

N° : 24717

Cote : A

Date : 880324

I N D I C E

	Pag.
Resumen	1
Introducción	2
Usos del Litio	5
Muestreo	6
Metodología	7
Evaporación	8
Separación	9
Datos experimentales (Resultados)	9
Precipitación de Cationes	18
Rendimiento del Proceso, pureza del producto	36
Diagrama de flujo para el Beneficio de Litio	38
Ingeniería del Proyecto, planta piloto de Li_2CO_3	40
Características del producto a elaborar	40
Capacidad de planta, producción	41
Descripción del proceso	42
Descripción de la Planta, equipos	45
Balance de Materia	47
Materias primas	48
Maquinaria y Equipo	48
Balance Energético	77
Distribución de Planta y Diagrama de pro- ceso	79
Referencias bibliográficas	80
Anexo 1	
Figuras	
Anexo 2	
Tablas	

RESUMEN

En la presente memoria técnica se trata la investigación química básica del comportamiento de las salmueras intersticiales de la primera costra de sal en el Salar de Uyuni; la determinación de un flujograma adecuado para el proceso de beneficio de litio como carbonato,; la ingeniería del proyecto y el diseño de una planta piloto con el cálculo de maquinaria, programa de distribución, balances másicos y energéticos.

RESUME

Dans ce mémoire on présente les résultats de recherche de chimie fondamentale sur le comportement des saumures interstitielles de la croûte de sel superficielle du Salar de Uyuni. Une proposition de protocole d'extraction du Lithium sous forme du carbonate est faite ainsi que la présentation d'une unité pilote.

ABSTRACT

In the present technical report we treat the basic chemistry investigation about the interstitial brines behavior involved in the first salt scab in "Salar de Uyuni"; the determination of an appropriate fluxogram for the Lithium's benefit process as a Lithium Carbonate; the engineering of the project and the plan of a pilot plant with the calculation of the equipments and a distribution; mass balances, energetics balances programs.

INTRODUCCION (Antecedentes)

Los salares del Altiplano boliviano y en especial el Salar de Uyuni comenzaron a ser estudiados desde el 4 de abril de 1974 (suscripción Convenio U.M.S.A. - O.R.S.T.O.M.) en forma multidisciplinaria con los siguientes objetivos:

1. Estudio de Cuencas Evaporíticas.
2. Geoquímica de los salares.
3. Génesis de los Salares.
4. Determinación de concentraciones de elementos susceptibles a ser explotados económicamente.

En 1981 se publicó el libro "Los Salares del Altiplano Boliviano, Métodos de Estudio y Estimación Económica", por O. Ballivián y F. Risacher en París-Francia editado por la ORSTOM.

En 1982 R. Lopez y J. Zapata presentaron el trabajo "Método de Concentración de Cloruro de Litio a partir de Salmueras del Salar de Uyuni".

En 1984 (18-19 de Septiembre) la Asociación de Docentes de la Facultad de Ciencias Puras y Naturales organizó "EL SIMPOSIO DEL LITIO".

Esencialmente toda la información de los trabajos desarrollados en el país sobre los salares bolivianos está inmersa en las publicaciones antes mencionadas.

En el libro de O. Ballivián y F. Risacher (1981) se hace un estudio de tallado del Salar de Uyuni con cálculos de isoconcentraciones y reservas. Tal estudio limita el estado actual de nuestros conocimientos sobre los salares bolivianos.

Servant y Fontes (1978) Mostraron que el Altiplano fue cubierto por varios lagos extensos que, al secarse, depositaron capas de sales en la depresión central.

Los dos últimos lagos fueron:

Lago Minchin (40.000 - 25.000 años BP)

Lago Tauca (11.000 - 10.000 años BP)

Este último estaba formado por tres sub lagos:

Sub-lago Poopó (12.400 Km²)

Sub-lago Coipasa (11.000 Km²)

Sub-lago Uyuni (20.000 Km²)

Conectados por estrechos.

El Salar de Uyuni corresponde a la sequía, hace 10.000 años, del sub-lago de Uyuni del período Lacustre Tauca.

R.Lopez y J. Zapata (1982) muestran un método de concentración de salmueras naturales mediante evaporación a temperatura ambiente hasta 124 g/l de Cloruro de Litio correspondiente a 71.4% de sales disueltas y además se establecen técnicas analíticas en la determinación química de las salmueras.

En "EL SIMPOSIO DEL LITIO" se menciona la separación de Litio de salmueras (J.Rocha) describiendo el Método Foote's y discutiéndose la necesidad de plantear modificaciones al mismo para salmueras de UYUNI.

En tal simposio, J. Alvarado en "El Litio, sus Propiedades Químicas Analíticas y su Separación de los Elementos que lo Acompañan", Hace una minuciosa revisión bibliográfica sobre separación de Sodio, Magnesio, Calcio, Aluminio y Hierro.

J. Alvarado menciona además, algunos métodos de extracción por solventes orgánicos con separaciones calificadas de ineficientes por sus constantes de distribución bajas. "La tecnología para separar los cationes de Sodio, Potasio, Magnesio y Litio puede desarrollarse en el país en base a conocimientos de Químicos bolivianos".

Jaime Torrico señala "... el Litio muestra una marcada similitud con el Magnesio y en ciertos aspectos con los metales alcalino - térreos"

Enrique Velazco menciona "...las perforaciones realizadas por YPFB en búsqueda de hidrocarburos han demostrado que la profundidad del salar podría ser de por lo menos 12 metros en el primer estrato salino; capas de salmuera que podrían llegar a profundidades de 40 a 50 metros por lo menos..."

"... los 4 millones y medio de toneladas de Litio que se consideran que existen en el salar, fácilmente pueden duplicarse a nivel de 9 a 10 millones de toneladas de Litio..." Luego de dar algunos ejemplos señala:

..."Por lo tanto, aunque cada salmuera tiene particularidades que exigen estudios para determinar el proceso específico... el salar puede llegar a ser explotado..."

Por otro lado, Gustavo Lagos reporta en " El Litio, Un Nuevo Recurso para Chile" lo siguiente:

- Ultimos datos sobre el Mercado Mundial del Litio
- Producción de Compuestos de Litio.
- Esquemas de separación de Litio.
- Reservas y Recursos del Litio en el Mundo Occidental.
- Proceso de Producción de Carbonato de Litio a partir de salmueras.

Además trabajos sobre:

- Aleaciones de Litio
- Baterías
- Uso del Litio en Medicina
- Separación isotópica del Litio

- Aspectos farmacológicos del empleo del Litio.

En el III Panel de Investigación de la Facultad de Ciencias Puras y Naturales se muestran las últimas publicaciones sobre el Salar de Uyuni:

- Obtención de Litio y Magnesio Metálicos.
- Evaporación de Salmueras de "Salar de Uyuni"
- Planta Piloto para Beneficio de Litio en el Salar de Uyuni.

Este cuadro de antecedentes nos muestra que la investigación de nuestros recursos en el salar de Uyuni debe ser un aspecto de prioridad para los profesionales bolivianos en todos los campos, como economistas, médicos, ingenieros, geólogos y especialmente químicos.

USOS DEL LITIO

El Litio es un elemento que se encuentra en muchos minerales, siendo los principales: Espodumeno, Ambligonita, Petalita, Zinnwaldita, Lepidolita, Trifilita, ubicados en yacimientos de diferentes partes del mundo. Estos minerales se presentan generalmente como silicatos y fosfatos, acompañando al Litio, entre otros elementos, el Aluminio, Potasio, y Hierro. La cantidad estimada de litio en la corteza terrestre alcanza solo 0.007% calculada en la forma de óxido. También encontramos Litio en salmueras y aguas minerales como ión Li^+ acompañado por los cationes Na^+ , K^+ , Mg^{++} , Ca^{++} y aniones Cl^- , SO_4^{-2} , carbonatos, bicarbonatos, sulfuros y boratos, como es el caso del salar de Uyuni.

El compuesto más importante del Litio en la actualidad es el Carbonato de Litio que cubre más del 50% del mercado mundial, siguiéndole el Hidróxido de Litio con cerca del 34% y se tienen múltiples compuestos sintetizados.

Actualmente las industrias del Aluminio, la cerámica y el vidrio son las que más demandan el uso de compuestos de Litio, siguiendo en importancia la industria de grasas y lubricantes que usa el Hidróxido de Litio. Las grasas lubricantes de Litio han desplazado a las fabricadas en base a jabones de Calcio, Sodio y Aluminio. Además el hidróxido de Litio es el absorbente ideal para el anhídrido carbónico.

Para elaborar el caucho sintético se usan como catalizadores compuestos órgano-líticos, siendo el más importante el butil-litio. Otros órgano-líticos son utilizados para catalizar la producción de vitaminas, analgésicos y hormonas.

El Litio metálico por sus grandes ventajas como el bajo peso y capacidad de generar altos voltajes es muy requerido por los sistemas miniaturizados en la fabricación de pilas y baterías; se calculan existen unos trescientos mil marcapasos con mayor vida útil y menor peso. En un futuro no muy lejano se piensa que los usos del Litio en aleaciones darán a éstas, propiedades tales como: buena elasticidad y conductividad, baja densidad y gran resistencia al trabajo, fatiga y corrosión. Las mismas contribuirán a la mayor duración de estructuras y equipos, usando menor energía en el transporte para vehículos aereospaciales y aviación.

MUESTREO

En el Salar de Uyuni el mayor aporte está constituido por el Río Grande de Lípez cuyas aguas desembocan al Sur-Este del Salar; dicha zona presenta las concentraciones más altas en lo referente al Litio y Magnesio. Existen otros afluentes menores cuya contribución en sales no es cuantitativamente significativa, pero deben ser estudiadas dada su importancia; las muestras con las cuales se trabajaron obedecen a la concentración del Pozo "A" en

Superficie (Fig.1) esta perforación se situa a 10 Km al Norte de la Isla Incahuasi con una concentración de: 513 p.p.m. de Litio 12 500 de magnesio y 194 505 p.p.m. de cloruros.

En laboratorio se simuló, además, una salmuera artificial reproducida con todos los constituyentes cuantificados en la salmuera natural, a la que se sometió a los tratamientos respectivos, cuyo detalle se dará posteriormente.

METODOLOGIA

ANALISIS.-

Los métodos utilizados en el análisis de las muestras del Pozo, de cada etapa de evaporación, tanto en la salmuera natural como la artificial y de precipitación fueron los siguientes:

Análisis de cationes.-

Litio	(Li ⁺)	Espectrofotometría de Absorción Atómica *
Sodio	(Na ⁺)	Fotometría de Emisión de Llama *
Potasio	(K ⁺)	Fotometría de Emisión de Llama *
Calcio	(Ca ²⁺)	Espectrofotometría de Absorción Atómica *
Magnesio	(Mg ²⁺)	Espectrofotometría de Absorción Atómica *

Análisis de aniones.-

Cloruro	(Cl ⁻)	Método de Mohr
Sulfato	(SO ₄ ²⁻)	Espectrocolorimetría
Boro	(B)	Espectrocolorimetría
Alcalinidad Total		
AT (HCO ₃ ⁻)		Titulación potenciométrica

Otros.

Densidad	Picnometría
pH	Potenciometría

* Servicio de Análisis, Instituto de Investigaciones Químicas.

EVAPORACION

En la evaporación de salmueras natural y artificial en laboratorio, se trató de simular, en lo posible al máximo, las condiciones que regirían en la fase pre-industrial. Se utilizaron para ello, en cada salmuera, un reflector de rayos infrarojos y seis vasos de precipitados de 1 000 cm³, cubiertos con una película de acetato de celulosa (para evitar el polvo y concentrar el calor), semisumergidos en un baño adiabático de agua, termostatzado a 70°C. Este equipo simula perfectamente a piletas de evaporación y energía solar. La diferencia radica en que el proceso fué acelerado con alta temperatura. (Fig. 2)

La salmuera a ser evaporada fue distribuída en seis vasos de precipitados, con el objeto de contar con series de análisis conforme se evapora la muestra y así poder hacer un tratamiento de datos posterior; es sabido que en los análisis de laboratorio se incurre frecuentemente, en una serie de errores inevitables, tanto instrumentales como humanos.

El esquema de la Fig.3, muestra cada uno de los pasos realizados en esta prueba. Secuentemente se hizo la evaporación de 100 en 100 cm³ obteniendo, en cada etapa, datos y muestras de 5 cm³ para análisis. De esta manera se tendría un esquema completo, del comportamiento de las especies disueltas, conforme se sigue el proceso de evaporación.

La salmuera artificial preparada tenía las concentraciones de una zona diluída del salar y los resultados de análisis de la misma, sirven para extrapolar y corregir algunos otros de la evaporación de salmuera natural, sin temor a incurrir en una gran divergencia de resultados.

La salmuera natural correspondiente al experimento, pertenece a la costra superficial del Pozo A.

SEPARACION

El trabajo experimental de separación conforme el método propuesto, se llevó a cabo partiendo de 2,5 litros de salmuera preconcentrada por evaporación (Etapa 7).

Este volumen de salmuera, por necesidad de un tratamiento adecuado, se dividió en cinco porciones de 500 cm^3 cada una, consiguiéndose de esta manera, la facilidad de empleo de cinco proporciones diferentes de reactivos precipitantes.

El juego con proporciones diferentes de reactivos precipitantes, partiendo de las cantidades estequiométricas (como lo esquematiza la Figura 4), da la pauta del rendimiento de la reacción. No siempre una reacción se logra en su totalidad, es decir que las proporciones estequiométricas de reactivos, por lo general, no son las más óptimas o que provean el mayor rendimiento ya que no reaccionan completamente. El rendimiento puede ser afectado por la temperatura, pureza de los reactivos, tiempo de equilibrio, agitación, etc.

Una vez alcanzado el equilibrio ambiental, en forma posterior, se prosiguió al análisis de muestras de cada una de las cinco porciones en cada una de las etapas comprendidas en esta prueba.

DATOS EXPERIMENTALES (RESULTADOS)

Concluida la fase de evaporación, se tiene el siguiente resumen:

Se evaporaron en forma conjunta salmuera artificial y natural, distribuidas en doce vasos de precipitados de 1000 cm^3 (seis vasos cada una). El proceso comprendió 11 etapas, con un volumen de partida de 1000 cm^3 y un residuo final de 15 cm^3 de salmuera en cada vaso. La tabla 1 muestra el detalle de volúmenes, pesos de precipitado, pH y densidad promedio, para la evaporación de salmuera natural.

En esta tabla puede apreciarse que cuando se ha evaporado el 45% del volumen total de la salmuera, la cantidad de precipitado es máxima. Este dato, inicialmente, dá la pauta para una posible primera separación del sólido húmedo por filtrado. El pH de la salmuera en el transcurso de toda la evaporación es poco variable, casi neutro; tal valor es de mucha importancia, ya que un cambio muy grande de pH implicaría un gasto adicional en materiales de construcción especiales en la fase pre-industrial del proceso de evaporación.

Es particularmente importante la tabla 2 de resultados promedio de análisis en las etapas de evaporación de salmuera natural. Se distinguen los cationes mayoritarios Na^+ , K^+ y Mg^{2+} con el 40% en peso de la masa total de sólidos disueltos y los aniones Cl^- , en mayor cantidad, y SO_4^{2-} , con cerca del 59,6 % en peso en la etapa cero (0), antes de entrar en el proceso.

La distribución porcentual de mayor cuantía identificada entre estas especies (un total del 99% en peso) y el interés que presenta para el trabajo, establecer cómo se concentra el litio en la evaporación, dan la pauta para centrar el estudio e interpretación teórica de resultados, en los sistemas de componentes en equilibrio a formarse sucesivamente:

Tres componentes	:	NaCl , KCl , H_2O
Cuatro componentes	:	NaCl , KCl , MgCl_2 , H_2O
Cinco componentes	:	NaCl , KCl , MgCl_2 , LiCl , H_2O

Para ello deben tomarse en cuenta las consideraciones siguientes:

Debido a la baja proporción de las especies: Calcio, Boro y Bicarbonato (un total de 0,3%), no es de interés práctico el estudio de

sistemas multicomponentes complicados que comprendan a éstos y los iones mayoritarios, Na^+ , K^+ , Mg^{2+} y Cl^- .

Por su parte las solubilidades de sulfatos de los cationes mayoritarios son muy diferentes frente a las de cloruros. Este motivo predice la no formación de sulfatos de sodio, potasio o magnesio, en el proceso de evaporación. La tabla a continuación, muestra estas solubilidades:

TABLA 3
SOLUBILIDADES A 10°C
en g/cm³de agua

ESPECIE	SOLUBILIDAD	DIFERENCIA%
<u>SODIO</u>		
Sulfato	9,0	
Cloruro	35,9	-75
<u>POTASIO</u>		
Sulfato	9,2	
Cloruro	33,6	-73
<u>MAGNESIO</u>		
Sulfato	30,9	
Cloruro	53,2	-42

Ref. (1)

En la tabla 2 se adjunta además el balance iónico porcentual promedio (BI) definido por:

$$\text{BI} = \frac{\sum \text{equiv. cationes} - \sum \text{equiv. aniones}}{\sum \text{equiv. cationes} + \sum \text{equiv. aniones}} \times 100$$

El balance iónico es un cálculo que sirve para apreciar la precisión y desviación de análisis: mientras más cercano a cero, más garantizados los resultados. En una solución en equilibrio el número de equivalentes - gramo de cationes es igual al de aniones y, por tanto en la expresión, el numerador deberá tender a cero.

Los análisis que se presentan tienen una máxima variación del balance iónico en + 7,5 %. Considerando aceptable una divergencia del 10 %, dadas las características especiales de la salmuera y el equipo con que se trabaja, los resultados son buenos.

Sistemas de Componentes en la Salmuera Natural

Una forma de representación gráfica apropiada, en la que se distingan claramente las diferencias, desviaciones y comportamiento del sistema de componentes en la salmuera, dada su complejidad, es la representación de valores de equilibrio en coordenadas rectangulares. Esto quiere decir, estudiar el sistema multicomponente desglosado en pares o duplas de especies.

La tabla 4 muestra los valores de solubilidad para el sistema NaCl - KCl - MgCl₂ - LiCl a la temperatura constante de 15°C. Se han tomado estos datos de referencia debido a que la temperatura a la que se alcanzó el equilibrio en el proceso de laboratorio era de 15°C.

Aquí pueden verse las concentraciones de equilibrio que van alcanzando las diferentes sales en una solución, mientras ella se evapora. Inicialmente se tiene la salmuera saturada en NaCl (302 g/l) que va disminuyendo su solubilidad conforme otra especie, el KCl, aumenta su concentración; este fenómeno se explica

por el efecto del ión común Cloruro en la solución. La disminución de solubilidad del NaCl, hace que esta sal comience a precipitar en primera instancia; posteriormente, al alcanzar el KCl su punto de saturación de 155 g/l, precipita en forma conjunta.

Hasta el punto de precipitación de las sales: NaCl y KCl puede interpretarse lo que sucede en la salmuera de UYUNI.

Inicialmente esta disolución se halla saturada en NaCl e insaturada en KCl y $MgCl_2$, como lo indica la tabla 5 (elaborada en base a resultados de análisis de evaporación). Conforme se dá el proceso, disminuye la concentración de NaCl y aumenta la de KCl saturando la solución (Etp.7) y comienza su precipitación junto con el NaCl que ya lo estaba haciendo. La figura 5 muestra el comportamiento de la salmuera de Uyuni frente a los datos teóricos de referencia para el par NaCl - KCl.

Es de notar los puntos de saturación diferentes; ello se debe a la gran influencia que tiene la coprecipitación del magnesio en la salmuera natural (tabla 6). Es correcto suponer un comportamiento distinto a lo que sucede en una disolución que solo contiene sales de sodio y potasio (como la de referencia). Debe recordarse que la cantidad de magnesio en la salmuera de Uyuni es casi tan alta como la de potasio.

A pesar de ello, el proceso de evaporación continúa. Debido a su alta solubilidad el $MgCl_2$, que aún no saturaba la solución, vá concentrándose en forma simultánea a la constante precipitación de NaCl y KCl. Al cabo de cierto volumen evaporado, de igual manera, la solución se satura en $MgCl_2$ (460 g/l; Tabla 4) y comienza la precipitación sumándose a las dos especies anteriores. Por entonces el cloruro de litio ($LiCl$) solamente se concentra.

Las figuras 6, 4, 7, muestran cómo el $MgCl_2$ se concentra en solución, mientras que el $NaCl$ y KCl precipitan en forma conjunta. El comportamiento de la salmuera natural en este punto de saturación se asimila perfectamente al punto teórico (Etapa 11).

Teóricamente el $LiCl$ sigue su concentración hasta el valor de 419 g/l, punto en el cual se predice la precipitación conjunta de cuatro sales; $NaCl$, KCl , $MgCl_2$ y $LiCl$, (Tabla 4). La relación de concentración y precipitación se muestra en las figuras 8, 9, 10.

La comparación de gráficos desglosados de solubilidad de los componentes, entre la salmuera de Uyuni y los de referencia bibliográfica, muestra que el sistema de la salmuera natural se asimila y evoluciona al comportamiento que sigue el sistema multicomponente $NaCl - KCl - MgCl_2 - LiCl$, de acuerdo a la cuantía prioritaria de iones.

Son de interés práctico en el trabajo, los puntos de precipitación conjunta de sales:

TABLA 7

PUNTOS EUTECTICOS EXPERIMENTALES

EVAPORACION (%)	ETAPA	TIPO DE PRECIPITADO CONJUNTO PRINCIPAL
0	0	Salmuera Saturada
75	7	$NaCl - KCl$
98,5	11	$NaCl - KCl - MgCl_2$

Sin embargo, como se verá a continuación, no es de interés práctico pasar la etapa 7 de evaporación, ya que los análisis comprueban que

grán parte de litio disuelto comienza a perderse en el precipitado. Este fenómeno no ocurre por la precipitación del LiCl propiamente dicha, sino que posiblemente por ser el litio un catión tan extremadamente liviano es arrastrado, precisamente en esta etapa, por una especie mucho más pesada como es el cloruro de potasio KCl.

Límite máximo de evaporación, rendimiento.

Se hace necesario limitar el proceso de evaporación de la salmuera hasta una etapa óptima; ella no puede seguir indefinidamente por dos motivos principales: la baja del rendimiento, con la pérdida parcial del elemento más importante: el litio y el tiempo de proceso que es mayor, conforme más saturada la salmuera. Con el manejo de enormes volúmenes, el rendimiento sería mucho menor disminuyendo las perspectivas económicas que se pretenden.

Las figuras 11 y 12 muestran en detalle el proceso de evaporación seguido en laboratorio; la concentración seciente, tanto de cationes como aniones, se representa frente al porcentaje de volumen evaporado.

Puede verse que uno de los mayores volúmenes de precipitado se dá cuando se ha evaporado el 45% de la salmuera (volumen); de acuerdo al estudio de componentes realizado, hasta aquí se tiene cristalizado NaCl puro formándose en el sistema dos fases: sólida y líquida, que posiblemente deban separarse (Etapa 4).

También se aprecia que a la precipitación de los cationes Na^+ , K^+ y Mg^{2+} , les corresponde una similar de Cl^- , lo que confirma la teoría de precipitación estudiada: hasta la Etapa 7 precipitan NaCl y KCl y coprecipita (por arrastre) el magnesio.

Algo parecido sucede con el sulfato, a cuya precipitación corresponde una similar de calcio hasta el 65% de evaporación; ello se aprecia en el gráfico de la Figura 13. Sin embargo las concentraciones de estos dos iones son poco significativas frente a las especies mayoritarias.

En el presente trabajo se han asimilado Funciones Polinómicas al comportamiento de concentración y precipitación de estas especies. El motivo: contar con gráficos de evaporación para el Salar de Uyuni, extrapolables entre los valores medios de concentración superiores e inferiores. Deben recordarse las variadas concentraciones del salar; así por ejemplo, las concentraciones promedio de litio en la zona de Río Grande se acercan a los 1600 o más mg/l, valores que corresponden a concentraciones de equilibrio diferentes a las de partida en la prueba de laboratorio realizada. En todo caso, si se realizara la evaporación de la salmuera de cualquier sitio, tendría que recurrirse al gráfico mencionado para "ubicar" las concentraciones de partida y proseguir en forma acertada el proceso de cristalización.

La Tabla 6 indica el % de recuperación de especies tanto en la fase sólida como la líquida; es decir la cantidad que, de acuerdo a los resultados de análisis, queda disuelta en la salmuera residual y la que precipita. La recuperación en la fase líquida, no es más que el rendimiento, en cuanto a Litio, del proceso de evaporación.

El cálculo para todos los casos se realiza a partir de la siguiente relación:

$$\% \text{ Masa en el Precipitado} = \frac{M_i - M_f}{M_i} \times 100$$

Donde:

M_i = Masa inicial de la especie (Etapa 0)

M_f = Masa final de la especie en el Etapa n ; n: 0, 11

$$\% \text{ Masa en el Líquido Residual} = 100 - \% \text{ Masa en el Precipitado}$$

A partir de las concentraciones y volúmenes:

Siendo: Masa = Concentración x Volumen

$$M = C V$$

Donde:

M = Masa en mg

C = Concentración en mg/l

V = Volumen analizado en litros

Se tiene:

$$\% \text{ Masa en el Precipitado} = \frac{C_i V_i - C_f V_f}{C_i V_i} \times 100$$

$$\% \text{ Masa en el Líquido Residual} = 100 - \% \text{ Masa en el Precipitado}$$

donde:

C_i = Concentración de la especie en la Etapa 0

V_i = Volumen inicial, partida: 1 litro.

C_f = Concentración de la especie en la Etapa n

V_f = Volumen del líquido residual en la Etapa n

De acuerdo a los resultados de la recuperación de litio en la fase líquida que se ilustran en el gráfico de la Figura 14, puede deducirse un límite permisible para la evaporación de salmuera: el 75 % del volumen inicial como máximo; a partir de este valor se pierde una gran cantidad de litio por coprecipitación, es decir el arrastre con, supuestamente, KCl (Tabla 6).

A modo de ilustración se muestran los valores de las distintas especies distribuidas en las fases sólida y líquida, conforme se sigue el proceso de evaporación.

Por su parte la Figura 15 muestra la tendencia ascendente constante del porcentaje de sólidos precipitados frente al % de evaporación. Esto significa que en todo momento se trabaja con una salmuera saturada y bastará un minúsculo volumen de agua evaporada para la inmediata formación de un precipitado. Es necesario tomar en cuenta esta referencia, puesto que en un proceso industrial, el taponamiento de tuberías o bombas sería frecuente si en algún caso no se tomaran las previsiones de limpieza adecuadas.

PRECIPITACION DE CATIONES

El proceso de evaporación resuelve, con un rendimiento muy alto, el problema de separación de gran parte de las especies químicas disueltas junto con el Litio. Se tienen precipitados hasta aquí concretamente: 93,9% de Na^+ ; 1,6 % de K^+ ; 100 % de Ca^{2+} ; 53,3 % de Mg^{2+} ; 78,9% de Cl^- ; 96,3% de SO_4^{2-} y 81,4% de HCO_3^- , (Etapa 7). Además, el volumen inicial de salmuera ha sido reducido en un 75%, volumen éste, que hace más fácil su manejo. Los últimos datos que se observan (Tabla 6), muestran la importancia que tiene la evaporación de la salmuera; hasta la Etapa 7 se liberan más del 90% de los sólidos totales disueltos y cerca del 75% del agua solvente. No obstante, esta primera operación de "limpieza", es necesario separar, en lo posible, por completo, todas las especies que acompañan al Litio.

Se ha desarrollado un flujograma de separación de litio de la salmuera de Uyuni en forma paralela a la prueba de evaporación, que desplaza por su sencillez, rendimiento y bajo costo de insumos, a métodos estudiados como: extracción por solventes orgánicos y separación por colectores selectivos de Litio.

El método consiste en la precipitación de, principalmente, especies que perjudican la separación de Litio por tratamientos convencionales. Entre los elementos que más difícil hacen el tratamiento de la salmuera está el magnesio.

PRECIPITACION DE MAGNESIO CON LECHADA DE CAL

La relación magnesio/litio en Uyuni es la más alta de las salmueras en que es explotado el litio; su valor: 14-20/1 frente a 6,4/1 de Atacama y 1,5/1 en Silver Peak (EE.UU.). Por tal motivo, la cantidad de magnesio complica el sistema y hace inobjetable la adopción de técnicas especiales para el tratamiento de la salmuera.

La abundancia del ión magnesio en Uyuni, casi igual a la de potasio, hace que este elemento no pueda ser separado óptimamente con un simple proceso de evaporación sin perjudicar el rendimiento en recuperación de Litio. Por ello se hace necesario el separarlo entre las etapas de evaporación permisibles: Etapas 0 a 7. Esta separación puede darse precipitando el Mg^{+2} como hidróxido, ya que el $Mg(OH)_2$ es uno de sus compuestos menos soluble.

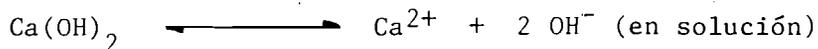
Usualmente, la separación de magnesio en medio básico (obtención de magnesio del agua de mar), se realiza a partir de hidróxido de calcio ($Ca(OH)_2$) en mezcla líquida o la llamada "Lechada de cal". Este reactivo, de muy fácil obtención por su abundancia y bajo costo, proviene de la reacción de óxido de calcio o "Cal Viva" con agua:



Los oxhidrilos liberados por la lechada de cal, debido a la diferencia de solubilidad entre el $Ca(OH)_2$ y el $Mg(OH)_2$, reaccionan rápidamente con los iones Mg^{2+} ; pueden atrapar más fácilmente un electrón o un anión (como el OH^-) que el Ca^{2+} , quién en solución se desliga del oxhidrilo que precipita ligado al magnesio de acuerdo a la reacción:



puesto que:



El precipitado húmedo de $\text{Mg}(\text{OH})_2$ es un coloide blanquecino de finísimos cristales (S. Trigonal), homogéneo, liviano y de consistencia pastosa, tal que su separación por filtrado convencional es muy difícil.

Aunque la precipitación con lechada de cal es un método excelente para la separación de magnesio, se ha comprobado por análisis que, si bien un promedio del 92 % del Mg^{2+} es liberado de la salmuera entre la evaporación y esta etapa (tabla 8), un restante 8% queda disuelto, siendo aún muy significativo frente a la cantidad de Litio. Este motivo ha llevado a optimizar el método, utilizando dos tandas de lechada de cal separadas por una etapa de evaporación.

Precipitación con Lechada de cal I

La primera lechada de cal precipita la mayor parte del magnesio contenido en la salmuera. La tabla 9 muestra los resultados de análisis de todas las especies que se mantienen en solución después de reaccionar con el $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y alcanzar el equilibrio en el lapso de 120 horas con agitación discontinua.

Partiendo de un total de 2,5 litros de salmuera concentrada por evaporación (Etapa 7), se realizaron los cálculos necesarios, tomando como referencia las cantidades estequiométricas y variando las proporciones en -10 %, 0 %, + 10 %, + 25 % y + 45 %, repartidas todas ellas en cinco vasos de precipitados con un volumen inicial de 0,5 litros de salmuera concentrada, cada uno. las propor

ciones de CaO, diferentes en cada vaso, se calculan a partir de la estequiometría de las reacciones de precipitación realizadas y los resultados se contemplan en la tabla 9 con la adición de otros datos necesarios.

La proporción de agua para la lechada de cal fue del 85 % en peso, es decir, que la lechada de cal utilizada en todos los casos tenía un 15 % de cal activa, como se especifica en la tabla 10.

Tabla 10

CARACTERISTICAS DE LA LECHADA DE CAL UTILIZADA

Densidad	1,35 g/cm ³
Viscosidad	2,70 poises
% en CaO	15

En la Tabla 9, puede verse el detalle de análisis de la solución residual de cada uno de los vasos. Particularmente importante es el contenido de magnesio, diferente en las cinco soluciones filtradas, debido a la proporción, también diferente de CaO introducido en la lechada de cal.

Estos resultados muestran que no es la proporción estequiométrica ideal para el proceso, pues deja una concentración de 3 033 mg/l de Mg²⁺ en solución, frente a 1 173 mg/l con un 10% de exceso en CaO, 3 054 mg/l con el 25% de exceso y 3 891 mg/l con el 45%.

Este fenómeno puede explicarse asumiendo que la actividad del oxhidrilo, aún ligado parcialmente al calcio, no se manifiesta por completo en la precipitación del Mg (OH)₂ no se halla completamente dissociado en solución y de ahí que es menor la parte oxhidrilo que reacciona con el magnesio, tornando menor el rendi-

miento de precipitación. Al introducir un breve exceso en CaO del 10%), es mayor la cantidad de oxhidrilo que se disocia y que atrapa el ión Mg^{2+} precipitándolo. No obstante, si el exceso es muy grande, como en los vasos 4 y 5, con el 25% y 45% respectivamente, se dá el fenómeno inverso. Puede interpretarse el mismo, como una saturación en calcio de la solución, pues la lechada de cal no solo introduce oxhidrilos. El exceso de calcio introducido es atrapado por los iones oxhidrilo antes que el magnesio insaturado y precipita como $Ca(OH)_2$ dejando una mayor parte del magnesio en solución. Ello explica las aún altas concentraciones de magnesio en los vasos 4 y 5.

El estudio de las cinco proporciones de CaO empleadas, mas el tiempo que tardan en reaccionar por completo con el magnesio, se resume en el gráfico de la figura 16. Aquí se muestran las concentraciones de magnesio que dejan las cinco proporciones diferentes frente al tiempo de equilibrio en horas. Para realizarlo se tomaron muestras consecutivas de salmuera tratada cada 24 h.

En la figura, puede apreciarse que, frente a las otras, la lechada de cal con el 10% de exceso en CaO es la que menos cantidad de magnesio deja en solución. Por otra parte, las muestras tardan en equilibrarse (es decir, tener una curva constante en concentración de magnesio) entre 100 y 140 horas con agitación discontinua. Ello nos lleva a concluir que para un óptimo rendimiento de precipitación, la cantidad ideal de CaO a utilizarse en la lechada de cal debe ser un 10% en exceso sobre la cantidad estequiométrica calculada. Por su parte, la reacción será completa a partir de las 100 horas de equilibrio con agitación discontinua.

El registro de estos datos y otros complementarios, ha sido procesado en la Tabla 9, con el fin de tener una relación con la que fácil

mente pueda calcularse la cantidad de óxido de calcio a emplear, la cantidad de agua y la masa total de lechada formada.

La columna que señala " % CaO de la masa Total ", registra la distribución porcentual de lechada de cal (CaO) frente a la masa total de salmuera concentrada a tratarse (en los cinco vasos). La óptima es la referida al vaso 3 que indica el 4,8% ,esto significa que la relación masa de CaO/ masa de salmuera es:

$$\text{Masa CaO} = 0,048 \text{ Masa total de salmuera}$$

siendo:

$$\begin{aligned} \text{Masa de salmuera} &= \text{Volumen total} \times \text{densidad} \\ L &= \text{Ley del CaO a emplearse (en \%)} \end{aligned}$$

se tiene:

$$\text{Masa CaO} = \frac{0,048 \text{ d Vt}}{L} \times 100$$

donde:

Vt = Volumen de la salmuera concentrada (Etapa 7)
que entra al encalado I, en litros.

d = densidad de la salmuera en kg/l

Por otra parte, la masa de lechada de cal al 15% en peso de CaO, puede calcularse con la relación:

$$M_{\text{Lech.}} = \frac{\text{Masa de CaO} \cdot L}{15} \quad (\text{kg})$$

y la masa de agua:

$$M_{\text{H}_2\text{O}} = M_{\text{Lech.}} - M_{\text{CaO}}$$

Estas ecuaciones pueden emplearse con mucha aproximación en cualquier volumen de las salmueras de Uyuni, controlando el porcentaje de evaporación y las concentraciones de magnesio con los gráfi

cos y funciones asimiladas a la cristalización de sales en la evaporación.

El empleo de la lechada de cal no afecta en mayor forma al litio contenido en la salmuera, puesto que este ion no es atrapado por los oxhidrilos: la agitación continua remueve constantemente los cristales de hidróxido de magnesio precipitados, acelera la reacción y libera el posible litio coprecipitado por arrastre.

El proceso de datos de análisis de la etapa (Tabla 8), muestra que, como promedio en esta precipitación, se pierde inevitablemente el 0,7 % en peso de litio (la pérdida global hasta aquí es del 2,3 %). En forma paralela, se evalúan las distribuciones porcentuales de los demás cationes, tanto en el sólido precipitado como en la solución residual.

Evaporación intermedia.

Cuando se mezcla la lechada de cal con la salmuera concentrada, se incrementa el volumen total en aproximadamente el 30% (Tabla 9); al ocurrir aquello, naturalmente, las especies concentradas en el proceso de evaporación se diluyen en la misma proporción y es necesario concentrarlas nuevamente por evaporación del agua introducida en la lechada. Por otra parte, la salmuera se satura en calcio (Ca(OH)_2) desplazando la saturación de potasio que se había alcanzado hasta la Etapa 7; debido a ello, también es necesario concentrar la salmuera por evaporación.

La prueba de precipitación con lechada de cal comprende, por lo mismo, una etapa intermedia de evaporación del 40% de la salmuera residual. Los resultados de análisis de esta etapa se muestran en la Tabla 11.

De acuerdo a ello podemos nuevamente recurrir a la Tabla 5, donde

Se muestran los valores experimentales de precipitación de cationes como cloruros. En las siete primeras etapas de evaporación se logra saturar la solución con NaCl y KCl, dejándola insaturada en las sales $MgCl_2$ y LiCl. Más tarde, al añadir un cierto volumen de agua con la lechada de cal (30% del volumen total de la salmuera) y calcio en cantidad, la solución disuelve en mayor proporción el KCl y la salmuera queda tan solo saturada en NaCl. Es necesario en este instante, evaporar el agua añadida y alcanzar el punto de saturación de KCl nuevamente. Se ha tomado por este motivo, como volumen de evaporación aproximado el 40 % (Tabla 11).

La coherencia de esta interpretación se justifica en los resultados de análisis obtenidos. Ellos muestran como la mayor parte del potasio precipita, quedando en solución, tras la etapa de evaporación intermedia, entre el 7,6 y 9,5 %, frente al 94,6 % en peso de K^+ que existía en la etapa de precipitación con lechada de cal I. La pérdida media de litio en esta evaporación es de aproximadamente el 6,3 %, relativa a la etapa anterior. La pérdida global del elemento alcanza el 8,5% promedio con esta operación. (Tabla 12).

Precipitación con lechada de cal II

Hasta la evaporación intermedia el objetivo que se persigue en la separación de magnesio está parcialmente cumplido. Sin embargo, aunque más del 96% promedio del catión ha sido separado, resta un 4% muy importante que aún acompaña al litio en solución. La existencia de magnesio es perjudicial, puesto que sus características de solubilidad, parecidas a las del litio, hacen que su separación en las últimas etapas del proceso (como carbonato de litio) sea sumamente complicada.

La segunda precipitación con lechada de cal, una vez separado más del 91 % del potasio, no hace más que precipitar el magnesio restante, aunque a costa del incremento de calcio en la salmuera; el litio queda acompañado de proporciones mucho menores de sodio, potasio, sulfato y cloruro de fácil separación.

Los resultados de análisis que se observan en la tabla 13, muestran cómo el proceso, hasta la presente etapa, ha desplazado al magnesio de ion mayoritario inicial, al de menor proporción en esta parte. El porcentaje global de magnesio en solución, ha decaído hasta el rango del 0,4 a 0% con esta operación (tabla 14).

También, debido a la precipitación casi total del potasio y magnesio se pierde, por coprecipitación, parte del litio. La caída global del catión Li^+ está en el rango del 7 al 14% de acuerdo a las proporciones de CaO utilizadas en cada uno de los cinco vasos. El litio perdido por arrastre no puede ser económicamente recuperado por lavado del precipitado puesto que, como él, todas las sales cristalizadas son solubles en agua, además de solventes baratos conocidos. Sin embargo, el rendimiento hasta aquí es óptimo.

No representa un problema mayor la adición de iones calcio en la salmuera, ya que su separación es más sencilla que la del magnesio.

Los análisis de la tabla 13, muestran además, que la solución se mantiene saturada en calcio; la proporción de sodio disminuye en el rango de 0,1 a 0,3% con relación a la etapa anterior y la de potasio en un 0,3 a 1,1 %; algo similar ocurre con otras especies. También los resultados de este cuadro corroboran la teoría vertida acerca de la precipitación selectiva del magnesio con la lechada de cal; el porcentaje total de precipitación de los cationes

acompañantes no alcanza al 2% referido a la etapa anterior (ello muestra la eficiencia de separación de magnesio por este medio).

La lechada de cal utilizada en esta segunda precipitación tiene las características de la anterior (Tabla 10):

Los resultados de análisis muestran que, en forma similar a la primera precipitación con lechada de cal, el mayor rendimiento de separación se dá en el vaso 3 (10% en exceso de reactivo).

Este exceso separa, virtualmente por completo, el magnesio contenido en la salmuera y, para tener esta concentración de oxhidrido en solución, la distribución porcentual de lechada de cal (CaO) frente a la masa total de salmuera que entra en esta parte del proceso, (Tabla 13) indica que la masa óptima de CaO es aproximadamente el 0,3% de la masa de salmuera, es decir:

$$\text{Masa de Cao} = 3 \times 10^{-3} \cdot \text{Mt}$$

donde:

$$M_{\text{CaO}} : \text{ en Kg.}$$

$$M_t : \text{ Masa de salmuera que entra en esta parte del proceso; en Kg.}$$

Conociendo la densidad (d) y el volumen total de salmuera:

$$M_t = d \cdot V_t$$

enfunción de la ley (L) del óxido de calcio utilizado:

$$M_{\text{CaO}} = \frac{3 \times 10^{-3} \cdot d \cdot V_t}{L} \cdot 100$$

La lechada de cal al 15% puede calcularse con la relación:

$$M_{\text{Lech.}} = \frac{\text{Masa de Cao} \cdot L}{15}$$

La masa de agua:

$$M_{\text{H}_2\text{O}} = M_{\text{Lech.}} - M_{\text{CaO}}$$

donde:

- d : Densidad en Kg/l
Vt : Volumen en litros de salmuera que entra en esta etapa.
L : Ley de CaO en %

Tales relaciones pueden ser utilizadas en el cálculo de precipitación de cualquier volumen de salmuera, controlando en todo caso, la concentración de magnesio.

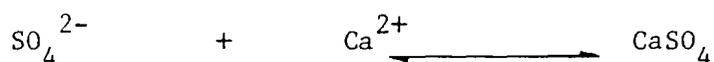
NEUTRALIZACION CON H_2SO_4 , PRECIPITACION CON Na_2SO_4 .

En las etapas anteriores se ha eliminado el magnesio a costa del incremento de la concentración de calcio en solución. Sin embargo, la separación de esta especie puede ser realizada con la precipitación de una de sus sales menos solubles: el sulfato de calcio (anhidro ó dihidratado).

Existe una gran diferencia de solubilidad de los sulfatos de sodio, potasio y litio, principalmente, frente a los de calcio: $CaSO_4$ y $CaSO_4 \cdot 2H_2O$. Como un caso por demás especial, ya que estos últimos varían su solubilidad en forma inversamente proporcional a la temperatura.

Se encuentra aquí un aspecto importante que dá la pauta para una mejor separación del calcio como sulfato, esto es, el incremento de temperatura. Si bien el sulfato de litio disminuye su solubilidad con el aumento de temperatura, la pendiente negativa de solubilidad de los sulfatos de calcio es mucho mayor. Una temperatura óptima para el tratamiento de separación de esta sal, estaría en el rango de los $80^\circ C$ a $100^\circ C$; así puede asegurarse una precipitación completa del sulfato de calcio.

En la salmuera natural existen iones sulfato manteniendo la insaturación en sulfato de calcio (precipitación con lechada de cal). Por otra parte, se ha comprobado experimentalmente que un medio neutro o ligeramente ácido, contribuye eficazmente a la precipitación del sulfato de calcio (ello porque tras las etapas de encalado I y II, la salmuera se torna básica con un pH de 9,3); no obstante, si bien la adición de iones sulfato, con por ejemplo H_2SO_4 , desplaza la reacción del calcio de izquierda a derecha:



dando la consiguiente precipitación de la sal de calcio, ocurriría lo contrario si tan solo se utilizara un medio ácido sin la adición de iones sulfato (Na_2SO_4); en este caso se corre el peligro del desplazamiento de la reacción en sentido inverso acidificando en exceso la salmuera, con la consiguiente baja del rendimiento de precipitación al tener constantemente el calcio en solución.

Los resultados de análisis de esta parte experimental, la neutralización inicial de la salmuera (entre un pH de 6,9 a 7,2) con H_2SO_4 concentrado y la precipitación del sulfato de calcio, se encuentran en la tabla 15.

Aquí puede verse que prácticamente todo el calcio y sulfato precipitan como la sal sulfato de calcio. La concentración de sodio naturalmente se eleva y la de potasio se mantiene; existen trazas de magnesio y el cloruro se pierde en un 4 % relativo a la anterior etapa.

En lo referente al litio, muevamente coprecipita por arrastre con una sal relativamente pesada como es el $CaSO_4$. A pesar de esta pérdida, en esta etapa, sí puede ser recuperado parte del litio coprecipitado; ello por el lavado de los cristales de precipitado

con agua destilada a una temperatura superior a los 80°C. El motivo, la insolubilidad del sulfato de calcio en agua. El proceso en laboratorio comprendió, por ello, dos lavados consecutivos de cristales.

La pérdida de litio en esta parte es, junto con la coprecipitación en la evaporación intermedia, la mayor de todo el proceso. En esta etapa se alcanza una pérdida en el rango de 10,4% y 5% en peso; el porcentaje global de caída de litio hasta la presente operación se acerca al 18% promedio. (Tabla 16).

Las cantidades estequiométricas de sulfato de sodio utilizadas en los cinco vasos, se variaron en las proporciones fijadas: - 10 %, 0%, + 10%, + 25%, + 45%.

Se han calculado, de acuerdo a la estequiometría de las reacciones, los resultados que se muestran en la tabla 15.

Las diferentes proporciones de Na_2SO_4 calculadas y resumidas en este cuadro, fueron utilizadas en los vasos experimentales y los resultados se adjuntan a otros de importancia para el proceso en la misma tabla.

Se han desarrollado, de la misma manera que antes, relaciones empíricas que ayudan a calcular con mucha aproximación las cantidades de reactivos precipitantes a emplear:

Acido sulfurico de neutralizacion.

El número de moles (n) de oxhidrilos a neutralizar es:

$$n_{\text{OH}^-} = V \cdot C_{\text{OH}^-}$$

donde:

$$\begin{aligned} C_{\text{OH}^-} &= \text{Concentración molar de oxhidrilos} \\ V &= \text{Volumen de solución en litros} \end{aligned}$$

por definición:

$$C_{\text{OH}^-} = 10^{-\text{pH}} = 10^{-(14-\text{pH})} = 10^{(\text{pH}-14)}$$

luego:

$$n_{\text{OH}^-} = V_s \cdot 10^{(\text{pH}-14)}$$

donde:

V_s = Volumen de salmuera residual a neutralizar (en litros).

La masa de ácido sulfúrico necesaria para neutralizar esta salmuera, se calcula con la siguiente serie de factores de conversión:

$$M_{\text{H}_2\text{SO}_4} = (V_s \cdot 10^{(\text{pH}-14)}) \text{ moles OH}^- \times \frac{1 \text{ mol H}^+}{1 \text{ mol OH}^-} \times \frac{1 \text{ mol H}_2\text{SO}_4}{2 \text{ mol H}^+} \\ \times \frac{98 \text{ g H}_2\text{SO}_4}{1 \text{ mol H}_2\text{SO}_4} \times \frac{\text{kg}}{1000 \text{ g}}$$

$$M_{\text{H}_2\text{SO}_4} = (V_s \cdot 10^{(\text{pH}-14)}) \cdot 49 \times 10^{-3} \text{ (kg H}_2\text{SO}_4)$$

puesto que el ácido sulfúrico industrial tiene un cierto grado de pureza:

$$M_{\text{H}_2\text{SO}_4} = \frac{4,9 V_s \cdot 10^{(\text{pH}-14)}}{C_{\text{H}_2\text{SO}_4}}$$

donde:

$C_{\text{H}_2\text{SO}_4}$ = Concentración de ácido sulfúrico industrial en % peso.

Considerando la densidad del ácido, puede calcularse el volumen con la relación:

$$V_{\text{H}_2\text{SO}_4} = \frac{4,9 V_s \cdot 10^{(\text{pH}-14)}}{C_{\text{H}_2\text{SO}_4}} \cdot \frac{1}{d}$$

donde:

d = densidad del ácido en kg/l

Sulfato de sodio.

Las proporciones de sulfato de sodio que más alto rendimiento de precipitación proporcionan, son las referentes a los vasos 3 y 4. La distribución porcentual óptima, referente a la masa de salmuera que entra al proceso, es del 0,10 % promedio (Tabla 15); ello significa:

$$M_{\text{Na}_2\text{SO}_4} = 1 \times 10^{-3} \text{ Ms}$$

donde:

Ms = Masa de salmuera que entra en esta etapa del proceso. (Kg)

Tomando en cuenta la densidad de la salmuera y la ley del sulfato de sodio utilizado, la masa a calcularse es:

$$M_{\text{Na}_2\text{SO}_4} = \frac{1 \times 10^{-3} \text{ Vs.d}}{L} \times 100 \text{ (kg)}$$

donde:

Vs = Volumen de salmuera residual que se trata en esta etapa (en litros).

d = densidad de la salmuera en kg/l

L = Ley de Na_2SO_4 en %.

La solución empleada, saturada en sulfato de sodio a temperatura ambiente, tiene una concentración de 40% en peso. Ello significa que la masa de la solución de Na_2SO_4 será:

$$M_{\text{soluc.}} = \frac{M_{\text{Na}_2\text{SO}_4} \cdot L}{40}$$

y la masa de agua:

$$M_{\text{H}_2\text{O}} = M_{\text{soluc.}} - M_{\text{Na}_2\text{SO}_4}$$

Con la presente operación concluida en el proceso y tomando en cuen

ta el respectivo tiempo de equilibrio, se obtiene una salmuera exenta de magnesio y calcio, una proporción pequeña de sodio y potasio, parte del cloruro inicial y litio disuelto de fácil separación.

PRECIPITACION DE LITIO CON CARBONATO DE SODIO.

Se trata de la operación más importante en la precipitación selectiva de cationes. El carbonato de litio (Li_2CO_3) es el producto final al que se pretende llegar con un rendimiento óptimo. A pesar de ello, antes de precipitar el carbonato de litio, es necesario eliminar las posibles trazas de magnesio y calcio restantes; aunque, de acuerdo a los análisis, el calcio ha sido eliminado por completo en las etapas anteriores y no existe inconveniente alguno con el sodio ó el potasio.

De esta forma se requiere del previo tratamiento con una pequeña cantidad de hidróxido de sodio. Esta separa, en su totalidad, las trazas de magnesio y calcio restantes, que a una temperatura superior a los 70°C precipitan como hidróxidos insolubles, dejando en solución los cationes: Li^+ , Na^+ y K^+ . La importancia de esta precipitación en el plan de una purificación final, se justifica plenamente al observar las solubilidades de carbonatos.

La diferencia de solubilidades existente, en el rango de los 90 a 100°C , entre el Li_2CO_3 y diversos carbonatos de sodio y potasio es muy grande. Esto indica la fácil separación de litio como sal carbonatada.

Es de singular importancia la tan especial característica del carbonato de litio al disminuir su solubilidad con el aumento de temperatura; no sucede lo mismo con las sales de sodio y potasio. Sin embargo, en este rango de temperaturas, el carbonato de magnesio es insoluble en su totalidad y lo mismo sucede con el carbonato de calcio. Si en la salmuera concentrada quedaran rastros o trazas de calcio o magnesio, estas especies serían las primeras en precipitar como car-

bonatos insolubles, disminuyendo la pureza final del producto (de ahí la importancia de la purificación previa).

En laboratorio, el tratamiento de salmuera concentrada se dió con la precipitación de Li_2CO_3 a partir de carbonato de sodio anhidro a la temperatura de 90°C . La forma de llevar a efecto la prueba fue similar a las de etapas anteriores en el uso de distintas proporciones del reactivo precipitante.

Los cálculos que se registran junto con otros correspondientes a la precipitación del carbonato de litio, son mostrados, en detalle, en la tabla 17.

En la misma, se aprecian los resultados de análisis correspondientes al sólido precipitado (Li_2CO_3) después de dos lavados consecutivos de cristales.

Como se había anticipado, de acuerdo a las solubilidades, el 100 % del sodio y potasio quedan en la solución residual y la solución de lavado (agua). Las trazas magnesio y calcio, que en el vaso 3 no alcanzan al 0,15%, se deben, probablemente, a la contaminación del agua de lavado, sin embargo, resultan insignificantes frente a las proporciones de litio y carbonato. Otro tanto ocurre con los cloruros que junto con el sodio y potasio se mantienen disueltos en la solución residual.

En esta etapa es de mucha importancia la pureza del agua de lavado y la inexistencia de magnesio y/o calcio en el reactivo industrial Na_2CO_3 . La temperatura del proceso debe ser mayor a 80°C para elevar el rendimiento; la agitación y el retorno al equilibrio de la solución son imprescindibles.

El lavado de los cristales de carbonato de sodio se lo realiza con

agua destilada y tiene el objeto de desprender la salmuera adherida a los mismos; la salmuera que recubre el precipitado de carbonato de litio contiene proporciones significativas de sodio y potasio que disminuyen según la cantidad de agua utilizada en el lavado. Por este motivo es necesario, tras la precipitación del carbonato de litio, el realizar dos o más lavados y una temperatura superior a los 30° C. La secuencia de purificación establece que mientras mayor el número de tandas de lavado, mayor la separación de salmuera contaminante y más puro el carbonato de litio obtenido. La alta temperatura del agua de lavado hace que el precipitado de litio no se disuelva nuevamente, ya que su solubilidad varía en forma inversamente proporcional.

La prueba experimental de esta etapa comprendió tres lavados sucesivos a la temperatura de 82° C. La tabla 18 muestra que el 97,8% de litio existente en la etapa anterior fue precipitado como carbonato de litio; queda un 2% promedio restante que indudablemente se pierde debido a la redisolución de la sal en el agua de lavado.

Conforme al formato seguido en las etapas anteriores, se han desarrollado relaciones empíricas que sirven para calcular las masas y volúmenes de soluciones precipitantes; en este caso, las cantidades de Na_2CO_3 y agua para formar la solución necesaria y precipitar el Li_2CO_3 .

La tabla 17 muestra que la proporción adecuada de precipitación del reactivo carbonato de sodio se encuentra entre la estequiométrica y el exceso 10%. Ello se presta al cálculo del % en peso de Na_2CO_3 óptimo frente a la masa total de salmuera que entra en esta etapa del proceso: 2,1%.

$$M_{\text{CO}_3\text{Na}_2} = 2,1 \% M_s$$

$$M_s = 2,1 \times 10^{-2} V_s d$$

donde:

M_s = Masa de la salmuera que entra al proceso

V_s = Volumen correspondiente a la masa M_s

d = Densidad en (kg/l)

Tomando en cuenta la pureza o ley L del Carbonato de sodio a emplear:

$$M_{\text{CO}_3\text{Na}_2} = \frac{2,1 \times 10^{-2} V_s d}{L} \times 100$$

dónde:

L = Ley del Na_2CO_3 en %

Por otra parte empleando una solución saturada de Na_2CO_3 al 40% en peso, la masa total de solución es:

$$M_{\text{solución}} = \frac{M_{\text{Na}_2\text{CO}_3} \cdot L}{40}$$

y la masa de agua

$$M_{\text{H}_2\text{O}} = M_{\text{solución}} - M_{\text{Na}_2\text{CO}_3}$$

Estas relaciones pueden emplearse para cualquier salmuera concentrada hasta la etapa de precipitación con sulfato de sodio. Naturalmente, con el control de concentraciones y volúmenes.

RENDIMIENTO DEL PROCESO, PUREZA DEL PRODUCTO.

El proceso seguido en laboratorio, cuyo esquema se contempla, en detalle, en los puntos anteriores, muestra resultados que anticipan un buen rendimiento del método. Los cuadros de análisis pro-

cesados permiten hacer un seguimiento, en detalle, de los cambios químicos que ocurren en la salmuera.

De allí se puede sacar el resumen de recuperación por etapa del elemento que presenta mayor interés en Uyuni: el litio, objeto del presente trabajo.

La tabla 19, muestra la recuperación del litio a lo largo del proceso.

TABLA 19

RECUPERACION DE LITIO EN LAS DISTINTAS ETAPAS

(%)

ETAPA	PERDIDA TOTAL %	MAYOR EFICIENCIA *
Evaporación Inicial	2,6 (*)	
Precipitación Selectiva		
Lechada de cal I	0,4 (*)	Vaso 3
Evap. Intermedia	2,9 (*)	Vaso 3
Lechada de cal II	1,8 (*)	Vaso 3
Sulfatado	9,3 (*)	Vaso 3 - 4
Carbonatado	2,2 (1)	Vasos 3 - 4
	16,6	
<u>TOTAL PERDIDA</u>	19,2 %	
<u>RECUPERACION GLOBAL DE LITIO</u>	80,8 %	

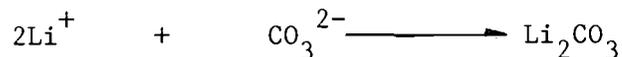
(*) : Pérdida en el sólido

(1) : Pérdida en el líquido

* : Referida a las proporciones óptimas

Pureza del Producto

De acuerdo a los resultados de análisis obtenidos (Tabla 17) y la estequiometría de la reacción:



Se tiene los resultados de pureza (en carbonato de litio anhidro) siguientes:

TABLA 20

PUREZA DEL CARBONATO DE LITIO

VASO	MASA DE Li (mg)	MASA DE CO ₃ esteq.	MASA DE Li ₂ CO ₃ esteq.	MASA TOTAL OBTENIDA	PUREZA %
1	807,8	3 497,0	4 304,8	4 695,9	91,7
2	844,1	3 654,1	4 498,2	4 755,3	94,6
3	840,2	3 637,2	4,477,4	4 485,3	99,8
4	802,2	3 472,7	4 274,9	4 446,4	96,1
5	837,8	3 626,8	4 464,6	4 958,4	90,0

masas en mg

Volumen de análisis : 0,297 l

Con este cálculo puede concluirse que el método investigado es el de más óptimo rendimiento para la salmuera de Uyuni, sencillo y de bajo costo por los insumos que utiliza. La pureza que se obtiene en carbonato de litio (vaso3) y la recuperación global de litio, justifican plenamente el desarrollo y "extrapolación" de esta fase de laboratorio a una planta piloto; ello en procura de optimizar cantidades de materias primas e insumos, estandarizar normas y métodos y por último, en base a todos los resultados obtenidos más los costos de producción deducidos, realizar un estudio de factibilidad adecuado.

DIAGRAMA DE FLUJO PARA EL BENEFICIO DE LITIO.

El diagrama de flujo con que se trabajó en laboratorio y cuyos resultados se comentan en los puntos anteriores se muestra en la figura 17.

Se ha realizado una representación de las distribuciones porcentuales de litio, magnesio y demás especies (otros), conforme el proceso de obtención de litio.

Para concluir, se muestra en forma gráfica (Fig.18) la evolución más interesante del flujograma: el par magnesio-litio.

Se observa que en la etapa de evaporación (1 y 2) la cantidad de litio es insignificante frente al magnesio y otros. La etapa 3 de encalado I cambia el panorama y disminuye considerablemente la cantidad de magnesio; no obstante, es significativa aun la proporción del mismo en esta salmuera. En la etapa 4 se nota una disminución de la barra correspondiente a "otros", el potasio disminuye en gran cantidad. La etapa 5, muestra cómo el magnesio ha desaparecido a costa del incremento de calcio; "Otros" crece. La etapa 6 trata de la precipitación del sulfato de calcio y finalmente en la etapa 7 puede verse cómo la proporción de litio crece favorablemente, "otros" desaparece y en su lugar se encuentra el anión carbonato. En esta etapa final, el carbonato de litio tiene una pureza máxima de 99,8%, siendo sus acompañantes principales trazas de magnesio y calcio.

INGENIERIA DEL PROYECTO, PLANTA PILOTO DE Li_2CO_3

Se ha comprobado, con muy buenos resultados, la utilidad y eficiencia del método propuesto para la separación del Litio de salmueras del salar de Uyuni. Este punto trata de la extrapolación de la serie de conclusiones y resultados experimentales obtenidos al diseño de una planta piloto. La misma comprenderá, en todos los casos, maquinaria sencilla dado que el proceso no es complicado ni sofisticado, rigiéndose estrictamente a cada uno de los pasos propuestos en el flujograma.

CARACTERISTICAS DEL PRODUCTO A ELABORAR.

Carbonato de Litio.

El mercado mundial del producto posee normas de aceptación del carbonato de litio basados en su pureza y forma de cristalización. El producto elaborado en la planta experimental deberá tender a estas especificaciones técnicas, en principio, puesto que los resultados de laboratorio las cubren totalmente; ellas son:

Pureza Mínima	:	99,2 % en peso de Li_2CO_3
Forma	:	Cristales finos
Hidratación de sal	:	Li_2CO_3 anhidro
Humedad Máxima	:	0,5 %

Envase

Se ha optado por el envase que usualmente se emplea en productos químicos no corrosivos:

Bolsas de Polietileno de 50 kg.	
Espesor polietileno	: 350 μ
Característica	: Polietileno de presión media

Sub Productos

Se tiene la producción:

Producción Diaria	:	17,7 kg Li_2CO_3 /día
Producción Mensual	:	531,0 kg Li_2CO_3 /mes
Producción Anual	:	6372,0 kg Li_2CO_3 /año

DESCRIPCION DEL PROCESO.

El proceso, cuyo diagrama de flujo experimental se contempla en detalle anteriormente, consta esencialmente de las siguientes etapas:

a) EVAPORACION INICIAL.

En esta fase la cristalización secuencial de sales, de acuerdo a la solubilidad, pretende separar gran parte de las especies más abundantes en la salmuera, en especial cloruro de sodio (NaCl) la evaporación inicial precipita más del 90% del sodio y cerca al 80% del cloruro total contenido en la disolución.

Sin embargo, se ha visto que mientras se evapora la salmuera, la cantidad de precipitado crece constantemente, llega un momento, en que si no es separado (este precipitado), se tiene una masa compacta o "barro" de cloruro de sodio humedecido con salmuera rica en litio. Este motivo indica que antes de evaporar en una sola etapa, al 75% del volumen inicial de salmuera, debe darse una separación del sólido por filtrado inicial. En la tabla 21 se hace un balance tanto de masa de precipitados como volumen de salmuera en cada una de las etapas.

Se ha determinado en forma acumulativa, la cantidad de sólido que de acuerdo a los resultados de análisis, la evaporación va precipitando en cada etapa. También, a partir de estos datos, puede calcularse el porcentaje que la masa de precipitado representa, con referencia a la masa total de salmuera.

Así se ve que al llegar la etapa 4, el porcentaje de sólido pre

precipitado en el magma es de 35% y el volumen de salmuera representa el 65% en peso; mientras que la etapa 5 contempla un 45,5 % de sólido y 54,7 % de líquido. El paso lógico a seguir, es el hacer una primera separación cuando se ha alcanzado la etapa 4, es decir, el 45% de evaporación.

Realizada esta primera separación del precipitado, continúa la evaporación sin cambiar las características que se habían determinado en laboratorio. Se parte en una segunda etapa de evaporación hasta completar el 75% propuesto inicialmente.

La tabla 21 muestra en detalle que, al filtrar el magma (etapa 4) queda líquido concentrado para el tratamiento. La evaporación continúa y al alcanzar la etapa 7, existe precipitado en el magma en una proporción del 18% frente al 82% de salmuera. Aquí se hace una nueva separación por filtrado y se continúa el tratamiento con lechada de cal.

b) ENCALADO I.

La primera etapa de precipitación con lechada de cal, precipita más del 94 % del magnesio contenido en solución. Se ha visto que el arrastre de este elemento, en el proceso, es perjudicial para la recuperación de litio en las últimas etapas. El tratamiento es a temperatura ambiente.

c) EVAPORACION INTERMEDIA.

Esta etapa concentra la salmuera y la satura en KCL, que precipita en una cuantía de más del 90%. Esta operación es fundamental en cuanto es necesaria la depuración de la salmuera, eliminando la máxima cantidad de especies disueltas acompañantes del litio, entre ellas el segundo componente en importancia, como es el potasio.

d) ENCALADO II.

Aunque más del 94% del magnesio fue separado en la primera precipitación con lechada de cal, esta etapa pretende, tras la separación de potasio en la evaporación intermedia, separar, en lo posible, la máxima cantidad de magnesio, logrando de esta forma facilitar el proceso de beneficio de litio. Al igual que en la primera etapa de encalado, esta operación debe realizarse a temperatura ambiente.

e) NEUTRALIZACION Y SULFATADO.

Aunque la lechada de cal libera la salmuera del catión que más problemas acarrea al proceso (Mg^{+2}), introduce calcio hasta el punto de saturación. Esta etapa separa de forma fácil y económica la totalidad del calcio precipitándolo como la sal sulfato de calcio y dejando apta la solución para el tratamiento previo a la separación del litio. La temperatura ideal para el proceso es de $85^{\circ}C$.

f) PURIFICACION DE LA SALMUERA.

Las anteriores etapas del proceso separan en su totalidad el Mg^{+2} , Ca^{+2} y K^{+} del litio disuelto. Sin embargo, la pureza del producto final depende en gran forma de las trazas de, principalmente, Mg^{+2} y Ca^{2+} que hayan quedado en solución. El hidróxido de sodio es un compuesto que fácilmente precipita los hidróxidos de calcio y magnesio, dejando sodio en solución. Aquí se hace el tratamiento o purificación final de la salmuera con hidróxido de sodio concentrado, dejándola exenta de calcio y magnesio.

g) CARBONATADO.

Las impurezas de calcio y magnesio son radicales en cuanto a la pureza del producto final, puesto que en esta etapa, el tratamiento con carbonato de sodio precipita, antes que el carbonato de litio (Li_2CO_3), carbonatos menos solubles de calcio y magnesio; de ahí

la importancia de la purificación previa de la salmuera.

Habiendo excluído el calcio y magnesio, la precipitación de Li_2CO_3 se produce dejando en solución: Sodio y Potasio, cuyos carbonatos son muy solubles.

El sólido precipitado (Li_2CO_3) arrastra consigo salmuera concentrada en K^+ y Na^+ ; este motivo induce a la separación de esta impureza por medio del lavado de los cristales con agua destilada a una temperatura superior a los 80°C ; puesto que el carbonato de litio disminuye su solubilidad con la temperatura.

h) OPERACIONES COMPLEMENTARIAS.

El proceso descrito contemplará, operaciones básicas de ingeniería que se estudian y detallan en el presente acápite; ellas son:

- . Transporte de fluídos (salmuera)
- . Filtración
- . Agitación
- . Secado

DESCRIPCION DE LA PLANTA, EQUIPOS

PLANTA PILOTO, DESCRIPCION.

La planta piloto que se propone tendrá una forma "modular", es decir, un modelo versátil en el que fácilmente se podrá incrementar la capacidad acoplando equipo sencillo en las denominadas "series de proceso". Cada una de ellas contempla operaciones y maquinaria cuyo detalle se observa en la figura 19.

Aquí se muestra la distribución específica de maquinaria en una serie de proceso. La planta piloto pretendida comprenderá 4 series idénticas para las cuales será común el uso de algunos de los siguientes equipos: Filtros (baterías A, B, C), pozas de encalado

(1 y 2) y pozas de sulfatado y carbonatado. Por lo mismo, se ha elaborado un programa de distribución de maquinaria, tal que cuatro series: A, B, C y D, compartan una sola maquinaria con excepción de las piletas de evaporación solar que, por características propias del proceso, son particulares de cada serie.

El motivo de la distribución programada de utilización de maquinaria que se muestra en la figura 20, tiene el objetivo principal de reducir la inversión total en equipos de planta; en segundo término, evitar los tiempos de ocio tanto de trabajadores como de máquinas en el transcurso del proceso. El modelo propuesto muestra tal facilidad en el cambio y acople de nuevas series, que un momento dado, pueden duplicar o triplicar la producción de la planta sin una muy alta inversión de capital en maquinaria.

Se tiene por ejemplo en el programa, que la evaporación de cada, serie de proceso está desplazada en tres días, ello con el objeto de utilizar secuencialmente la batería A de dos filtros; en este caso:

CICLO	SERIE	USO DE BATERIA DE FILTROS A	LIMPIEZA Y MANTENIMIENTO
1	A	días 24 y 25	día 26
	B	días 27 y 28	día 29
	C	días 30 y 31	día 32
	D	días 33 y 34	día 35
2	A	días 36 y 37	día 38
	.	.	.
	.	.	.

Algo similar ocurre con otras maquinarias como por ejemplo:
 pozas de encalado con agitación discontinua:

CICLO	SERIE	USO DE POZA DE ENCALADO I	LIMPIEZA Y MANTENIMIENTO *
1	A	días 47-48-49	día 49
	B	días 50-51-52	día 52
	C	días 53-54-55	día 55
	D	días 56-57-58	día 58
2	A	días 59-60-61	día 61

* M dio día al final de proceso por serie.

El programa distributivo que ofrece la figura 20 muestra, al final de cada ciclo, una producción diaria y constante de carbonato de litio.

Se ha determinado además, que el tiempo medio en que cada serie concluye el proceso es de 82 días; ello en base a tiempos estimados de evaporación, filtrado, agitación y equilibrio, secado y embolsado; cuyo detalle se muestra en el estudio de cada operación. La programación de este tiempo posee holguras de un día por serie, es decir, cuatro días por ciclo, entre los cuales puede acortarse o alargarse el proceso. Al margen de esta precaución, el funcionamiento de cada serie es individual; ello quiere decir que si por algún motivo se detiene o retarda el proceso de una de las series, el ciclo continúa sin perjuicio de las demás.

BALANCE DE MATERIA .

De acuerdo a los resultados de la fase experimental, se ha realizado el balance de materia de una serie de proceso cuyo detalle se

muestra en la figura 21. Por su parte, la tabla muestra el balance másico global resumido.

Debido a que cada serie de proceso es idéntica a las demás, el balance másico realizado es válido para todas ellas. Simplemente el gasto de insumos, la generación de productos, subproductos e impurezas deberá multiplicarse por el número de series a utilizar. La tabla 23 muestra el detalle de consumo de insumos químicos por serie de proceso y total.

MATERIAS PRIMAS.

Los principales reactivos "precipitantes" tales como el óxido de calcio (CaO), el sulfato de sodio (Na₂SO₄) y carbonato de sodio (Na₂CO₃), se encuentran muy concentrados en el departamento de Potosí. La riqueza mineral de este sector del país hace del proceso más factible y menos costoso, puesto que las materias primas empleadas se encuentran en la zona del salar de Uyuni.

MAQUINARIA Y EQUIPO.

En este punto se hace la descripción de la maquinaria a utilizarse en la planta piloto de carbonato de litio. De acuerdo al proceso se tiene en orden ascendente las operaciones siguientes:

- Transporte de fluidos
- Evaporación
- Agitación
- Encalado I
- Encalado II
- Sulfatado
- Carbonatado
- Filtración
- Secado

Transporte de Fluídos.

La experiencia constante, las pruebas relacionadas con cada una de las operaciones propuestas y la adición de parámetros no considerados en laboratorio, hacen que la ubicación de la planta piloto sea a orillas del Salar de Uyuni.

El bombeo de salmuera cubrirá un área semicircular de 10 km de radio hacia dentro del salar, teniendo como centro la planta instalada. Se ha considerado esta superficie de bombeo suficiente para conseguir un detalle pormenorizado (pruebas de bombeo) en esta zona de rendimientos, tanto de bombas como de concentración de salmuera con la época de lluvias. Es más fácil y acertado procesar una serie de datos provenientes de pozos distintos, que hacer lo mismo con un sólo punto. Por otra parte, se conoce la existencia de alguna variación en concentraciones de especies químicas con la época estival del año. El proceso en planta piloto deberá normar una serie de adaptaciones de este cambio al proceso experimental desarrollado en laboratorio.

Por lo mismo, se ha realizado el cálculo de potencia de bombas para el transporte de salmuera superficial desde puntos distintos, a una distancia máxima de 10 Km, hasta un tanque destinado al stock de salmuera en planta. Se tiene el siguiente resumen:

TUBERIA	POTENCIA (KW)	TRABAJO ELECTRICO	POTENCIA (CV)
1"	135,1	180,3 kWh/día	184,0
2"	5,6	7,5 kWh/día	7,6
3"	1,1	1,4 kWh/día	7,5

Costo óptimo

Para calcular el diámetro óptimo, de acuerdo a su costo, se tiene:

TUBERIA	LONGITUD POR ROLLO (m)	CANTIDAD	COSTO UNIT Bs.
1"	100	100	156,4
2"	50	200	167,9
3"	25	400	172,5

ACCESORIOS (ACOPLES)	COSTO UNITARIO Bs.	CANTIDAD (UNIDADES)
1"	1,29	99
2"	2,87	199
3"	8,68	399

Costo operacional *

TUB.	COSTO TOT. TUBERIAS	COSTO ACCESOR.	DEPRECIACION POR DIA **	COSTO W. ELEC/DIA	COSTO OPERAC. POR DIA
1"	15 640	127,7	21,9	57,6	79,5
2"	33 580	571,1	47,4	2,4	49,8
3"	69 000	3 463,6	100,6	0,4	101,0

* Costo en Bs; costo del trabajo eléctrico a la fecha: Bs. 0.32/kWh

** Depreciación de tubería en dos años.

De acuerdo a este análisis se tiene:

Potencia de bomba necesaria: 9,0 CV

siendo $\eta = 85\%$ (dato de fábrica), rendimiento.

Caudal : 2,08 l/s

Altura mín. : 10 m

Trabajo eléctrico : 7,5 kWh/día

Costo diario total : Bs. 49,8/día

Tubería (tipo) : Tubo extensible de 2" de diámetro (ebonita reforzada con fibra)

Bomba (tipo) : Turbina vertical para pozos

Las bombas que se emplean para fuentes superficiales de líquido son las bombas turbina vertical de acoplamiento estrecho, también son utilizadas en el drenaje de lagos, ríos, sumideros, pozos y otros; la ventaja que presentan, frente a otras, es el gasto energético pequeño y la alta presión que generan con gran rendimiento. Por otra parte, pueden fácilmente aumentar su capacidad al incrementarse el número de escalones o rodetes de aspiración. (figura 22).

Evaporación.

La concentración de salmuera natural por el método de evaporación, tiene el objeto de liberar la mayor cantidad de materia (sólida o líquida) que de alguna forma complica el proceso. Ello se ha logrado secuencialmente en laboratorio y los resultados de esta experiencia se extrapolarán al cálculo de evaporadores. El tipo de evaporadores a emplearse es el de piletas de evaporación solar y el motivo principal: uso de la energía solar.

Al contrario de los evaporadores mecánicos, no existe un costo de energía utilizada en evaporación solar que deba recargarse al de producción; la energía solar reemplaza por completo cualquier otro tipo de energía que pueda utilizarse. Al margen de ello, la programación del método de elaboración de Carbonato de Litio en series de proceso, hace que el tiempo de evaporación tenga poca significación frente a una producción diaria y constante. El enorme volumen de salmuera que se procesará en una planta industrial, hace virtualmente imposible, debido a costos energéticos, la utilización de energía artificial.

La inversión de capital en evaporadores mecánicos es mucho mayor que la empleada en piletas de evaporación solar; por último, el

costo de mantenimiento y manejo de evaporadores mecánicos supera en mucho al de evaporadores solares.

Tales consideraciones hacen que el diseño de planta piloto para el salar de Uyuni contemple, en su primera etapa, el estudio de evaporadores con energía solar.

Evaporación en laboratorio.

El proceso ha sido descrito anteriormente en detalle. La figura 2 muestra la pileta de evaporación de laboratorio, un baño termotatizado que asemeja las piletas adiabáticas industriales, cobertores de acetato de celulosa para concentrar la temperatura simulan lo que serían en planta piloto cubiertas o techados, lámparas de rayos infrarrojos asemejan, de alguna forma, lo que sería la energía solar en Uyuni. El método empleado no contempla, por razones obvias, humedad ambiental, vientos, precipitación pluvial y temperatura de la región. Sin embargo, la influencia que estos parámetros tienen en la evaporación tan solo se refiere a la velocidad del proceso; no afectan en mayor forma la composición media de la salmuera y menos pueden variar la masa de las especies iónicas disueltas.

Estas hipótesis han hecho que pueda acelerarse el proceso de evaporación, sin temor a incurrir en errores significativos, tan solo con el incremento de temperatura. No obstante el mayor desorden molecular que origina la alta temperatura debe ser compensado en pleno, con el tiempo que tardan en estabilizarse las moléculas a temperatura ambiente (tiempo de equilibrio).

En lo referente a resultados de laboratorio, son comentados en detalle en el punto correspondiente.

Velocidad de Evaporación

La evaporación es una de las operaciones, que por el tiempo que se emplea en ella, define la velocidad global de proceso. Por este motivo se contemplan pruebas de velocidad de evaporación de salmuera natural de Uyuni a distintas temperaturas. El cálculo tiene el objeto de simular la evaporación en planta y aproximar resultados experimentales propuestos en el presente estudio.

El área total que contempla la prueba de evaporación está referida a seis vasos de precipitación de un litro cada uno; esto es, un total de 520 cm². Los resultados se presentan en la tabla 24 a continuación:

TABLA 24

VELOCIDAD DE EVAPORACION

TEMPERATURA (°C)	TIEMPO DE EVAPORACION (h)	VOL. TOTAL EVAPORADO (cm ³)	VEL. DE EVAPORAC . (l/m día)
90	6	396	30,46
85	6	215	16,46
75	6	137	10,54
65	6	108	8,31
55	6	81	6,23
45	6	72	5,54
35	6	38	2,92
25	6	15	1,15

Temperatura de ebullición (Teb = 98 °C)

El gráfico de la figura 23 presenta un aspecto muy interesante en cuanto al microclima artificial creado dentro del vaso y es el ascenso casi exponencial de la velocidad de evaporación frente a

la temperatura, dato que muy bien puede aprovecharse en la planta piloto. A pesar de ello, serán necesarias pruebas adicionales (en planta) para determinar el mayor rendimiento de evaporación que naturalmente daría el viento de Uyuni.

Piletas de Evaporación Solar.

Se trata de depósitos de gran superficie construídos a bajo nivel (suelo) cuyo objeto es el concentrar de alguna forma la energía radiante llegada del sol.

Para darse el fenómeno de evaporación en la salmuera, debe incrementarse en forma significativa la actividad molecular de la solución, de tal manera que la presión de vapor se eleve, con la consiguiente salida de moléculas en forma de vapor de agua. La energía calorífica solar es la que incrementa la temperatura produciendo la evaporación de la salmuera.

Un requisito indispensable a cumplirse en las piletas de evaporación solar, es el ser adiabáticas y herméticas. La energía calorífica que llega a la salmuera y se concentra en ella, tiende a disiparse por conducción a través de las paredes de la pileta y radiación desde la superficie libre del líquido. Este motivo induce al estudio de materiales y aislantes baratos que eviten esta pérdida de calor y concentren la energía en la evaporación de la solución. La siguiente, es una lista de materiales de fácil acceso y poco costosos que pueden ser empleados gracias a su baja conductividad térmica:

TABLA 25

CONDUCTIVIDADES TERMICAS DE ALGUNOS

MATERIALES DE CONSTRUCCION Y AISLANTES

EN kcal/(h) (m²) (°C/m)

Asbesto	0,064	
Hormigón	0,25	cemento Portland
Plastoform	0,028	
Goma	0,15	
Serrín	0,045	ebonita
Madera	0,13	pino
Ladrillo	0,59	
Corcho	0,037	
Lana mineral	0,032	fibrosa
Lana de vidrio	0,036	
Aire	0,014	
Yeso	0,64	

El modelo propuesto, es el que se presenta en la Ref. Figura 24 donde el corte de las piletas esquematiza las capas aislantes entre la salmuera y el suelo. Se han escogido para ello, los siguientes materiales en orden descendente:

Capa Externa.

1ra. capa: Lámina de polietileno (impermeable) espesor 250 μ

2da. capa: Plastoform (espesor 2 cm) recubierto con pintura de PVC.

Capa Interna

3ra. capa: Hormigón ciclópeo

4ta. capa: Ladrillo hueco (huecos 1,8 - 2 cm)

5ta. capa: Base de hormigón ciclópeo

La primera capa, una lámina delgada de polietileno tiene el objeto de recubrir y evitar la infiltración de salmuera en la estructura.

La segunda capa de plastoform-lámina es el primer aislante, puesto que su rigidez y baja conductividad térmica hacen preferible su uso, frente a la goma, corcho, serrín o lana. Tendrá un espesor de 2 cm, suficientes para un buen aislamiento.

Por último, la base de la estructura, aislante e impermeable al agua infiltrada desde el suelo, estará constituida por hormigón ciclópeo en proporción 1 : 4: 2, de cemento Portland, grava y arena.

El suelo de apoyo en esta zona tiene una textura arcillosa e impermeable muy necesaria para la construcción de piletas industriales. La importancia de elección del terreno para la ubicación de las piletas de evaporación radica precisamente en la impermeabilidad de los suelos, puesto que de lo contrario la corrosión de estructuras por agua salada infiltrada desde abajo sería muy grande. El mapa de textura de suelos al rededor del salar (fig 25), muestra la consistencia de los mismos en este sector. La zona elegida está dentro de lo que se consideran suelos arcillosos impermeables (franco-arcillosos y arcillo-limosos).

Por su parte, a pesar de las precauciones en cuanto al aislamiento y adiabaticidad de las piletas, existe otro factor que ha de tomarse en cuenta en la evaporación solar, es el de la temperatura medio ambiente

La altura a la que se encuentra el salar de Uyuni, junto a la cordillera Andina, hace de la temperatura reinante, baja en extremo; ello perjudica en gran forma la velocidad de evaporación.

Se concibe una planta piloto, como un "Laboratorio in situ" frente a lo que ha de ser una planta industrial, de ahí la semejanza del diseño. Sin embargo, el tiempo de proceso es radical en cuanto a la elaboración de resultados de planta piloto. Este factor hace que al igual que en la experiencia dada en laboratorio, deba acelerarse el proceso de evaporación con elevación de la temperatura.

En tal forma se conoce el estudio y diseño mejorado de piletas de evaporación solar, realizado en Quillagua-Chile por G. FRICK y G. HIRSHMAN presentado el año 1972. En el mismo se encuentran aspectos muy interesantes en cuanto a evaporadores solares.

Al margen de las condiciones adiabáticas mencionadas se han diseñado cobertores o techos de piletas, construídos principalmente con vidrio. Pruebas al respecto señalan que este tipo de cobertores alcanzan fácilmente los 50° - 55°C de temperatura (IIF). La inclinación del techo en las piletas tiene el objeto de resvalar el agua de evaporación condensada en la superficie fría de los cobertores y colectarla en pequeños canales ubicados a los costados; esto evita la condensación y caída de las gotas de agua sobre la salmuera, al margen de presentar una mayor inclinación para irradiación solar. Al mismo tiempo, se provee a la planta de agua destilada en forma natural que, como se ha visto en el proceso, es de uso muy importante tanto para el lavado de cristales como la disolución de reactivos precipitantes; ésta es una forma muy económica de purificar agua.

También se contempla en el esquema, aislantes internos como polietileno y plastoform de 2 cm de espesor, sobre una base de cemento. Por su parte, algunos de los cobertores utilizados serán de vidrio, no obstante existe el inconveniente de empleo de este material dada su fragilidad.

El detalle muestra el estudio realizado por Hirschman ; toma como diseños de más trascendencia, por su rendimiento en la evaporación y concentración de energía calorífica, cinco modelos especiales, los denominados USM-3, USM-4, USM-5, USM-6 y USM-7. De acuerdo a los experimentos realizados por el autor en Grecia, existe una relación lineal entre la producción (P) de agua evaporada en la piletta y la radiación solar (R):

$$P = aR - b$$

Esta experiencia contempla la pérdida de calor por convección y radiación (pérdida de inercia térmica) tanto en las paredes de la piletta, fondo y cubierta. En este sentido se han probado varios modelos de piletas entre los cuales se mencionan los más importantes:

MODELO	PRODUCCION DE AGUA EN (l/m ² día)	CUBIERTA
USM-4	P = 0,000909 R - 0,500	Vidrio
*USM-5		
1 panel	P = 0,000672 R - 0,300	vidrio
2 paneles	P = 0,000607 R - 0,279	vidrio
3 paneles	P = 0,000654 R - 0,274	vidrio
USM-6	P = 0,000634 R - 0,450	vidrio
USM-7	P = 0,000581 R - 0,481	vidrio

* La cubierta de vidrio consiste en un panel (1 x 2 m.) o subdividida en 2 o 3 paneles.

Radiación solar: R en kcal / m²día.

RADIACION SOLAR MEDIA **

UYUNI R: (kcal/m²dia)

MES	1979	1980	1981
ENE	4877,7	7259,4	5928,1
FEB	6666,5	6922,7	----
MAR	5438,3	5270,4	5638,7
ABR	5214,8	5359,9	----
MAY	4583,0	4621,4	----
JUN	3951,4	3801,2	3698,3
JUL	4203,9	3922,7	4045,8
AGO	5195,7	4867,7	4638,7
SEP	5807,6	5631,8	5473,7
OCT	6440,1	----	5863,7
NOV	7200,7	6882,4	6999,7
DIC	6275,7	6427,9	6389,2
\bar{R}	5488,0	5542,5	5408,0

** Red Solarimétrica boliviana 1982

INSTITUTO DE INV. FISICAS

Entre todas las piletas que se presentan en el estudio de Hirschman y Frick, la más eficiente es la USM-4 cuyo modelo se adoptará, en primera instancia, para el diseño de la planta piloto en Uyuni.

La radiación solar correspondiente a la zona del salar de Uyuni se reporta en la Red Solarimétrica boliviana (Instituto de Inv. Físicas-FCPN) de donde se resume el cuadro anterior.

La irradiación media anual en Uyuni es cerca de 5500 (kcal/m²día); con este dato puede ser calculada la producción de agua evaporada en cada uno de los modelos:

USM-4 P = 0,000909 (5500) - 0,5
P = 4,5 l/m² día.

USM-5

1 panel P = 0,000672 (5500) - 0,3
P = 3,4 a/m² día

2 paneles P = 0,000607 (5500) - 0,279
P = 3,0 l/m²día

3 paneles P = 0,000654 (5500) - 0,274
P = 3,3 l/m²día

USM-6 P = 0,000634 (5500) - 0,45
P = 3,0 l/m²día

USM-7 P = 0,000581 (5500) - 0,481
P = 2,7 l/m² día.

Este cálculo muestra cómo el modelo USM-4 evapora más del 30% de agua que los restantes diseños. El objeto que se persigue en la planta piloto es probar esta eficiencia y la acción del viento; desde ya, los volúmenes de evaporación que aquí se presentan, sabiendo que el microclima creado dentro de estas piletas alcanza fácilmente una temperatura cercana a los 50 °C, son acordes a los volúmenes de evaporación determinados en laboratorio a esta temperatura.

El volumen de agua evaporada varía en forma directamente proporcional a la superficie de irradiación, esto quiere decir que mientras mayor sea la superficie expuesta a la radiación solar, mayor será el volumen evaporado y menor el tiempo empleado en esta operación. Con este criterio se ha optado por las dimensiones siguientes: (Figura 24)

DIMENSIONAMIENTO

Nro.		LARGO (m)	ANCHO (m)	PROFUNDIDAD (m)	OPERACION
4	Piletas A	15	2	0,4	Evaporación Inicial I hasta el 45%
2	Piletas B	4,5	2	0,4	Evaporación I hasta el 75%
2	Piletas C	8,3	2	0,4	Evaporación Intermedia 40% del volumen tratado en la etapa.

Los motivos por los cuales se adoptan estas medidas se justifican por los aspectos que se explican a continuación:

Ancho: 2 m

Las cubiertas que se utilizarán serán de plástico; en plaza se las encuentra en cualquier longitud, pero solo 2 m de ancho.

Profundidad: 0,4 m

Se ha considerado que el control de volumen en un gran área puede ser realizado con la medida de alturas de salmuera en las piletas; una profundidad de 40 cm es adecuada para tal efecto. Por otra parte, mientras menos profunda sea la salmuera mayor será la penetración de los rayos solares y más alta la eficiencia de evaporación.

Longitud: Variable

El programa elaborado para la distribución secuencial de uso de maquinaria por series exige tiempos de evaporación aproximadamente iguales en todos los casos, de lo contrario se formarían "cuellos de botella" en de

terminados sectores y otros se mantendrían desocupados. Lo que se pretende es uniformar los tiempos de proceso en las piletas y que por ser los más largos, son los llamados tiempos críticos. Así por ejemplo, si una pileta evapora el volumen que le corresponde en 15 días y la siguiente lo hace en 20 días al sucederse las series formarán una cola, mientras la primera es atendida, con tiempos de espera variables, en cinco días para la segunda, 10 para la tercera, 14 para la cuarta serie y así sucesivamente, aglomerándose y obstruyendo el proceso.

Se han realizado en base a estos resultados, los cálculos necesarios para el dimensionamiento de piletas, como capacidad y tiempo de evaporación; el detalle se muestra en la tabla siguiente:

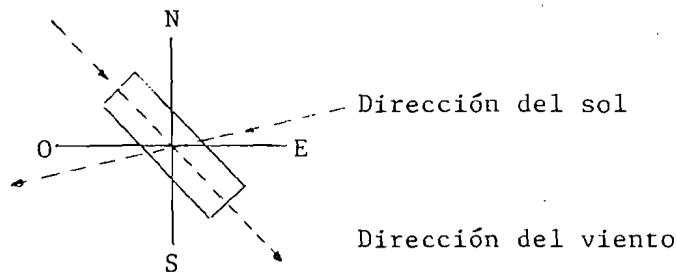
TABLA 26
PILETAS DE EVAPORACION SOLAR

POR SERIE	Nro.	DIMENSIONES POR PILETA (m)	CAP. MAXIMA POR PILETA (l)	TIEMPO DE EVAP. (días)
Piletas A	4	15,0 x 2 x 0,4	7200	23
Piletas B	2	4,5 x 2 x 0,4	2700	20
Piletas C	2	8,3 x 2 x 0,4	4980	19

Orientación

La orientación de piletas en planta es muy importante. Longitudinalmente deben estar orientadas en dirección NO - SE, de tal for

ma de presentar la menor superficie de resistencia a los fuertes vientos de la zona a partir del medio día. Por otra parte, el recorrido del sol, será favorable frente a las caras de los cobettores que se exponen:



Filtración

Una de las principales operaciones a realizarse en planta es la de filtración. A lo largo del proceso se ha visto la separación constante de fases sólida y líquida, puesto que la evaporación y la precipitación son etapas fundamentales del método.

Existen en este proceso dos tipos principales de precipitados:

- Granulares (Evaporaciones I, II e Intermedia, Sulfatación, Carbonatado)
- Coloidales (Encalado I y II)

Tales precipitados de acuerdo a su consistencia complican en mayor o menor forma la operación de filtrado. Sin embargo, existen métodos industriales de filtración que facilitan bastante la separación de fases.

Filtración en Laboratorio.

Las pruebas de filtración que se realizaron en laboratorio contemplan el cómputo de tiempos, volúmenes de filtrado y presiones diferentes de vacío, en cada uno de los precipitados que deja el proceso.

ETAPA	PRECIPITADO	TIPO
Evap. I-II, Intermedia	Sales de Sodio y potasio.	Granular grueso
Encalado I-II	Hidróxido de Magnesio e impurezas.	Coloidal
Sulfatado	Sulfato de calcio e impurezas	Granular fino
Carbonatado	Carbonato de litio	Granular fino

Presión de trabajo (filtrado al vacío)

Las diferentes presiones de vacío utilizadas para la filtración de las muestras se detallan en el cuadro siguiente:

			ΔP (kg/cm ²) *
P ₁	: 5 mm Hg	= 0,01 kg/cm ²	0,66
P ₂	: 15 mm Hg	= 0,02 kg/cm ²	0,65
P ₃	: 25 mm Hg	= 0,03 kg/cm ²	0,64
P ₄	: 35 mm Hg	= 0,05 kg/cm ²	0,62
P ₅	: 50 mm Hg	= 0,07 kg/cm ²	0,60

* Presión en la ciudad de La Paz: 0,67 kg/cm²

Resultados de laboratorio.

La tabla 27 muestra los resultados de filtración obtenidos para cada una de las especies de precipitado surgidas del proceso. Estos resultados son de suma importancia para el cálculo de filtros semi-industriales de la planta piloto. El empleo de diferentes presiones

de trabajo sirve para calcular las óptimas superficies de filtrado.

Cálculo de la superficie de filtración.

La forma usual de cálculo de áreas de filtrado es a partir de la relación de cambios del volumen de filtrado con el tiempo:

$$\frac{dV}{d\theta} = \frac{P A^2}{\mu \alpha W + \mu \beta A} \quad \text{Ec. de Carman}$$

donde:

$\frac{dV}{d\theta}$: Variación del volumen de filtrado respecto al tiempo.

P : Presión de filtrado (kg/cm²)

A : Superficie de filtrado (m²)

μ : Viscosidad (kg/m.h)

α : Resistencia específica de la torta (h²/kg)

β : Resistencia específica del material filtrante (h²/m²)

W : Cantidad de precipitado por volumen de filtrado (kg/m³),

Integrando entre los límites 0 y θ (principio y fin de la filtración):

$$\frac{\theta}{V} = \frac{\mu W \alpha}{2 P A^2} (V) + \frac{\mu \beta}{P A}$$

que es una recta de la forma:

$$Y = b X + a$$

donde:

- b : Pendiente
- a : Ordenada en el origen

Esta ecuación, reemplazando los términos correspondientes, puede ser graficada, esto es: θ/V vs. V como se muestra en las figuras 26, 27, 28, y 29 (Gráficos 1,2,3, y 4).

- . Sales de sodio y potasio
- . Hidróxido de magnesio y precipitado de excesos
- . Sulfato de calcio y precipitado de excesos
- . Carbonato de Litio.

A partir de la extrapolación de los valores gráficos se hallan los parámetros de la ecuación de Carman (integrada) y de esta manera se calculan las superficies filtrantes para los diferentes filtros.

De esta manera se tienen los siguientes resultados:

- a) Filtros etapas I, II - Sales de sodio y potasio: (Evaporación):

ΔP (kg/cm ³)	Area (m ²)
0,66	9,41
0,65	9,36
0,64	9,48
0,62	9,56
0,60	10,15

- B) Filtros etapas 3,5 - Hidróxido de magnesio y excedentes (encalado)

ΔP (kg/cm ²)	Area, (m ²)
0,66	9,33
0,65	9,80
0,64	11,30
0,62	12,10
0,60	12,40

c) Filtros etapa sulfatado.-

ΔP (kg/cm ²)	AREA(m ²)
0,66	4.50
0.65	4,70
0,64	4.60
0,62	4,60
0,60	4,80

d) Filtros etapa carbonatado:

ΔP (kg/cm ²)	Area (m ²)
0,66	8,72
0,65	8,35
0,64	8,51
0,62	8,91
0,60	9,34

Relación Area de Filtrado - Presión

El objeto que tiene el establecimiento de la relación existente entre el área de filtrado y la presión de vacío a ejercer, es el adaptar una determinada presión de bomba al área conocida de los filtros industriales.

Se ve que existe una relación exponencial entre estas dos variables. El cálculo se dá a partir del cuadro resumen de las pruebas de laboratorio (tabla 28).

T A B L A 28

CUADRO RESUMEN PRUEBA DE FILTRADO

ΔP (kg/cm ²)	A R E A (m ²)			
	EVAPORACION I - II	ENCALADO I - II	SULFATADO	CARBONATADO
0,66	9,41	9,35	4,5	8,72
0,65	9,36	9,80	4,7	8,35
0,64	9,48	11,3	4,6	8,51
0,62	9,56	12,1	4,6	8,91
0,60	10,15	12,4	4,8	9,34

Regresión: La función que mejor se adecúa es:

$$y = a e^{b X}$$

$$\ln y = \ln a + b X$$

r	+ 0,90	- 0,93	- 0,93	- 0,83
b	- 1,22	- 4,88	- 0,97	- 1,5
a	20,81	240,84	8,51	22,65

Requerimientos.

- | | | | |
|----|------------|---|----------------------------------|
| a) | EVAP. I | } | BATERIA DE DOS FILTROS CONTINUOS |
| | EVAP. II | | |
| | ENCALADO 1 | | |
| b) | EVAP. III | } | 1 FILTRO CONTINUO |
| | ENCALADO 2 | | |
| | SULFATADO | | |

c) CARBONATADO 1 FILTRO CONTINUO

A) Batería de dos filtros continuos.

Tomando como base de cálculo la mayor cantidad de materia a filtrar (EVAPORACION I - II) se tiene, de acuerdo a la figura (26) que, para un filtro industrial de 2 m² de área; se requiere una presión de:

$$P = 1,81 \text{ kg/cm}^2$$

B) 1 Filtro Continuo.

En forma similar el filtrado de las etapas, Encalado II, Evaporación intermedia y sulfatado (tomando como ref. la mayor cantidad de materia a filtrar), (Encalado II - Evap. intermedia), para un filtro de 1 m² de área se requiere una presión de:

$$P = 1,83 \text{ kg/cm}^2$$

C) Filtro Continuo para Carbonatado.

La masa a filtrar en la última etapa con un filtro de 2,0 m² de área requiere una presión de:

$$P = 1,13 \text{ kg/cm}^2$$

Se han elegido estas áreas ya que los filtros rotatorios pequeños existen en las dimensiones normalizadas (0,5 m², 1 m², 2 m² y 3 m²)

Potencia de Filtros.

Ha de calcularse la potencia necesaria para el funcionamiento de las bombas de vacío en cada batería de filtros, al margen de la potencia nece-

saría para mover el filtro rotatorio.

En el funcionamiento de los filtros rotatorios al vacío se exige el empleo de una bomba, que en realidad es la máquina de la instalación que más potencia consume. Como se ha visto en la parte experimental, la presión de vacío es muy variable de acuerdo al tipo de torta formada sobre el filtro; por lo mismo, la dimensión de bombas varía mucho de acuerdo a la porosidad del material a filtrar. Se prefieren por lo general bombas de vacío "seco" (tipo émbolo) aunque muchas veces se emplean bombas de vacío rotatorias.

La potencia empleada en la rotación del filtro, es poco significativa frente a la de bombas, los más grandes filtros no consumen más de 0,055 CV/m³ de volumen filtrado.

Realizado el cálculo por los métodos convencionales se tiene el siguiente detalle:

Bombas de vacío necesarias para el filtrado.

Batería de dos filtros: (Etapas Evap. I - II y Encalado I)

POTENCIA

$$2 \text{ filt.} \times \frac{0,32 \text{ kW h}}{\text{día.filtro}} = 0,64 \text{ kW h/día ; } 0,08 \text{ CV (0,06 kW)}$$

1 Filtro Continuo: (Etapas Evap. Intermedia - Encalado II-Sulfatado)

$$1 \text{ filt.} \times \frac{0,07 \text{ kW h}}{\text{filtro-día}} = \frac{0,07 \text{ kW h/día}}{\text{filtro-día}} ; 0,04 \text{ CV (0,03 kW)}$$

T O T A L

$$1,31 \text{ kW h/día}$$

Potencia consumida en la rotación:

Batería de dos filtros:

$$2 \text{ filt.} \times \frac{0,04 \text{ kW}}{\text{filtro}} \times 16 \text{ h} = 0,08 \text{ kW} \times \frac{16 \text{ h}}{3 \text{ días}} = 0,4 \text{ kW h/día}$$

1 Filtro Continuo:

$$\begin{array}{l} 1 \text{ Filt.} \quad \times \quad \frac{0,04 \text{ kW}}{\text{filtro}} \\ \text{T O T A L} \end{array} = 0,04 \text{ kW} \times \frac{4 \text{ h}}{\text{día}} = \frac{0,16 \text{ kW h/día}}{0,64 \text{ kW h/día}}$$

Filtros Industriales.

Se ha considerado el modelo de filtro a emplearse. Para la separación de precipitados de sólidos coloidales o porosos; son especialmente importantes los filtros continuos de vacío de tambor rotatorio. Tales modelos son apropiados para el manipuleo de estos materiales ya que realizan la separación de la solución con una presión relativamente baja. La deformación de partículas compresibles es mínima, se obtiene en forma fácil un buen filtrado ya que las tortas se descargan automáticamente. Algunas de las ventajas que presentan estos filtros son:

- Reducción de la presión de vacío por limpieza, descarga automática constante de la torta.
- Completa eliminación de todos los problemas ocasionados por las telas filtrantes, los frecuentes lavados y renovación de las mismas.
- Mínima pérdida de solución retenida.
- Importante reducción de la mano de obra necesaria.
- Filtración rápida y eficaz.
- Puede eliminarse toda sobrecarga de los filtros ya que la velocidad de filtrado puede acelerarse sin bajar el rendimiento.

- Dilución mínima de los precipitados debido al bajo consumo de agua de lavado necesaria para la descarga.

La figura 30 muestra el esquema de un filtro rotatorio tipo Oliver.

Las ventajas que presentan son amplias frente a filtros convencionales. El funcionamiento no es complicado y menos su mantenimiento. Los tipos de precipitados que se tendrán, tras las etapas de, principalmente encalado, son de muy difícil tratamiento en filtros no continuos. Frente a posibles inconvenientes y las ventajas que ofrecen los filtros de tambor rotatorio, se ha optado por la adopción de los mismos en el diseño de esta planta.

Agitación.

El capítulo anterior comprendía aspectos de mucha importancia en cuanto a los análisis y rendimientos de reacciones químicas en el proceso. El tiempo en que llega a completarse una reacción o tiempo de equilibrio, puede ser alcanzado rápidamente y en mayor eficiencia cuando se dé movimiento a la solución reactante por medio de un agitador.

Industrialmente, la agitación es una operación más, incorporada a todo proceso donde se dé una reacción química, sea de disolución, intercambio iónico u otra. Las reacciones llevadas a cabo en laboratorio contaron con un sistema de agitación acorde con sus dimensiones.

Este punto trata del cálculo de agitadores que necesariamente deberán ser instalados en cada uno de los estanques donde se lleve a cabo una reacción. La estructura de los mismos es sencilla, tal que pueden ser construidos en el país sin inconveniente alguno.

Dimensiones y Potencia Instalada.

Para llevar a cabo una reacción química o una disolución, un agitador debe cumplir dos requisitos fundamentales: en primer lugar dispersar o suspender la fase precipitada discontinua en la totalidad de la fase continua y en segundo término provocar una intensa turbulencia entre las burbujas, gotitas o partículas suspendidas, con tal de favorecer la transferencia de materia entre las fases. Para satisfacer estas exigencias son necesarios agitadores que produzcan velocidades de flujo lo suficientemente elevadas con tal de impedir la sedimentación de partículas o la estratificación de fases ; la intensidad de la turbulencia debe ser uniforme en todo el recipiente si se desea una transferencia másica total.

En las operaciones de agitación son recomendados rodetes de tamaño mediano que funcionan a velocidades medias. Rodetes pequeños que giren a grandes velocidades concentran la turbulencia alrededor de la hélice y por el contrario rodetes grandes a muy pequeña velocidad no logran una buena suspensión de partículas.

Un ejemplo clásico y muy útil por su sencillez y eficiencia es el agitador de paletas con cortacorrientes cuyo esquema se muestra en la figura 31. Tal modelo se adoptará para el proceso en esta planta.

El cálculo del tamaño de agitadores es el convencional a partir del parámetro de potencia, el número de Reynolds y el número de Froude. De ello se tienen los resultados siguientes:

OPERACION	DIMENSIONES DEL TANQUE	DIMENSIONES DE LAS PALETAS	CORTACORRIENTES RPS
ENCALADO I	h = 2,3 m D = 2.0 m	Dr = 0,67 m hp = 0,17 m	W = 0,067 m 1,67
ENCALADO II	h = 2,0 m D = 1,6 m	Dr = 0,53 m hp = 0,13 m	W = 0,053 m 1,67
SULFATADO	h = 1,9 m D = 1,4 m	Dr = 0,47 m hp = 0,12 m	W = 0,050 m 1,67
CARBONATADO	h = 1,9 m D = 1,4 m	Dr = 0,47 m hp = 0,12 m	W = 0,050 m 1,67

Donde:

- h = altura del tanque
- D = diámetro del tanque
- Dr = diámetro del rodete
- hp = altura de las paletas
- W = ancho del cortacorrientes
- RPS = velocidad (revoluciones/segundo)

De la misma forma se tienen calculados los siguientes resultados del cálculo de potencia para estos agitadores:

Operación	Agitadores Nro.	Potencia CV	Potencia Total CV	Trabajo eléctrico Total kW h/día
Encalado 1	2	2	4	24
Enaclado 2	1	0,57	0,57	3,4
Sulfatado	1	0,30	0,30	1,78
Carbonatado	1	0,30	0,30	1,78
TOTAL			5,17	30,96

Secado.

Eliminar la humedad que arrastra el producto final tras el filtrado, es la última operación y principal tarea en cuanto a la aceptación del producto en el mercado. El carbonato de litio se comercializa con una humedad máxima de 0,5% y es necesario obtener resultados de planta piloto con secaderos semi-industriales.

Se utilizará en este diseño un secadero discontinuo de bandejas, puesto que el modelo puede ser conseguido o construido a bajo costo, La figura 32, muestra el esquema del mismo, donde la circulación de aire caliente es continua.

Con tal motivo se realizaron, en laboratorio, pruebas de secado para el carbonato de litio obtenido y los resultados se presentan a continuación (Tabla 29):

T A B L A 29

PRUEBA DE SECADO EN LABORATORIO

θ	X	θ	X	θ	X	θ	X
0	0,392	3,0	0,138	6,0	0,019	9,5	0,013
0,5	0,360	3,5	0,092	7,0	0,018	10,0	0,011
1,0	0,324	4,0	0,056	7,5	0,019	10,5	0,011
1,5	0,281	4,5	0,038	8,0	0,020	11,0	0,012
2,0	0,236	5,0	0,022	8,5	0,018	11,5	0,010
2,5	0,186	5,5	0,022	9,0	0,017	12,0	0,012

θ : Tiempo en horas

X : Humedad g H₂O/5 g Li₂CO₃

T = 75 °C.

Estos resultados expresados en kg H₂O/kg sólido seco (1 x 10⁻³)

θ	X	θ	X	θ	X
0	78,4	2,0	27,6	6,0	3,8
0,5	72,0	3,5	18,4	7,0	3,6
1,0	64,8	4	11,2	7,5	3,8
1,5	56,2	4,5	7,6	8,0	4,0
2,0	47,2	5	4,4		
2,5	37,2	5,5	4,4		

La figura 33 muestra un gráfico típico de secado que nos permite realizar los cálculos usuales para hallar el área de secado:

Tiempo de secado de el período ante-crítico:

$$\theta_{AC} = \frac{S}{A} \left(\frac{X_1 - X_c}{W_c} \right)$$

Tiempo de secado en el período post-crítico.

$$\theta_{PC} = \frac{S}{A} \left(\frac{X_c - X^*}{W_c} \right) \ln \left(\frac{X_1 - X^*}{X_2 - X^*} \right)$$

donde:

- S : Masa de sólido seco
- A : Area de secado
- X_c : Humedad crítica
- X* : Humedad de equilibrio
- X₁ : Humedad inicial período ante-crítico
- N_c : Velocidad crítica
- X₂ : Humedad final período post-crítico

Por una parte, el aire exterior se encuentra a la temperatura media de 8°C con una humedad relativa media anual del 30% (16); antes de entrar en el secadero se lo precalentará, a humedad constante, hasta la temperatura de 75 °C en el calentador, para tal efecto, figura 5,21. El aire caliente estará impulsado por un ventilador y, sobre el sólido humedo de las bandejas, enfreará adiabáticamente hasta

aproximadamente la temperatura de 43 °C, valor en el cual pierde su potencial de secado (diagrama Psicrométrico, Uyuni), siendo sometido a recalentamiento nuevamente hasta 75 °C. Al recircular este aire y enfriar adiabáticamente pierde su potencial de secado a la temperatura de 52°C ($\psi = 30\%$ gráfico Psicrométrico). En este instante deberá recalentarse por tercera y última vez; el potencial de secado se pierde ahora a los 57 °C y recalentarlo nuevamente no tiene objeto puesto que el potencial del aire recalentado por cuarta vez se pierde a los 64 °C la diferencia entre esta temperatura y la máxima, de 75 °C, es mucho menor.

Los cálculos realizados con las ecuaciones de velocidad de secado y el diagrama Psicrométrico nos permiten llegar a los resultados siguientes:

Area total de secado	:	47 m ²
Tiempo total de secado	:	4 h
Trabajo eléctrico diario	:	13 kW h/día
Potencia	:	3,3 kW (trabajo 4h/día)

BALANCE ENERGETICO

De acuerdo al cálculo realizado para cada una de las maquinarias y haciendo las consideraciones adicionales de uso energético, se tiene el resumen siguiente:

T A B L A 30

BALANCE ENERGETICO DE PLANTA

MAQUINARIA PRINCIPAL	POTENCIA INSTALADA kW	TRABAJO ELECTRICO DIARIO kW h
<u>FILTROS</u>		
Batería A	0,10	1,04
Filtro B	0,06	0,15
Filtro C	0,06	0,76
<u>AGITADORES</u>		
Encalado I	2,94	24,00
Encalado II	0,42	3,40
Sulfatado	0,22	1,78
Carbonatado	0,22	1,78
SECADERO	3,25	13,00
<u>CALENTADORES</u>		
DE LAVADO	3,50	10,50
<u>SELLADORA</u>		
(EMBOLSADO)	2,00	2,00
<u>USOS IMPREVISTOS</u>		
(10%)	1,28	5,84
SUBTOTAL	14,05	64,30

BALANCE ENERGETICO (APOYO)

ILUMINACION (Planta)	2,00	20,00
<u>CONSUMO INTERNO</u>		
(vivienda)	2,50	25,00
LABORATORIO	3,50	18,00
<u>USOS IMPREVISTOS</u>		
(10 %)	0,80	6,30
SUBTOTAL	8,80	69,30
TOTAL	23,00	133,60
	(31,3 CV)	

DISTRIBUCION DE PLANTA Y DIAGRAMA DE PROCESO.

La figura 34 muestra, de acuerdo al uso de equipo programado, la distribución de maquinaria en planta. Se ha diseñado un modelo tal, que no existen interferencias entre el flujo de operaciones de las cuatro series propuestas: S_A , S_B , S_C , S_D .

En esta distribución se muestra que, por ejemplo, la serie de proceso S_A comienza el ciclo en la evaporación inicial I por los extremos de este grupo; ello evita la interferencia de las cuatro piletas iniciales en la batería de filtros A. Secuencialmente conforme avanza el proceso del ciclo en el tiempo, se van adjuntando a esta operación las tres series restantes (centrales) en similar forma.

Las líneas punteadas indican la dirección que sigue en el proceso de serie A, También se muestra cómo, tras la evaporación inicial I, la salmuera pasa a la batería de filtros A, de aquí es transportada mediante bombeo a las piletas B y de allí devuelta, tras la operación, a los mismos filtros. El filtrado pasa a la poza de agitación de Encalado I y, filtrada la salmuera, nuevamente es bombeada (con la misma bomba) a la serie de piletas C, de Evaporación Intermedia. Concluida esta operación se continúa el proceso conforme el flujograma estudiado.

La forma modular de la planta hace que con solo añadir uno o dos grupos de piletas y programando el uso de filtros, agitadores y demás maquinaria en el tiempo, pueda ampliarse la producción sin una inversión grande en equipo.

La secuencia que siguen las demás series (S_A , S_B , S_C), es similar a la mostrada en la figura para la serie A. Se ha logrado de este

modo una correcta distribución que minimiza los tiempos de recorrido en planta, evitando en todo momento las posibles obstrucciones dado que cuatro series utilizan la misma maquinaria.

De igual modo, conforme el diagrama de flujo del método, se ha realizado el estudio de las operaciones surgidas en el mismo y establecido el Diagrama de Proceso de Flujo de Operaciones que se muestra en la figura 35. Puesto que el flujo es continuo, no surgen ramificaciones importantes. Sin embargo, la rama de subproductos se encuentra en actual estudio y se espera contar pronto con el diseño de un pequeño complejo industrial que representa el Beneficio de los Recursos Evaporíticos del Salar de Uyuni.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- BALLIVIAN(O), RISACHER (E), 1981, los Salares del Altiplano Boliviano
Estudio y Estimación Económica.
- FINDLAY (A.), Dover Publications INC., 1929, The Phase Rule
- GRANGER (B.), 1958 Ingeniería Química.
- HANDBOOK OF CHEMISTRY AND PHYSICS, 1976, 56 Th Edition GRB Press
- HIRCHMAN (G.), FRICK (G.), 1972, Theoretical Studies fo Salar Stills
in Chile.
- KIRK, OTHMER, 1976, Enciclopedia de Tecnología Química.
- LAVA, QUEBEC - UMSA, 1979, Carta Climática de la Región Andina Bolivia-
na.
- LOPEZ (R.), ZAPATA (I.), 1982, Método de Concentración de Li Cl a par-
tir de salmueras del Salar de Uyuni.
- MC. CABE, SMITH, 1979, Operaciones básicas de Ingeniería Química.
- MONTE DE OCA I, 1979, Geografía y Recursos Naturales.
- RISACHER (F.), 1986, Primeros sondeos en el Salar de Uyuni.
- SARAVIA (I.), 1979, 1980, 1981, Red Solarimetría Boliviana Instituto de
Investigaciones Físicas - U.M.S.A.
- TEEPLE (I.), and Associates (American Potash and Chemical Corp), 1929.
The Industrial Development of Searles Lake Brines.
- TRAYBAL (J.), 1978 Operaciones con Transferencia de Masa.
- VIAN, OCON, 1979, Problemas de Ingeniería Química.

* * * * *

A N E X O 1

F I G U R A S

EQUIPO DE EVAPORACION

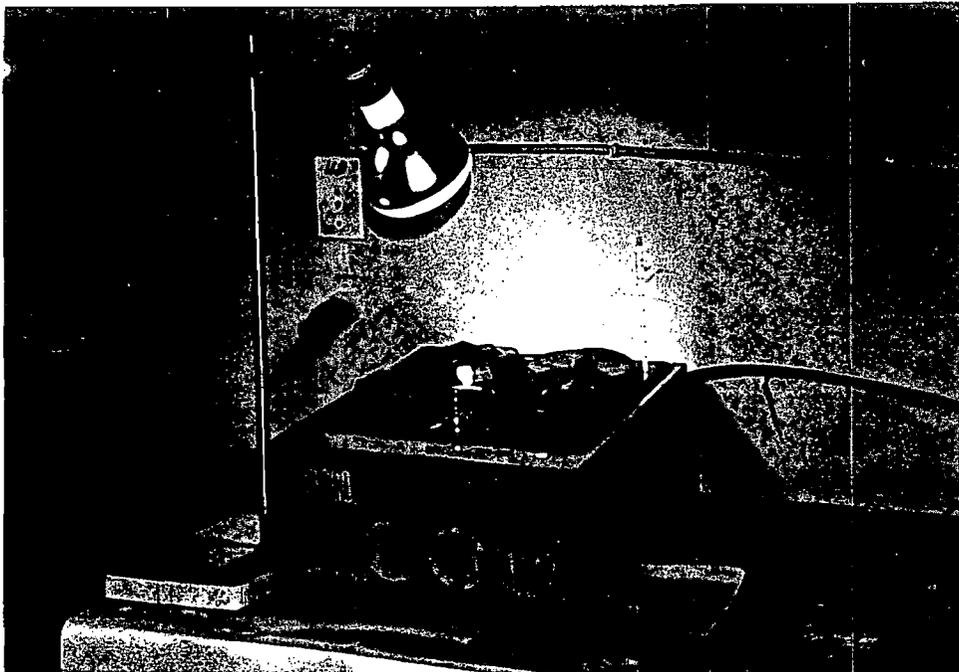
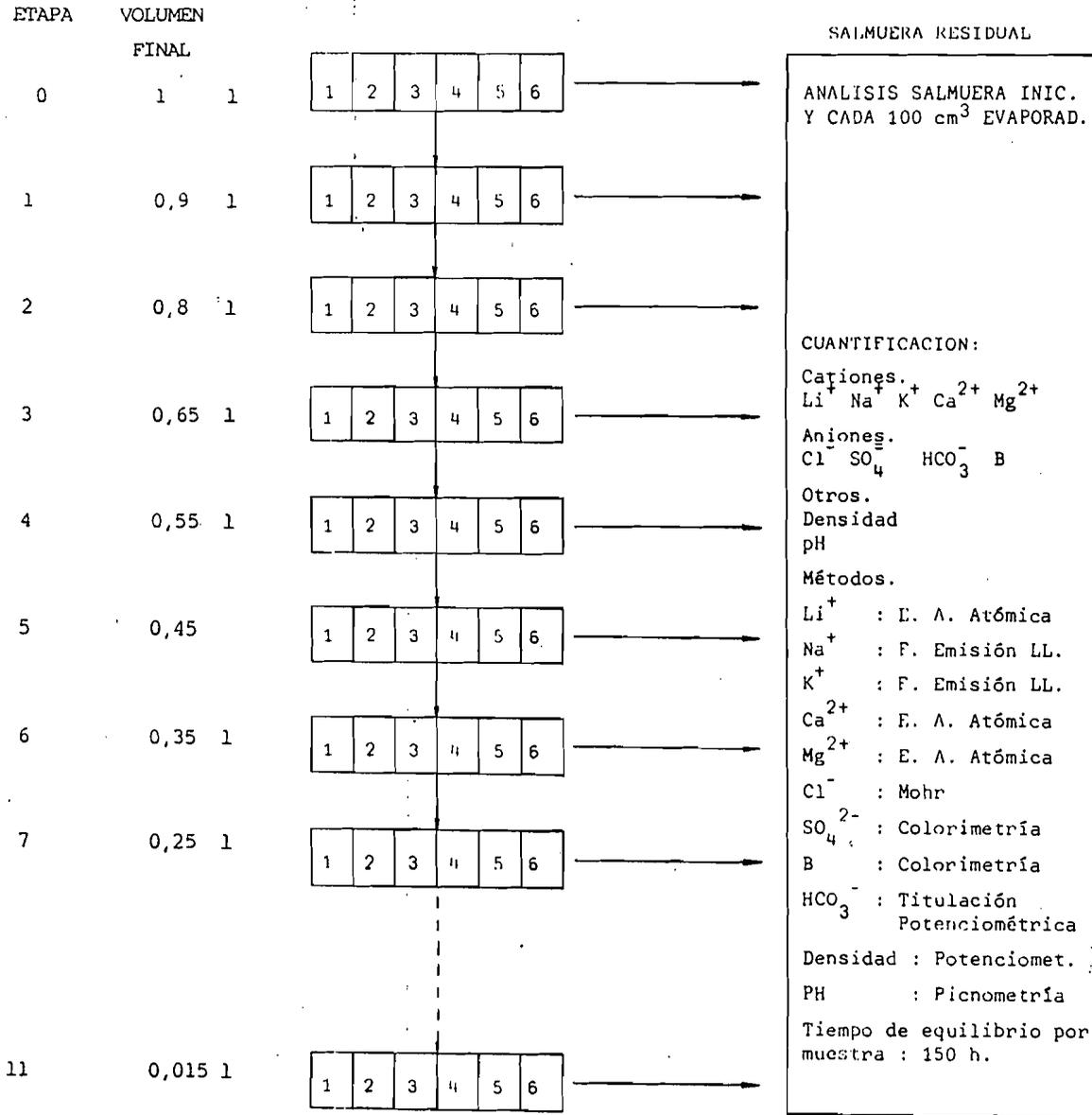


FIGURA 2

FIGURA 3

ESQUEMA DE EVAPORACION



ESQUEMA DE PRECIPITACION SELECTIVA

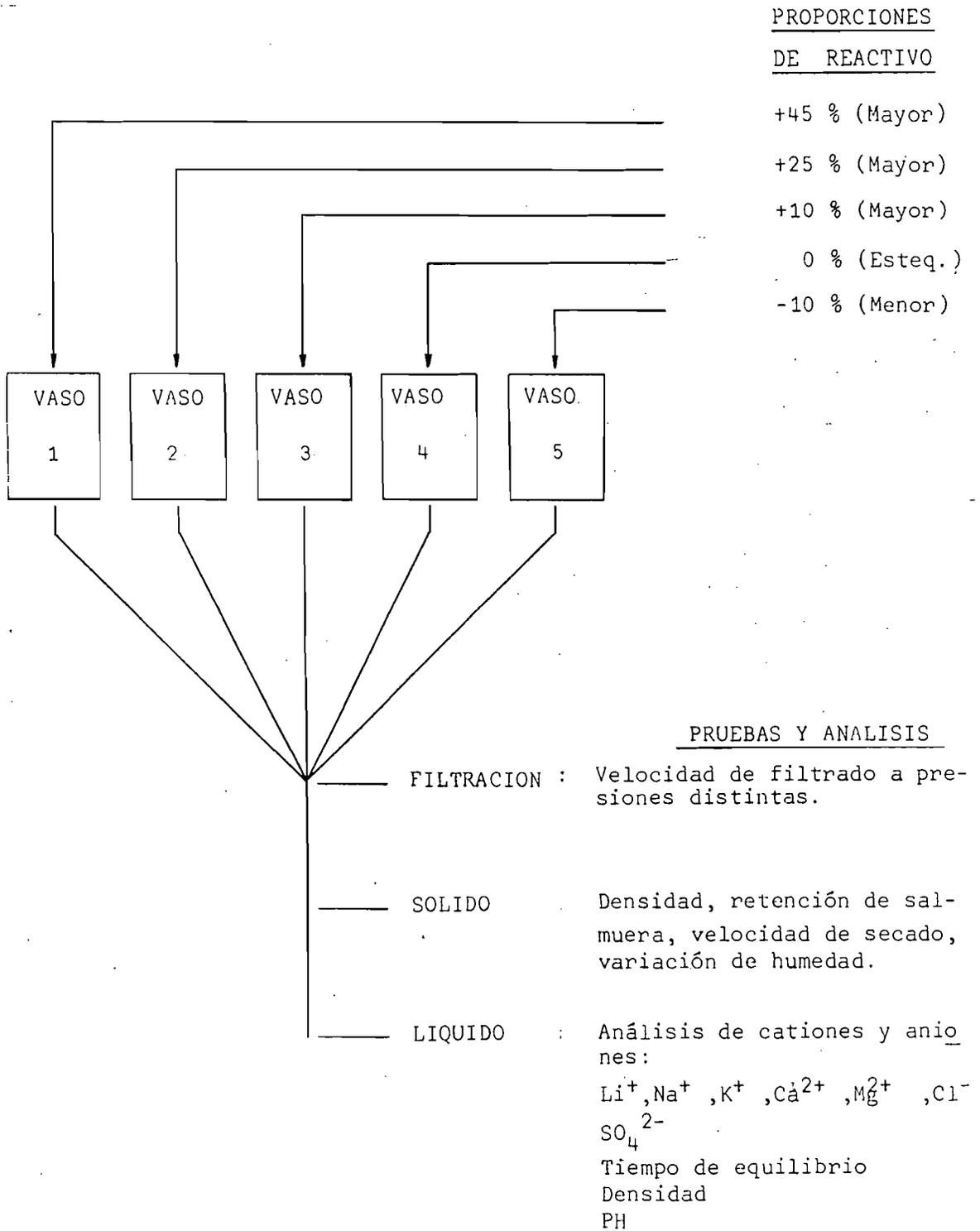


FIGURA 4

FIGURA 5

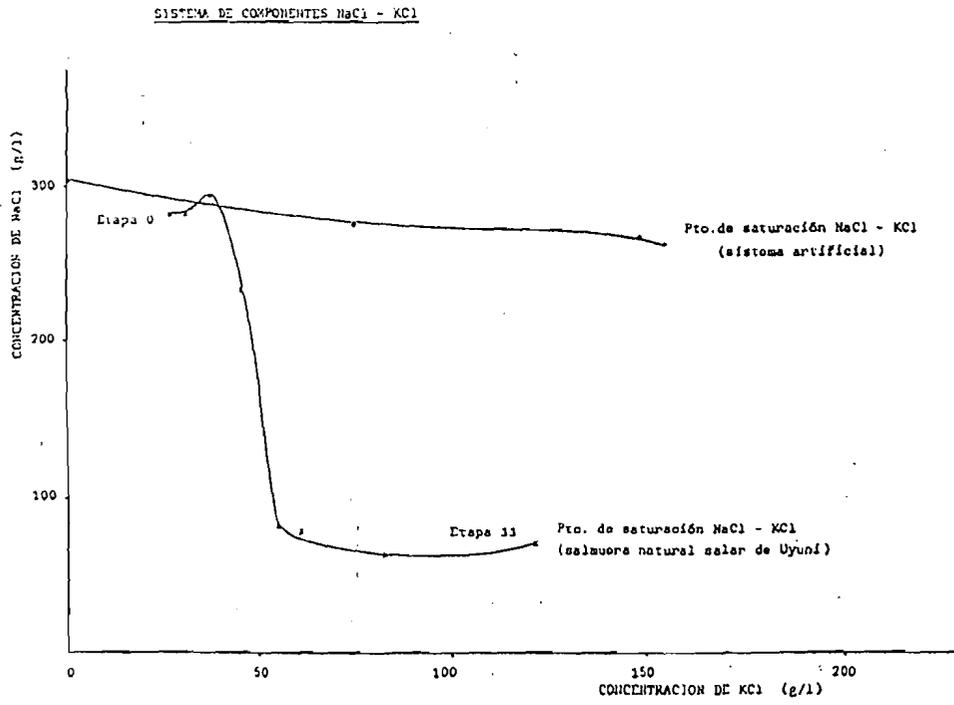


FIGURA 6

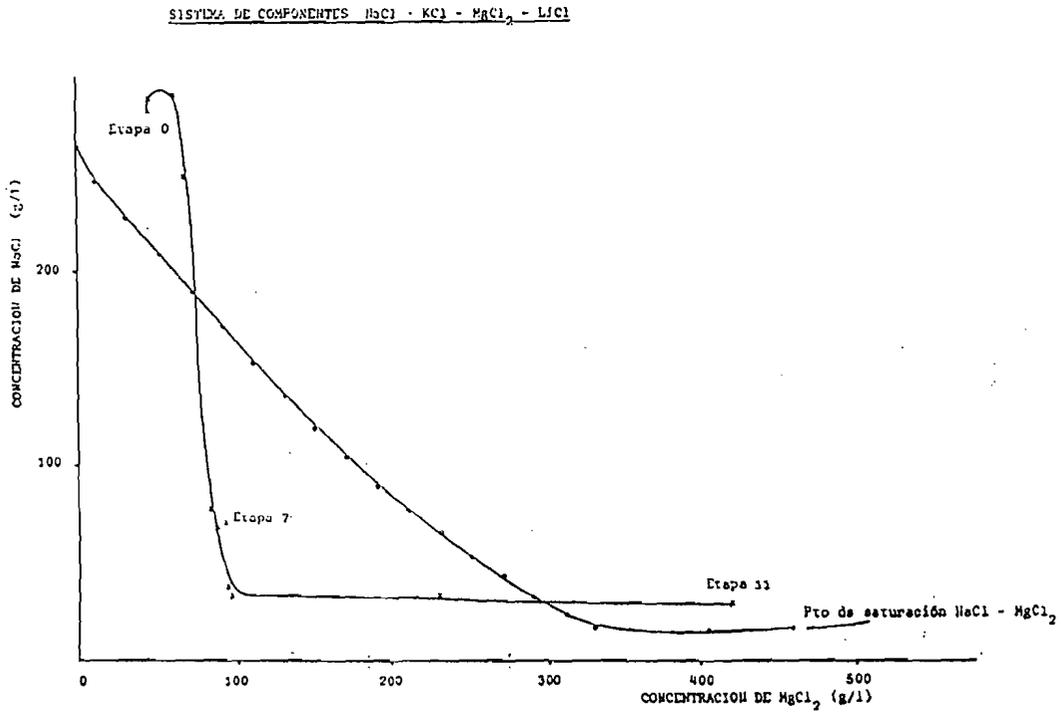


FIGURA 7

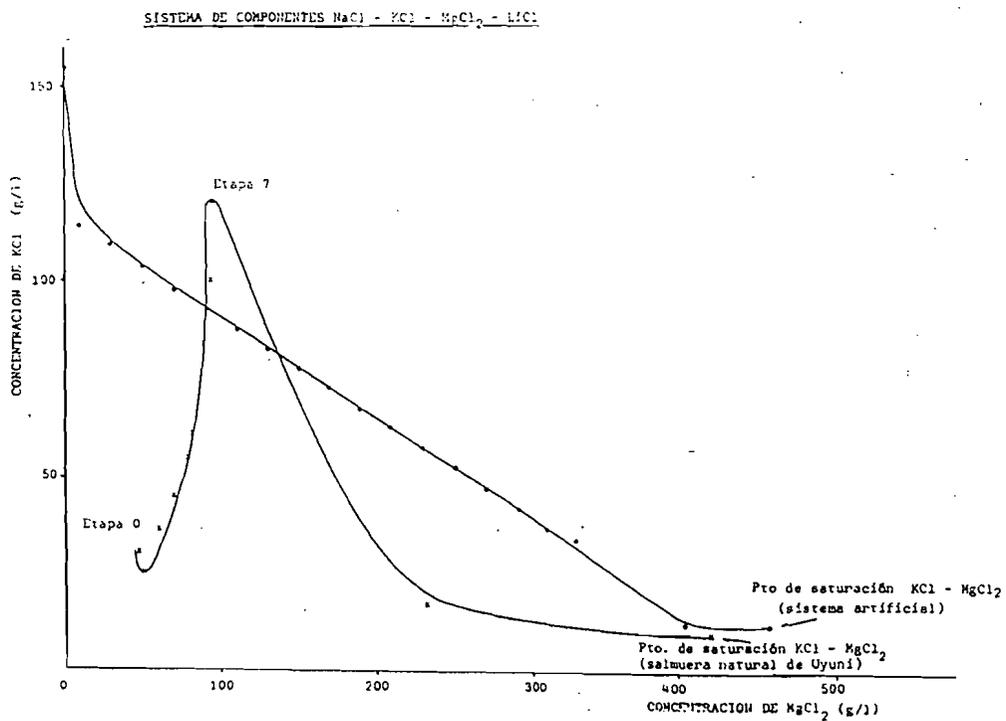


FIGURA 8

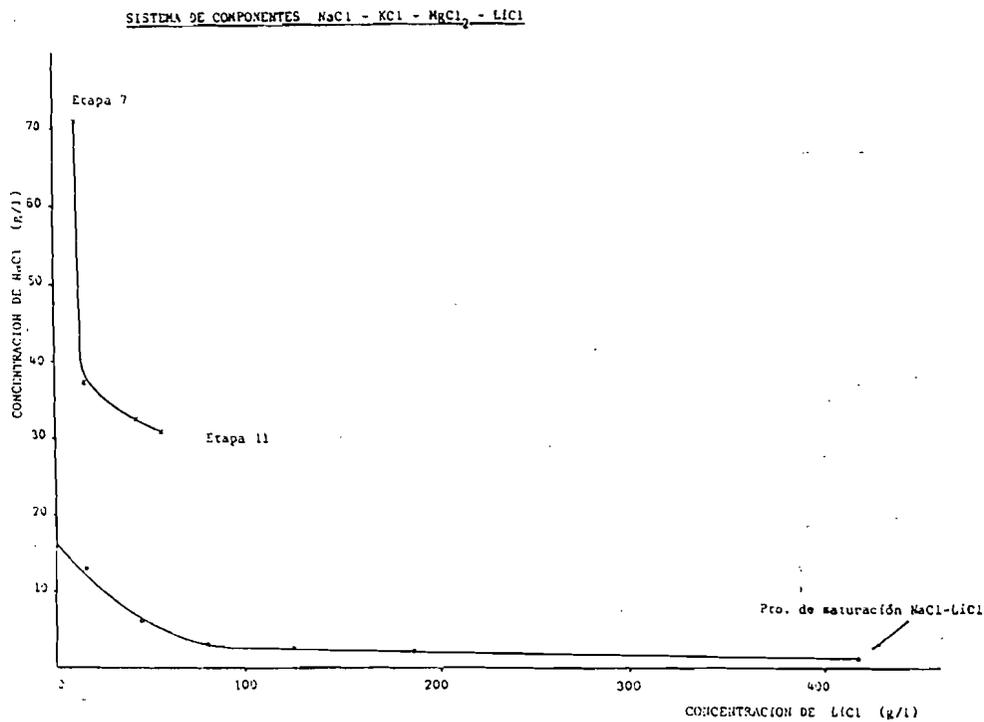


FIGURA 9

SISTEMA DE COMPONENTES NaCl - KCl - MgCl₂ - LiCl.

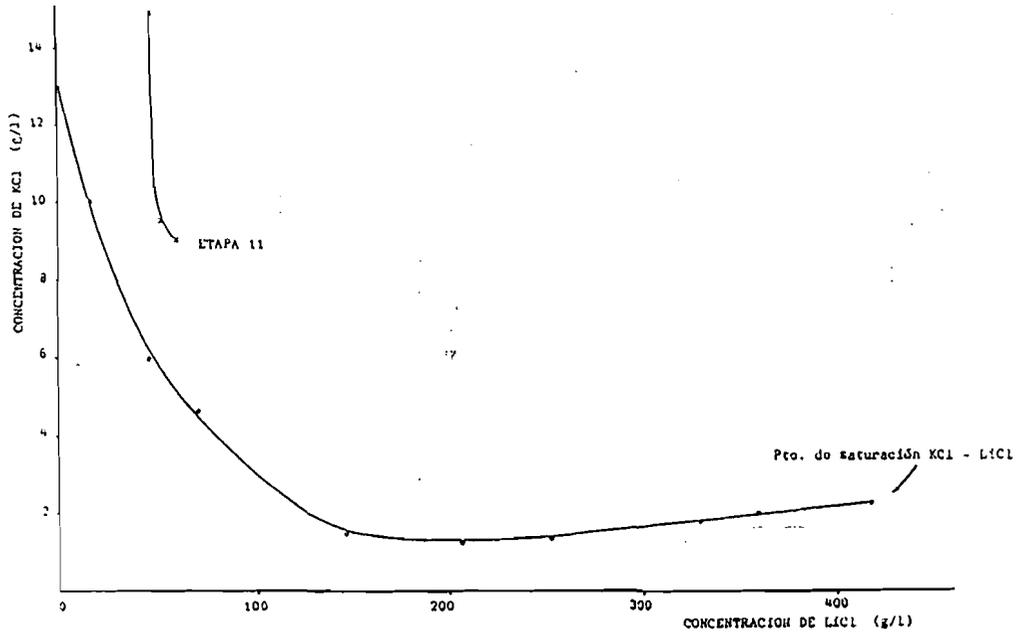


FIGURA 10

SISTEMA DE COMPONENTES NaCl - KCl - MgCl₂ - LiCl

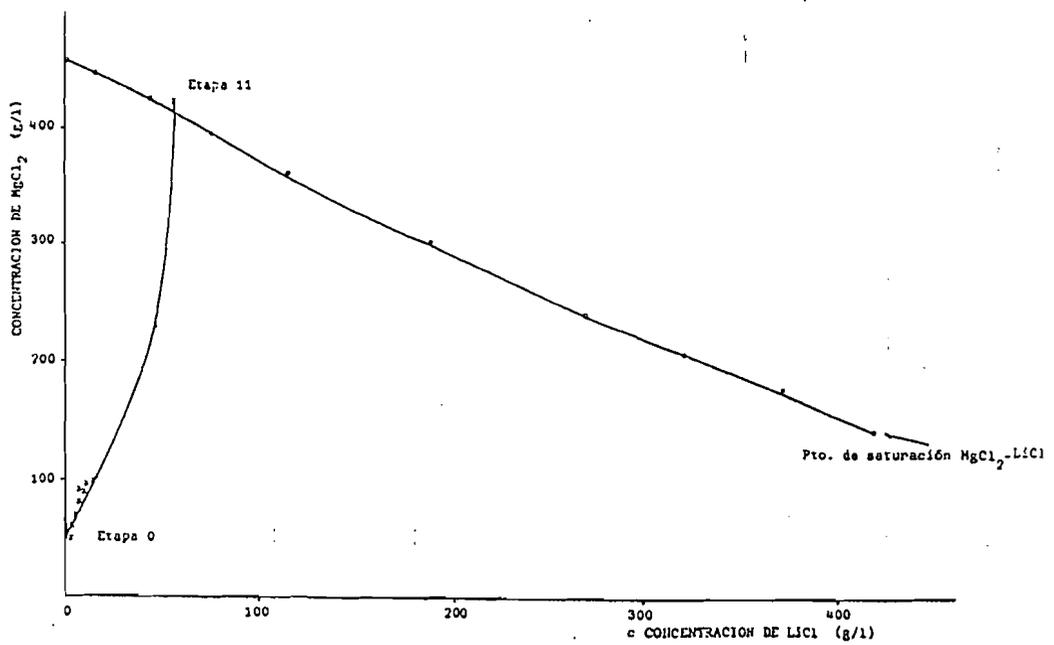


FIGURA 11

EVAPORACION

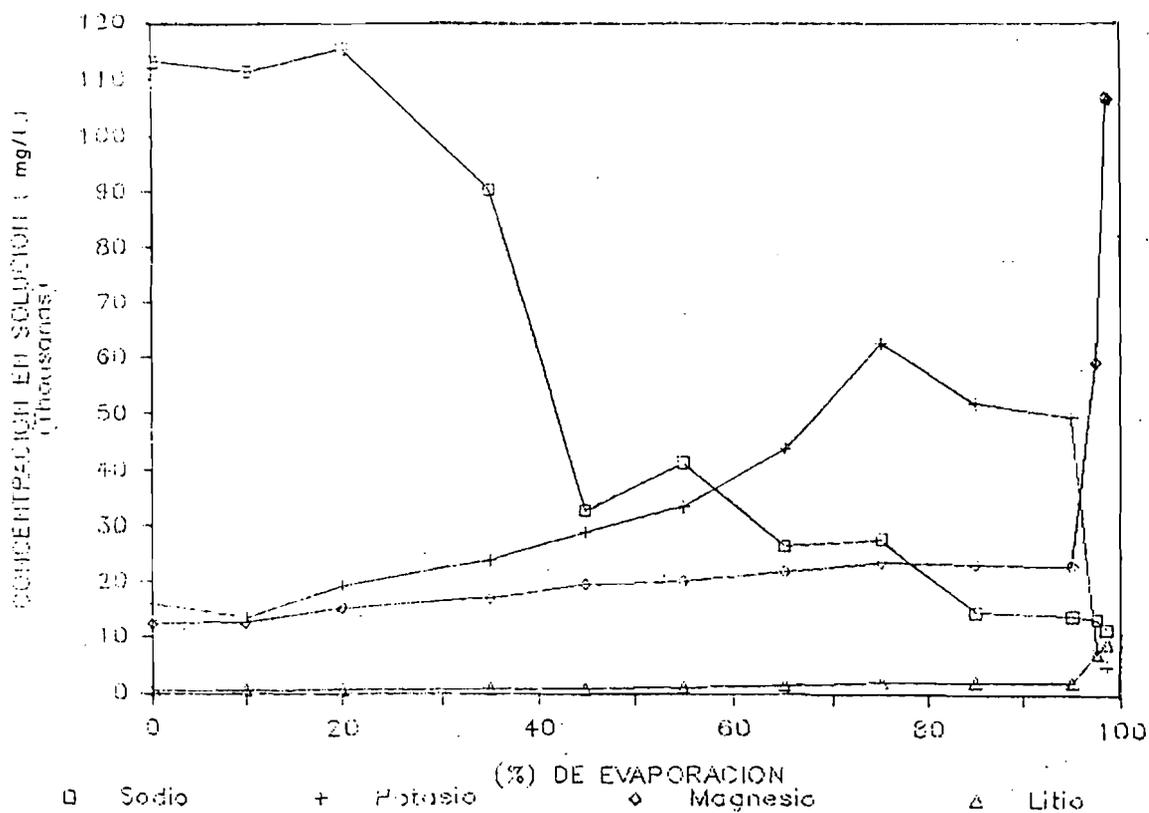
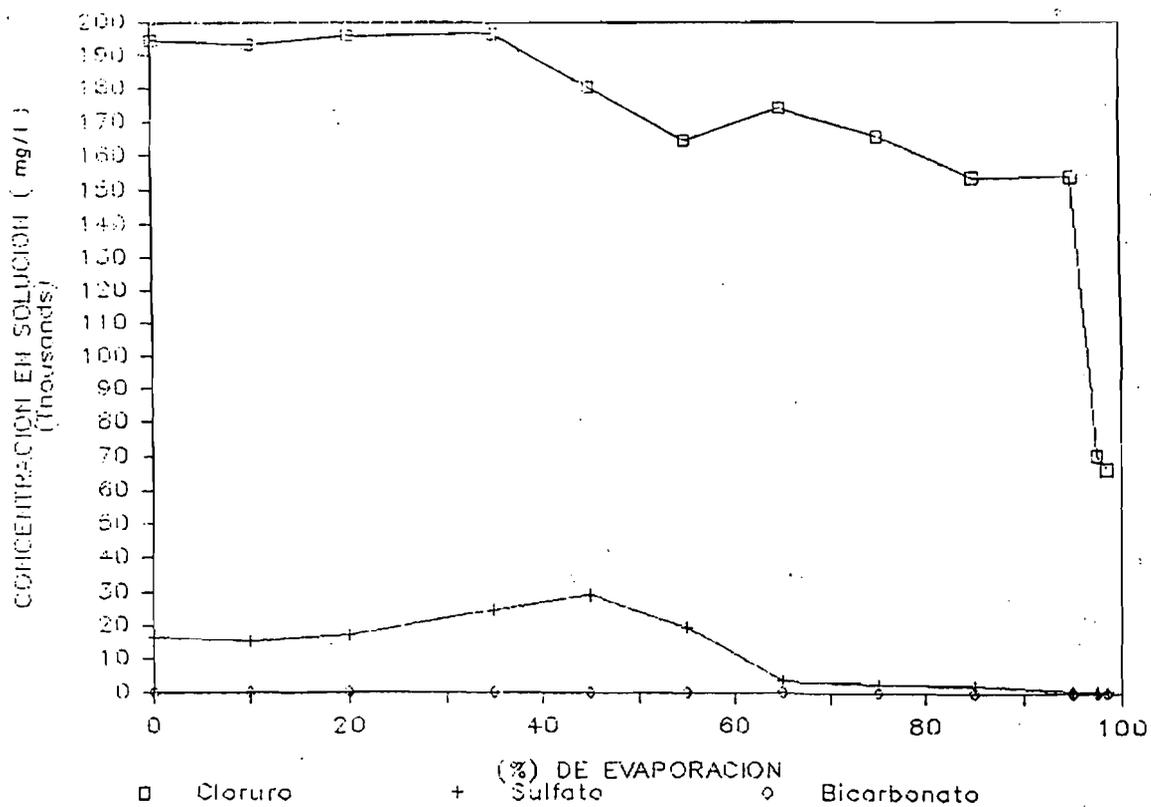


FIGURA 12

EVAPORACION



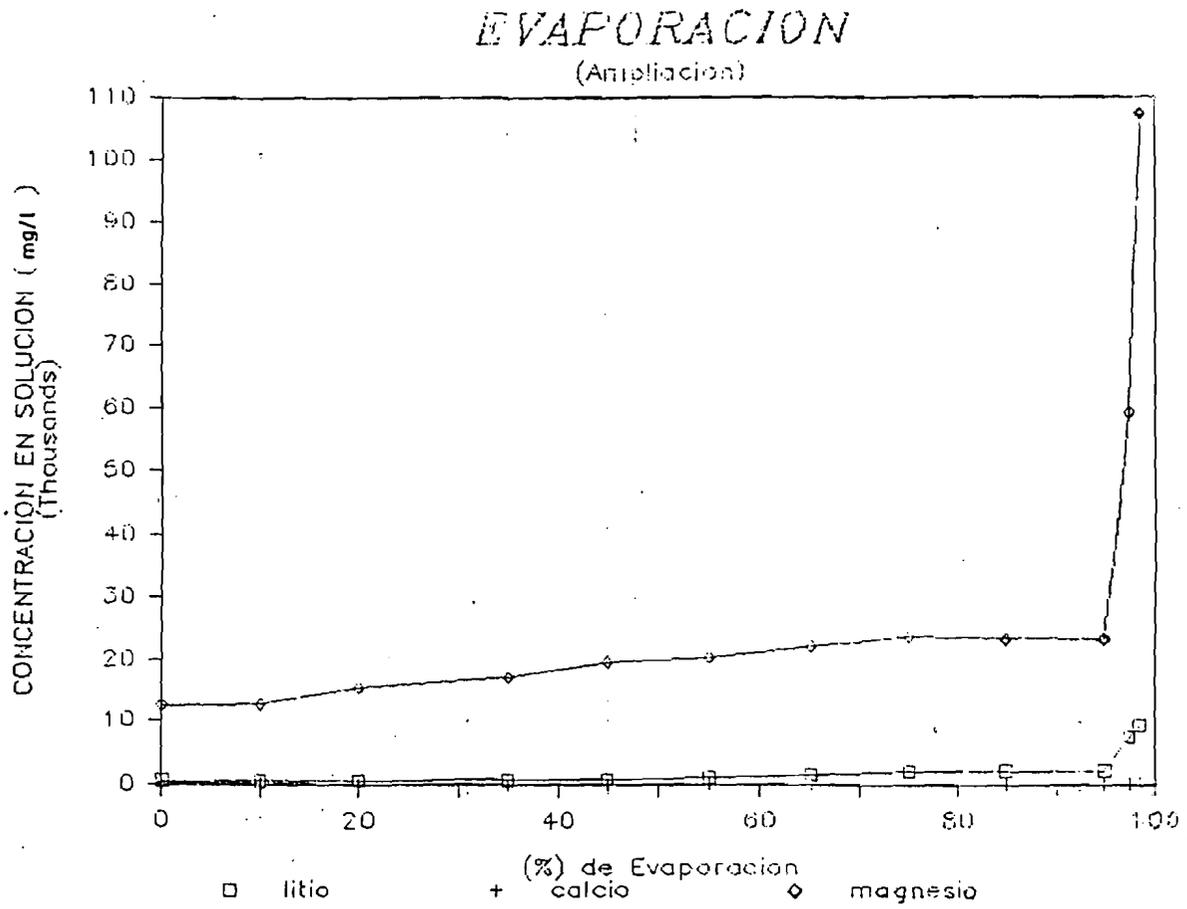
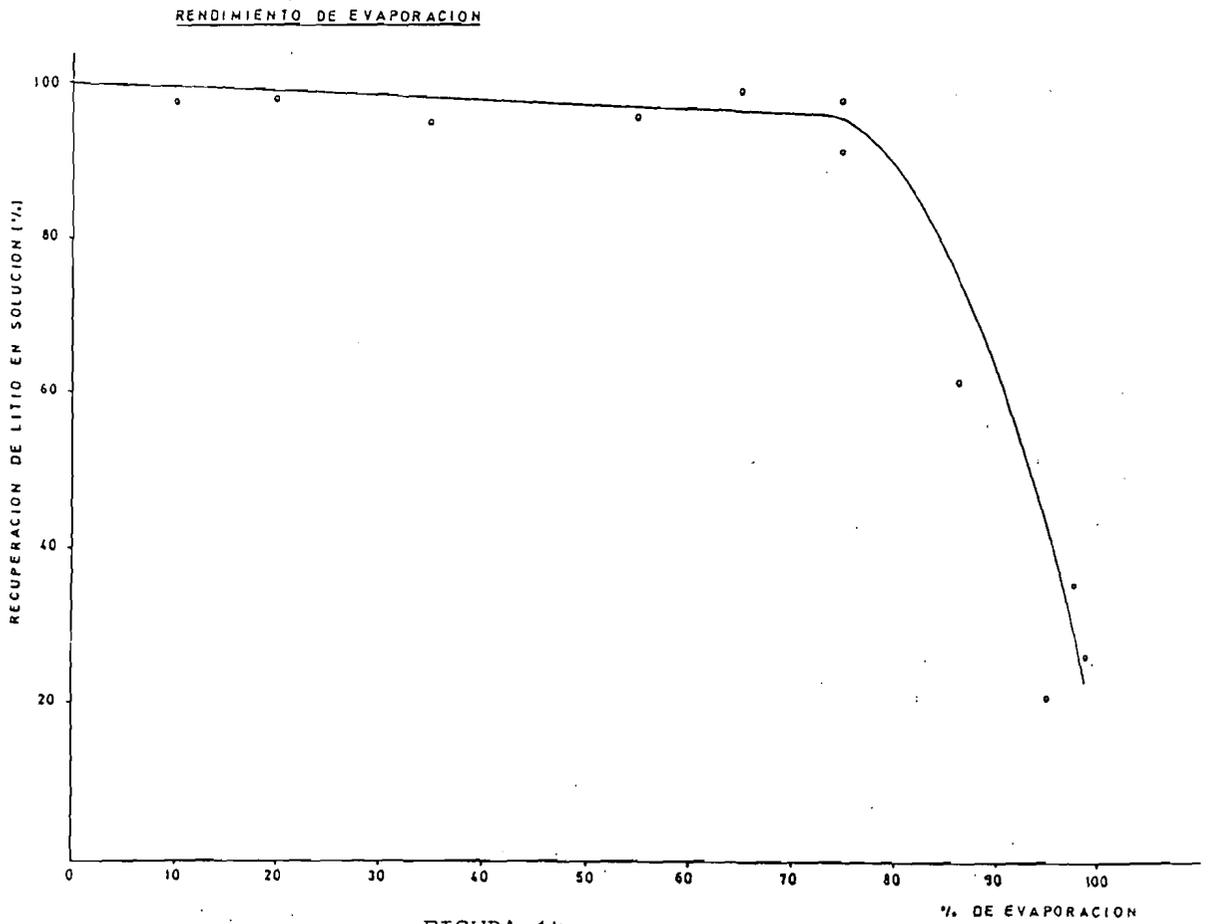


FIGURA 15

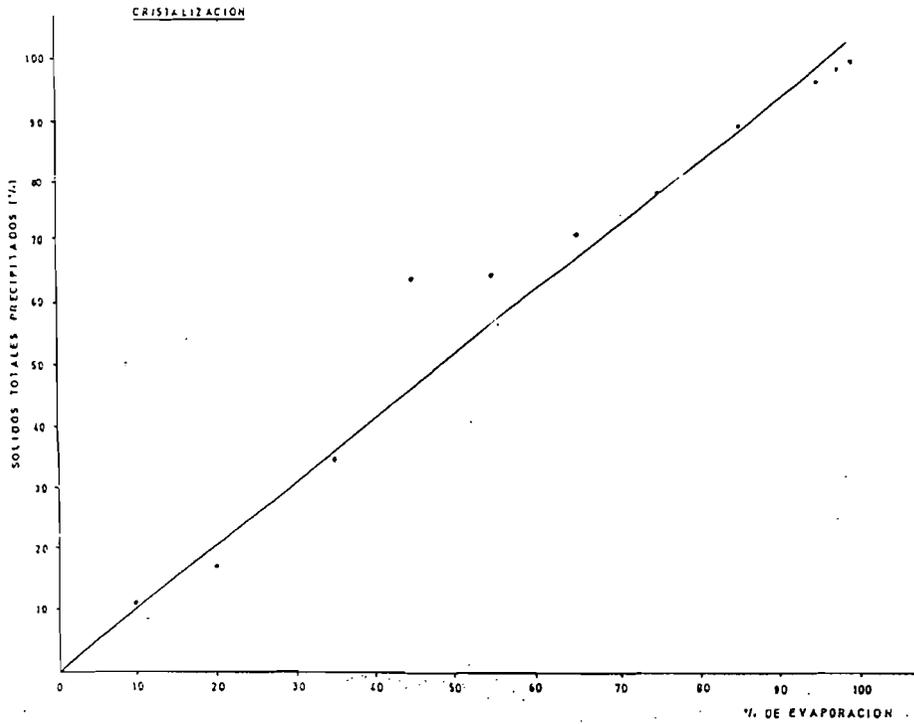


FIGURA 16

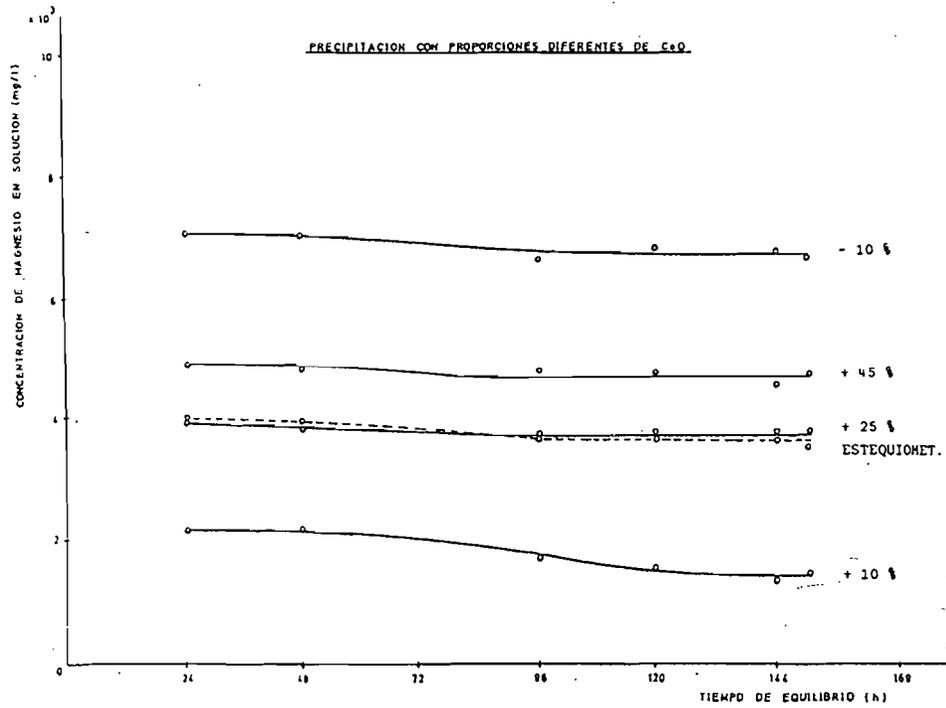
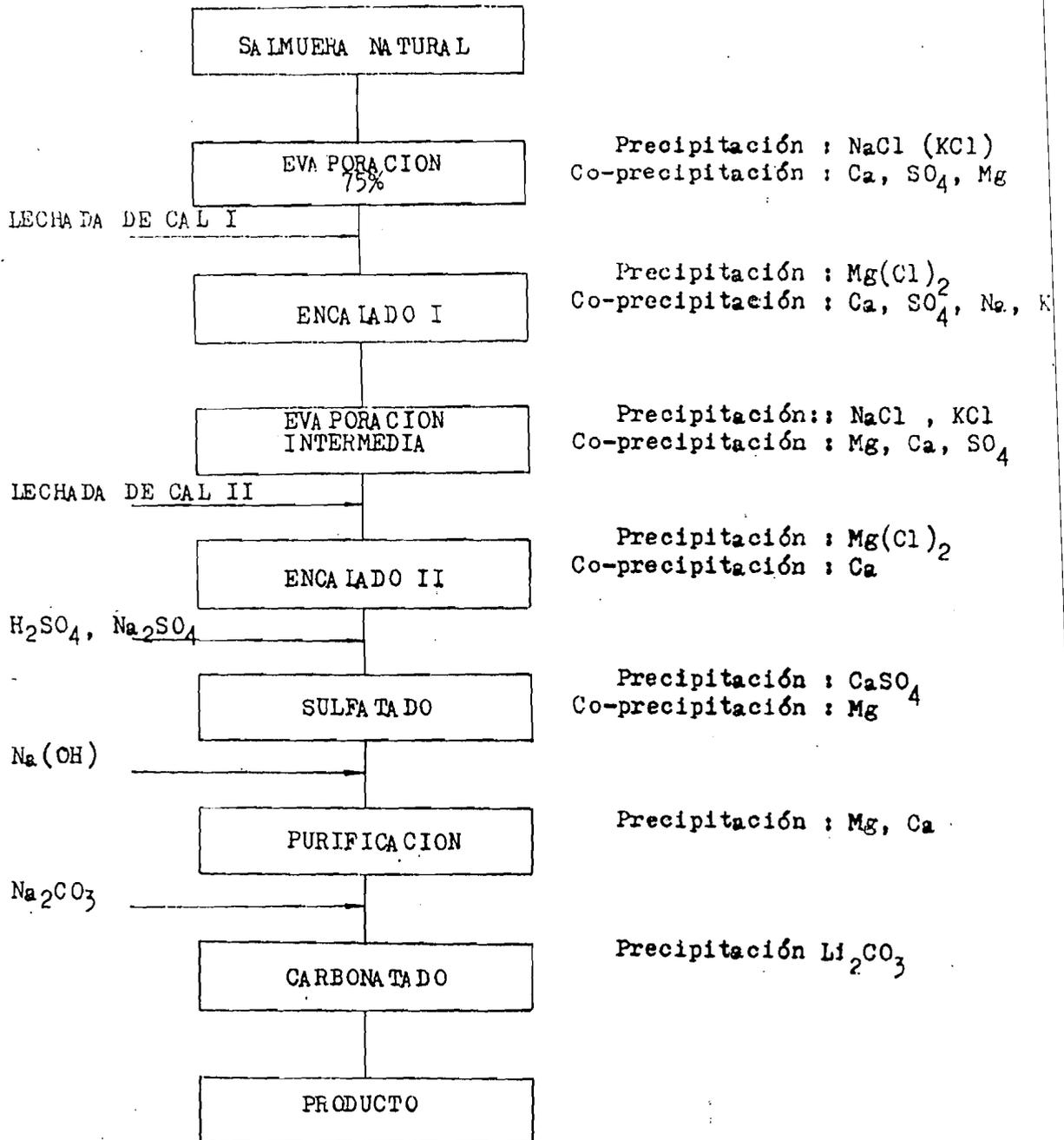


FIGURA 17

DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO

OBSERVACIONES



EVOLUCION DEL PAR MAGNESIO-LITIO

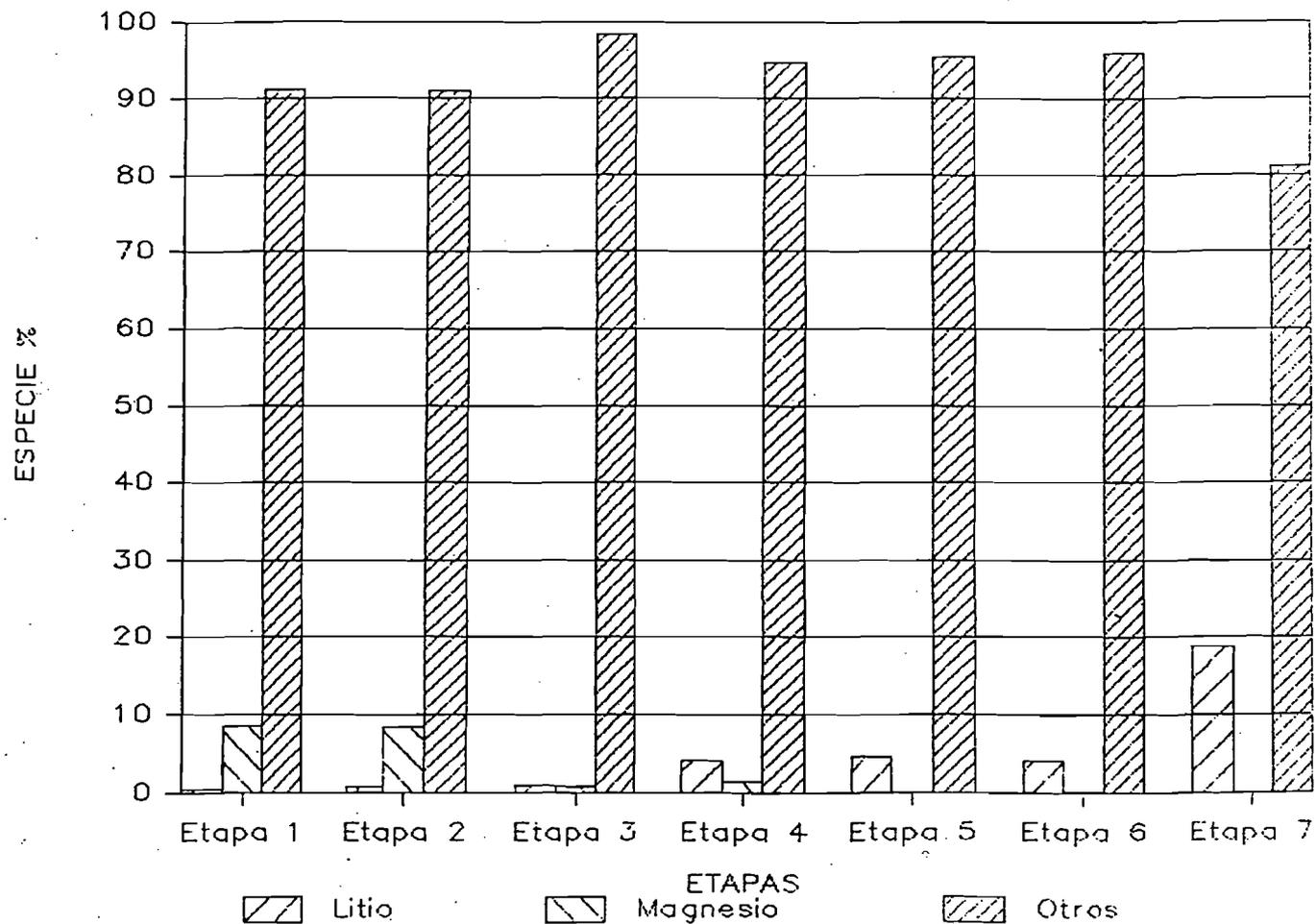


FIGURA 18

MAQUINARIA Y EQUIPO DE UNA SERIE DE PROCESO

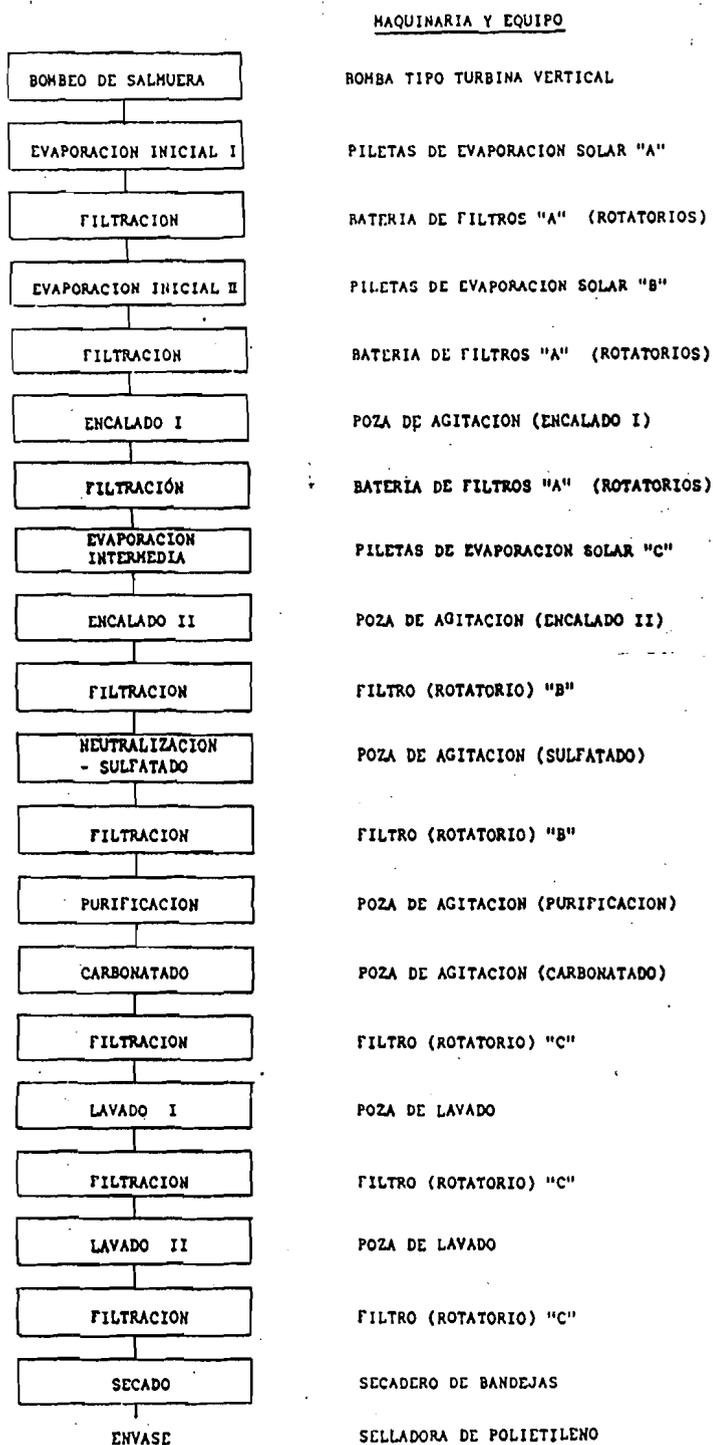
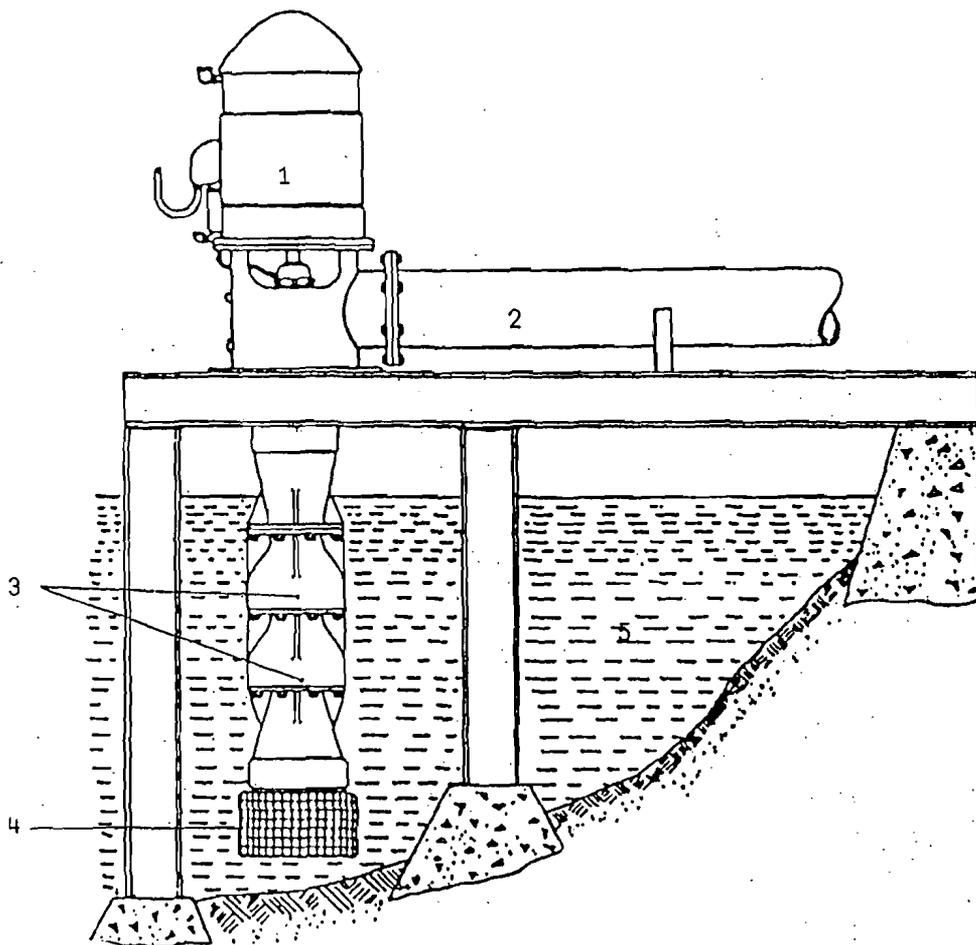


FIGURA 19

INSTALACION TIPICA DE UNA BOMBA TURBINA VERTICAL
PARA AGUAS DE SALIDA



- 1 BOMBA CON MOTOR INCORPORADO
- 2 TUBERIA DE DESAGUE
- 3 ELEMENTOS DE ASPIRACION (ACOPLES)
- 4 REJILLA DE PROTECCION
- 5 LAGUNA O FUENTE DE AGUA

FIGURA 22

FIGURA 23

VELOCIDAD DE EVAPORACION

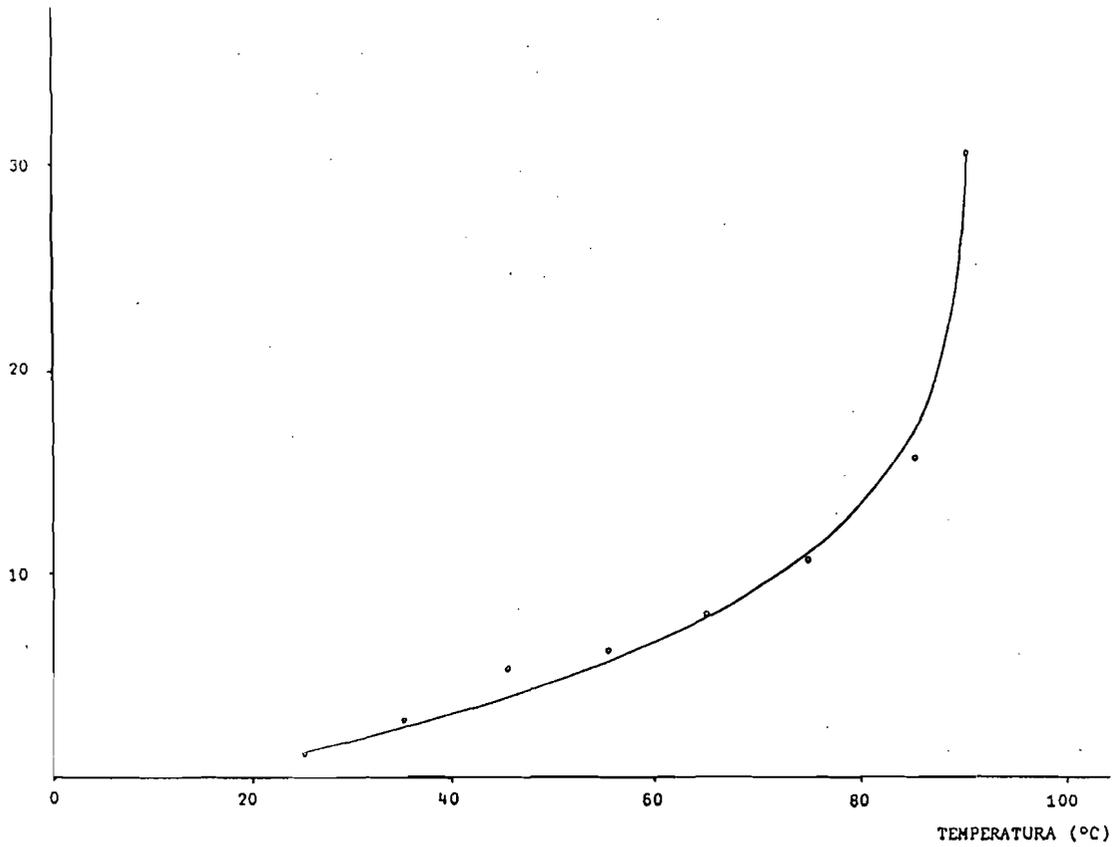
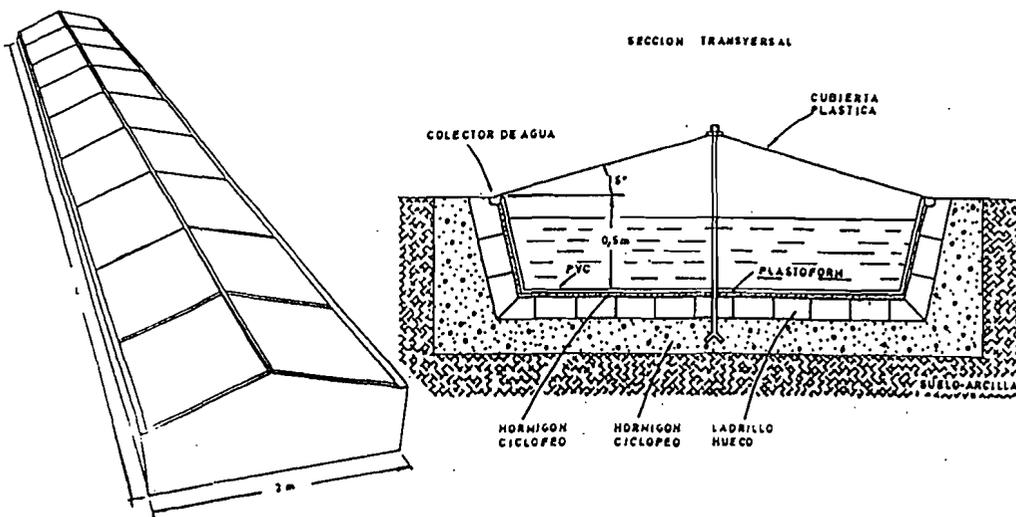


FIGURA 24

PILETA DE EVAPORACION SOLAR



L: 15, 45, 8.3

FIGURA 25

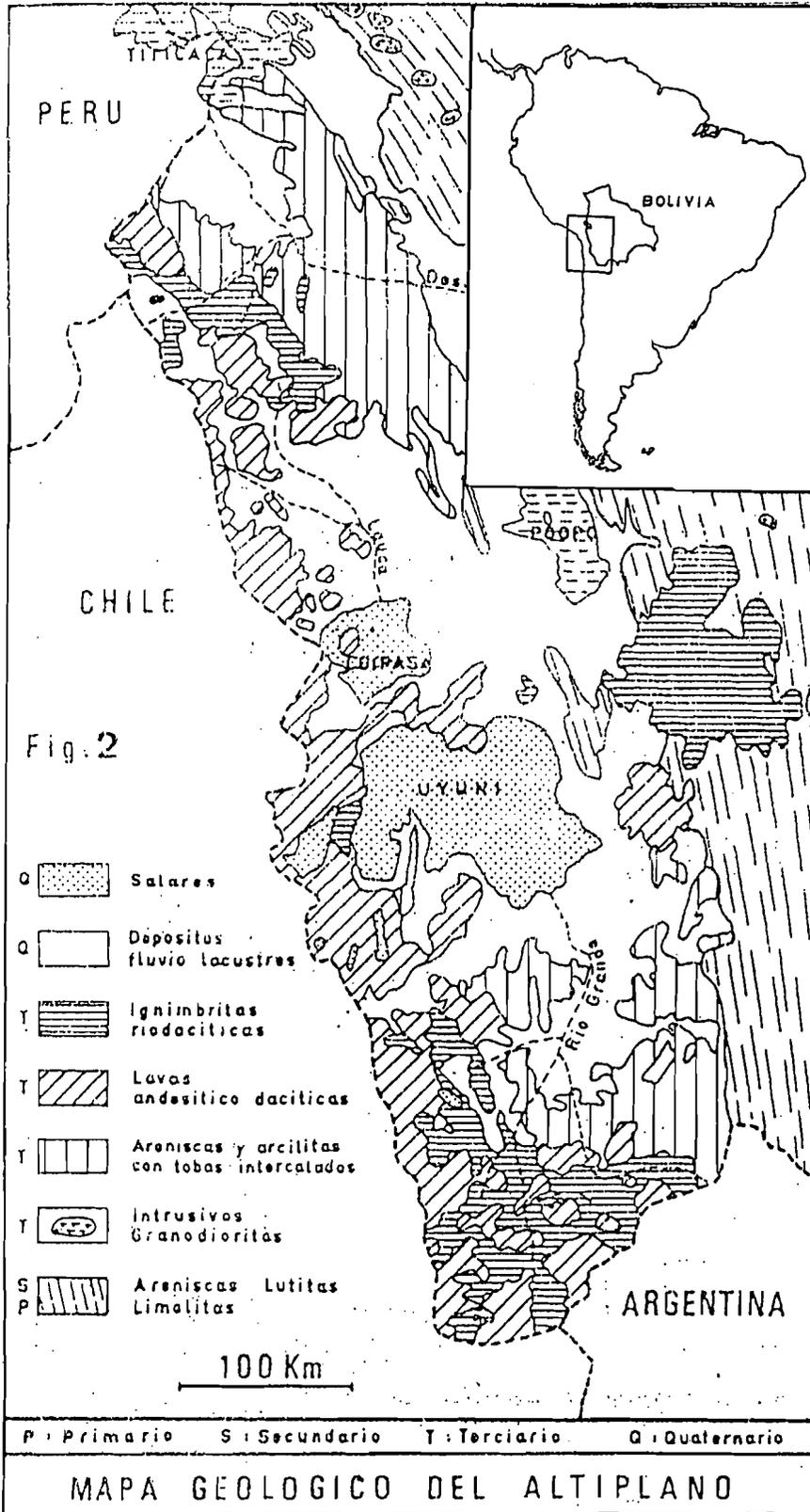


FIGURA 26

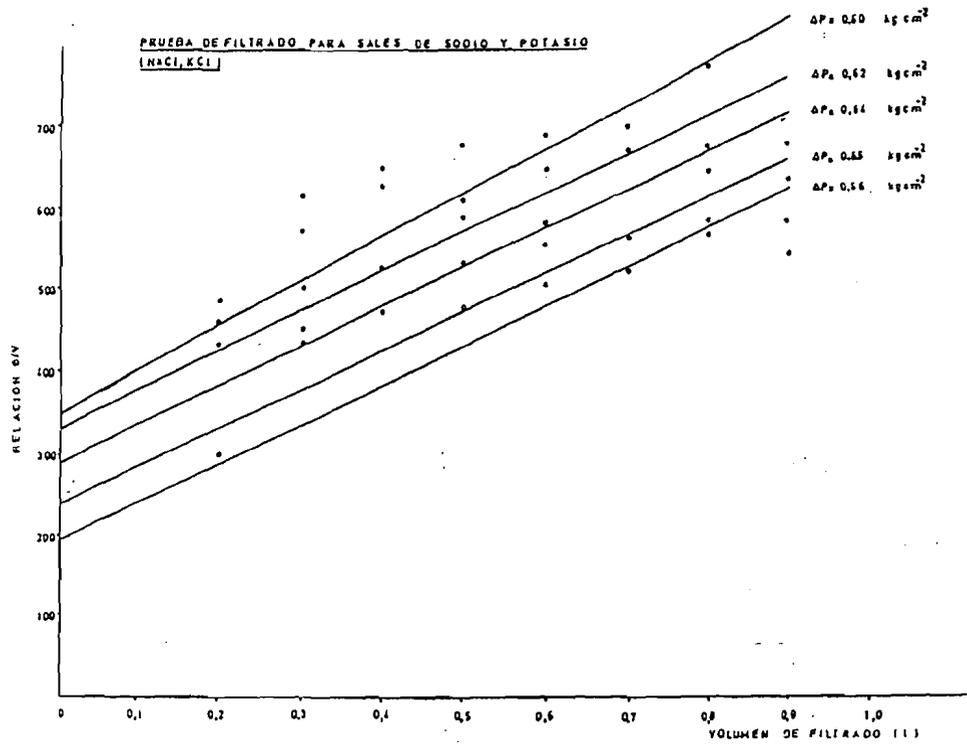


FIGURA 27

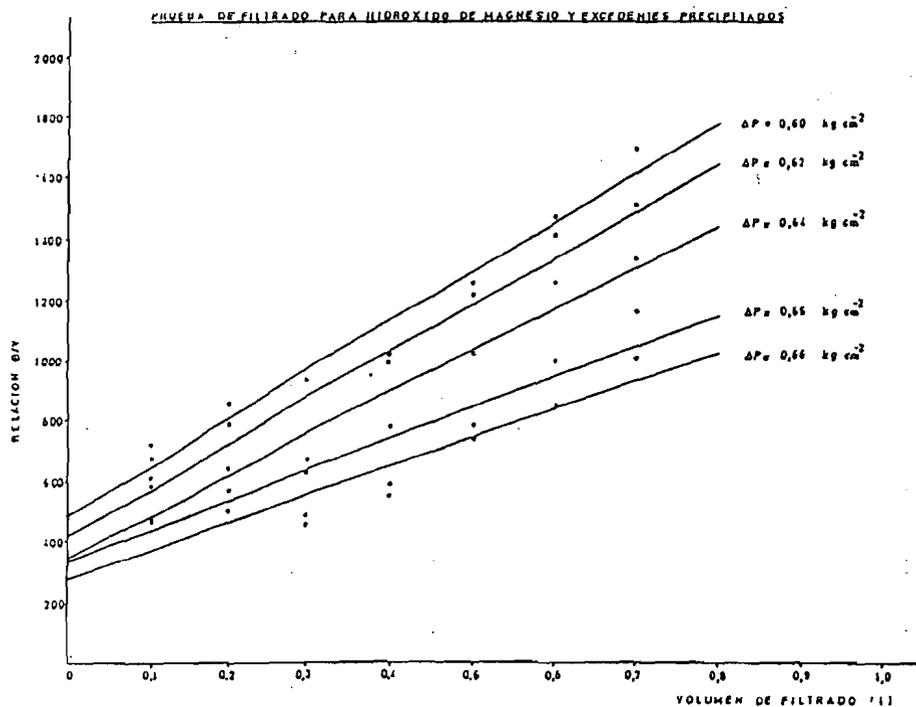


FIGURA 28

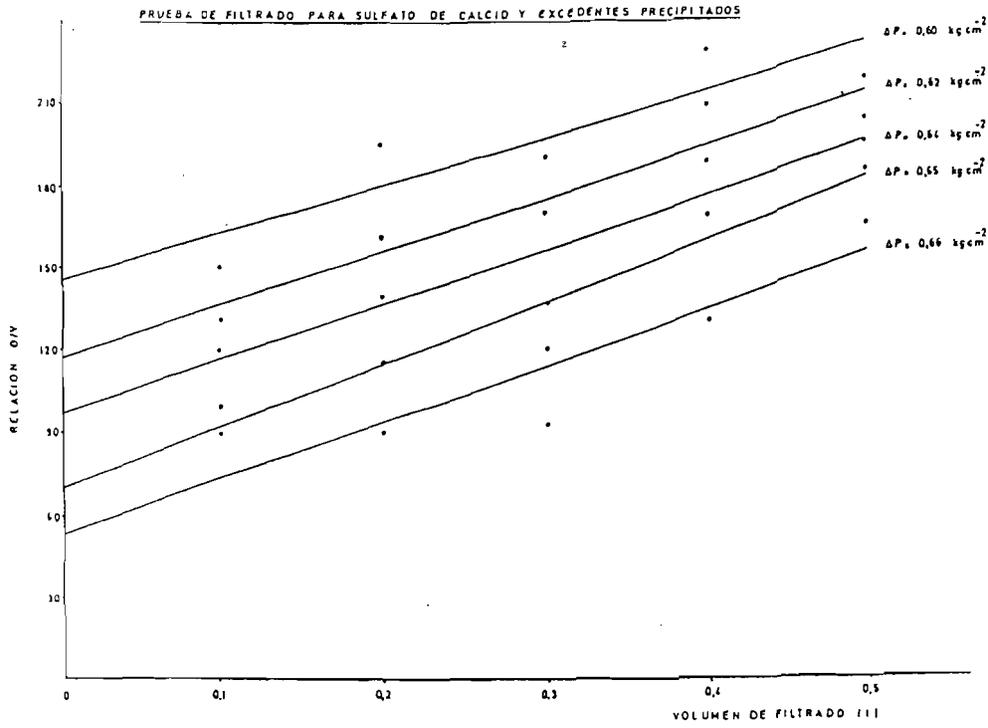
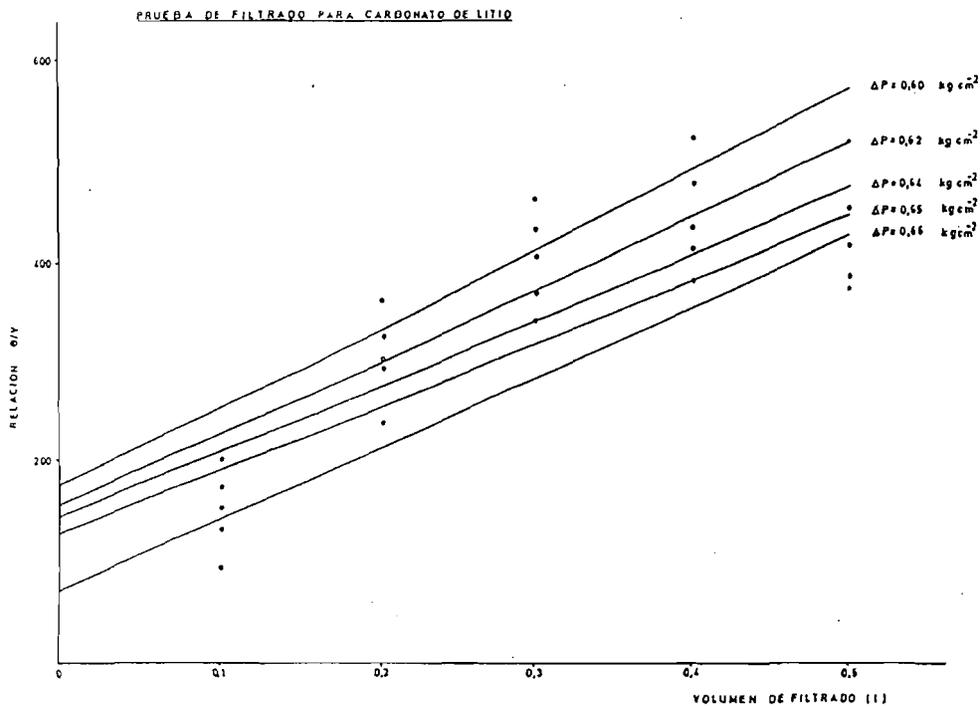
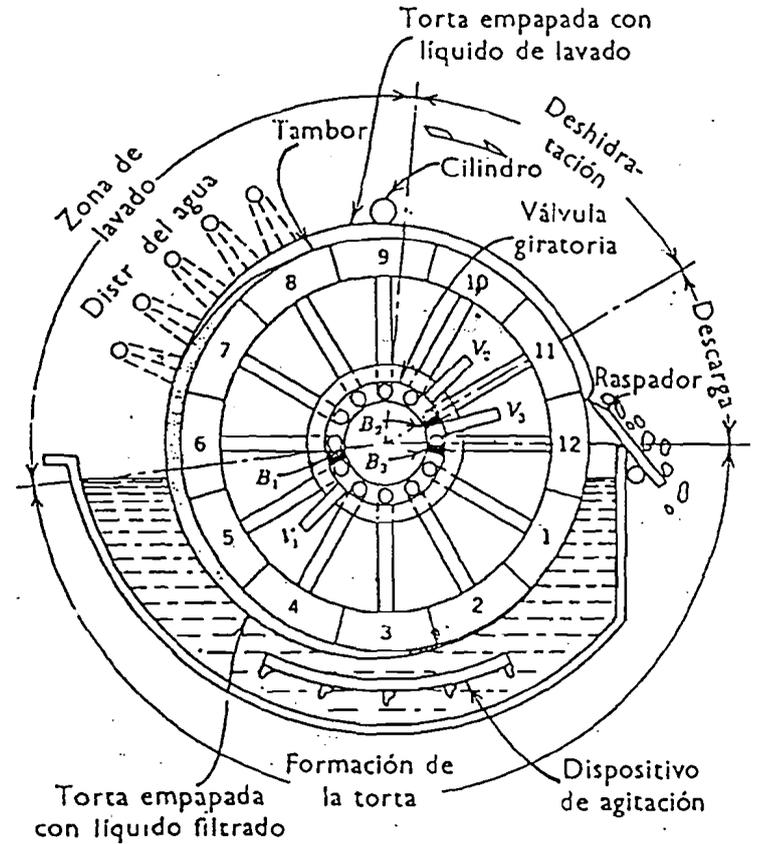
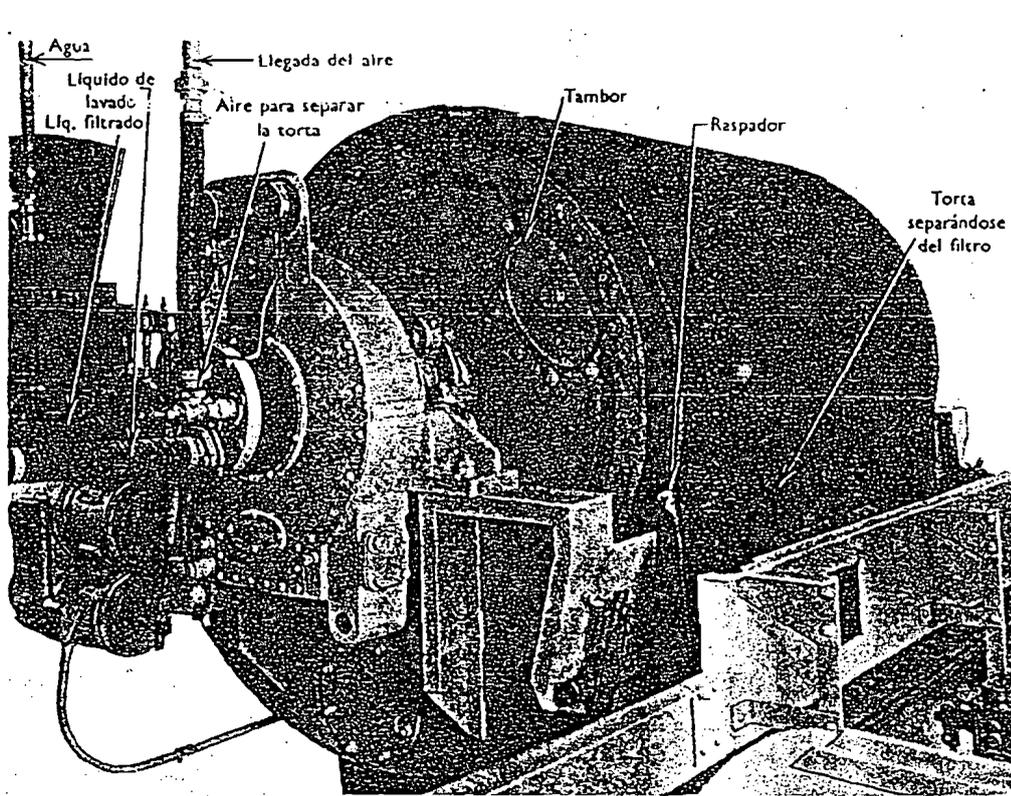


FIGURA 29



FILTRO ROTATORIO AL VACIO



CORTE

FIGURA 30

FIGURA 31

AGITADORES DE PALEIAS

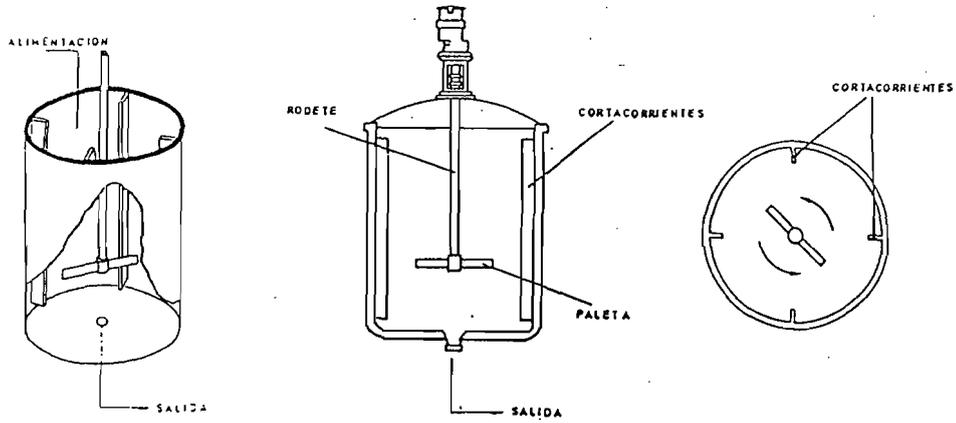
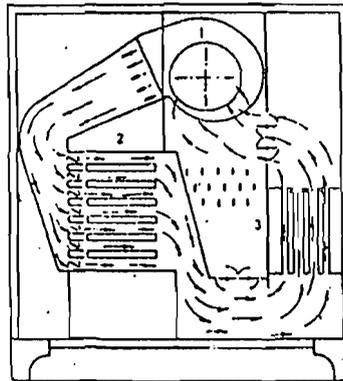


FIGURA 32

ESQUEMA DE UN SECADOR DE BANDEJAS**



REFERENCIAS:

- 1 PALETAS DE ASPIRACION E IMPULSION DE AIRE (VENTILADOR)
- 2 BANDEJAS
- 3 CALENTADOR DE AIRE
- 4 CAMARA DE TRANSPORTE DE AIRE
- SENTIDO DE FLUJO

PRUEBA DE SECADO PARA CARBONATO DE LITIO

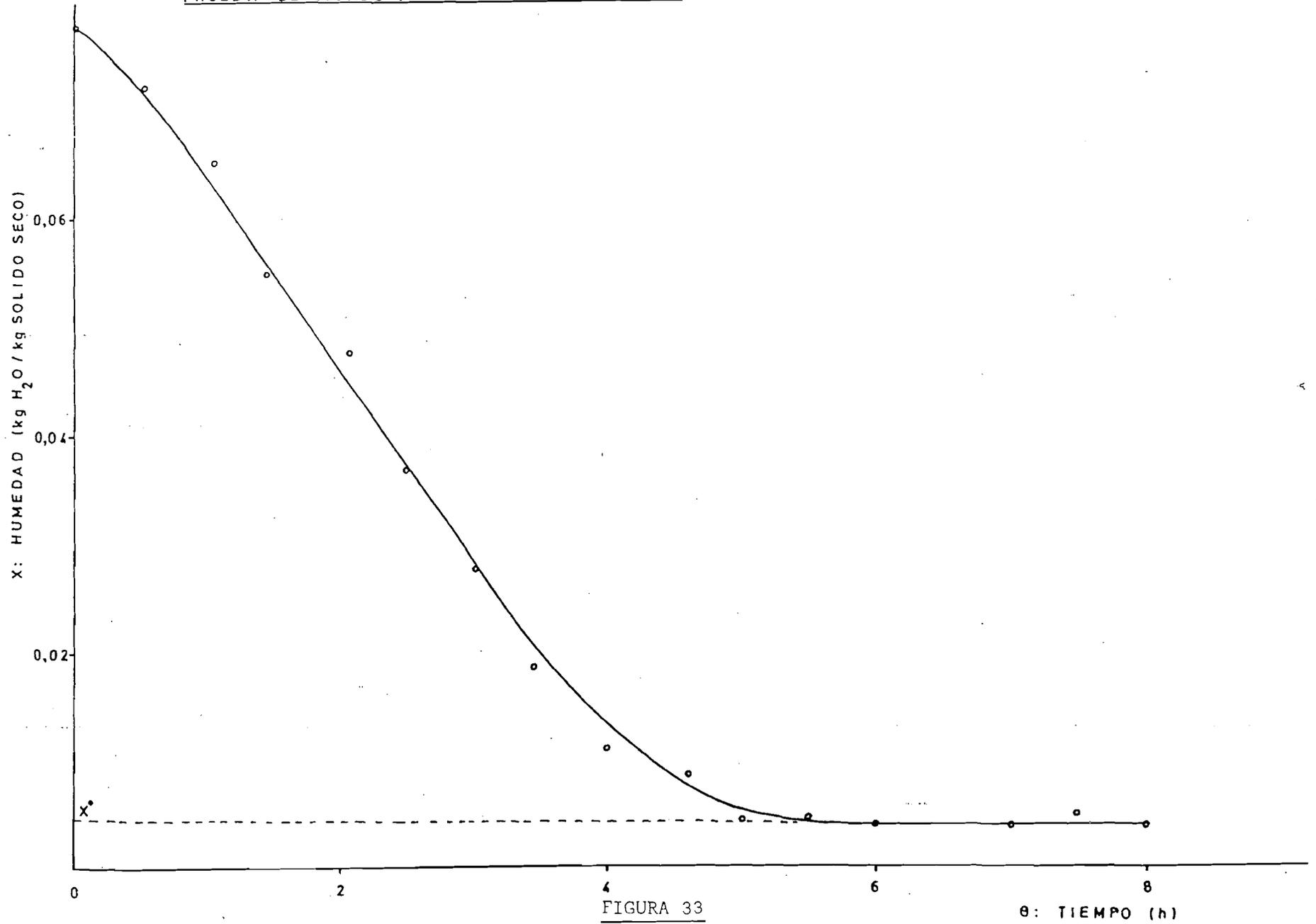
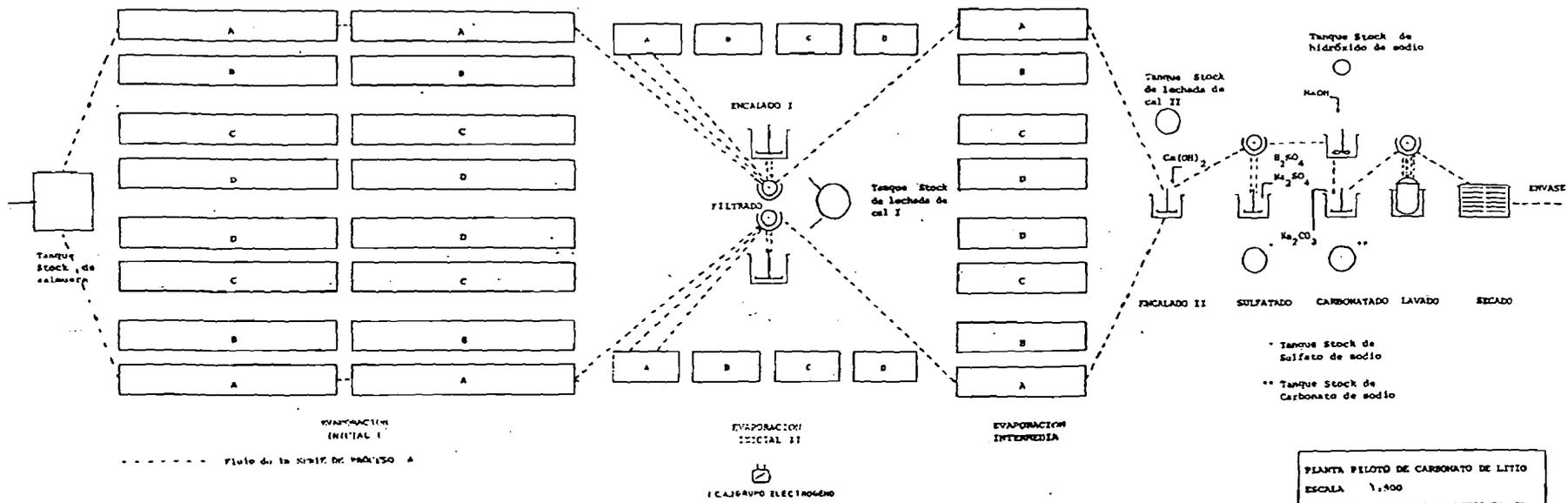


FIGURA 33

θ: TIEMPO (h)



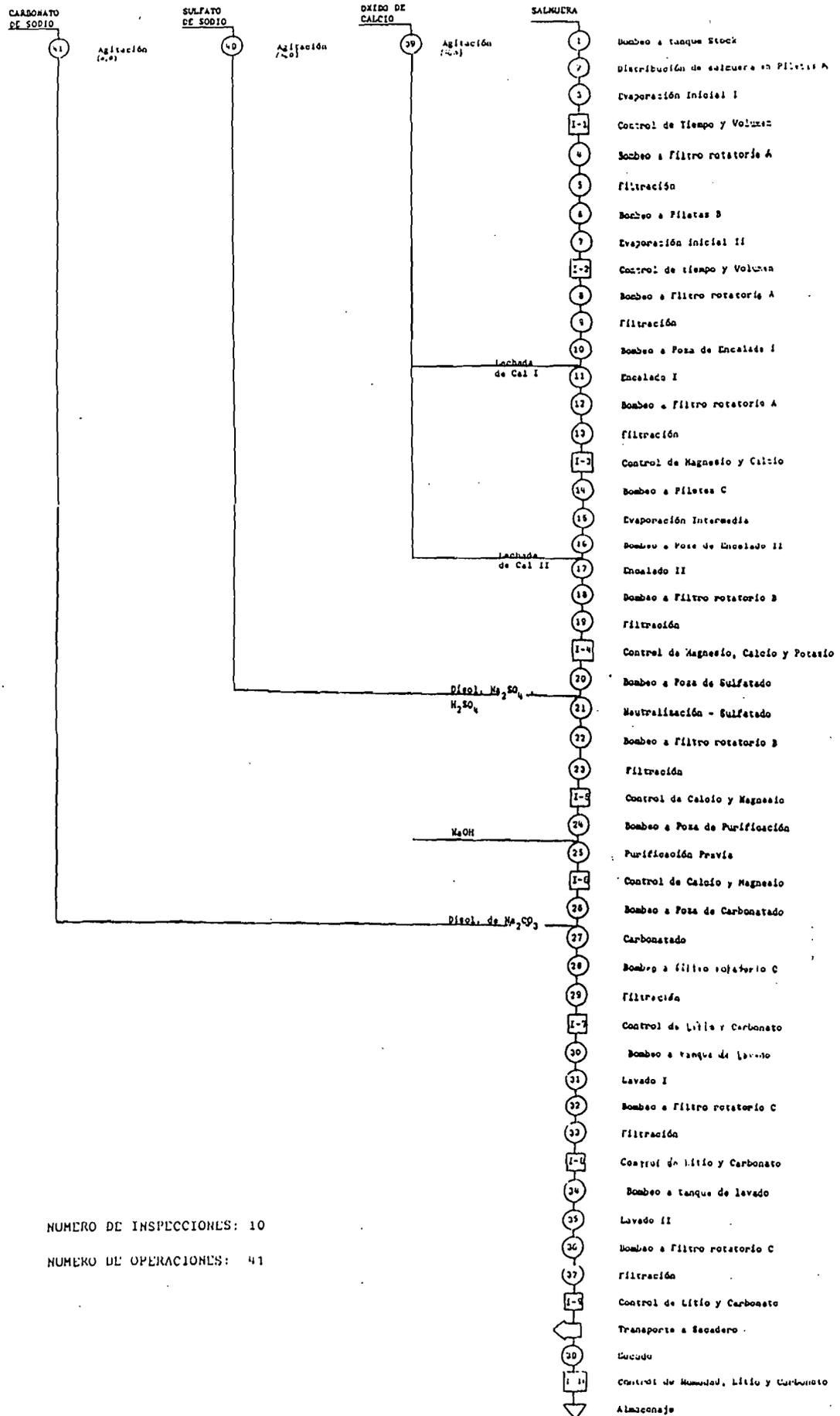
PLANTA PILOTO DE CARBONATO DE LITIO
 ESCALA 1:500
 PROYECTO: BENEFICIO DE LITIO EN EL
 SAJAR DE UYUNI - POTOSI
 PROYECTISTA: HERRANDO PALMA CARRASCO
 FECHA : La Paz, Mayo 16, 1987

DISTRIBUCION DE PLANTA

FIGURA 34

FIGURA 35

DIAGRAMA DE PROCESO - FLUJO DE OPERACIONES



NUMERO DE INSPECCIONES: 10
 NUMERO DE OPERACIONES: 41

A N E X O 2

T A B L A S

TABLA 1

PRUEBA DE EVAPORACION SALMUERA NATURAL

ETAPA	VOL. INICIAL (MAGMA) cm ³	VOL. FINAL (MAGMA) cm ³	VOL. EVAPORADO POR ETAPA (cm ³)	VOL. EVAPORADO TOTAL (cm ³)	EVAPORACION %	PRECIPITADO (g) (SOLIDO HUMEDO)	VOL. RESIDUAL (LIQUIDO) cm ³	DENSIDAD (g/cm ³)	pH
0	1 000	1 000	-	-	-	-	1 000	1,17	6,7
1	1 000	900	100	100	10,0	50,7	833,2	1,17	6,6
2	900	800	100	200	20,0	38,1	723,3	1,25	6,3
3	800	650	150	350	35,0	68,2	625,3	1,24	6,4
4	650	550	100	450	45,0	69,6	535,1	1,24	6,5
5	550	450	100	550	55,0	19,6	443,1	1,19	6,6
6	450	350	100	650	65,0	18,2	344,0	1,19	6,5
7	350	250	100	750	75,0	17,8	247,6	1,19	6,5
8	250	150	100	850	85,0	6,2	148,3	1,23	6,4
9	150	50	100	950	95,0	5,4	48,6	1,23	6,5
10	50	25	25	975	97,5	4,1	24,1	1,12	6,4
11	25	15	10	985	98,5	3,0	13,5	1,22	6,4

TABLA 2

RESULTADOS DE ANALISIS, EVAPORACION SALMUERA NATURAL

ETAPA	CATIONES										ANIONES						D	
	Li ⁺		Na ⁺		K ⁺		Ca ²⁺		Mg ²⁺		Cl ⁻		SO ₄ ²⁻		HCO ₃ ⁻			
	CONCENT. mg/l	% EN PESO	CONCENT. mg/l	% EN PESO	CONCENT. mg/l	% EN PESO	CONCENT. mg/l	% EN PESO	CONCENT. mg/l	% EN PESO	CONCENT. mg/l	% EN PESO	CONCENT. mg/l	% EN PESO	CONCENT. mg/l	% EN PESO		
0	513	0,14	113 200	31,57	16 000	4,52	291,4	0,08	12 500	3,63	194 505	54,93	16 480	4,65	45,2	0,01	556	0,16
1	547	0,16	111 500	32,14	13 698	3,94	228,0	0,07	12 663	3,64	193 285	55,53	15 510	4,46	40,0	0,01	534	0,15
2	627	0,17	115 511	31,71	19 488	5,35	61,0	0,02	15 392	4,23	195 723	53,74	16 970	4,66	41,0	0,01	538	0,15
3	739	0,21	90 400	25,54	24 000	6,78	71,0	0,02	17 098	4,83	195 418	55,49	24 752	6,99	39,0	0,01	538	0,15
4	824	0,35	32 900	14,40	29 069	12,49	47,0	0,02	19 627	8,44	119 335	51,20	29 116	12,51	37,0	0,02	680	0,25
5	1 112	0,43	31 068	12,30	32 366	12,64	73,0	0,03	20 253	7,91	152 433	59,51	18 173	7,10	36,0	0,01	618	0,23
6	1 456	0,53	26 552	9,75	43 873	16,11	45,0	0,02	22 019	8,08	174 009	63,98	3 357	1,23	33,0	0,01	759	0,25
7	2 019	0,71	27 770	9,71	63 565	22,46	--	--	23 578	8,24	165 667	57,92	2 495	0,87	34,0	0,01	802	0,28
8	2 087	0,85	14 608	5,89	51 933	20,93	--	--	23 228	9,36	153 669	61,93	2 122	0,85	30,0	0,01	852	0,33
9	2 090	0,86	14 035	5,75	49 480	20,28	--	--	23 164	9,49	153 828	63,05	454	0,19	30,0	0,01	902	0,37
10	7 300	4,62	13 431	8,47	8 374	5,16	--	--	59 100	37,29	70 000	44,16	400	0,25	--	--	--	--
11	9 020	6,53	11 540	5,79	4 962	2,49	--	--	107 150	53,80	66 158	33,20	330	0,17	--	--	--	--

TABLA 4

SOLUBILIDADES DEL SISTEMA

NaCl - KCl - MgCl₂ - LiCl - H₂O

NaCl	KCl	MgCl ₂	LiCl	OBSERVACIONES
302	0	-	-	PTO. DE SATURACION : NaCl - H ₂ O
277	75	-	-	
268	149	-	-	PTO. DE SATURACION : NaCl - KCl - H ₂ O
263	155	-	-	
246	115	10	-	
228	110	30	-	
209	104	50	-	
190	98	70	-	
172	93	90	-	
153	88	110	-	
136	83	130	-	
119	78	150	-	
104	73	170	-	
89	60	190	-	
76	63	210	-	
64	58	230	-	
52	53	250	-	
42	48	270	-	
32	43	290	-	
23	30	310	-	
17	35	330	-	
15	12	405	-	
16	13	460	-	
13,2	10,0	..	15,0	PTO. DE SATURACION : NaCl - KCl - MgCl ₂ - H ₂ O
..	..	448	16,7	
..	..	470	44,0	
5,5	46,0	
..	5,7	..	75,0	
3,1	4,6	396	113,0	
3,1	..	368	146,0	
3,0	1,49	..	187,0	
2,7	..	307	205,0	
2,7	1,31	..	233,0	
2,4	1,26	..	250,0	
2,5	1,43	..	265,0	
2,5	..	245	292,0	
2,1	320,0	
2,2	..	212	329,0	
1,9	1,80	..	350,0	
2,0	359,0	
..	1,90	..	373,0	
2,0	..	181	381,0	
2,2	..	174	387,0	
2,4	..	164	396,0	
2,7	..	170	402,0	
2,5	..	166	419,0	
2,7	2,30	163	..	

SOLUBILIDADES EN g/l 15°C

TABLA 5

CONCENTRACION DE CATIONES COMO CLORUROS

RESULTADOS EXPERIMENTALES

(EN g/l)

ETAPA	NaCl	KCl	MgCl ₂	LiCl	OBSERVACIONES °
0	287,8	30,5	49,0	3,1	Saturada en NaCl; insaturada en KCl, MgCl ₂ y LiCl.
1	282,2	26,1	49,6	3,3	
2	293,6	37,2	60,3	3,8	
3	229,8	45,8	67,0	4,5	
4	83,6	55,4	76,9	5,0	Saturada en NaCl, KCl; insaturada en MgCl ₂ y LiCl.
5	78,0	61,7	79,3	6,8	
6	67,5	83,7	86,3	8,9	
7	70,6	121,2	92,3	12,3	
8	37,1	99,0	91,0	12,7	
9	35,7	94,3	90,7	12,6	
10	34,1	15,6	231,5	44,6	
11	29,3	9,5	419,7	55,1	Saturada en NaCl, KCl, MgCl ₂ ; insaturada en LiCl.

° De acuerdo a las solubilidades del sistema

TABLA 6

RECUPERACION DE ESPECIES EN LAS FASES SOLIDA Y LIQUIDA CONFORME SE EVAPORA

ETAPA	EVAPORACION %	(CM 4)															
		Li ⁺		Na ⁺		K ⁺		Ca ²⁺		Mg ²⁺		Cl ⁻		SO ₄ ²⁻		HCO ₃ ⁻	
		SOLIDO	LIQUIDO	SOLIDO	LIQUIDO	SOLIDO	LIQUIDO	SOLIDO	LIQUIDO	SOLIDO	LIQUIDO	SOLIDO	LIQUIDO	SOLIDO	LIQUIDO	SOLIDO	LIQUIDO
0	0	-	100	-	100	-	100	-	100	-	100	-	100	-	100	-	100
1	10	5,8	94,2	13,0	87,0	24,4	75,6	30,9	69,1	10,5	89,5	12,2	87,8	16,9	83,1	21,8	78,2
2	20	3,6	96,4	19,5	80,5	4,0	96,0	83,5	16,5	2,9	97,1	20,7	79,3	18,8	81,2	26,5	73,5
3	35	9,8	90,2	50,0	50,0	6,1	93,9	84,7	15,3	14,3	85,7	16,8	83,2	5,9	94,1	46,0	54,0
4	45	24,1	75,9	84,4	15,6	2,8	97,2	91,4	8,6	18,0	81,0	17,2	82,8	5,5	94,5	58,2	41,8
5	55	4,0	96,0	83,8	16,2	7,0	93,0	88,3	11,7	28,2	71,8	27,5	72,5	47,6	52,4	64,7	35,3
6	65	2,4	97,6	91,9	8,1	5,7	94,3	94,7	5,3	39,4	60,6	39,4	60,6	93,0	7,0	74,9	25,1
7	75	2,6	97,4	92,9	6,1	1,6	98,4	100,0	0,0	72,4	27,6	72,4	27,6	72,4	27,6	72,4	27,6
8	85	11,7	88,3	98,1	1,9	51,9	48,1	100,0	0,0	72,4	27,6	72,4	27,6	72,4	27,6	72,4	27,6
9	95	80,2	19,8	99,4	0,6	85,0	15,0	100,0	0,0	91,0	9,0	91,0	9,0	99,9	0,1	99,9	0,1
10	97,5	65,7	34,3	99,7	0,3	98,8	1,2	100,0	0,0	88,6	11,4	99,1	0,9	99,9	0,1	100,0	0,0
11	98,5	25,6	74,4	99,9	0,1	99,6	0,4	100,0	0,0	88,1	11,9	99,5	0,5	100,0	0,0	100,0	0,0

***** LIMITE DE EVAPORACION PERMISIBLE

TABLA 8

RECUPERACION DE ESPECIES EN LAS FASES SOLIDA Y LIQUIDA

PRECIPITACION CON LECHADA DE CAL I

(CM 4)

VASO	VOLUMEN FINAL cm ³	(CM 4)															
		Li ⁺		Na ⁺		K ⁺		Ca ²⁺		Mg ²⁺		Cl ⁻		SO ₄ ²⁻		HCO ₃ ⁻	
		SOLIDO	LIQUIDO	SOLIDO	LIQUIDO	SOLIDO	LIQUIDO	SOLIDO	LIQUIDO	SOLIDO	LIQUIDO	SOLIDO	LIQUIDO	SOLIDO	LIQUIDO	SOLIDO	LIQUIDO
1	500	2,0	98,0	95,2	4,8	5,4	94,6	98,9	1,1	86,8	13,2	86,8	15,5	84,5	1,7	83,3	16,7
		0,4	99,6	21,6	78,4	4,2	95,8	98,9	1,1	71,9	28,1	27,4	72,6	54,5	45,5	11,7	88,3
2	400	2,1	97,9	95,2	4,8	5,4	94,6	99,5	0,5	87,7	7,3	85,4	17,4	82,6	1,7	83,3	16,7
		0,5	99,5	22,0	78,0	4,8	95,2	99,5	0,5	84,5	15,5	32,3	67,7	55,7	44,3	11,7	88,3
3	100	2,0	98,0	95,2	4,8	5,4	94,6	99,4	0,7	87,2	2,8	15,8	14,2	85,8	1,6	82,9	17,1
		0,4	99,6	21,8	78,2	4,2	95,8	99,3	0,7	94,0	6,0	33,3	66,7	56,7	43,3	7,1	92,9
4	600	3,1	96,9	95,2	4,8	5,4	94,6	98,7	0,3	82,6	7,4	85,9	14,1	85,9	1,6	83,3	16,7
		1,5	98,5	21,8	78,2	4,8	95,2	98,7	0,3	84,4	15,6	23,5	76,5	57,9	42,1	11,2	88,8
5	500	2,4	97,6	95,2	4,8	5,4	94,6	99,3	0,7	90,6	9,4	65,3	14,7	85,3	1,6	83,3	16,7
		0,8	98,2	22,5	77,5	4,8	95,2	99,3	0,7	80,1	19,9	10,3	89,7	57,6	42,4	11,2	88,8

-- % Precipitación Global de la especie
 -- % Precipitación relativa a la etapa anterior

TABLA 9

PRECIPITACION CON LECHADA DE CAL I

BALANCE

MASA INICIAL:
 M.I. = 615 g

VASO	VOL. INICIAL SALMUERA * cm ³	VOL. FINAL MAGMA ** cm ³	DENSIDAD MAGMA g/cm ³	MASA TOTAL MAGMA g	SOLIDO HUMEDO PRECIP. (SH.) g	% del Total	SOLIDO SECO PRECIPITADO g	% del Total	RETENCION MEDIA g salm./ 100 g SH.	MASA LIQUIDO RESIDUAL g	% de Total	MASA DE CaO ARADIDA g	% de M.I.	EXCESO S/ESTEQU. %	pH
1	500	610	1,23	750	34,9	4,65	24,4	3,25	30,2	715,1	95,35	24,5	4,0	-10	9,3
2	500	610	1,23	750	41,7	5,56	29,1	3,88	30,2	708,3	94,40	27,2	4,4	0	9,3
3	500	610	1,23	750	50,3	6,70	35,1	4,68	30,2	699,7	93,30	29,9	4,8	+10	9,3
4	500	610	1,23	750	42,8	5,70	29,8	3,97	30,2	707,2	94,30	34,0	5,5	+25	9,3
5	500	610	1,23	750	39,0	5,20	27,2	3,63	30,2	711,0	94,80	39,4	6,4	+45	9,3

* Salmuera concentrada etapa 7

** Mezcla sólido - líquido

* RESULTADOS DE ANALISIS

VASO	Li ⁺	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	AT	STD
1	1 664	18 015	50 131	356	5 483	99 516	940	25	106,4
2	1 663	17 922	50 103	210	3 033	92 780	915	25	100,7
3	1 664	17 951	50 132	312	1 173	91 409	859	26	98,8
4	1 646	17 950	50 115	149	3 054	91 099	869	25	99,6
5	1 658	17 810	50 114	458	3 891	95 522	875	25	102,9

* En mg/l (Volumen Medio de salmuera : 0,604 l)
 AT Alcalinidad Total (HCO₃⁻)

* EVAPORACION INTERMEDIA

MASA INICIAL :
M.I. = 684 g

BALANCE

VASO	VOL. INICIAL SALMUERA ** cm ³	VOL. FINAL MAGMA cm ³	DENSIDAD MAGMA g/cm ³	MASA TOTAL MAGMA g	SOLIDO HUMEDO PRECIP. (SH.)		SOLIDO SECO PRECIPITADO		RETENCION MEDIA g salm. / 100 g SH.	MASA LIQUIDO RESIDUAL		pH
					g	% del Total	g	% del Total		g	% del Total	
1	570	340	1,20	408	143,2	35,1	102,7	25,2	28,3	264,8	64,9	8,9
2	570	340	1,20	408	143,6	35,2	102,9	25,2	28,3	264,4	64,8	8,8
3	570	340	1,20	408	134,6	33,0	96,5	23,7	28,3	273,4	67,0	9,0
4	570	340	1,20	408	142,8	35,0	102,4	25,1	28,3	265,2	65,0	9,0
5	570	340	1,20	408	138,7	34,0	98,9	24,2	28,3	269,3	66,0	9,0

* 40% del volumen tratado

** Salmuera concentrada Lechada de Cal I

* RESULTADOS DE ANALISIS

VASO	Li ⁺	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	AT	STD
1	3 566	15 239	9 833	421	5 567	69 438	399	0	26,2
2	3 842	15 116	12 127	328	3 080	65 299	468	8	25,2
3	3 838	15 149	10 867	414	1 112	61 667	323	0	23,5
4	3 516	15 822	10 167	315	3 188	64 572	480	0	24,6
5	3 764	15 243	10 457	438	3 791	67 267	414	7	25,4

* En mg/l (Volumen Medio de salmuera : 0,251 l)
AT Alcalinidad Total (HCO₃⁻)

TABLA 11

TABLA 12

RECUPERACION DE ESPECIES EN LAS FASES SOLIDA Y LIQUIDA
EVAPORACION INTERMEDIA
(EN %)

VASO	VOLUMEN FINAL cm ³	Li ⁺		Na ⁺		K ⁺		Ca ²⁺		Mg ²⁺		Cl ⁻		SO ₄ ²⁻		HCO ₃ ⁻	
		SOLIDO LIQUIDO	SOLIDO LIQUIDO	SOLIDO LIQUIDO	SOLIDO LIQUIDO	SOLIDO LIQUIDO	SOLIDO LIQUIDO	SOLIDO LIQUIDO	SOLIDO LIQUIDO	SOLIDO LIQUIDO	SOLIDO LIQUIDO	SOLIDO LIQUIDO	SOLIDO LIQUIDO	SOLIDO LIQUIDO	SOLIDO LIQUIDO	SOLIDO LIQUIDO	
1	251	12,3	87,7	98,3	1,7	92,3	7,7	89,4	0,6	94,4	5,6	95,5	4,5	99,7	0,3	100,0	0,0
		10,4	89,6	64,8	25,2	91,8	8,2	50,8	49,2	57,8	42,9	71,0	29,0	82,4	17,6	100,0	0,0
2	251	6,0	94,0	93,3	1,7	90,5	9,5	99,7	0,3	96,1	3,1	95,8	4,7	99,6	0,4	97,8	1,2
		4,0	96,0	65,0	35,0	89,9	10,1	35,1	64,9	57,1	43,2	70,8	29,2	78,7	21,3	86,7	13,3
3	251	4,9	95,1	58,3	1,7	91,5	8,5	89,6	0,4	98,9	1,1	96,0	4,0	99,8	0,2	100,0	0,0
		2,5	97,1	54,9	35,1	91,0	9,0	44,8	55,1	60,6	39,4	72,0	28,0	84,4	15,6	100,0	0,0
4	251	11,5	88,5	58,2	1,6	92,0	1,6	99,8	0,2	96,4	3,2	95,6	4,2	99,6	0,4	100,0	0,0
		8,2	91,3	63,4	36,1	91,6	8,4	12,1	87,9	56,6	43,4	70,5	29,5	77,0	23,0	100,0	0,0
5	251	7,5	92,1	58,2	1,7	91,8	8,2	99,7	0,3	96,2	3,8	95,7	4,2	99,7	0,3	98,1	1,9
		5,7	94,3	54,4	35,6	91,3	8,7	60,3	39,7	59,5	40,5	70,7	29,3	80,3	19,7	89,4	10,6

-- % Precipitación Global de la especie
-- % Precipitación relativa a la etapa anterior

TABLA 13

PRECIPITACION CON LECHADA DE CAL II
BALANCE

MASA INICIAL:
M.I. = 266 g

VASO	VOL. INICIAL SALMUERA # cm ³	VOL. FINAL MAGMA cm ³	DENSIDAD MAGMA g/cm ³	MASA TOTAL MAGMA g	SOLIDO HUMEDO PRECIP. (SH.)		SOLIDO SECO PRECIPITADO		RETENCION MEDIA g salm./100 g SH.	MASA LIQUIDO RESIDUAL		MASA DE CaO AÑADIDA		EXCESO S/ESTEQU. %	pH
					g	% del Total	g	% del Total		g	% del Total	g	% de M.I.		
1	225	240	1,18	283	5,38	1,90	3,8	1,34	30,2	277,6	98,1	3,18	1,41	+10	9,3
2	225	240	1,18	283	3,68	1,30	2,6	0,92	30,2	279,3	98,7	1,76	0,78	+10	9,3
3	225	240	1,18	283	2,55	0,90	1,8	0,64	30,2	280,5	99,1	0,63	0,28	+10	9,3
4	225	240	1,18	283	3,11	1,10	2,2	0,78	30,2	279,9	98,9	1,82	0,81	+10	9,3
5	225	240	1,18	283	4,25	1,50	3,0	1,06	30,2	278,8	98,5	2,16	0,96	+10	9,3

* Salmuera concentrada Evaporacion Intermedia

* RESULTADOS DE ANALISIS

VASO	Li ⁺	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	AT	STD
1	3 337	14 307	9 218	442	418	53 962	318	0	21,9
2	3 581	14 195	11 318	393	196	53 188	438	?	22,2
3	3 580	14 217	10 105	401	42	51 790	303	0	21,5
4	3 341	14 843	9 502	416	211	53 906	454	0	22,1
5	3 375	14 281	9 790	435	238	54 988	389	0	22,3

* En mg/l (Volumen Medio de salmuera : 0,267 l)
AT Alcalinidad Total (HCO₃)

TABLA 14

RECUPERACION DE ESPECIES EN LAS FASES SOLIDA Y LIQUIDA
PRECIPITACION CON LECHAMA DE CAL II
(EN %)

VASO	VOLUMEN FINAL cm ³	Li ⁺		Na ⁺		K ⁺		Ca ²⁺		Mg ²⁺		Cl ⁻		SO ₄ ²⁻		HCO ₃ ⁻	
		SOLIDO LIQUIDO	LIQUIDO	SOLIDO LIQUIDO	LIQUIDO	SOLIDO LIQUIDO	LIQUIDO	SOLIDO LIQUIDO	LIQUIDO	SOLIDO LIQUIDO	LIQUIDO	SOLIDO LIQUIDO	LIQUIDO	SOLIDO LIQUIDO	LIQUIDO	SOLIDO LIQUIDO	LIQUIDO
1	267	13,2	86,8	98,3	1,7	97,3	7,7	99,4	0,6	99,6	0,4	96,3	3,7	99,7	0,3	100,0	0
		1,0	99,0	0,1	99,9	0,3	99,7	99,4	0,6	92,0	8,0	17,3	97,7	15,2	84,8	--	--
2	267	6,8	93,2	98,3	1,7	90,6	8,4	99,4	0,6	99,8	0,2	94,3	3,7	99,6	0,4	97,3	1,1
		0,9	99,1	0,1	99,9	0,7	99,3	99,4	0,6	93,7	6,9	13,4	86,6	0,4	99,6	--	0
3	267	6,6	93,4	98,3	1,7	91,6	8,4	99,4	0,6	100,0	0,0	96,4	3,6	99,9	0,1	100,0	0,0
		1,8	98,2	0,2	99,8	1,1	98,9	99,4	0,6	94,0	6,0	10,6	89,4	0,2	99,8	--	0
4	267	13,1	86,9	94,2	1,8	92,1	7,9	99,4	0,6	99,9	0,1	94,3	3,7	99,6	0,4	100,0	0,0
		1,7	98,3	0,7	99,3	0,6	99,4	99,4	0,6	94,0	7,0	11,7	88,3	--	100,0	--	0
5	267	12,2	87,8	94,3	1,7	93,8	6,2	99,4	0,6	99,7	0,3	94,7	3,3	99,7	0,3	100,0	0,0
		4,4	95,6	0,3	99,7	0,4	99,6	99,4	0,6	93,3	6,7	13,0	87,0	0,0	100,0	100,0	0,0

-- % Precipitación Global de la especie
-- % Precipitación relativa a la etapa anterior

TABLA 15

PRECIPITACION CON SULFATO DE SODIO
BALANCE

MASA INICIAL :
N.I. = 265 g

VASO	VOL. INICIAL SALMUERA cm ³	VOL. FINAL MAGMA cm ³	DENSIDAD MAGMA g/cm ³	MASA TOTAL MAGMA g	SOLIDO HEMIDO PRECIP. (SH.)		SOLIDO SECO PRECIPITADO		RETENCION MEDIA g salm./100 g SH.	MASA LIQUIDA RESIDUAL		MASA DE Na ₂ SO ₄ ARADIDA		EXCESO S/ESTIQ. %	pH
					g	% del Total	g	% del Total		g	% del Total	g	% de N.I.		
1	237	267	1,12	299	1,20	0,40	0,89	0,30	26,1	297,8	99,6	0,234	0,09	-10	6,9
2	237	267	1,12	299	1,20	0,40	0,89	0,30	26,1	297,8	99,6	0,177	0,07	00	7,0
3	237	267	1,12	299	0,60	0,20	0,44	0,15	26,1	298,4	99,8	0,254	0,10	+10	7,0
4	237	267	1,12	299	1,20	0,40	0,89	0,30	26,1	297,8	99,5	0,238	0,09	+25	7,0
5	237	267	1,12	299	1,50	0,50	1,11	0,40	26,1	297,6	99,6	0,333	0,12	+45	7,0

* Salmuera concentrada Lechada de Cal II

* RESULTADOS DE ANALISIS

VASO	Li ⁺	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	AT	STD
1	7 800	13 471	8 237	17	234	46 620	0	0	21,1
2	7 925	13 017	10 189	7	123	46 207	17	0	21,4
3	7 900	13 458	9 108	8	19	46 509	0	0	21,0
4	7 780	13 885	8 481	0	126	46 491	24	0	21,7
5	20902	13 437	8 766	7	140	47 858	10	0	21,6

* En mg/l (Volumen Medio de salmuera : 0,291 l)
AT Alcalinidad Total (HCO₃⁻)

TABLA 16

RECUPERACION DE ESPECIES EN LAS FASES SOLIDA Y LIQUIDA
PRECIPITACION CON SULFATO DE SODIO
(EN %)

VASO	VOLUMEN FINAL cm ³	Li ⁺		Na ⁺		K ⁺		Ca ²⁺		Mg ²⁺		Cl ⁻		SO ₄ ²⁻		HCO ₃ ⁻	
		SOLIDO LIQUIDO	LIQUIDO	SOLIDO LIQUIDO	LIQUIDO	SOLIDO LIQUIDO	LIQUIDO	SOLIDO LIQUIDO	LIQUIDO	SOLIDO LIQUIDO	LIQUIDO	SOLIDO LIQUIDO	LIQUIDO	SOLIDO LIQUIDO	LIQUIDO	SOLIDO LIQUIDO	LIQUIDO
1	294	19,6	80,4	99,7	1,8	97,4	7,6	100,0	0,0	99,7	0,3	96,1	3,9	100,0	0,0	100,0	0,0
		7,3	92,7	--	--	1,3	98,7	99,8	0,2	98,1	11,9	4,5	99,5	100,0	0,0	--	--
2	294	15,9	84,1	99,3	1,7	90,9	8,9	100,0	0,0	99,9	0,1	98,3	3,7	100,0	0,0	100,0	0,0
		9,6	90,7	--	--	0,7	99,3	94,0	7,0	90,7	9,3	4,0	94,0	61,7	4,3	100,0	0,0
3	294	19,4	80,6	99,2	1,8	91,6	8,4	100,0	0,0	100,0	0,0	96,1	3,9	100,0	0,0	100,0	0,0
		10,4	89,6	--	--	0,4	99,6	99,7	0,6	90,0	10,0	7,9	97,9	100,0	0,0	--	--
4	294	20,1	79,9	99,7	1,8	92,3	7,7	100,0	0,0	99,8	0,1	96,5	3,5	100,0	0,0	100,0	0,0
		8,1	91,9	--	--	1,6	98,4	100,0	0,0	94,0	6,0	4,7	95,3	100,0	0,0	--	--
5	294	16,6	83,4	99,3	1,8	91,9	8,1	100,0	0,0	99,9	0,1	94,1	3,9	100,0	0,0	100,0	0,0
		5,0	95,0	--	--	1,1	99,9	100,0	0,0	99,0	10,0	3,8	96,2	100,0	0,0	100,0	0,0

-- % Precipitación Global de la especie
-- % Precipitación relativa a la etapa anterior

- PRECIPITACION CON CARBONATO DE SODIO

MASA INICIAL :
M.I. = 297 g

BALANCE

VASO	VOL. INICIAL SALMUERA # cm ³	VOL. FINAL MAGMA cm ³	DENSIDAD MAGMA g/cm ³	MASA TOTAL MAGMA g	SOLIDO HUMEDO PRECIP. (SH.)		SOLIDO SECO PRECIPITADO		RETENCION MEDIA g salm./ 100 g SH.	MASA LIQUIDO RESIDUAL		MASA DE Na ₂ CO ₃ ASADIDA		EXCESO g/ESTEO.	pH
					g	% del Total	g	% del Total		g	% del Total	g	% de M.I.		
1	265	272	1,12	305	7,0	2,3	4,85	1,6	30,7	298,0	97,7	5,1	1,7	-10	6,9
2	265	272	1,12	305	7,0	2,3	4,85	1,6	30,7	298,0	97,7	5,9	2,0	0	7,1
3	265	272	1,12	305	6,7	2,2	4,64	1,5	30,7	298,3	97,8	6,5	2,2	+10	7,0
4	265	272	1,12	305	6,4	2,1	4,44	1,5	30,7	298,6	97,9	7,0	2,4	+25	7,0
5	265	272	1,12	305	7,3	2,4	5,06	1,7	30,7	297,7	97,6	8,5	2,9	+45	7,1

* Salmuera concentrada Sulfatada.

* RESULTADOS DE ANALISIS

VASO	Li ⁺	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	AT	STD
1	2 720	-	-	16	220	-	-	12 855	4 695,9
2	2 842	-	-	7	60	-	-	13 102	4 755,3
3	2 829	-	-	3	16	-	-	12 254	4 485,4
4	2 701	-	-	-	119	-	-	12 151	4 446,3
5	2 821	-	-	7	130	-	-	13 737	4 958,4

* ANALISIS DE SOLIDOS EN mg/l. Volumen medio de analisis : 0,297 l
AT Alcalinidad Total : CO₃²⁻

TABLA 17

RECUPERACION DE ESPECIES EN LAS FASES SOLIDA Y LIQUIDA

PRECIPITACION CON CARBONATO DE SODIO

(EN %)

VASO	VOLUMEN FINAL cm ³	Li ⁺	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	CO ₃ ²⁻
		SOLIDO LIQUIDO	SOLIDO LIQUIDO	SOLIDO LIQUIDO	SOLIDO LIQUIDO	SOLIDO LIQUIDO	SOLIDO LIQUIDO	SOLIDO LIQUIDO	SOLIDO LIQUIDO
1	297	78,7	71,3	0,0	100,0	0,0	100,0	0,03	99,97
2	297	97,8	2,2	0,0	100,0	0,0	100,0	94,8	5,2
3	297	92,3	17,7	0,0	100,0	0,0	100,0	0,01	99,99
4	297	97,8	2,2	0,0	100,0	0,0	100,0	0,00	100,00
5	297	81,7	18,3	0,0	100,0	0,0	100,0	0,01	99,99

-- % Precipitación Global de la especie
-- % Precipitación relativa a la etapa anterior

TABLA 18

MODELO DE FILTRACION PROPUESTO

ETAPA	VOL. FINAL MAGMA # cm ³	EVAPORACION %	DENSIDAD MAGMA g/cm ³	MASA TOTAL MAGMA (MM) g	SOLID. TOTALES DISUELTOS		SOLIDOS PRECIPITADOS		SOLID. TOTALES PRECIPITADOS		MASA LIQUIDA RESTANTE		MASA SOLIDA ACUMULATIVA		MASA LIQUIDA ACUMULATIVA	
					g	% de MM	g	% de MM	g	% de MM	g	% de MM	g	% de MM	g	% de MM
0	1 000	0	1,17	1 170	354,1	30,3	-	-	-	1 170	100,0	-	-	1 170	100,0	
1	900	10	1,17	1 053	307,4	29,2	46,7	4,4	1 006	95,6	46,7	4,4	1 006	95,6		
2	800	20	1,25	1 000	287,2	28,7	20,2	66,9	933	93,3	66,9	6,7	933	93,3		
3	650	35	1,24	806	221,7	27,5	65,5	132,4	16,4	674	83,6	132,4	16,4	674	83,6	
4	550	45	1,19	655	124,5	19,0	97,2	229,6	35,0	425	65,0	229,6	35,0	425	65,0	
5	450	55	1,19	536	112,8	20,8	13,0	742,6	45,3	293	54,7	13,0	2,4	523	97,6	
6	350	65	1,19	417	93,7	22,4	19,1	260,5	62,5	157	37,5	32,1	7,7	386	92,3	
7	250	75	1,23	308	72,2	23,4	21,5	281,9	91,5	25	8,5	53,5	18,0	256	82,0	
8	150	85	1,20	180	36,8	20,4	35,1	317,3	-	-	-	-	-	-	-	
9	50	95	1,23	62	11,9	19,4	24,9	342,2	-	-	-	-	-	-	-	
10	25	97,5	1,12	28	3,9	13,9	8,0	350,2	-	-	-	-	-	-	-	
11	15	98,5	1,22	18	2,8	15,6	11,0	351,3	-	-	-	-	-	-	-	

***** PRIMER FILTRADO (EVAPORACION I)
***** SEGUNDO FILTRADO (EVAPORACION II)

TABLA 21

TABLA 22

BALANCE MASICO GLOBAL

ETAPA	CONSISTENCIA	ENTRADA TOTAL kg	SALIDA TOTAL kg	CONCEPTO	OBSERVACIONES
EVAPORACION INICIAL (Piletas "A")	SALMUERA	28 080	10 210	SALMUERA CONCENTRADA SOLIDO TOTAL PRECIPITADO AGUA EVAPORADA	MAGNA MAGNA 55 % LIQUIDO 35 % SOLIDO SECO EVAPORACION: 45 % DEL VOLUMEN INICIAL
FILTRADO (BATERIA DE 2 FILTROS)	MAGNA	15 708	8 945	SALMUERA CONCENTRADA SALMUERA RETENIDA SOLIDO SECO PRECIPITADO	SOLIDO HUMEDO PRECIPITADO Y SEPARADO RETENCION: 0,23 Kg SALMUERA kg SOLIDO SECO (SS)
EVAPORACION INICIAL II (Piletas "B")	SALMUERA	8 945	6 052	SALMUERA CONCENTRADA SOLIDO TOTAL PRECIPITADO AGUA EVAPORADA	MAGNA MAGNA 82 % LIQUIDO 18 % SOLIDO SECO EVAPORACION: 75 % DEL VOLUMEN INICIAL
FILTRADO (BATERIA DE 2 FILTROS)	MAGNA	7 380	5 786	SALMUERA CONCENTRADA SALMUERA RETENIDA SOLIDO SECO PRECIPITADO	SOLIDO HUMEDO PRECIPITADO Y SEPARADO RETENCION: 0,20 kg SALMUERA kg SOLIDO SECO (SS)
ENCALADO I (POZA DE ENCALADO I)	SALMUERA LECHADA DE CAL	5 786 1 852	7 063 348	SALMUERA CONCENTRADA PRECIPITADO DE $Mg(OH)_2$ (4,68% DE LA SALMUERA EXCENTA DE IMPUREZAS) IMPUREZAS DEL CaO (MINERAL) (45 % DEL CaO)	LEY: 55 %
FILTRADO (BATERIA DE 2 FILTROS)	MAGNA	7 638	6 835	SALMUERA CONCENTRADA SALMUERA RETENIDA SOLIDO SECO PRECIPITADO	SOLIDO HUMEDO PRECIPITADO Y SEPARADO RETENCION: 0,286 kg SALMUERA kg SOLIDO SECO (SS)
EVAPORACION INTERMEDIA (PILETAS "C")	SALMUERA	6 835	3 053	SALMUERA CONCENTRADA SOLIDO TOTAL PRECIPITADO AGUA EVAPORADA	MAGNA MAGNA 74 % SOLIDO SECO 76 % LIQUIDO EVAPORACION: 40 % DEL VOLUMEN TRATADO (ETAPA)
ENCALADO II (POZA DE ENCALADO III)	MAGNA LECHADA DE CAL	4 001 77	3 095 948	SALMUERA CONCENTRADA SOLIDO TOTAL PRECIPITADO (EVAPORACION INTERMEDIA) PRECIPITADO DE $Mg(OH)_2$ (0,64% DE LA SALMUERA EXCENTA DE IMPUREZAS) IMPUREZAS DEL CaO (MINERAL) (45 % DEL CaO)	LEY: 55 %
FILTRADO	MAGNA	4 078	2 706	SALMUERA CONCENTRADA SALMUERA RETENIDA SOLIDO SECO PRECIPITADO	SOLIDO HUMEDO PRECIPITADO Y SEPARADO RETENCION: 0,395 kg SALMUERA kg SOLIDO SECO (SS)
SULFATADO NEUTRALIZAC.	SALMUERA SOLUC. SULFATO DE SODIO H_2SO_4 CONCENT.	2 706 7	2 707 5,4	SALMUERA CONCENTRADA PRECIPITADO DE $CaSO_4$ (0,28% DE LA SALMUERA EXCENTA DE IMPUREZAS) IMPUREZAS DEL Na_2SO_4 (MINE.) (70 %)	LEY: 80 %
FILTRADO	MAGNA	2 713	2 705	SALMUERA CONCENTRADA SALMUERA RETENIDA SOLIDO SECO PRECIPITADO	SOLIDO HUMEDO PRECIPITADO Y SEPARADO RETENCION: 0,348 kg SALMUERA kg SOLIDO SECO (SS)
CARBONATADO	SALMUERA SOLUC. CARBONATO DE SODIO	2 704,8 145,0	2 804,2 45,6	SALMUERA RESIDUAL MAS IMPUREZAS DEL CARBONATO Li_2CO_3 PRODUCTO (1,6 % DE LA SALMUERA)	LEY: 68,9 %
FILTRADO	MAGNA	2 849,8	2 785,3	SALMUERA RESIDUAL MAS IMPUREZAS SALMUERA RETENIDA SOLIDO SECO PRECIPITADO Li_2CO_3 PRODUCTO	SOLIDO HUMEDO PRECIPITADO Y SEPARADO RETENCION: 0,443 kg SALMUERA kg SOLIDO SECO
LAVADO I	SOLIDO HUMEDO AGUA DESTILADA	64,5 100,0	119,8 0,7	AGUA DE LAVADO SOLIDO DISUELTO SOLIDO SECO PRECIPITADO Li_2CO_3 PRODUCTO	REDISOLUCION: 0,007 kg SOLIDO litro de agua MASA DE AGUA: 50 % más que el peso del sólido
FILTRADO	MAGNA	164,5	101,0	SALMUERA RESIDUAL MAS IMPUREZAS SALMUERA RETENIDA SOLIDO SECO PRECIPITADO Li_2CO_3 PRODUCTO	SOLIDO HUMEDO PRECIPITADO Y SEPARADO RETENCION: 0,443 kg SALMUERA kg SOLIDO SECO
LAVADO II	SOLIDO HUMEDO AGUA DESTILADA	63,5 100,0	119,5 0,7	AGUA DE LAVADO SOLIDO DISUELTO SOLIDO SECO PRECIPITADO Li_2CO_3 PRODUCTO	REDISOLUCION: 0,017 kg SOLIDO litro de agua MASA DE AGUA: 50 % más que el peso del sólido
FILTRADO	MAGNA	163,5	101,0	SALMUERA RESIDUAL MAS IMPUREZAS SALMUERA RETENIDA SOLIDO SECO PRECIPITADO Li_2CO_3 PRODUCTO	SOLIDO HUMEDO PRECIPITADO Y SEPARADO RETENCION: 0,443 kg SALMUERA kg SOLIDO SECO
SECADO	SOLIDO HUMEDO	62,5	19,1	HUMEDAD EVAPORADA (H_2O) SOLIDO SECO Li_2CO_3 PRODUCTO	

TABLA 23

CONSUMO DE INSUMOS QUIMICOS
POR SERIE DE PROCESO

<u>INSUMO</u>	<u>(ciclo)</u> <u>CONSUMO</u> <u>kg/serie</u>	<u>LEY (%)</u>
CaO	274,0	55
Na ₂ SO ₄	5,2	80
Na ₂ CO ₃	85,0	68
H ₂ SO ₄ (c)	0,010	--
NaOH	0,12	--

CONSUMO TOTAL DE INSUMOS QUIMICOS
POR AÑO (κ)

<u>INSUMO</u>	<u>CONSUMO</u> <u>kg/año</u>	<u>NUMERO DE</u> <u>SERIES</u>
CaO	3795	4
Na ₂ SO ₄	72	4
Na ₂ CO ₃	1180	4
H ₂ SO ₄	1	4
NaOH	2	4

x Tomando en cuenta las series de proceso propuestas: S_A, S_B, S_C y S_D y un tiempo medio de tratamiento de 104 días por 4 series.

TABLA 27

RESULTADOS PRUEBA DE FILTRACION

A. Sales de sodio, potasio (NaCl, KCl) - EVAPORACION INICIAL.

VOL. DE FILTRADO (l)	TIEMPO EN SEGUNDOS (θ)				
	$\Delta P = 0,66$ Kg/cm ²	$\Delta P = 0,65$ Kg/cm ²	$\Delta P = 0,64$ Kg/cm ²	$\Delta P = 0,62$ Kg/cm ²	$\Delta P = 0,60$ Kg/cm ²
0,1	7	10	15	18	22
0,2	60	77	87	92	97
0,3	135	130	150	171	185
0,4	187	210	225	251	260
0,5	240	265	298	305	341
0,6	310	340	352	392	417
0,7	362	393	435	472	485
0,8	451	465	516	538	620
0,9	486	520	573	612	685

B. Hidróxido de magnesio y precipitado de excesos (Mg(OH)₂) - ENCALADO.

VOL. DE FILTRADO (l)	TIEMPO EN SEGUNDOS (θ)				
	$\Delta P = 0,66$ Kg/cm ²	$\Delta P = 0,65$ Kg/cm ²	$\Delta P = 0,64$ Kg/cm ²	$\Delta P = 0,62$ Kg/cm ²	$\Delta P = 0,60$ Kg/cm ²
0,1	46	58	61	68	72
0,2	102	115	127	158	170
0,3	135	143	189	198	281
0,4	220	235	308	395	403
0,5	367	385	504	607	625
0,6	504	591	749	846	883
0,7	702	805	937	1 052	1 185

C. Sales de calcio y precipitado de excesos (CaSO₄) - SULFATADO.

VOL. DE FILTRADO (l)	TIEMPO EN SEGUNDOS (θ)				
	$\Delta P = 0,66$ Kg/cm ²	$\Delta P = 0,65$ Kg/cm ²	$\Delta P = 0,64$ Kg/cm ²	$\Delta P = 0,62$ Kg/cm ²	$\Delta P = 0,60$ Kg/cm ²
0,1	9	10	12	13	15
0,2	18	23	28	32	39
0,3	28	36	41	51	57
0,4	52	67	75	83	91
0,5	85	92	97	101	109

D. Carbonato de Litio (Li₂CO₃) - Carbonatado

VOL. DE FILTRADO (l)	TIEMPO EN SEGUNDOS (θ)				
	$\Delta P = 0,66$ Kg/cm ²	$\Delta P = 0,65$ Kg/cm ²	$\Delta P = 0,64$ Kg/cm ²	$\Delta P = 0,62$ Kg/cm ²	$\Delta P = 0,60$ Kg/cm ²
0,1	9	13	15	17	20
0,2	47	58	60	65	72
0,3	102	110	121	130	138
0,4	151	165	173	180	207
0,5	185	192	205	225	257

DIRECTION GÉNÉRALE

213, rue La Fayette - 75480 Paris Cedex 10

CENTRE ORSTOM BONDY

70, route d'Aulnay - 93140 Bondy

CENTRE ORSTOM MONTPELLIER

Institut Agronomique Méditerranéen
3191, route de Mende - 34060 Montpellier Cedex

UNIVERSIDAD BOLIVIANA

UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRES

INSTITUTO DE INVESTIGACIONES QUIMICAS

Tel. 792238 - 795878

Cajón Postal No. 303

Cota Cota Calle 27

Campus Universitarios

La Paz - Bolivia