

## 1.- ASPECTOS TEORICOS DEL PROCESO DE DEPOSITACION DE LA SAL.

Primeramente, se intentará despejar las incógnitas mas evidentes del proceso de concentración y producción de sal por evaporación de agua de mar, lo que dejará planteadas necesidades mas complejas relacionadas con la optimización del volumen de producción y su calidad. El término "Sal", se toma por lo común como sinónimo de Cloruro de Sodio, cuya fórmula química es  $\text{NaCl}$ . Sin embargo este cloruro no se encuentra solo en el agua de mar, sino mezclado con otras sales. Entonces se interpreta la expresión "Sales" como otros compuestos solubles en agua, incluyendo al Cloruro de Sodio.

La primera cuestión es, ¿Qué es la Sal o Cloruro de Sodio? Como el resto de las sales, éste compuesto, desde el punto de vista químico, es un producto de la reacción de una base y un ácido, los cuales, en este caso, son el Hidróxido de Sodio y el Acido Clorhídrico, cuyas fórmulas son  $\text{NaOH}$  y  $\text{HCl}$ , respectivamente.

A la sal común, también se le denomina Halita o sal de roca. Cristaliza en el sistema isométrico, generalmente en cubos. - Los cristales son algunas veces deformados o con caras cavernosas. También se presenta en forma masiva, granular o compacta, y con menos frecuencia columnar. Presenta fractura concoidea, y es mas bien quebradiza. Su dureza es de 2.5 en la escala de Mohs y su peso específico oscila entre 2.1 y 2.6 gramos por centímetro cúbico, en los cristales puros se ha observado el peso de  $2.164 \text{ gr/cm}^3$ .

Su lustre es vítreo, por lo común es incolora pero también presenta colores blanco, amarillento, rojizo, azul y púrpura.

A veces muestra un color azul intenso, que generalmente se localiza en puntos irregulares. Esto se ha explicado en varias -

formas: Como debido a la presencia de sodio coloidal, a un cloruro inferior de sodio o bien a la presencia de materia orgánica. Varfa desde transparente a translúcida. Es soluble, posee sabor salado o salino. Según su fórmula, tiene el 60.6% de Cloro y el 39.4% de Sodio. La sal común es altamente diatérmica, o sea que deja pasar el calor con facilidad por su masa. Cuando es pura y clara como el agua, las placas limpias pulimentadas dejan pasar 923 de 1000 rayos térmicos, perdiendo los restantes por reflexión en ambas superficies. Los cloruros de Calcio y Magnesio, además del Sulfato de Magnesio; hacen a la sal común propensa a la delicuescencia o sea la propiedad de humedecerse al contacto con el aire. Por otro lado contribuyen en este sentido, el Sulfato de Calcio y los Cloruro de Antimonio y de Potasio.

La Sal posee una tendencia bastante grande y aguda a la cristalización. Como ejemplo, puede mencionarse el caso de los cristales cúbicos encontrados en Chile, conteniendo solamente el 38.64% de Cloruro de Sodio, junto con el 55.35% de compuestos insolubles y el 6% de otras Sales. La Sal logró cristalizar en el propio sistema, contando solo con un poco mas de la tercera parte del peso total. Asimismo, en la Sal llamada Sulfohalita ( $3\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 2\text{NaCl}$ ), formada por moléculas de halita y thenardita, la halita obliga a la thenardita a cristalizar en el sistema isométrico aun cuando el hábito de la thenardita es el de cristalizar en el sistema rómbico, no obstante que la proporción de NaCl solo sea del orden del 22%.

Con respecto a la cristalización, si se evapora lentamente -- una solución saturada de sal gema, la sal cristaliza en cubos que se superponen unos a otros formando pirámides huecas interiormente, con las paredes escalonadas. La velocidad de evaporación es muy importante en el tamaño de los cristales. Una evaporación rápida dará como resultado cristales muy pequeños y viceversa. Además, es importante mencionar que un enfriamiento de la solución saturada caliente no produce cristales, a -

diferencia de otras sales que pueden cristalizar también de esa manera.

La sal es muy soluble en agua. Sin embargo, en alcohol es casi-insoluble. Así por ejemplo, 100 partes de alcohol de 95%, apenas disuelven 0.17 partes de sal. La temperatura no afecta demasiado a la solubilidad de la salmuera ni a su grado de saturación. Solamente la densidad de la misma tiene efectos palpables en este respecto. (Tabla I)

°F	° C	%Sal °Be <sup>1</sup>
-6	-21.11	23.31
0	-17.78	23.83
+10	-12.22	24.70
20	- 6.67	25.53
30	- 1.11	26.16
32	0.0	26.29
32.3	+ 0.1	26.31
40	4.44	26.33
50	10.00	26.36
60	15.56	26.395
70	21.11	26.45
80	26.67	26.52
100	37.78	26.68
125	51.67	26.92
150	65.56	27.21
175	79.44	27.52
200	93.33	27.91
212	100.00	28.12
220	104.44	28.29
227.7	108.70	28.46

TABLA I.- SOLUBILIDADES MAXIMAS DE LA SAL SEGUN LA TEMPERATURA

La mayor parte de las sales son sólidas y cristalizadas aunque existen algunas líquidas y otras amorfas, que resultan, generalmente por precipitación de dos sales solubles. Puede decirse con carácter general que las sales son mas pesadas que el agua.

<sup>1</sup> Grados Baumé, escala ideada por el Químico Francés Antoine - Buamé (1728-1804) para medir densidades y grados de concentración de mezclas y disoluciones. Es aproximadamente igual al por ciento en peso.

Con frecuencia se han observado salmueras con diversos estados de concentración y también con colores variados; esta coloración del agua puede relacionarse con el grado de concentración de sales que tengan en ese momento. Cada sal posee una coloración que transmite el agua en que se encuentra, si su concentración es suficientemente alta en relación a la de las demás sales. Así, una salmuera de 3.5°Be, que es el agua de mar, posee una coloración azul-verde. Al llegar a los 26°Be, su color es blanquesino debido a la concentración de NaCl (sal común) y pérdida de  $\text{CaCO}_3$  y  $[\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}]$  (Calcita y Yeso). Arriba de 35°Be se vuelve rosa y luego verde por la pérdida de sal común y aumento de sales de magnesio y potasio.

El color de las sales depende del metal y del ácido que las han formado. Las sales de los dos primeros grupos de metales de la tabla periódica de los elementos son incoloras; si bien los de ácidos coloreados, como los cromatos, los manganatos y los permanganatos tienen color. Las sales de cromo y las de los demás grupos tienen color diverso, aunque algunas son incoloras. Las sales ferrosas son verdes, las de cobre azules; las de manganeso, rosadas, etc. Hoy se atribuye el color de las sales en solución a los iones; así, se dice que los iones K, Na, Ca, son incoloras, el ion Cu es azul, el ion Ni es verde, etc.

El sabor de las sales también varía grandemente. Cuanto más solubles son en agua, las sales poseen en general más sabor, dependiendo éste principalmente del ion positivo o metal. Las sales de sodio son saladas, las de magnesio amargas, las de hierro astringentes, las de plomo dulces, etc.

La tabla I muestra que la temperatura influye poco en la modificación del punto de saturación de la sal en la solución, por lo que puede esperarse que las diferencias de temperatura del agua en los vasos de la salina modifique la saturación en el rango de 26.3% a 26.52% de sal, diferencia mínima que puede despreciarse.

Para medir la densidad de la salmuera se utiliza un instrumento llamado salinómetro o areómetro, graduado en escala Baumé - ( $^{\circ}\text{Be}$ ), con lo cual obtenemos el porcentaje de sales disueltas en agua. Por lo general se corrige esta lectura por temperatura como lo indica la Tabla II y X.

Densidad	%NaCl	Densidad	% NaCl
1.00725	1	1.11146	15
1.01450	2	1.11938	16
1.02174	3	1.12730	17
1.028999	4	1.13523	18
1.03624	5	1.14315	19
1.04366	6	1.15107	20
1.05108	7	1.15931	21
1.06593	8	1.16755	22
1.07335	9	1.17580	23
1.08097	10	1.18404	24
1.08859	11	1.19228	25
1.09622	12	1.20098	26
1.10384	13	1.20433	26.395
	14		(Punto de Saturación)

TABLA II.- LA DENSIDAD EN FUNCION DEL PORCENTAJE DE -  
SAL DISUELTA A 15.56°C DE TEMPERATURA.

En resumen, al ir agregando sal a una solución o por evaporación del agua de ésta, se incrementa la densidad de la salmuera, hasta llegar a una solubilidad máxima o punto de saturación en donde ya no se disuelve mas sal. Al pasar de este punto determinado, la sal empieza a depositarse y cristalizarse en el fondo del depósito. Esta es regla general para todas las sales, variando solamente en lo que se refiere al Punto de Saturación, ya que cada sal posee el propio. Por ejemplo, la sal común posee un punto de saturación de 26.5 $^{\circ}\text{Be}$  a 25 $^{\circ}\text{C}$ , lo que indica que al aumentar la densidad a 26.6 $^{\circ}\text{Be}$ , empezará la depo

sitación y cristalización de sal. Sin embargo, la sal llamada Thenardita ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) existente también en el agua de mar, posee una saturación de  $28.11^\circ\text{Be}$  a  $25^\circ\text{C}$ , por lo que cristaliza después de la sal común. Esto puede auxiliarnos en la obtención de sal lo mas pura posible al retirar el agua antes de llegar a los  $28.11^\circ\text{Be}$  evitando así que la thenardita se deposite encima de la sal, ocasionando una impureza de ésta. Mencionamos anteriormente que las variaciones de temperatura no influyen en el punto de saturación de la sal, pero sí lo hacen en otras sales como la thenardita mencionada anteriormente. Así, a una temperatura de  $15.56^\circ\text{C}$  la sal baja su saturación a solo  $26.395^\circ\text{Be}$ , sin embargo, la thenardita baja a  $14.19^\circ\text{Be}$ , con lo cual si a  $25^\circ\text{C}$  cristaliza después de la sal, ahora lo hace antes. Entonces, si antes lo hacía en los vasos cristalizadores, ahora lo hace en los concentradores.

¿Es la sal común, la que predomina en el agua de mar? En efecto, una salmuera del mar abierto posee:

Agua	=	96.5%
Sal común	=	2.7%
Otras Sales	=	0.8%

Existen pequeñas variaciones en mares abiertos y muy marcadas en mares cerrados (golfos, bahías y lagos) donde las concentraciones de sales pueden alcanzar grandes valores gracias a la gran evaporación y poca alimentación de salmuera fresca. De las sales disueltas en el mar, la sal común representa el 70.4% aproximadamente y el 29.6% las otras sales y compuestos insolubles.

Cuando una sal se disuelve en agua, sus componentes se separan en iones, conservando su identidad molecular a menos que se produzca una reacción por adición de otro compuesto que acelere ciertas precipitaciones. Existe mucha variedad en cuanto a la concentración de iones de salmuera a salmuera, según se puede observar en la tabla III.

## Muestras

ION	I	II	III
Ca	37832	40567	22400
Mg	3824	3092	-
Na	67966	79253	49000
SO <sub>4</sub>	180	115	508
HCO <sub>3</sub>	148	186	116
Cl <sub>2</sub>	182660	202810	-
I <sub>2</sub>	7	7	-
Br <sub>2</sub>	4570	4600	-
K	-	-	1380
Fe	-	-	138
CO <sub>3</sub>	-	-	-

TABLA III.-ANALISIS DE SALMUERAS NATURALES  
(valores en P.P.M)

Las sales en sí, tienen variaciones de concentración como se muestra en la tabla IV.

## Localidades

SAL	A	B	C	D
NaCl	55.60	75.96	51.62	47.25
CaCl <sub>2</sub>	32.68	17.575	34.43	41.94
MgCl <sub>2</sub>	10.43	4.94	10.63	10.20
KCl	0.63	1.31	1.70	-
MgBr <sub>2</sub>	0.60	0.21	0.62	0.61
CaSO <sub>4</sub>	0.060	Ind.	-	-
I <sub>2</sub>	-	0.005	-	-

TABLA IV.- ANALISIS DE ALGUNAS SALMUERAS NATURALES  
(valores en porciento en peso)

En general, las sales que pueden estar presentes en el agua de mar en variadas concentraciones, son:

Halita ( $\text{NaCl}$ )  
 Thenardita ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ )  
 Glauberita ( $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot \text{CaSO}_4$ )  
 Termonatrita ( $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ )  
 Natrón ( $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10 \text{H}_2\text{O}$ )  
 Nahcohita ( $\text{NaHCO}_3$ )  
 Mirabilita ( $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10 \text{H}_2\text{O}$ )  
 Carnalita ( $\text{KCl} \cdot \text{MgCl}_2 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$ )  
 Silvita ( $\text{KCl}$ )  
 Kieserita ( $\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ )  
 Hidrofilita ( $\text{KCaCl}_2$ )  
 Bishofita ( $\text{MgCl}_2 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$ )  
 Yeso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$ )  
 Calcita ( $\text{CaCO}_3$ )  
 Hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )  
 Alúmina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )  
 Bromuros de Magnesio y Sodio ( $\text{MgBr}_2$ )( $\text{NaBr}$ )  
 Yoduros ( $\text{I}_2$ )  
 Nitro Cúbico ( $\text{NaNO}_3$ )  
 Shonita ( $\text{K}_2\text{SO}_4 \cdot \text{MgSO}_4 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$ )  
 Kainita ( $\text{KCl} \cdot \text{MgSO}_4 \cdot 3 \text{H}_2\text{O}$ )  
 Langbeinita ( $\text{K}_2\text{SO}_4 \cdot 2 \text{MgSO}_4$ )  
 Espomita ( $\text{MgSO}_4 \cdot 7 \text{H}_2\text{O}$ )  
 Tachhidrita ( $\text{CaCl}_2 \cdot \text{MgCl} \cdot 12 \text{H}_2\text{O}$ )  
 Astrakanita ( $\text{NaSO}_4 \cdot \text{MgSO}_4 \cdot 4 \text{H}_2\text{O}$ )

Estas sales pueden o no estar presentes en la cristalización, dependiendo de otros factores como la temperatura de la salmuera y la densidad del agua en el momento de la cristalización. La temperatura influye en el sentido de que muchas sales son sensibles a los enfriamientos, en los cuales cristalizan. En cambio, aumentan su solubilidad en los calentamientos. Algunas sales se forman por reacción de dos sales presentes, pero sola

mente a temperaturas muy altas como las generadas por la actividad volcánica. La densidad influye en que cada sal posee su propio punto de saturación y así le corresponde cierto orden de depositación. Las menos solubles se depositan primero, y las más solubles a lo último.

La Halita llamada Sal de roca, Sal fósil o Sal gema, que se encuentra en la naturaleza ya cristalizada; tiene como impurezas las mismas sales presentes en la halita producida en salinas modernas, con la sola diferencia que aquella contiene, algunas veces, sales que solo se forman a muy altas temperaturas, propias de actividad volcánica. En las siguientes tablas podemos confirmar estas observaciones.

COMPUESTO	Localidades				
	1	2	3	4	5
NaCl	92.08	76.1-99.8	99.25	96.15	98.22
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.52	- -	-	0.015	-
CaCl	2.04	0.5- 0.2	0.04	0.018	0.053
CaSO <sub>4</sub>	0.71	0.01-0.03	0.69	3.252	0.634
CaCO <sub>3</sub>	0.15	1.1- 0.39	-	-	-
MgCl <sub>2</sub>	0.08	- -	0.01	0.342	0.052
SiO <sub>2</sub>	1.42	- -	-	-	-
MgSO <sub>4</sub>	-	- -	-	-	-
Insolubles	-	22.8 -0.3	-	0.223	1.041

TABLA V.- ANALISIS DE ROCAS DE SAL  
(valores en porciento en peso)

COMPUESTO	L o c a l i d a d e s				
	I	II	III	IV	V
Insolubles	0.962	0.756	0.711	1.407	1.070
CaCO <sub>4</sub>	0.743	0.872	0.225	0.857	1.600
CaCl <sub>2</sub>	0.006	0.053	0.010	0.031	0.23
MgCl <sub>2</sub>	0.002	0.024	0.009	0.066	-
MgSO <sub>4</sub>	-	-	-	-	-
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	-	-	-	-	-
KCl	-	-	-	-	0.31
NaCl	98.262	98.181	99.97	96.97	96.44

TABLA VI.- COMPOSICION DE MUESTRAS DE SAL GEMA  
(valores en porciento en peso)

COMPUESTO	L o c a l i d a d e s		
	A	B	C
NaCl	97.87	100.00	99.85
MgCl <sub>2</sub>	0.14	ind.	0.15
CaCl <sub>2</sub>	0.14	"	ind.
CaSO <sub>4</sub>	0.88	"	"
Insolubles	0.85	"	"
Agua	0.12	"	"

TABLA VII.- ANALISIS DE HALITA  
(valores en porciento en peso)

COMPUESTO	%	
Agua	73.5393	
NaCl	26.3292	Análisis de Salmuera Saturada hecha con Sal Gema.
CaSO <sub>4</sub>	0.1221	
CaCl <sub>2</sub>	0.0029	
MgCl	0.0065	
NaCl	99.503	
CaSO <sub>4</sub>	0.462	Análisis de la sal obtenida - por evaporación de la salmue- ra anterior.
CaCl <sub>2</sub>	0.011	
MgCl	0.024	

TABLA VIII.- ANALISIS DE SALMUERA HECHA CON SAL GEMA Y SU RE-CRISTALIZACION

La sal obtenida en la zona de cristalización de los amargos - y asociada a cierta actividad volcánica, tendrá menos NaCl y mas de otras sales solubles.

SAL	Localidades					
	1	2	3	4	5	6
NaCl	37.5	31.5	11.7	4.6	25.0	9.8
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	19.4	18.3	30.1	2.45	12.3	31.6
NaHCO <sub>3</sub>	9.1	1.15	5.7	0.9	6.5	17.5
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	0.6	0.56	1.6	2.45	5.6	21.6
Otras Sales	33.4	48.49	50.9	89.6	50.6	19.5

TABLA IX.- ANALISIS DE MUESTRAS DE SALES  
(valores en porciento en peso)

El grado de solubilidad de la sal es un factor clave en el proceso de producción de sal. Las sales menos solubles se depositan primero y las mas solubles despues. En esto se basa principalmente la operación de obtención de sal, (figura 1). Incluso los yacimientos minerales de Halita que se explotan con minería subterránea, y que tuvieron las mismas condiciones que ahora poseen las salinas modernas, poseen la misma secuencia de depositación. Las sales menos solubles se encuentran a mas profundidad y las mas solubles se depositan mas arriba. Por ejemplo, un depósito de sal en Stassfurt, Alemania tiene esta secuencia en línea ascendente:

- I. Dolomita y Calcita (carbonatos de calcio y magnesio)
- II. Yeso y Anhidrita (sulfatos de calcio)
- III. Halita (cloruro de sodio)
- IV. Polihalita (sulfato de potasio, magnesio y calcio)
- V. Kieserita (sulfato de magnesio)
- VI. Carnalita (cloruro de potasio y magnesio)

Puede verse en esta formación una secuencia precisa en el orden de las sedimentaciones de abajo a arriba. Los minerales menos solubles (los carbonatos de calcio y magnesio y sulfatos de calcio), ocupan la parte inferior y los mas solubles (polihalita, kieserita y carnalita), la superior.

Tomando en cuenta todo lo mencionado, resulta lógico suponer que es necesario separar la salmuera en un rango de densidades para lograr la máxima pureza de sal; la cual se obtiene a 25°C entre los 25.4°-37.5°Be aproximadamente. La Anhidrita ( $\text{CaSO}_4$ ), ya terminando su depositación penetra en el área de la sal depositando el 15% de su concentración. El Bromuro de Sodio y Magnesio empieza a cristalizar a los 26°Be, alcanzando a depositar el 25% de su contenido total, dentro del área de la sal. Los sulfatos y cloruros de magnesio (Kieserita, -- Kainita, Langbernitita, Epsomita, Bishofita y Tachhidrita) em -

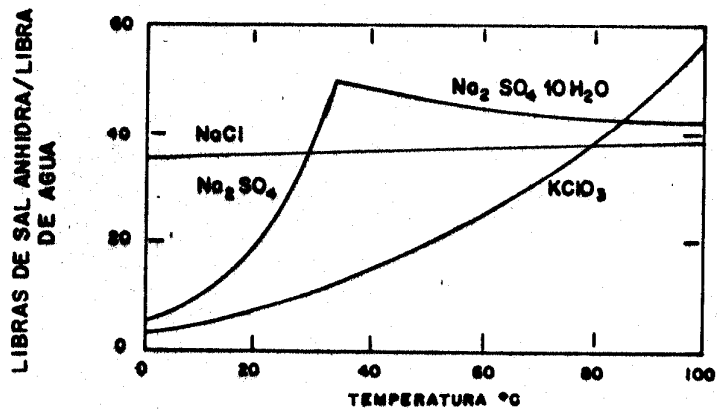


FIG.1. CURVAS DE SOLUBILIDAD DE ALGUNAS SALES EN AGUA

piezan a precipitar a los 30°Be, llegando a un total de 80% de sales de magnesio dentro del área del NaCl; ésto representa un contenido de impurezas muy grande en la sal. Las otras sales - precipitan antes del área de la sal. La calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) empieza su depositación a partir de la concentración normal del agua de mar, hasta los 16°Be. La hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) termina a los 7°Be. El Yeso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) empieza a cristalizar a una densidad alrededor de 13°Be (teóricamente 11.7°Be) y continua a lo largo del curso de la evaporación. Sin embargo, a una densidad de alrededor de 16.4°Be, el yeso cambia su cristalización a Anhidrita -- ( $\text{CaSO}_4$ ). A una densidad de 27°Be la mayor parte se ha cristalizado, completando el cien por ciento a una densidad de 36°Be - aproximadamente. Las figuras 2 y 3 muestran la ruta de cristalización de los diferentes componentes del agua de mar en la evaporación.

La sal llega a su punto de saturación teórica alrededor de los 25.4°Be a 25°C, y así cada uno de los otros componentes continúan cristalizándose a través del curso de la evaporación. A una densidad de 29°Be alrededor del 72% de la sal se ha cristalizado y a 30°Be alrededor del 79%. El bromo cristaliza como solución sólida de NaBr en la sal, es muy pequeñas concentraciones y aumenta lentamente en la cantidad cristalizada en la medida que aumenta la concentración, mientras que la depositación de otros cloruros descienden (Silvita, Bishofita y Carnalita), la cantidad de bromo aumenta drásticamente. Sin embargo esta cristalización sigue siendo solo una cantidad relativamente pequeña, removida de la solución hasta el final de la evaporación. Varias sales dobles en sulfatos y magnesio, como la Astrakanita ( $\text{NaSO}_4 \cdot \text{MgSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ), teóricamente no comienzan a cristalizar, sino hasta una densidad de 33.5°Be, pero debido al -- efecto enfriador de la noche, las marcadas concentraciones de mezclas inestables, que pudiesen existir y la muy diferente cinética de ciertas sales, aparecen algunas sales de magnesio y sulfato a 30°Be y su concentración en la sal puede ser apreciable de 32 a 33°Be.

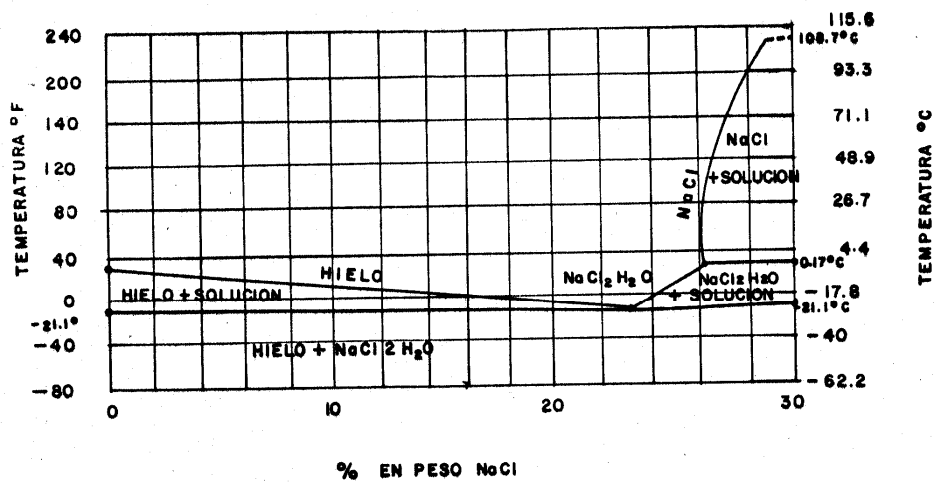


FIG. 2. DIAGRAMA DEL SISTEMA CLORURO DE SODIO Y AGUA CONFORME A LA REGLA DE LAS FASES

DEPOSITACION DE SAL DURANTE LA EVAPORACION DEL AGUA DE MAR, 25° C.

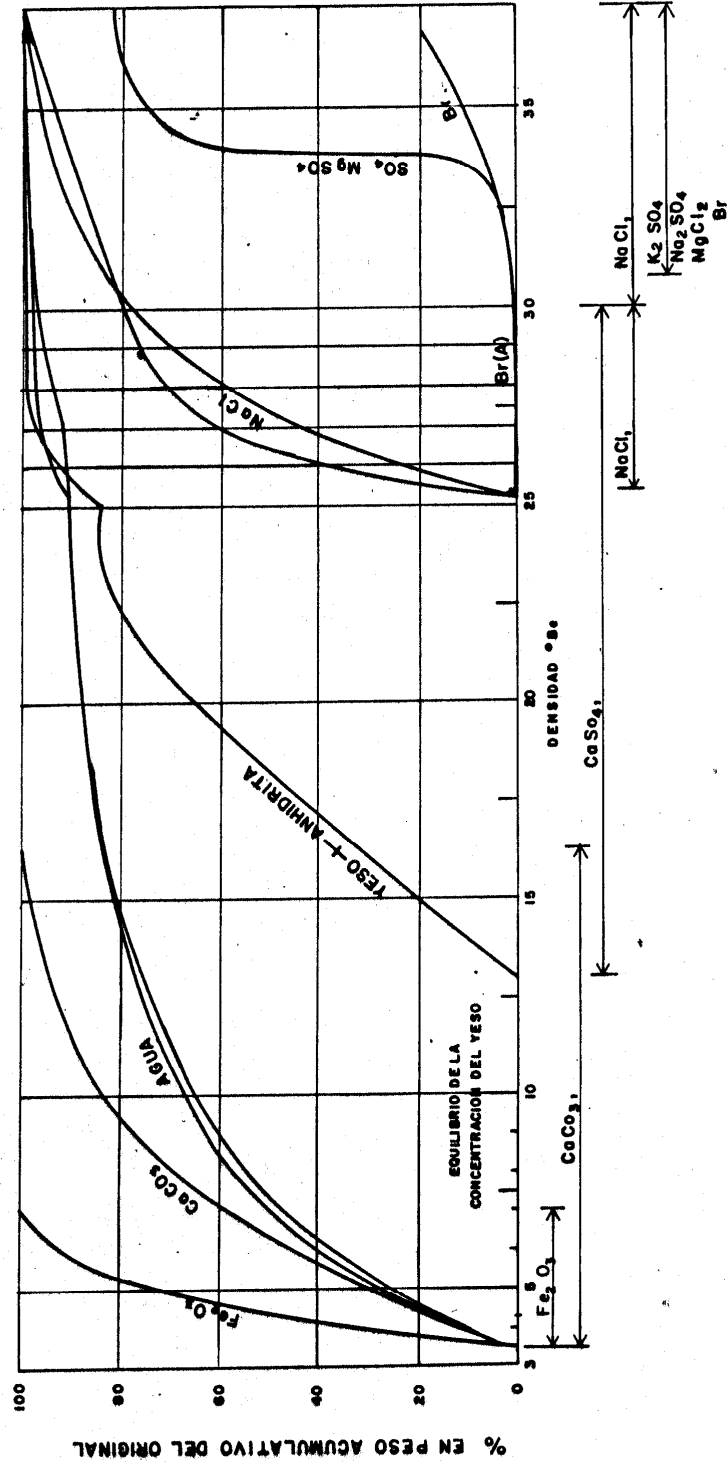


FIG. 3. DEPOSITACION DE SAL DURANTE LA EVAPORACION DEL AGUA DE MAR, 25° C.

La figura 4, es un diagrama basado en las anteriores relaciones de fase y muestra los contaminantes cristalizados con la sal. - La cantidad de yeso o anhidrita disminuye rápidamente durante - la cristalización de la sal, pero como la cantidad de sal tam - bién disminuye a mas altas densidades, el porcentaje acumulati - vo de anhidrita ( $\text{CaSO}_4$ ) disminuye a un ritmo mucho mas lento -- que en la relación sal a anhidrita. Por otra parte, la cantidad de sulfatos de magnesio, epsamita ( $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ) y Kieserita ( $\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ), en la misma escala, aparecen con un súbito ascenso, - pero como son muy solubles en agua y salmuera, su presencia no - debe considerarse una grave impureza sino hasta que alcance con - centraciones mas altas.

El área de la sal debe restringirse con el objeto de obtener me - nos impurezas en la sal cristalizada, por lo que el límite infe - rior puede elevarse a  $26.5^\circ\text{Be}$  y así obtener solo el 5% de anhi - drita como impureza en la sal, o bien conservar el límite infe - rior, a  $25.4^\circ\text{Be}$ , tolerando un 15% de impureza con la condicón - de someter a la, sal a un lavado final a base de salmuera de --  $21.5^\circ\text{Be}$  y agua de mar, para eliminar una parte de la anhidrita. Desde los  $28^\circ\text{Be}$  hasta los  $38^\circ\text{Be}$ , la anhidrita cristaliza en for - ma tan reducida y constante que, dadas ciertas constantes de la salina, puede obtenerse un porciento promedio de depositación - que casi siempre anda entre 1.0 y 1.25%. El límite superior está casi siempre en el rango de  $29.5^\circ\text{Be}$  a  $30.5^\circ\text{Be}$ , debido princi - palmente, a que en esta densidad, inicia marcadamente la crista - lización de los sulfatds de magnesio, con un ritmo de incremen - to constante, desde los  $30^\circ\text{Be}$ . Los bromuros empiezan a cristali - zar desde los  $26^\circ\text{Be}$ . Por lo anteriormente visto, la operación - en las salinas se apeg a al comportamiento de las sales y a su - área correspondiente de cristalización. En consecuencia, tene - mos que se construyen primero los llamados vasos de concentra - ción en donde se recibe el agua directamente del mar, permane - ciendo aquí hasta que alcanza la concentración de  $25.5^\circ\text{Be}$ . En - estos vasos se deposita todo el fierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), los carbonatos-

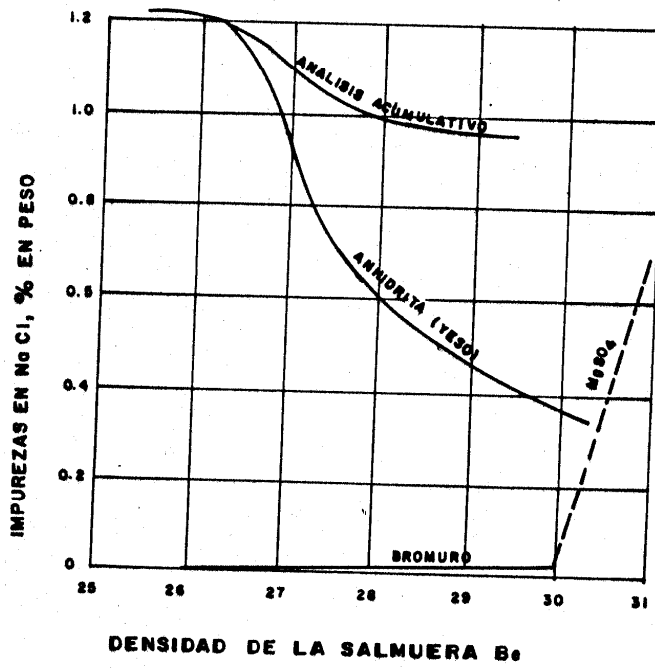


FIG. 4. IMPUREZAS CRISTALIZADAS CON LA SAL DEL AGUA DE MAR.

de calcio, el yeso y el 90% de la anhidrita. Al llegar a esta densidad, el agua se traslada a otros vasos llamados de cristalización, su concentración se eleva hasta los 29.5°Be depositando el 75% del NaCl. Al llegar a esta densidad el agua se pasa a los vasos de amargos en donde permanece hasta su total evaporación depositándose el resto de las sales contenidas en la solución.

Como punto de interés sobre la evaporación del agua de mar, la cantidad de agua removida también se grafica en la figura 3. - Esta valor por supuesto, varía enormemente de acuerdo a la densidad original del agua de mar, pero al comenzar con agua de mar normal, 3.5°Be (cierta muestra marcó 3.44°Be), alrededor del 92% del agua se ha evaporado antes de que la sal empiece a cristalizar, aproximadamente el 5.4% del agua se evapora durante la zona de 24.5° a 29°Be y la restante permanece en los amargos. Las figuras 2 y 5 muestran las concentraciones típicas de los diferentes iones durante la evaporación del agua de mar.

Resumiendo la anterior Físico-Química del agua de mar durante la evaporación, algunas consideraciones son importantes. Partiendo de la densidad de cerca de 5°Be, al punto de saturación de la sal, algunas fases cristalizan, de manera que cualquiera puede tener algún valor económico propio o pueden actuar como "Selladores" del piso del vaso. Así, el yeso y la anhidrita se depositan en considerables cantidades, en el rango de 13° a 23°Be. Otra cuestión importante, es que es imposible producir sal cien por ciento pura en salinas solares, ya que la anhidrita y el bromo son contaminantes inevitables. No obstante, su cantidad puede ser muy pequeña. Además, la anhidrita puede removerse posteriormente en la planta lavadora. Por tanto la producción de sal puede aumentarse considerablemente, al prolongar el período de evaporación hasta alcanzar una concentración de 30° a 32°Be, contando por supuesto con planta lavadora de capacidad adecuada para remover la mayor cantidad posible de sales solubles.

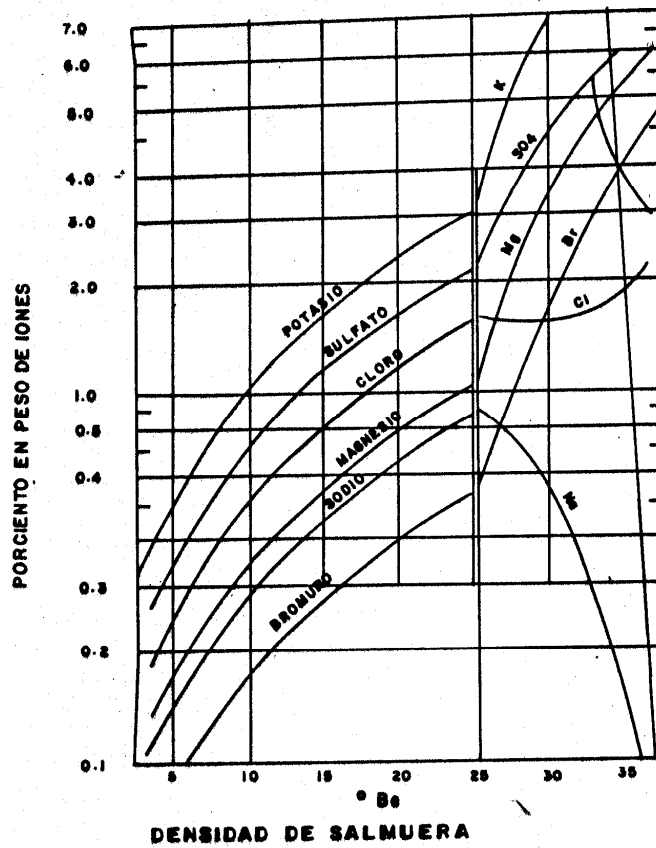


FIG. 5. COMPORTAMIENTO DE LOS IONES CON RESPECTO A LA CONCENTRACION DE LA SALMUERA

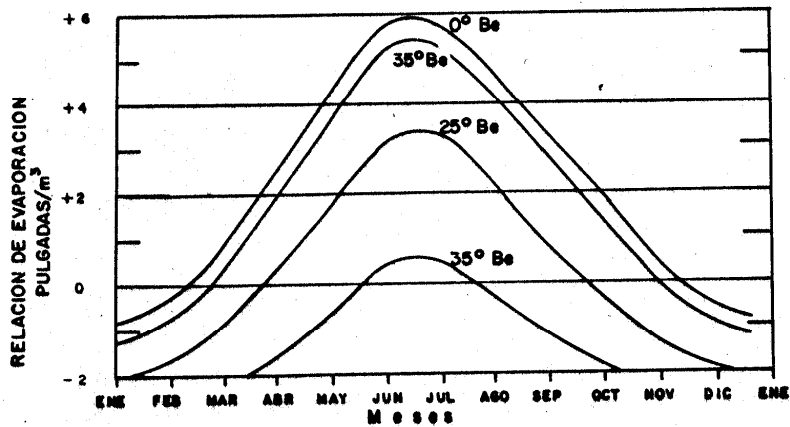


FIG. 6. VARIACION MENSUAL TIPICA DE RANGO DE EVAPORACION SOLAR