

PRINCIPIOS RACIONALES PARA LA EXPLOTACIÓN DE SALINAS A EVAPORACIÓN SOLAR

Por el profesor contratado Ingeniero **CONSTANTINO MÓSCU**

La necesidad orgánica del hombre por la sal, cloruro de sodio, le ha determinado desde los tiempos más antiguos a procurársela en todas las formas que la naturaleza la presentaba. Entre éstas, la sal en solución, en las aguas de mar, lagunas, lagos o fuentes, era la forma más accesible y así la extracción de la sal, por cristalización, utilizando la evaporación determinada por las condiciones climatéricas y topográficas, han formado una de las viejas industrias de la humanidad. Pero no obstante la gran edad de esta industria y asimismo que fueron creadas en nuestra época explotaciones de gran extensión, con instalaciones modernas, produciendo a veces algunas centenas de millares de toneladas por año (Hafun, Cabo Guardafuy, en la costa del Mar Rojo), los principios científicos de este tipo de explotación son muy poco conocidos y raramente aplicados.

La extracción de Na. Cl., de estas aguas y especialmente de las aguas de mar, consiste sumariamente en la concentración de ellas hasta la saturación en Na. Cl., al aire libre, en superficies arregladas para esta finalidad, siendo basada en realidad sobre un complejo de fenómenos, como:

- La acción evaporante, función del estado atmosférico y, en general de la climatología de la región, de la extensión y ubicación de la salina, de la concentración de las aguas;
- El proceso de precipitación de los varios cuerpos en disolución o suspensión en las aguas, influenciado también por la variación de la temperatura y las acciones químicas que pueden intervenir;
- La marcha de la cristalización, función del espesor de las capas de agua en los estanques, de la intensidad de los vientos, de la naturaleza del terreno que forma el fondo de los estanques.

El cuadro naturalmente reducido del presente artículo, no permite desarrollar todas las cuestiones ligadas con este asunto, así que nos permitiremos presentarlas de manera resumida.

El objeto de todo explotador de salinas es evidentemente obtener el máximo de producción por la unidad de superficie, en un mínimo de tiempo, debiendo evitar generalmente períodos climáticamente impropios y tratándose que sea la sal químicamente lo más pura posible y bien cristalizada.

Este propósito es realizado, según las incidencias ya señaladas, de los varios factores, de modo siguiente:

UBICACIÓN, CONDICIONES MESOLÓGICAS

Puesto que las salinas están generalmente ubicadas en regiones de clima árido o semiárido, es imprescindible completar las informaciones de climatología general de la región, casi siempre conocidas, por estudios de microclimatología, estrictamente local, de carácter permanente, instalando una estación metereológica en la salina, cuya importancia está en relación con aquella de la explotación.

Débase así establecer la presión atmosférica media anual, la temperatura media anual, el total de las precipitaciones anuales, la evaporación neta media en los períodos de trabajo, el número de días con precipitaciones $\geq 0,1$ m/m por ejemplo, en estos períodos, la posibilidad de un día con lluvia $\geq 0,1$ m/m, las direcciones correspondientes de los vientos, etc. Acumulando una serie bastante grande de observaciones, un observador atento tendrá la posibilidad de prever las precipitaciones por lo menos con una antelación de algunas horas, tomando las medidas necesarias para evitar o atenuar sus efectos damnificadores en la salina. Evidentemente el papel de la estación metereológica y de las observaciones, se reduce cuando se trata de lugares con clima invariable o típicamente árido, como en ciertas regiones ecuatoriales y tropicales del globo.

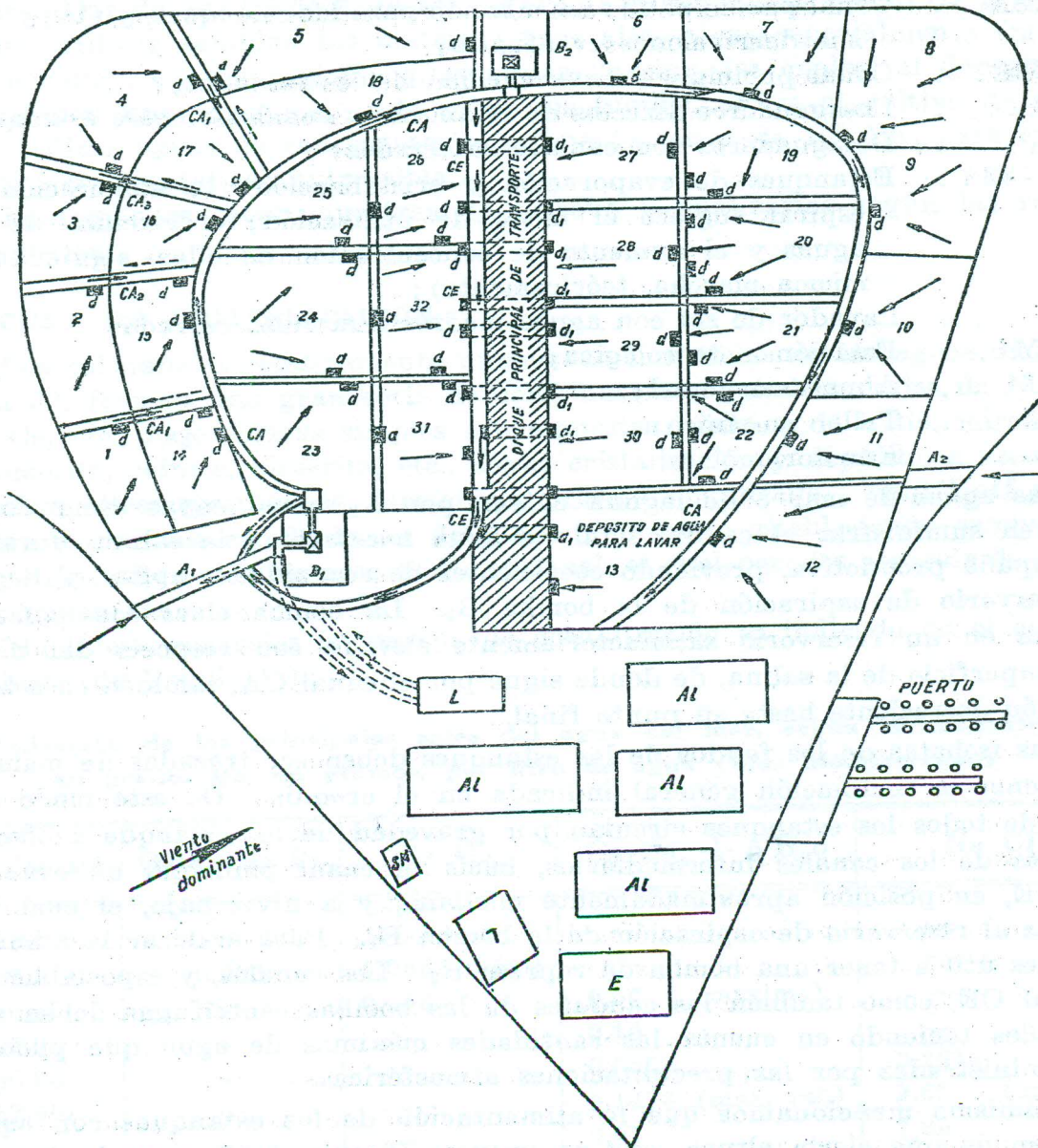
Naturalmente que la condición esencial es de existir una diferencia bastante grande entre la evaporación neta media y el total de las precipitaciones. Pero también la frecuencia y la intensidad, especialmente, de los vientos importa, afectando directamente la forma de cristalización. La sal cristaliza en la singonia o sistema cúbico, y en los estanques, se deposita en agregados cristalinos en la forma de tolva, generalmente incompleta, bajo la forma piramidal, correspondiendo a la mitad o cuarta de la tolva, cristales llamados dientes de caballo, por razón de aproximativa semejanza. Esta forma cristalina es la que se considera buena y ventajosa.

Para obtener esta forma de cristales se ha observado que es preciso una ligera «brisa», la cual al provocar un movimiento ondulatorio del agua, facilita el desplazamiento de los cristales elementales los cuales pueden agruparse, añadiéndose unos a otros sucesivamente. En cambio, si no existe esa brisa la formación de las agrupaciones es extremadamente reducida, una capa de cristales menudos se observa en la superficie del agua en los estanques, la cual cae al fondo en un cierto momento por su propio peso. El depósito está formado de cristales muy finos, incoherentes.

Todavía, hay un límite en la intensidad del viento, más allá de la cual, los cristales devienen de nuevo finos y no se agrupan, a causa de la precipitación demasiado rápida que no permite una orientación suficiente.

Morfológicamente el terreno de una salina debe ser plano y lo más próximo posible al nivel del mar. Si se desean obtener condiciones ideales para el movimiento de las aguas, es preferible utilizar parcial o totalmente, terrenos de forma peninsular, pudiendo ser alimentados con aguas de varias direcciones aunque sean opuestas, a fin de que dichos movimientos no se paralizen por los cambios de dirección de los vientos.

También en el interior de la península, débese aprovechar un fondo de pantano o pequeño lago, si eventualmente existe, haciendo coincidir el centro de la salina con su parte más profunda, y si estas condiciones naturales no existen, arreglar el terreno del mismo modo. Así construyendo estanques con fondos a líneas de nivel o de igual profundidad (isobatas) racionalmente orientadas, según el ciclo de circulación de aguas adoptado en la salina, se



evitan muchas horas de funcionamiento para las instalaciones mecánicas de circulación y se obtienen movimientos mucho más rápidos por gravedad, con los estanques dispuestos en cascadas.

Así, pues, la disposición general teórica, de una salina correspondería al croquis adjunto. Ella está formada por una serie de estanques separados por

diques, entre los cuales casi siempre hay canales que permiten el movimiento de las aguas, canales que deben ser numerosos y dar el máximo posible de combinaciones de movimientos:

- A₁ y A₂ Son canales para la entrada del agua del mar;
- B₁ y B₂ Son las instalaciones de bombas para la circulación forzada de las aguas;
- CA . . . Canal principal de alimentación para los estanques, y CA₁ y CA₂ sus derivaciones eventuales;
- CE . . . Canal principal de evacuación de los estanques;
- d . . . Desaguaderos directos de estanques a canales o entre estanques;
- d₁ . . . Desaguaderos con canales enterrados;
- 1-32 . . . Estanques de evaporación y cristalización (la numeración en espiral sugiere el modo de utilización; el circuito de las aguas y el aumento de concentración de ellas, siguiendo la misma marcha, teóricamente);
- L . . . Lavador de sal con aguas madres a circuito cerrado;
- SM . . . Estación meteorológica;
- Al . . . Almacenes de sal;
- T . . . Taller mecánico;
- E . . . Escritorio.

Las aguas de mar o de laguna entran por A₁, canal cuyas dimensiones permiten suministrar el caudal total de agua necesaria a la salina, durante la campaña productiva, previendo coeficientes de seguridad amplios, y llegan al reservorio de aspiración de la bomba B₁. La bomba eleva las aguas y desagua en un reservorio satisfactoriamente elevado con respecto del nivel de la superficie de la salina, de donde sigue por el canal CA, también en sobre-elevación decreciente hasta su punto final.

Las isobatas de los fondos de los estanques deben ser trazadas de manera de obtener la inclinación general indicada en el croquis. De este modo las aguas de todos los estanques circulan por gravedad de un estanque a otro o a través de los canales intermediarios, hacia el canal principal de evacuación CE, en posición aproximadamente mediana, y a nivel bajo, el cual les conduce al reservorio de aspiración de la bomba B₁. Para acelerar la alimentación es útil a tener una bomba de represa B₂. Los canales, y especialmente el canal CE, como también los caudales de las bombas centrífugas deben ser calculados teniendo en cuenta las cantidades máximas de agua que pueden ser suministradas por las precipitaciones atmosféricas.

Asimismo mencionamos que la alimentación de los estanques con agua que caen de una cierta altura, que no provoca inconveniente para los estanques de evaporación, no es admisible para los estanques de cristalización, en los cuales las aguas no deben ser perturbadas.

En cuanto a la naturaleza del suelo de la salina, ella debe ser estudiada para responder a las siguientes calidades imprescindibles: impermeabilidad, tanto para las aguas puestas sobre él, como para las aguas subterráneas,

resistencia suficiente para permitir la recolección de la sal, composición química adecuada, para no alterar la composición de la sal y, al contrario, favorecer en lo posible, la cristalización.

De este último punto de vista, se ha comprobado que los fondos de hormigón dan un resultado muy inferior al de los fondos de fango salado marítimo o lagunar, consolidado, el cual provoca una cristalización rápida y fuerte alrededor de sus núcleos de sal. Para facilitar la extracción de la sal se pueden utilizar también las materias vegetales, algas especialmente (*microleus corium*), en suspensión en las aguas de mar, las cuales, al depositarse constituyen una especie de tela sobre los fondos. Para el cultivo de éstas debe utilizar aguas de concentración suficiente, cerca de 10° Bé., para evitar que la capa vegetal sea putrescible.

Lo mejor es sacar muestras de terreno y analizarlas según las reglas edafológicas.

PROCESO DE CRISTALIZACIÓN

Las sustancias relativamente numerosas contenidas en las aguas de mar, hasta 32, forman una gran serie de combinaciones químicas: sales de Na, K, Mg, Ca, etc., bajo formas simples o compuestas: cloruro de sodio, mirabilita, picromerita, cainita, kieserita, etc., cuyas cristalización y depósito, a veces sucesivas, a veces simultáneas, forman un proceso complicado. Vant'Hoff y sus colaboradores han estudiado en detalle este proceso, estableciendo campos de saturación, sobre un diagrama tridimensional, el cual permite a seguir de cerca estos fenómenos.

En líneas generales la marcha de cristalización es indicada en el cuadro siguiente, de Usiglio (1):

Cristalización de las principales sales del agua del mar, según la concentración en grados Bé, en gramos, por litro de agua (Mar Mediterráneo)

Grados Bé	Oxido de Fe	Ca Co ₃	Ca So ₄ + n H ₂ O	Na CL
3,8	—	—	—	—
7,1	0,003	0,064 (máx.)	—	—
16,75	—	0,053	0,56 (máximo)	—
25,00	—	—	0,16	—
26,25	—	—	0,0508	3,2614
27,00	—	—	0,1476 (máx. rel.)	9,65 (máx.)
28,50	—	—	0,07	7,89
30,20	—	—	0,0144 (mínimo)	2,624
32,40	—	—	—	2,272
35,00	—	—	—	1,404 (mín.)
38,00	—	—	—	—

(1) Usiglio: "Annales de Chimie et de Physique", tomo XXVII.

J. Stocker (2) indica el análisis siguiente, para 1 m.³ de agua del Mar Mediterráneo, también a 3º 6 grados Baumé (Bé):

Cloruro de sodio	31,7	Kilogramos
Cloruro de magnesio	3,3	»
Sulfato de magnesio	2,7	»
Sulfato de calcio	1,4	»
Bromuro de sodio	0,6	»
Carbonato de calcio	0,4	»

O sean, aproximadamente, 32 kilogramos de sal común y 8 kilogramos de sales diversas.

Evaporando 1 m.³ de agua de mar a 3º 5 Bé., que contenía 41,6 kilogramos de sales disueltas y 983 kilogramos de agua, el mismo autor, sintetiza los resultados en el cuadro siguiente, lo cual completa al cuadro de Usiglio:

Grado Bé.	Volumen de la solución	Peso de la solución	Peso de las sales depositadas	Peso de las sales disueltas	Peso del agua en la solución	Peso del agua evaporada
3,5	1.000	1.025	0	41,6	983	0
8	476	504	0	41,6	463	520
16	203	228	0,5	41,1	187	796
25	112	135	1,6	40,0	93	888
30	30	38	26	15,6	23	960
35	17	22	31,6	10,0	12	971

En cuanto a la variación de la composición del agua con la concentración, hay aquí la composición a 3º 5 Bé., 25º Bé., 30º Bé. y 35º Bé.:

	AGUA A 3º 5 Bé. Kilogramos	AGUA A 25º Bé. Kilogramos	AGUA A 30º Bé. Kilogramos	AGUA A 35º Bé. Kilogramos
Cloruro de sodio	3,17	23,92	20,49	13,77
„ „ magnesio	0,33	2,63	9,79	16,85
Sulfato „ „	0,27	2,01	7,59	9,88
„ „ calcio	0,15	0,18	—	—
Sales diversas	0,13	0,89	3,18	4,50
Total sales	4,05	29,63	41,05	45,—
„ agua	95,95	70,4	58,95	55,—
TOTAL	100,—	100,—	100,—	100,—

(2) J. Stocker: "Le sel". Presses, Univ. de France, 1949.

Estos cuadros nos indican ya como debe ser seguida la cristalización, como también sugiere la idea de dividir en dos principales categorías los estanques de una salina, la primera llamada de «evaporación», donde se deponen las materias en suspensión, los óxidos de Fe, CaCO₃, yeso, concentrándose las aguas hasta llegar a la concentración de saturación en Cl. Na, alrededor de 25° Bé.; la segunda de «cristalización» donde irá a cristalizar y deponerse el Cl.Na; sin impurezas o mejor dicho, con el mínimo prácticamente posible de impurezas.

Se ve también que la concentración en estos estanques no debe ser continuada mas allá de 29° Bé., porque el máximo de deposición de la sal es así logrado y se debe evitar el depósito de sales magnesianas (Mg Cl₂, Mg So₄, etcétera) el cual empieza justamente a la concentración de 28°-29° Bé., aproximadamente.

La evaporación. La evaporación de las aguas de mar ha sido estudiada por numerosos investigadores a causa de su importancia capital en la meteorología porque con la elevación de los vapores a la atmósfera, ella determina todos los fenómenos meteorológicos; lluvias, nieblas, temporales, etc.

Los primeros, considerando la evaporación del agua dulce bien conocida en Física, con leyes bien establecidas, han buscado una relación entre ella y la evaporación del agua de mar, sea bajo la forma de relaciones fijas, sea bajo la forma de fórmulas empíricas. Así, Ragona, Chapman, Köttsdorfer, Dieulafait (1), Mazelle (2), Okada (3) establecen cada uno, una razón, la cual varía entre 0,54 y 0,98.

Mazelle da también una fórmula empírica:

$$y = -0,018 + 0,7303 x + 0,0561 x^2 - 0,0044 x^3$$

donde x es la evaporación del agua dulce, en condiciones de ambiente, idénticas.

Se han hecho después estudios metódicos por observaciones directas en varios mares y océanos, los cuales han conducido a resultados expuestos por el doctor G. Wüst en su publicación «Die Verdunnstung auf dem Meere» — Veröffentlichungen des Instituts für Meeres Kunde. Heft 6—Berlín 1920:

a) Velocidad de evaporación en aire inmóvil del agua pura. Los mejores resultados son obtenidos por la fórmula de Dalton;

$$\frac{dE}{d\theta} = C (e_s - e_a) \quad (1)$$

para una evaporación dE en el tiempo dθ, e_s siendo la tensión máxima de vapores a la temperatura S del agua evaporada, e_a la tensión actual de vapores en el aire, y C una constante.

(1) Dieulafait: "Evaporation comparée des eaux douces et des eaux de mer". Comptes rendus. Ac. Sc. París.

(2) Mazelle E.: "Verdunstung des Meereswassers und Süswassers". Sitzungber. K. akad. der Wiss. Math-Naturw Kl. Wien.

(3) Okada: "Vergleichende Mesungen der Verdunstung des Meerwassers und Süswasser". Met, Zeitschr.

De esta fórmula puede ser deducida la evaporación aparente, como resultado de dos factores: evaporación absoluta y condensación absoluta.

b) Influencia de la temperatura del aire, la cual, debe ser considerada porque la capacidad de absorción de la atmósfera para los vapores de agua aumenta con la temperatura, así que debemos introducir un factor de temperatura en la ecuación (1).

$$\frac{dE}{d\theta} = C \left(1 + \alpha t \right) \left(e_s - e_a \right) \quad (2)$$

c) Influencia de la proporción de sal. Hasta ahora hemos considerado la evaporación del agua pura, pero en las aguas de mar, tenemos en realidad una solución. Para éstas interviene una disminución de la tensión de vapor; ligada a la disminución del punto de congelación. Llamando con e_s a la tensión de vapor del agua pura, e_m aquella del agua de mar, y S el contenido en sal en ‰, hay, según Witting (1), la relación:

$$\begin{aligned} \text{sea} \quad \frac{e_s - e_m}{e_s} &= 0,0005 S \\ e_m &= \left(1 - 0,0005 S \right) e_s \end{aligned} \quad (3)$$

para mares o grandes superficies descubiertas.

El coeficiente de e_s , tiene entonces el valor de 0,98, en media S siendo 40 ‰, así que la ecuación (2) deviene:

$$\frac{dE}{d\theta} = C \left(1 + \alpha t \right) \left(0,98 e_s - e_a \right) \quad (4)$$

Hemos omitido las influencias debida a la variación de la presión del aire, que representan un máximo de 3 ‰, como también aquella debida a la variación de la concentración en sal, la cual, entre los límites de 30 ‰ y 50 ‰, no influye en la tensión de vapor más que en un 20 ‰, aproximadamente.

La ecuación (3) permite una interpretación teórica de la razón entre la evaporación del agua de mar E_m y la evaporación del agua dulce E_d representada por:

$$\frac{E_m}{E_d} = \frac{0,98 e_s - e_a}{e_s - e_a}$$

Como es notorio esta razón no es constante, lo que explica los valores tan diferentes encontrados por los distintos investigadores, así como hemos mencionado al comienzo de este párrafo.

(1) Witting R.: "Untersuchungen für Kenntnis der Wasserumsetzungen in den Finland umgebenen Meeren". Institut Finl. hydrographische biolog. Untersuchungen, No 2, 1908.

En los climas secos e_a será muy reducido en relación con e_s , así que el valor del cociente se acerca a su valor máximo 0,98. Pero cuando más húmedo sea el clima, tanto más pequeño será el valor de la relación.

d) *Influencia del movimiento del aire.* Esta influencia es asimismo visible en la fórmula de Dalton, porque es claro que el número de las moléculas de vapor de agua tomadas por el aire aumenta con la velocidad de la corriente de aire.

Dalton, Weilemann, Stelling, representa esta influencia por una función lineal de la forma:

$$f(v) = K(1 + av)$$

mientras que Schiebeck, Trabert y Krümmel la representa por una ecuación de la forma:

$$f(v) = C\sqrt{v}$$

Marvin en 1909 ha intentado explicar teóricamente la influencia del viento sobre la evaporación y sus estudios lo han inducido a adoptar una curva de carácter parabólico.

Estos resultados han sido confirmados por las investigaciones de Gallenkamp, quien llega a la siguiente fórmula:

$$\frac{dE}{d\theta} = C(1 + \alpha t)(e_s - e_a)\left(\sqrt[3]{v} + 0,08\sqrt[3]{v}\right)$$

para la evaporación, modificando la ecuación (4) por la introducción del último término que se refiere a la influencia de la velocidad del aire V . La fórmula da una buena concordancia entre los valores observados y calculados pero únicamente para V entre 0 y 15 Km. por hora.

La fórmula general de la ecuación (4) será entonces:

$$\frac{dE}{d\theta} = Kf(v)(1 + \alpha t)(0,98e_s - e_a)$$

La altura del agua evaporada en un tiempo Θ sería:

$$E = K(1 + \alpha t) \int f(v)(0,98e_s - e_a)$$

En la práctica, límitase a una aproximación más grosera substituyéndose las integrales con los valores medios de una serie de observaciones. En este caso:

$$E = K(1 + \alpha t) f(v)(0,98e_s - e_a), \text{ donde:}$$

E igual altura de agua evaporada en 12 ó 24 horas.

V , e_s , e_a , eventualmente medias diurnas.

Marvin ha introducido la noción de potencial de evaporación:
 $p = (1 + \alpha t) (0,98 e_s + e_a)$ lo que simplifica sensiblemente los cálculos, utilizándose la ecuación: $\frac{E}{p} = A + B V$ por la evaporación en 24 horas; donde A y B son constantes que se determinan experimentalmente, y V la velocidad media del viento en el recipiente de las observaciones.

CÁLCULO DE LAS ÁREAS

En la práctica para la evaporación, se utilizan las indicaciones de los aparatos de medición de uso común: los evaporímetros, completados con eudiómetros ubicados lo más racionalmente posible, a fin de deducir la evaporación neta con una buena aproximación.

Es cierto que estos aparatos nunca estarán en condiciones idénticas a la de los estanques, pero como su ubicación es permanente será posible determinar una relación entre las lecturas y las comprobaciones prácticas en la salina.

La evaporación disminuye con el aumento de la densidad de la solución, como hemos visto precedentemente.

Examinando experimentalmente la variación de la evaporación de una salmuera en función de la concentración, por la misma superficie, ubicación y condiciones ambientes, se ha visto que ella está representada por una curva que tiene una leve convexidad con respecto al eje de las abscisas, los que era también indicado por las previsiones teóricas.

A esta curva se puede substituirse con suficiente aproximación, por una línea recta.

Si E es el valor de la evaporación a una densidad x , en grados Bé., esta recta está dada por la ecuación:

$$E = a x + b \quad (I)$$

Tomando b igual 1, el valor de a , es $a = -0,022$ (figura 1). Partiendo de la ley de la evaporación se puede deducir la superficie necesaria para obtener una cierta cantidad de sal en una localidad determinada, como también la relación que debe existir entre la superficie de evaporación y la de cristalización.

Pero se debe tener en cuenta que hay dos períodos distintos en el proceso, es decir:

- Evaporación de agua para conducir la solución al punto de saturación;
- Evaporación para provocar la cristalización de la sal, después del punto de saturación.

En el primer período hay un notable decrecimiento del volumen de agua en relación con el aumento de la densidad. Las investigaciones experimentales

han demostrado que esa variación está dada por una curva que se puede representar con buena aproximación, por la ecuación:

$$xy + cx = D \quad (II)$$

en la cual $\left\{ \begin{array}{l} x = \text{Densidad del agua en grados Bé.;} \\ y = \text{Volumen de la solución para la misma densidad;} \\ c = 0,0326; \\ D = 2,0652; \end{array} \right.$

tomando como unidad, el volumen del agua del mar a la densidad de 2º Bé., (figura 1).

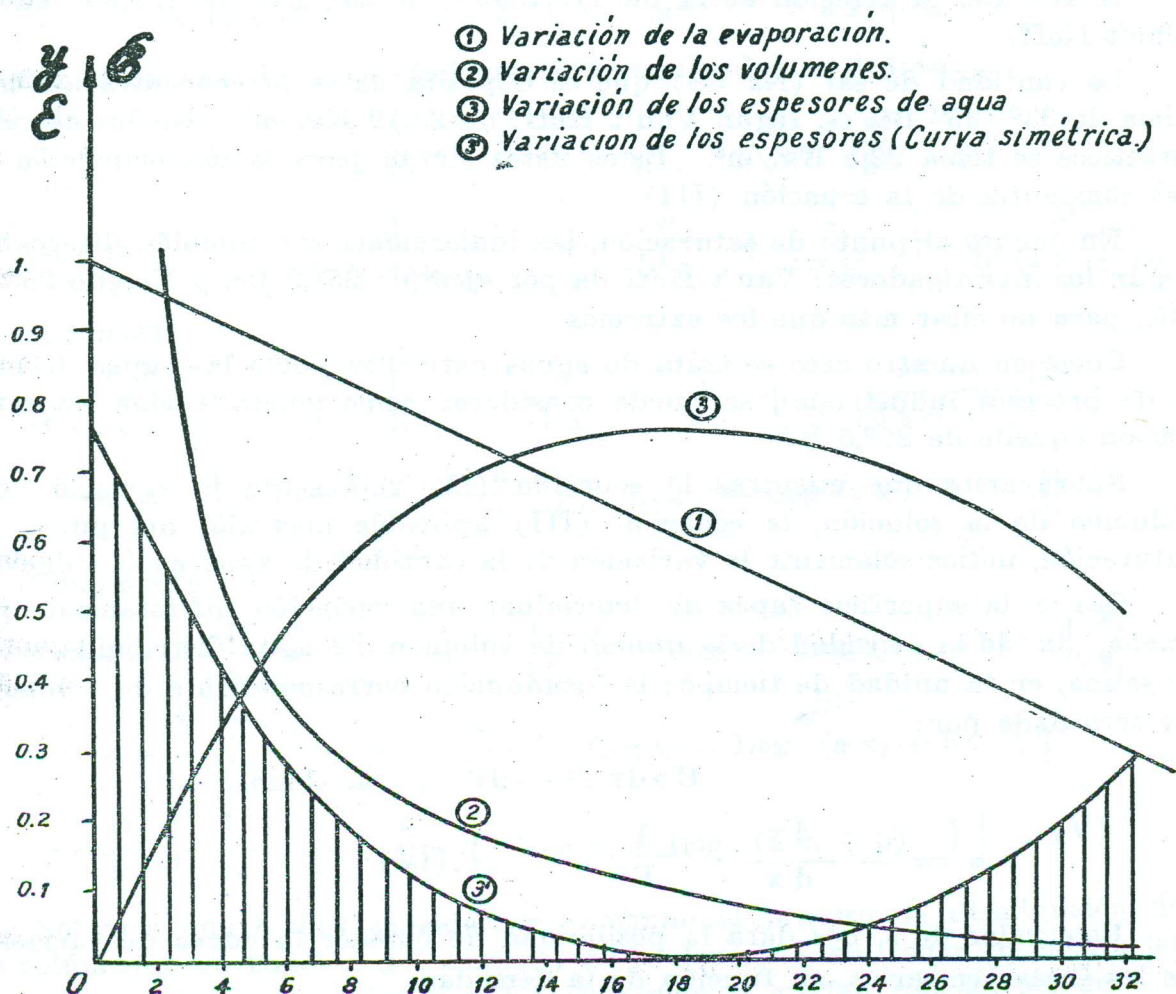


Figura 1

En la fase más allá del punto de cristalización, el agua evaporada es proporcional con la sal que se deposita, porque es efectivamente la cantidad de agua capaz de mantener en disolución la cantidad respectiva de sal, a la concentración de saturación.

La variación será aquí de la forma lineal:

$$y = \gamma x + \delta \quad (III)$$

en la cual los coeficientes pueden ser establecidos en función de la cantidad de sal que se deposita entre el punto de saturación y la concentración límite adoptada por el proceso de la salina respectiva, la cual es conveniente que sea de 28° - 29° Bé.

La relación entre la cantidad total de sal y la cantidad de agua en el punto de saturación varía, según los autores entre 1/2,665 (Van't Hoff) y 1/2,749 (Usiglio).

A 28° Bé. la relación sería de 1/2,1545 y a 29° Bé. de 1/1,958 según Van't Hoff.

La cantidad de sal (Na Cl) que se deposita hasta la concentración máxima de 33° - 35° Bé. es, según Van't Hoff, de 22,19 Kg./m³. En los cálculos prácticos se toma 22,5 Kg./m³. Estos datos sirven para la determinación de las constantes de la ecuación (III).

En cuanto al punto de saturación, las indicaciones son también diferentes, según los investigadores: Van't Hoff da por ejemplo 25°,2 Bé. y Usiglio 26°,25 Bé., para no citar más que los extremos.

Como en nuestro caso se trata de aguas naturales, como las aguas de mar y de procesos industriales, se puede considerar como concentración de saturación aquella de 25°,5 Bé.

Subrayamos que mientras la ecuación (II) representa la variación del volumen de la solución, la ecuación (III) aplicable más allá del punto de saturación, indica solamente la variación de la cantidad de agua en la solución.

Sea s la superficie capaz de determinar una variación infinitamente pequeña, dx de la densidad de la unidad de volumen del agua distribuida sobre la salina, en la unidad de tiempo; la disminución correspondiente de volumen, dy será dada por:

$$E s dx = - dy, \quad \text{de donde:}$$

$$s = - \frac{dy}{dx} \cdot \frac{1}{E} \quad (IV)$$

Este valor de s , nos dará la posibilidad de obtener la curva de variación de las áreas necesarias, en función de la densidad.

Integrando la ecuación entre dos densidades x_1 y x_2 , obtenemos el área necesaria para llevar de la densidad x_1 , a la densidad x_2 , el volumen unitario de agua (que hemos considerado que es el volumen del agua a 2° Bé):

$$\int_{x_1}^{x_2} s dx = - \int_{x_1}^{x_2} \frac{dy}{dx} \cdot \frac{1}{E} dx$$

Así, pues, para el primer período ya considerado (de evaporación hasta la saturación), y utilizando las ecuaciones (I) y (II) tendremos:

$$\int s \, dx = -D \int \frac{dx}{x^2 (ax + b)}$$

La fracción $\frac{1}{x^2 (ax + b)}$ es una fracción racional de forma $\frac{f(x)}{g(x)}$ en la cual el grado de $f(x) <$ grado de $g(x)$ así que se puede descomponer en una serie de fracciones racionales:

$$\frac{1}{x^2 (ax + b)} = \frac{\alpha}{x} + \frac{\beta}{x^2} + \frac{\gamma}{ax + b}$$

Por el método de los coeficientes indeterminados se deduce:

$$\alpha = -\frac{a}{b^2}; \quad \beta = \frac{1}{b}; \quad \gamma = \frac{a^2}{b^2}$$

Así que:

$$\frac{1}{x^2 (ax + b)} = -\frac{a}{b^2 x} + \frac{1}{b x^2} + \frac{a^2}{b^2 (ax + b)}$$

Entonces:

$$\begin{aligned} \int \frac{dx}{x^2 (ax + b)} &= \int \frac{1}{b} \left[-\frac{a}{bx} + \frac{1}{x^2} + \frac{a^2}{b(ax + b)} \right] dx = \\ &= -\frac{1}{b} \left[\frac{1}{x} + \frac{a}{b} \left[\text{Log } x - \text{Log } (ax + b) \right] \right] \end{aligned}$$

Finalmente:

$$\begin{aligned} \int_{x_1}^{x_2} s \, dx &= \frac{D}{b} \left[\frac{1}{x} + \frac{a}{b} \left[\text{Log } x - \text{Log } (ax + b) \right] \right]_{x_1}^{x_2} = \\ &= \frac{D}{b} \left[\frac{1}{x_2} + \frac{a}{b} \left[\text{Log } x_2 - \text{Log } (ax_2 + b) \right] \right] \\ &\quad - \frac{D}{b} \left[\frac{1}{x_1} + \frac{a}{b} \left[\text{Log } x_1 - \text{Log } (ax_1 + b) \right] \right] \quad (V) \end{aligned}$$

Notamos que hemos considerado continuo el proceso de disminución de los volúmenes, en función del aumento de la densidad, sin tener en cuenta las discontinuidades provocadas por la separación a ciertas concentraciones, de varias sustancias, como: óxidos de Fe, carbonato y sulfato de calcio.

Para la segunda fase, tomando en consideración las ecuaciones (I) y (III), obtenemos:

$$\int_{x_2}^{x_3} s \, dx = -\gamma \int_{x_2}^{x_3} \frac{dx}{x^2 (ax + b)} = -\gamma \left[\text{Log } (ax_3 + b) - \text{Log } (ax_2 + b) \right] \quad (VI)$$

Estas fórmulas nos permiten entonces calcular las superficies necesarias para elevar la concentración de las aguas de una densidad a otra en el período de evaporación propiamente dicho, o de provocar la cristalización de la sal entre dos límites de densidades preestablecidas, en la fase de cristalización.

En caso de conocer la superficie y una densidad, se puede determinar la otra.

En realidad, la salina no puede ser construída para realizar el proceso en forma continua y se debe fijar una serie de intervalos de evaporación, incluyendo un número más o menos grande de estanques, según la concentración de las aguas de alimentación, la intensidad de la evaporación, la composición de las aguas, etc.

La amplitud de cada serie de estanques, correspondiendo a un intervalo de concentración, se calculará con las fórmulas precedentes, tomándose las densidades iniciales y finales para cada una de ellas.

Una consecuencia muy interesante para el explotador de una salina es la de apreciar el espesor del agua en los distintos períodos de la campaña salífera. para obtener el mejor resultado, ya que, intuitivamente se puede prever que los espesores deben variar según los grados de concentración. Así un espesor menor de la capa líquida favorecerá una mayor evaporación.

Pero el espesor es dado por:

a) Para el período de evaporación:

$$\epsilon_1 = \frac{y}{s} = \frac{x}{D} \left(D - cx \right) \left(ax + b \right) \quad (\text{VII})$$

b) Para el período de cristalización:

$$\epsilon_2 = \frac{y}{s} = \gamma \frac{\gamma x + \delta}{ax + b} \quad (\text{VIII})$$

Para el período de cristalización la variación del espesor de agua en los estanques no presenta interés porque se mantiene generalmente constante. Su valor debe ser determinado por la preocupación de obtener el máximo de evaporación, pero también teniendo en cuenta que sea bastante grande para proteger la capa de sal cristalizada en caso de lluvia, en las regiones con precipitaciones abundantes y bruscas.

En la fase evaporante la variación del espesor en función de la densidad es al contrario muy interesante, porque responde al imperativo de la explotación, de acelerar lo más posible la evaporación.

Representando gráficamente la curva $\epsilon_1 = f(x)$ dada por la ecuación (VII) obtenemos la curva (3) pasando por el origen para la densidad $x = 0$ (figura 1).

Como se ve, el espesor va creciendo desde las densidades altas, teniendo un máximo para la densidad de cerca de 20° Bé., para disminuir después en la región de la saturación. Tomando la curva (3') simétrica de la curva (3) las ordenadas de esta curva darán proporcionalmente los espesores de agua que se debe tener en los estanques de la salina.

Estas indicaciones deben ser seguidas en las salinas para obtener buenos resultados. Claro que, como en la práctica no es realizable una continuidad de acción, los espesores calculados e indicados por la curva (3') serán adoptados para los varios intervalos ya establecidos y las respectivas series de estanques.

Si un intervalo ha sido establecido entre dos densidades n y p , el espesor varía entre:

$$\epsilon_n = \frac{y_n}{\int_n^p \frac{d y}{d x} \frac{1}{E} d x} \quad \text{y} \quad \epsilon_p = \frac{y_p}{\int_n^p \frac{d y}{d x} \frac{1}{E} d x} \quad (\text{IX})$$

De este modo el explotador puede adoptar para el intervalo respectivo, sea el valor inicial ϵ_n , sea el valor final ϵ_p , sea el valor medio:

$$\frac{\epsilon_n + \epsilon_p}{2} \quad \text{para el espesor del agua.}$$

Aplicación: Para ilustrar los conceptos expuestos en lo que precede, vamos a aplicarlos a una salina, con los siguientes datos característicos:

- Producción a alcanzar por campaña salífera: 10.000 toneladas;
- Evaporación neta total, durante la campaña salífera: 0,60 m., correspondiendo a las salinas uruguayas de Rocha, cerca de Montevideo, para el período octubre-mayo;
- Concentración inicial de las aguas: 2º Bé (el caso más desfavorable para el Océano Atlántico);
- Concentración final considerada 28º Bé.

Calculamos las áreas unitarias con las fórmulas (V) y (VI) en la hipótesis que la cantidad de sal depositada en el período de cristalización por el volumen unitario a 2º Bé., representa 22,50 kilogramos, lo que conduce a

$$\gamma = - 0,01256 \quad \text{y} \quad \delta = 0,43, \quad \text{aproximadamente.}$$

Las áreas respectivas serán:

$$S_{2^\circ}^{25^\circ} = 1,9220 \quad \text{y} \quad S_{25^\circ}^{28^\circ} = 0,0906$$

y el área total necesaria:

$$M = S_{2^\circ}^{25^\circ} + S_{25^\circ}^{28^\circ} = 2,0126 \text{ m}^2$$

para la evaporación unitaria, sea $E = 1,00 \text{ m.}$

Para obtener una tonelada de sal con $E = 0,60 \text{ m.}$, serán necesarios:

$$\frac{2,0126 \times 1000}{0,60 \times 22,5} = 148 \text{ m}^2$$

y para 10.000 toneladas

$$M = 148 \text{ ha.}$$

La relación entre las superficies de cristalización y evaporación, es:

$$R = \frac{0,0906}{1,9220} = \frac{1}{21,20} = \frac{i}{2i}$$

y calculando, obtenemos para cada uno de ellos respectivamente:

$$S_e = 6,730 \text{ ha} \quad \text{y} \quad S_c = 141,270 \text{ ha}$$

La superficie evaporante se puede dividir en 6 series de estanques, por ejemplo, según el orden siguiente:

	Superficie unitaria		Superficie total
Serie I de 2º a 4º Bé.	0,9615	cerca	70,670 hs.
Serie II de 4º a 7º Bé.	0,4374	»	32,149 »
Serie III de 7º a 11º Bé.	0,2324	»	17,082 »
Serie IV de 11º a 15º Bé.	0,1221	»	8,975 »
Serie V de 15º a 20º Bé.	0,0974	»	7,160 »
Serie VI de 20º a 25º Bé.	0,0712	»	5,234 »
	<hr/>		<hr/>
	1,9220		141,270 hs.

Las aguas de mar entran en la primera serie de estanques donde se produce la primera decantación depositándose los cuerpos en suspensión, la arena, etc. Después siguen pasando en las otras series de estanques decantándose siempre más y dejando los óxidos de hierro, el carbonato de calcio y en las últimas dos series, el yeso.

De la última serie, teniendo ya la concentración de saturación, 25º o 25º, 5 Bé, las aguas pasan en los estanques de cristalización, donde cristaliza el Na Cl., prácticamente puro.

Cuando la concentración alcanza 29º Bé, estas aguas llamadas madres, se tiran fuera de los estanques de cristalización, evitándose así el depósito de sales magnésicas y son substituídas por otras aguas a 25º Bé.

La producción media para la superficie total será:

$$\frac{10.000.000 \text{ kg}}{1.480.000 \text{ m}^2} = 6,8 \text{ kg / m}^2$$

y para la superficie de cristalización:

$$\frac{10.000.000 \text{ kg}}{67.300 \text{ m}^2} = 148,5 \text{ kg / m}^2$$

El volumen de agua salada (marina) que se debía utilizar, sería:

$$\frac{1 \text{ m}^3 \times 10.000.000 \text{ kg}}{22,5 \text{ kg}} = 444.444 \text{ m}^3$$

Los espesores de agua a ser adoptados en cada una de las seis series de estanques arriba mencionadas, se calcularán según el método ya indicado y las fórmulas (VII), (VIII) y (IX).

Es claro que, en la realidad los fenómenos examinados son mucho más complejos, pero si se tiene en cuenta la imperfección de los métodos de su medición, los errores de los aparatos, la variación continua de los factores que influyen sobre los elementos básicos; evaporación, concentración de aguas, etc., nuestras consideraciones o simplificaciones de valores medios, no dan diferencias muy sensibles con los resultados directos, así que los métodos expuestos para establecer un proyecto de salina, pueden rendir apreciables servicios, substituyendo el empirismo.

El cuadro forzosamente restringido de este artículo no permite desarrollar más ampliamente el asunto y por la misma razón hemos dejado de lado algunos aspectos interesantes, como el aprovechamiento de las aguas madres en la explotación, extracción de otras substancias aparte de Na Cl., contenidas en las aguas de mar, cuestiones tratadas ya en otras publicaciones (1 y 2).

-
- (1) Ing. Constantino Móscu: "Cálculo, instalación y métodos de explotación de salinas de mar". Congreso general de Ing. de Minas, Bucarest, 1939.
 - (2) Ing. Constantino Móscu: "Las utilizaciones industriales de las aguas de mar y océanos". Ed. Miniera, Bucarest, 1937.