

# **Jornada científica: Plantas desaladoras y vertido al medio marino**

## **El fenómeno de la Osmosis en la dispersión de la salmuera en un lecho marino**

Por: Juan Maria Sánchez Sánchez  
ECOAGUA INGENIEROS

*Murcia, 13 marzo 2003*



# 1.- INTRODUCCIÓN

La necesidad de disponer de un Modelo Matemático que sirva para realizar predicciones del comportamiento de la salmuera al ser vertida en el medio marino es algo que todos los implicados en el campo de la desalación, ingenierías, constructores, administración y usuarios, estamos necesitando cada vez con mayor urgencia.

Obviamente el Modelo debe ser tal que, una vez introducidas las condiciones locales: batimetría, corrientes marinas, oleaje, forma de la costa, etc. permita obtener resultados fiables, es decir que reflejen lo más fielmente posible el comportamiento posterior de la realidad. Para ello es preciso que en dicho modelo se incluyan todas aquellas variables que de una forma u otra puedan influir en el comportamiento de la salmuera en el medio marino.

Las razones para querer disponer de un sistema predictivo fiable creo que son muchas y todos podemos darlas, pero voy a apuntar algunas que me parecen importantes resaltar. Disponer de dicha herramienta nos permitirá adoptar las medidas correctoras que realmente se precisan para impactar lo menos posible al Medio Ambiente, haciendo que las medidas adoptadas sean en la dirección correcta y con las inversiones que realmente se precisen. Lo contrario, puede dar lugar a hacer inviables Plantas desaladoras, que podrían resolver el problema de muchas personas, por la necesidad de realizar inversiones excesivas de protección marina debido una predicción incorrecta del comportamiento de la salmuera. Las consecuencias que se derivarían de una situación así, creo que no es necesario comentarlas.

## 2.- SITUACIÓN ACTUAL

Hasta ahora los únicos modelos disponibles son los desarrollados para otras aplicaciones como son la dispersión de los contaminantes contenidos en los humos de las chimeneas al ser puestos en la atmósfera, o la dispersión de los contaminantes de un agua residual al ser enviados a un medio receptor, como puede ser el mar. Todos ellos son modelos válidos para la aplicación para la que fueron desarrollados, pero al tratar de utilizarlos en la dispersión de la salmuera los resultados que nos dan respecto al comportamiento de las "plumas" de dispersión no se ajustan a la realidad como se ha podido constatar.

Dichos Modelos se basan en el análisis hidráulico (diferencias de densidad, efecto de la temperatura...), de la difusión (coeficientes de difusión de los componentes.....) y mecánico (efecto del oleaje, de las corrientes, las mareas,.....). Este análisis es válido para contaminantes en suspensión o que no son iónicos, pero este no es el caso de la salmuera, donde sus "contaminantes" son las mismas sales que ya existen en el mar, pero concentradas en un 15%, para el caso de las plantas de MSF o MED, y hasta el doble, para el caso de la Osmosis Inversa. Dichas sales, como todos sabemos, están disueltas e ionizadas y, por tanto, ponen en juego otra fuerza que es la Presión Osmótica. No tenemos que confundir la membrana semipermeable con el fenómeno de la Osmosis. La membrana permite poner de manifiesto un fenómeno que ya existe independientemente de ella. Confundir ambas cosas sería como confundir el termómetro con la existencia de la temperatura. Dicha confusión está en todas partes, así el Diccionario de la Real Academia de la lengua define la palabra ósmosis como: "*del griego Acción de empujar, impulso/ f. Fis. Difusión o paso reciproco que tiene lugar entre dos líquidos o gases de distinta densidad capaces de mezclarse a través de un tabique o membrana permeable que las separa*". Por su parte los diccionarios de María Moliner y de Manuel Seco dan ambos la misma definición: "*del griego "osmos", impulso. 1 f.Fís Fenómeno que consiste en el paso reciproco de dos líquidos de distinta*

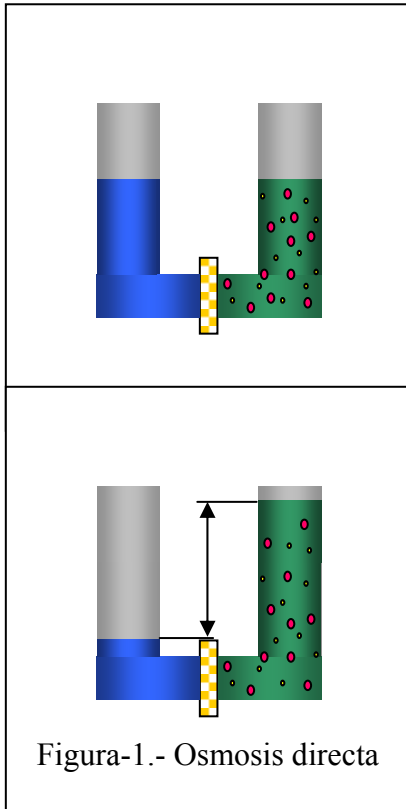
*densidad a través de una membrana porosa interpuesta entre ellos.*

**2 Influencia reciproca entre dos cosas que se ponen en contacto".** Como se puede ver las definiciones no son todo lo correctas que se debería esperar desde el punto de vista del fenómeno físico.

Dando por hecho que las fuerzas (presiones) que pone en juego el fenómeno de la ósmosis existen en cualquier caso, el Modelo Matemático que contemple la dispersión de la salmuera debe tenerlo en consideración. Su importancia no es pequeña, como todos conocemos, pues la diferencia de presiones entre el agua de mar y la salmuera, en el caso de plantas de Osmosis Inversa, puede llegar a valores de 25 a 30 bares.

### 3.- UNA PRIMERA APROXIMACIÓN

Voy a tratar de plantear, en una primera aproximación, las bases de cálculo de esta influencia de la osmosis sobre la dispersión de la salmuera.



En primer lugar una observación. En el lenguaje que utilizamos decimos que una solución salina tiene una presión osmótica de un valor determinado, pareciendo que dicha solución ejerce dicha presión sobre el agua pura. En realidad es al revés, es decir si tomamos el agua pura como nivel de referencia cero, las soluciones salinas presentan una **depresión osmótica** frente al agua pura, ya que, puestas en contacto a través de una membrana semipermeable, es el agua la que va hacia la solución salina y termina equilibrando la depresión osmótica con una presión hidrostática.

Si tenemos una tubería que descarga un caudal  $Q_s$  de salmuera con una salinidad de  $S_s$ , y aceptamos que el agua de mar intentará diluir dicha corriente introduciéndose en ella por efecto de osmosis, al cabo de un cierto tiempo alcanzaremos una situación estática de la descarga. Para determinar el estado de esta situación estática vamos a partir de las siguientes hipótesis:

- que la influencia de otros factores, como las corrientes marinas, las mareas, el oleaje es nulo
- que la altura del fondo marino es grande
- que la distancia a la superficie del mar es grande
- que la velocidad de salida de la salmuera es cero
- que el efecto de diferencia de densidades es nulo

Es decir que el efecto de las demás variables que intervienen en la dispersión es nulo. En primer lugar será un modelo de simetría central,

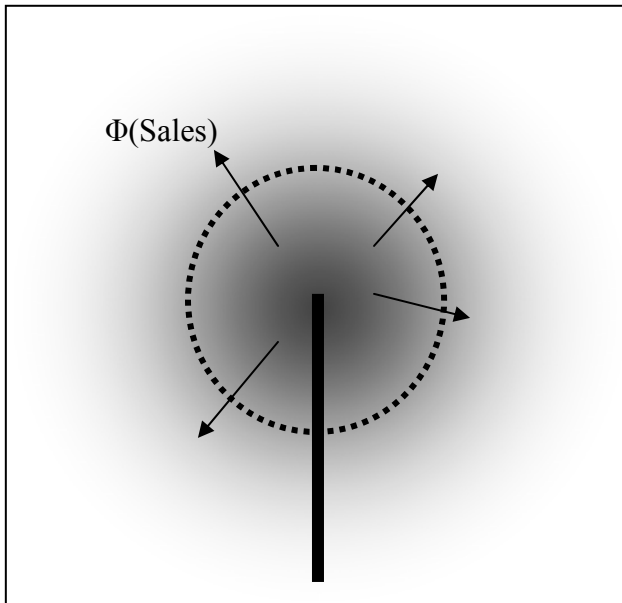


Figura 2.- Dispersión de la salmuera

por lo que tendrá forma esférica con centro el punto de descarga de la salmuera. En este punto la salinidad será la de la salmuera, es decir  $S_s$ , después irá disminuyendo en esferas concéntricas hasta que en el infinito la salinidad será la del agua de mar  $S_{am}$ .

En esta situación, a través de cualquier superficie esférica concéntrica el flujo de sales neto que va a salir es

igual a  $Q_s \times S_s$ , y en dirección radial, ya que las sales que entren dentro de la esfera traídas por el agua de mar de disolución de la salmuera, habrán de salir a su vez, pues dentro de la esfera no hay sumideros. Podemos por tanto poner el flujo de sales como:

$$\overline{\Phi(\text{Sales})} = \frac{Q_s \times S_s}{4\pi R^2} \vec{r}, \text{ si calculamos la divergencia de este campo vectorial,}$$

$$\text{tendremos: } \text{div } \vec{\Phi} = \frac{\partial \Phi}{\partial R} + \frac{2}{R} \Phi = \frac{Q_s \times S_s}{4\pi} \left( \frac{-2R}{R^4} + \frac{2}{R^2} \frac{1}{R} \right) = 0, \text{ es decir la}$$

divergencia de este campo vectorial es cero, lo que significa que es irrotacional por lo que existe un campo escalar que cumple que su Laplaciana es cero. El campo escalar es la concentración de sales en cada punto del campo, que tiene forma esférica también. El gradiente de este campo es un campo vectorial que va en sentido de las concentraciones crecientes, es decir tiene el mismo sentido que la **depresión osmótica** y por tanto podemos establecer que el gradiente del campo escalar es una función de la presión osmótica:

$$\overrightarrow{\text{grad}S} = F(\Pi_o); \text{ siendo } \Pi_o \text{ es la presión osmótica de } S$$

por otra parte tenemos que:

$\Delta S = 0$  ; que integrándola con las condiciones antes dichas sobre el gradiente y con las condiciones de contorno siguientes:

$$R = 0 \rightarrow S = S_s$$

$$R = \infty \rightarrow S = S_{am}$$

Tenemos una ecuación en derivadas parciales que al integrarla se obtiene la solución al problema, cuyo resultado es una ecuación del tipo:

$$S = \emptyset(R, S_s, S_{am}, Q_s, T)$$

## 4.- CASOS ESTUDIADOS

Haciendo una integración numérica aplicada a casos concretos, tenemos los resultados que vamos a presentar a continuación:

CASO 1.- Planta de Osmosis Inversa de producción 50.000 m<sup>3</sup>/d, factor de conversión 45%, salinidad del agua de mar de 35.000 ppm. y temperatura 20°C

En este caso el caudal de salmuera será de 2.546 m<sup>3</sup>/h, con una concentración de 63.316 ppm. La curva de concentración de sales en función de la distancia al punto de descarga contemplando solamente el efecto de la Osmosis, es la de la figura-3.

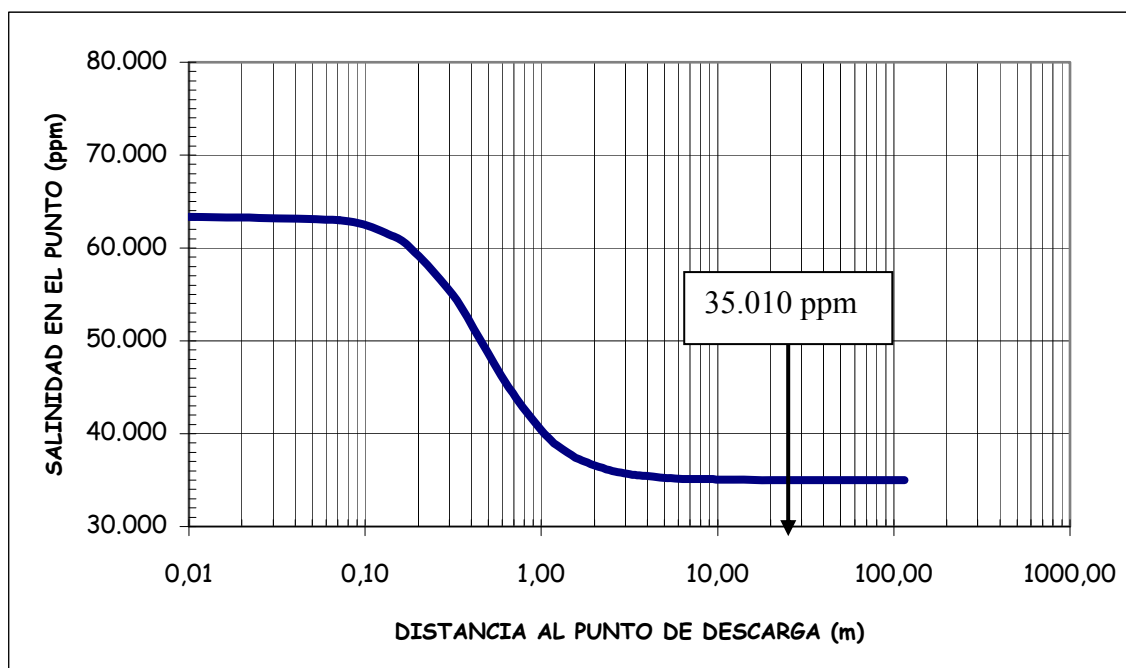


Figura 3.- CASO-1

Podemos ver en la Figura 3 que la dispersión de la salmuera tiene lugar de una forma rápida en el primer metro y medio de radio de la esfera, donde se reduce la salinidad a 38.600 ppm. y a los 26 m. la diferencia de salinidades entre la descarga y el agua de mar es de 10 ppm. A los 115 metros la diferencia entre ambas corrientes es de 0,5 ppm.



CASO 2.- Planta de Osmosis Inversa de producción 250.000 m<sup>3</sup>/d, factor de conversión 45%, salinidad del agua de mar de 35.000 ppm. y temperatura 20°C

En este caso el caudal de salmuera será de 12.730 m<sup>3</sup>/h, con una concentración de 63.316 ppm. La curva de concentración de sales en función de la distancia al punto de descarga contemplando solamente el efecto de la Osmosis, es la de la figura-4.

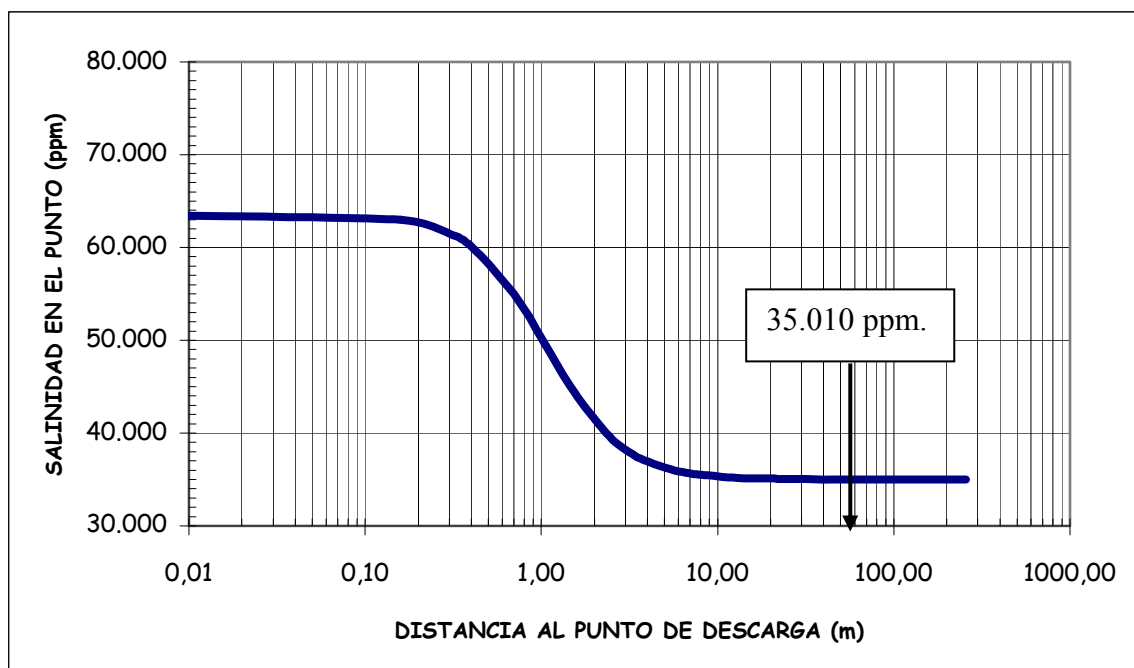


Figura 4.- CASO-2

En la figura podemos observar que aumenta el tamaño de la esfera de salinidades, pero no de forma proporcional al caudal, ya que mientras este aumenta cinco veces, la esfera de salinidades aumenta poco más del doble para la salinidad de 38.500 ppm que ahora ocurre a menos de cuatro metros. Lógicamente la asintota se alarga mucho más, así los 35.010 ppm. se alcanzan a los 57 m. y la diferencia de 0,5 ppm. ocurre a los 257 m. No obstante como se puede ver la zona crítica sigue sin ser grande desapareciendo la concentración de la salmuera que podríamos considerar peligrosa antes de los diez metros del punto de descarga.

CASO 3.- Planta de Osmosis Inversa de producción 250.000 m<sup>3</sup>/d, factor de conversión 45%, salinidad del agua de mar de 40.000 ppm. y temperatura 20°C

En este caso el caudal de salmuera será de 12.730 m<sup>3</sup>/h, con una concentración de 72.408 ppm. La curva de concentración de sales en función de la distancia al punto de descarga contemplando solamente el efecto de la Osmosis, es la de la figura-5.

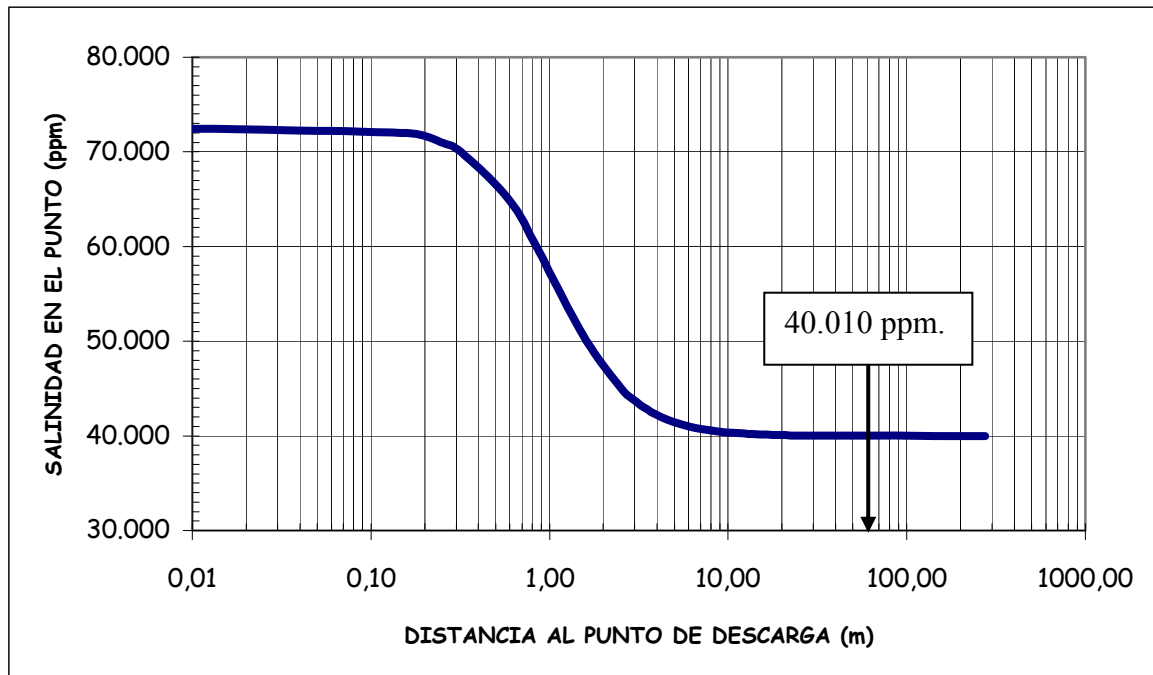


Figura 5.- CASO-3

Comparando esta figura 5 con la 4, vemos que apenas se observan diferencias entre ellas, solo el desplazamiento vertical debido a tener una mayor salinidad el agua de mar. La diferencia de salinidad entre las corrientes de 10 ppm., se verifica a los 61 m. y la de 0,5 ppm., a los 274 m., por tanto prácticamente la salinidad del agua de mar no influye en la velocidad de dispersión de la salmuera por efecto de la osmosis directa.

Otro factor cuya influencia es pequeña es la temperatura del agua de mar, por lo que no se presentan ejemplos variándola.

## 5.- UN EXPERIMENTO DE LABORATORIO

Con el fin de comprobar de forma experimental si el desarrollo teórico se corresponde con la realidad, se ha realizado un experimento de laboratorio consistente en dejar caer una gota de una disolución salina dentro de un recipiente con agua pura y ver que ocurría. La primera dificultad fue encontrar un producto que fuese una sal y que además tuviera color con el fin de poder visualizar el efecto. Se optó por la sal de sulfato de cobalto que tiene una coloración rojiza. Se realizó una disolución de 0,43 gr de cloruro de cobalto en 6,5 cm<sup>3</sup> de agua, con lo que obtuvimos una concentración de 66.000 ppm. Se dejó caer una gota de dicha disolución en un tanque de agua con una concentración de sales de menos de 100 ppm. y se fotografió el fenómeno para poder analizarlo. Se tomaron 70 fotografías durante 2 segundos. El resultado fue que la gota cae (efecto de diferencia de densidades), pero esta caída se va ralentizando a la vez que la gota va creciendo de tamaño y disolviéndose, es decir, va perdiendo concentración y por tanto la diferencia de densidades es cada vez menor hasta desaparecer completamente.



Fig 6.- Momento inicial del experimento



Fig 7.- Tamaño de la gota tras 2 seg.

Si se repite el experimento con una gota de un líquido no ionizable y cargado de sustancias en suspensión, tal y como es una gota de tinta, el comportamiento es diferente. En primer lugar tarda mucho



Fig 8.- Momento inicial de experimento



Fig 9.- Tras 40 segundos del inicio

más tiempo en caer por otra parte no se disuelve aún y después de estar más de 15 minutos, solo se termina disolviendo si se agita el agua. La caída también se ralentiza pero debido al efecto "paracaídas", es decir la gota se abre como un paracaídas en el fluido, reduciendo su velocidad de caída.

En las fotografías que se muestran a continuación puede observarse este fenómeno.

Por tanto el comportamiento de cada gota es completamente diferente en función de que el producto esté o no sometido al efecto de la Osmosis, en consecuencia dicho efecto habrá que tenerse en cuenta en los Modelos que predigan el comportamiento de los vertidos de salmuera en el medio marino.

## 6.- EFECTO DE LA DIFERENCIA DE DENSIDADES

Si consideramos que hay una diferencia de densidades entre la salmuera y el agua de mar, entrará a tener efecto la fuerza de la gravedad. Esto supondrá que la salmuera caerá hacia el fondo marino, al igual que la gota del experimento, a la vez que se va diluyendo e igualando, en consecuencia, su densidad con la del agua de mar, por lo que la caída se irá ralentizando. Las ecuaciones son las siguientes:

$$dm = \rho x dV$$

$$dF = g x dm = g x \rho x dV \quad (\text{para la fuerza de caída})$$

$$dF = -g x \rho_{am} x dV \quad (\text{para la fuerza de flotación})$$

$$dF = (\rho - \rho_{am}) x g x dV$$

$$a = \frac{dF}{dm} = \frac{(\rho - \rho_{am}) x g x dV}{\rho x dV} = g x \left(1 - \frac{\rho_{am}}{\rho}\right)$$

$$h(\text{de descenso}) = -v_0 + \frac{1}{2} g x \left(1 - \frac{\rho_{am}}{\rho}\right) x t^2$$

Según estas ecuaciones una velocidad de salida de la salmuera en sentido hacia arriba, puede ser beneficiosa, en principio porque hace que la concentración de la salmuera que llegue al fondo marino sea más baja que no existiendo dicha velocidad. Pero además puede favorecer la dilución al crear una corriente de choque que facilitará la mezcla.

## **7.- CONCLUSIONES**

El efecto de la dispersión como consecuencia de la osmosis es tan fuerte que se puede decir que siempre será posible realizar la disposición de la salmuera en el medio marino sin que esta llegue a afectar a la fauna y flora existentes. Es importante para la flora y fauna bentónica, hacer que el centro de descarga de salmuera esté elevado, con el fin de que el área de contacto del fondo marino con la esfera de salinidad considerada peligrosa para los seres antes mencionados, se minimice o incluso se anule.

Igualmente favorecerá la dispersión y una menor afección si la salmuera sale con una cierta velocidad con componente vertical hacia arriba. Todo esto sin considerar otros efectos como son el oleaje y las corrientes marinas que también van a favorecer dicha dilución. Es por ello que se hace necesario que los modelos matemáticos actuales en vigor recojan correctamente el efecto de la osmosis cuya influencia puede ser decisiva en la dispersión de la salmuera en el medio marino.