

Consideraciones previas para el desarrollo de un índice del estado de intrusión en masas de aguas subterráneas costeras

J.A. Navarro Iáñez⁽¹⁾ y J.M. Murillo Díaz⁽²⁾

(1) Dpto. Ingeniería Geológica-ETSI Minas (UPM) c/ Ríos Rosas 21. Madrid 28003

(2) Instituto Geológico y Minero de España c/ Ríos Rosas 23. Madrid 28003
jm.murillo@igme.es

RESUMEN

El desarrollo de un índice de estado de la intrusión (IEI) de una masa de agua subterránea (MAS) costera, que de una forma rápida y fácil, identifique la evolución del estado cualitativo de un acuífero se tercia como una prioridad para conseguir una gestión sostenible de las aguas subterráneas. En el presente artículo se realizan una serie de consideraciones previas para el desarrollo de dicho índice. La metodología que se propone pretende realizar los cálculos únicamente a partir de la geometría del acuífero y de los datos que se recogen en las campañas de control piezométrico y de la calidad de las aguas subterráneas que, periódicamente, se realizan en los acuíferos. Este índice de estado de intrusión (IEI) puede constituir una herramienta útil en la gestión de los acuíferos costeros, pues, sin necesidad de contemplar complicados modelos numéricos que conllevan un considerable esfuerzo tecnológico y económico, puede informar de la situación en que se encuentra un embalse subterráneo en lo referente al estado de la intrusión marina, ya que en la mayor parte de los acuíferos costeros de España existen series de datos históricos de piezometría y calidad (red de intrusión) que permitirían calcular este índice y analizar la evolución temporal de la intrusión.

Palabras clave: acuíferos costeros, índice, intrusión marina

Developmen of an intrusion state index of a coastal groundwater body. Previous rules

ABSTRACT

The development of an intrusion state index (ISI) of a coastal groundwater body, which quickly and easily identifies the evolution of the qualitative state of an aquifer, is a priority for achieving a sustainable management of the groundwater. This paper shows the previous rules for defining this index. The methodology proposed employs only geometrical, piezometric and quality groundwater data. This intrusion state index (ISI) can be a useful tool for the management of coastal aquifer, because it can avoid the built of numerical models which are expensive and employ too much time. We will be able to calculate this index in almost all the Spanish coastal aquifers because there are historical data

Key words: coastal aquifers, index, seawater intrusion

Introducción

Las masas de aguas subterráneas (MAS) costeras constituyen sistemas hidrogeológicos de especial significación por el equilibrio hidrodinámico que se establece entre el estado piezométrico de la masa de agua subterránea y el potencial constante que constituye el mar.

Este equilibrio hidrodinámico se configura a través de la interfase. Esta superficie marca el contacto entre el agua dulce y el agua salada dentro de lo que se denomina almacenamiento subterráneo. La diferente densidad que presenta el agua dulce del acuífero y el agua salada del mar permite que, a efectos prácticos,

esta superficie pueda considerarse como tal, marcando un cambio brusco en la salinidad del agua almacenada en el acuífero.

Una explotación no sostenible del acuífero costero (modificación sustancial del estado cuantitativo de la MAS costera) deriva en un avance de la interfase, con la consiguiente salinización del embalse subterráneo (modificación del estado cualitativo de la MAS), proceso que tiene una especial relevancia por la importancia estratégica que suelen jugar estos embalses subterráneos costeros en la satisfacción de demandas urbanas y agrícolas.

El estado cualitativo de una MAS costera derivado de la posición de la interfase es consecuencia de la

situación piezométrica y, por tanto, del balance hidrogeológico del acuífero. Una modificación sustancial de los caudales que son transferidos desde los embalses subterráneos costeros al mar, como reflejo de un descenso piezométrico acusado, provoca un avance de la cuña salina hacia el continente dando origen al efecto de intrusión marina.

La propia evolución piezométrica en régimen no influenciado de una MAS costera origina el movimiento de la interfase salina en una dinámica que se cataloga como natural. La modificación sustancial de esta dinámica natural provoca una alteración significativa en la calidad del agua subterránea. Esta vinculación entre la evolución hidrodinámica de la MAS costera y la salinidad de las aguas almacenadas constituye el argumento que justifica el desarrollo del índice del estado de intrusión (IEI) que se presenta en esta comunicación.

El IEI se configura como un indicador del estado de la intrusión, pues permite comparar la situación actual con la asociada a un régimen más o menos próximo al natural a partir de la utilización de las series históricas de datos de piezometría y calidad (red de intrusión) de las aguas subterráneas de que dispone el IGME o cualquier otro organismo que gestione o controle las masas de aguas subterráneas.

Por tanto, utilizando los datos históricos de estas redes de control se pueden concretar valores para el IEI, que pueden servir de fiel para fijar el buen estado cuantitativo y cualitativo de las MAS costeras en lo referente a la intrusión marina, dado que esto constituye un objetivo prioritario en la política de planificación hidrológica de la Directiva Marco de Aguas (DMA). De esta forma, las estrategias de gestión y las normas de explotación que se apliquen a los acuíferos costeros para la corrección de los problemas de intrusión marina pueden ser evaluadas rápidamente mediante la construcción del IEI, aunque posteriormente, si se precisa, se empleen otras metodologías más complejas y sofisticadas, como pueden ser las técnicas de modelación matemática de los acuíferos.

El IGME dispone de datos históricos de piezometría e intrusión en la práctica totalidad de los acuíferos costeros del territorio nacional, en series de datos trimestrales o semestrales, que abarcan periodos de hasta 40 años. Este tiempo se considera suficientemente largo para comparar, a través del IEI, la situación actual con la existente cuando el acuífero apenas se explotaba. Esta última situación podría caracterizar el buen estado cuantitativo de las MAS costeras, ya que se puede asemejar a una situación hidrodinámica (estado cuantitativo) próxima al régimen natural.

Mediante el empleo de este indicador se daría uso y vigencia a una serie de datos históricos que han

sido tratados y almacenados en bases de datos durante varias décadas, sin que se precise realizar, en primera instancia, complicados modelos matemáticos de simulación de la intrusión marina, en la totalidad de las MAS costeras del territorio nacional, al objeto de disponer de un indicador capaz de avisar a los gestores del agua que algo va mal en una determinada MAS costera. El empleo de la modelación matemática de los acuíferos, dada la complejidad técnico-financiera que supone, debe reservarse y contemplarse sólo en aquellos casos donde se precise un conocimiento más profundo del funcionamiento de un determinado acuífero.

La definición y uso de indicadores constituye, desde hace algunos años, una de las líneas de investigación y de los campos de trabajo en los que interviene el Instituto Geológico y Minero de España de manera preferencial (Pernía y Corral 2001; Pernía y Lambán, 2007).

Metodología

El índice de estado de intrusión (IEI) parte de considerar la vinculación directa que existe entre el estado cuantitativo de la MAS costera (estado piezométrico) y el estado cualitativo (grado de salinización o avance de la cuña salina marina), circunstancia que queda plasmada por la propia ley de Ghyben-Hezberg, derivada de fijar el equilibrio hidrostático que significa la interfase neta entre la masa de agua salada que constituye el mar y la masa de agua dulce almacenada en el acuífero costero (Figura 1).

$$Z_h(t) = \alpha \cdot H(t) \quad [1]$$

$$\alpha = \frac{\rho_a}{\rho_m - \rho_a} \quad [2]$$

$$Z_m(t) = Z - Z_h(t) \quad [3]$$

donde:

$H(t)$, cota piezométrica (m snm), que expresa el estado cuantitativo de la MAS costera y es un parámetro hidrodinámico.

α , constante Ghyben-Hezberg que depende de la relación de densidades del agua dulce (ρ_a) y del agua salada (ρ_m)

$Z_h(t)$, columna de agua dulce bajo la cota cero (nivel del mar) en el embalse subterráneo. Es un concepto hidrodinámico ya que depende de la $H(t)$ –ley Ghyben-Hezberg–.

$Z_m(t)$, columna de agua salada bajo la cota cero (nivel

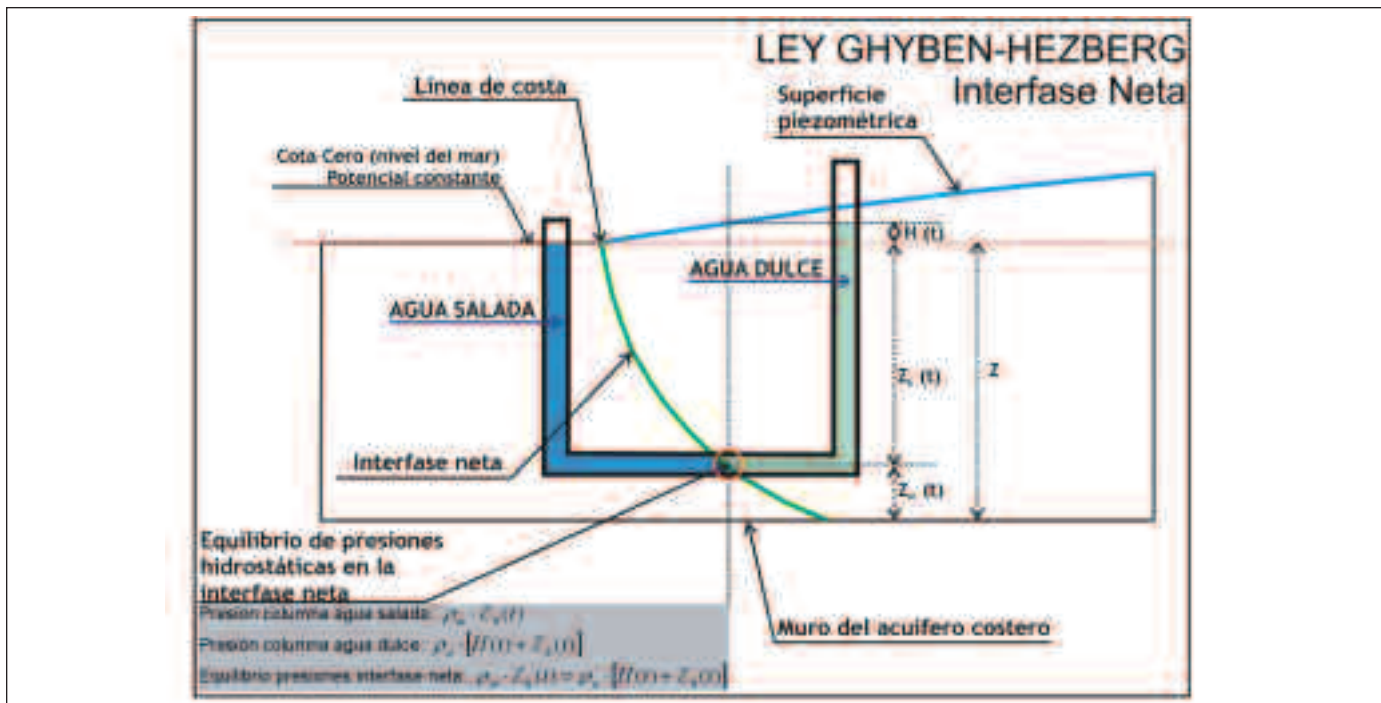


Figura 1. Representación gráfica de la Ley de Ghyben-Hezberg
Figure 1. Graphic representation of the Ghyben-Hezberg Law

del mar) en el embalse subterráneo. Corresponde a la zona saturada de la MAS costera que queda por debajo de la interfase salina.

Z, espesor de acuífero bajo la cota cero (nivel del mar). Es un concepto morfológico (geométrico) invariante.

Por tanto, la columna de agua saturada en cualquier punto del acuífero corresponde a la expresión:

$$H(t) + Z$$

En la geometría de la MAS costera (Figura 2) se puede diferenciar entre el volumen ($V_{s,o}=V_m+V_o$), que potencialmente puede ser afectado por la intrusión marina, que se corresponde con la parte del embalse subterráneo que se localiza bajo la cota cero, y el resto del embalse subterráneo, que queda por encima del nivel del mar ($V_d=V_1+V_2$), y no puede ser intruido. El volumen de acuífero determinado por el avance máximo de la cuña salina ($V_{s,o}$) corresponde al supuesto en que la recarga al acuífero fuese nula, durante un cierto periodo de tiempo, y la explotación del acuífero la necesaria para vaciar dicho volumen. Este volumen se encuentra limitado por la cota cero m s.n.m.

Esta regionalización del embalse subterráneo parte de considerar un régimen de explotación en el

que no se forman ascensos de domos salinos por encima de la cota cero, lo que, caso de producirse, sería una situación transitoria, que tendería al equilibrio, por lo que se puede considerar que $V_d=V_1+V_2$ no es un volumen de acuífero que pueda ser afectado permanentemente por contaminación de agua de mar.

Bajo estas consideraciones previas, para cualquier situación en el régimen hidrodinámico de la MAS costera, existirá un volumen de embalse subterráneo saturado de agua salada (V_m), un volumen de embalse subterráneo bajo la cota cero saturado de agua dulce (V_o), un volumen de embalse subterráneo saturado de agua dulce (V_1), que se sitúa por encima de la superficie de cota cero y del volumen de acuífero potencialmente intruible, y, por último, un volumen de embalse subterráneo saturado de agua dulce (V_2), que se sitúa sobre el nivel del mar, pero fuera del área que potencialmente podría ser afectada por la cuña salina.

Por tanto, se pueden expresar las siguientes relaciones de volúmenes de almacenamiento en la MAS costera:

$$V_t(t) = V_{s,o} + V_d(t) = [V_m(t) + V_o(t)] + [V_1(t) + V_2(t)]$$

[4]

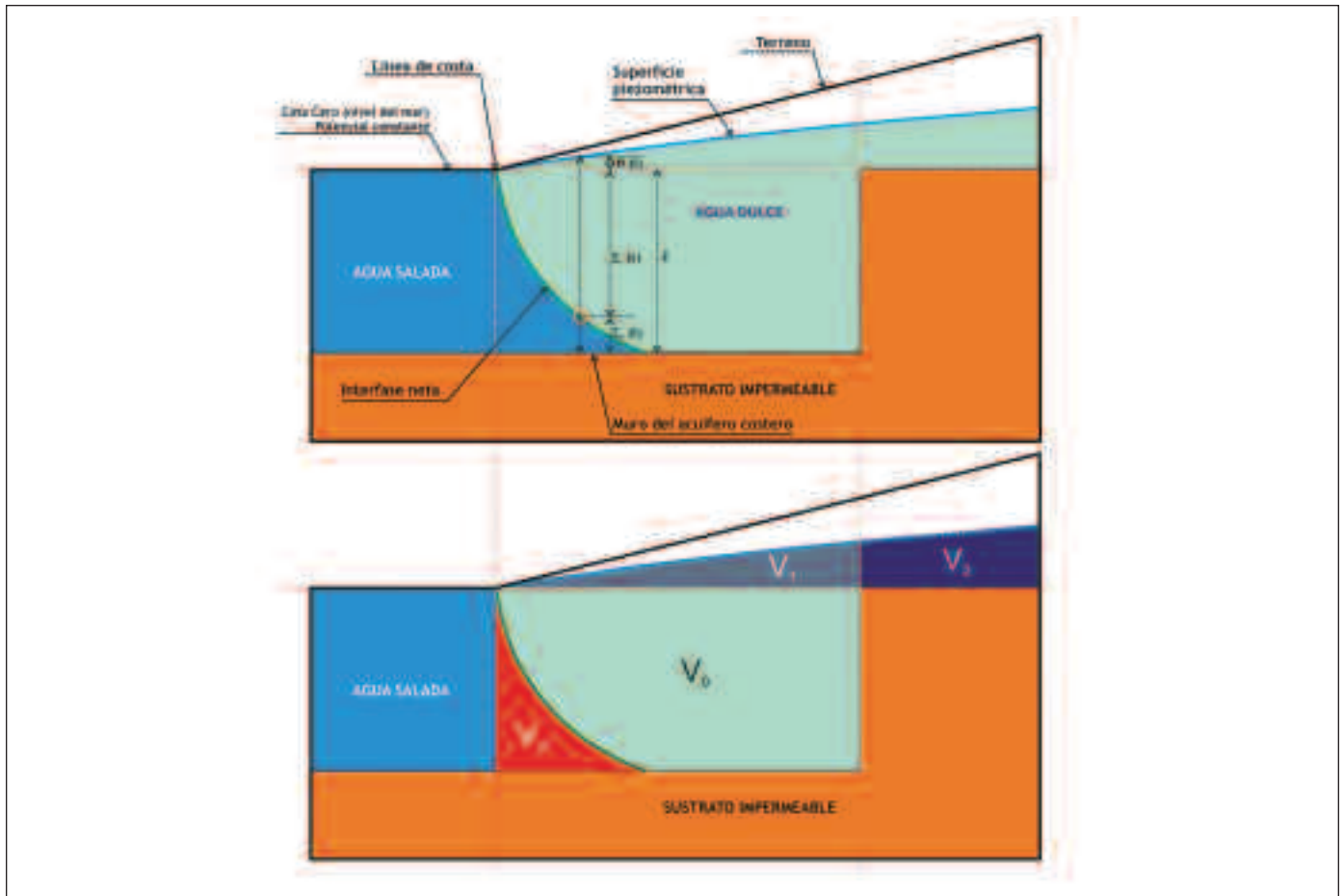


Figura 2. Síntesis geométrica de una masa costera de agua subterránea.
 Figure 2. Geometric synthesis of a coastal groundwater body.

Donde el volumen $V_{s,o}$ es un concepto estático, pues depende exclusivamente de la geometría de la formación acuífera, mientras que el resto de volúmenes considerados son dinámicos, pues son reflejo de la evolución piezométrica de la MAS costera.

Atendiendo a criterios morfológicos o volumétricos, el índice de estado de intrusión (IEI_m índice de estado de intrusión cuantitativo) quedaría definido como:

$$IEI_m(t) = \frac{V_m(t)}{V_{s,o}} = \frac{V_{s,o} - V_o(t)}{V_{s,o}} = 1 - \frac{V_o(t)}{V_{s,o}} = 1 - \Psi_m(t)$$

donde:

$IEI_m(t)$, índice de estado de intrusión cuantitativo, es un concepto dinámico. Toma un valor máximo unidad que implica una intrusión total en las MAS costera; el valor mínimo correspondería al estado hidrodinámico natural en la época de aguas altas ($V_{m(min)}$ y $V_{o(max)}$).

$V_m(t)$, volumen de embalse subterráneo saturado con agua salada. Es un volumen dinámico.

$V_{s,o}$, volumen de embalse subterráneo saturado bajo la cota cero (nivel del mar). Es un volumen estático ya que depende de la morfología de la formación acuífera.

$V_o(t)$, volumen de embalse subterráneo saturado con agua dulce bajo la cota cero (nivel del mar). Es un volumen dinámico.

$\Psi_m(t)$, parámetro morfodinámico.

[5] Para calcular el IEI_m es necesario proceder a discretizar (Figura 3) el embalse subterráneo mediante un mallado de celdas rectangulares (mallado típico

de modelos de parámetros distribuidos en diferencias finitas) y definir la isohipsa cero, al objeto de fijar la superficie del acuífero que intersecta la cota cero o nivel del mar y que fija la cota hidrostática límite para el avance máximo de la cuña salina.

$$S_o = \sum_{\forall s(i) \in S_o} s(i) \quad [6]$$

Si se establece un mallado regular $-s(i)=cte$ -, el valor de S_o correspondería a:

siendo A el número de celdas del mallado que quedan abarcadas por la isohipsa cero.

Partiendo del mallado definido se pueden calcular los volúmenes mediante la siguiente formulación:

$$V_m(t) = \sum_{i \in S_o} s(i) \cdot n_e(i) \cdot z_m^*(i, t) \quad [7]$$

$$V_o(t) = \sum_{i \in S_o} s(i) \cdot n_e \cdot z_h^*(i, t) \quad [8]$$

$$V_{s,o} = \sum_{i \in S_o} s(i) \cdot n_e(i) \cdot Z(i) \quad [9]$$

donde:

$s(i)$, superficie de cada celda del mallado.

$n_e(i)$, porosidad eficaz en cada celda del mallado.

$z_m^*(i, t)$, espesor saturado de agua salada en cada celda del mallado.

$z_h^*(i, t)$, espesor saturado de agua dulce bajo el nivel del mar en cada celda del mallado.

En la formulación volumétrica es necesario realizar un cambio de variables: $Z_m(i, t) \rightarrow z_m^*(i, t)$ y $Z_h(i, t) \rightarrow z_h^*(i, t)$, ya que en el cálculo de los volúmenes V_o y V_m interviene el factor geométrico de la siguiente manera:

$$\forall s(i) \in S_o \left\{ \begin{array}{l} \text{si } \alpha \cdot H(i, t) \geq Z(i) \Rightarrow z_h^*(i, t) = Z(i) \\ \text{si } \alpha \cdot H(i, t) < Z(i) \Rightarrow z_h^*(i, t) = \alpha \cdot H(i, t) \end{array} \right. \quad [10]$$

$$\forall s(i) \in S_o \left\{ \begin{array}{l} \text{si } \alpha \cdot H(i, t) \geq Z(i) \Rightarrow z_m^*(i, t) = 0 \\ \text{si } \alpha \cdot H(i, t) < Z(i) \Rightarrow z_m^*(i, t) = Z(i) - \alpha \cdot H(i, t) \end{array} \right. \quad [11]$$

Y por tanto el parámetro morfodinámico se calcularía mediante la expresión:

$$\Psi_m(t) = \frac{V_o(t)}{V_{s,o}} = \frac{\sum_{s(i) \in S_o} s(i) \cdot n_e(i) \cdot z_h^*(i, t)}{\sum_{s(i) \in S_o} s(i) \cdot n_e(i) \cdot Z(i)} \quad [12]$$

En situaciones de sobre-bombes (Figura 4) puede ocurrir que la cota piezométrica en el acuífero se sitúe bajo el nivel del mar ($H(i, t) < 0$). En estos casos se produciría una discontinuidad en el cálculo propuesto para el $IEI_m(t)$, ya que, aplicando la Ley de Ghyben-Herzberg (interfase neta) en estas celdas, acontecería que:

$$\text{Si } H(i, t) < 0 \left\{ \begin{array}{l} z_h^*(i, t) = 0 \\ z_m^*(i, t) = Z(i) \end{array} \right. \quad [13]$$

Esta circunstancia de que toda la columna de la zona saturada del acuífero, para la celda (i), este ocupada por agua salada, cuando desaparece la presión hidrodinámica positiva en el acuífero (nivel piezométrico bajo cota cero), exige contemplar otros factores en la definición del IEI, situación que exige acudir a un índice más completo (Figura 5) donde intervengan datos piezométricos (hidrodinámicos) y de calidad del agua subterránea (red de intrusión).

Así, se ha definido el índice de estado de intrusión (IEI) de una MAS costera mediante la expresión:

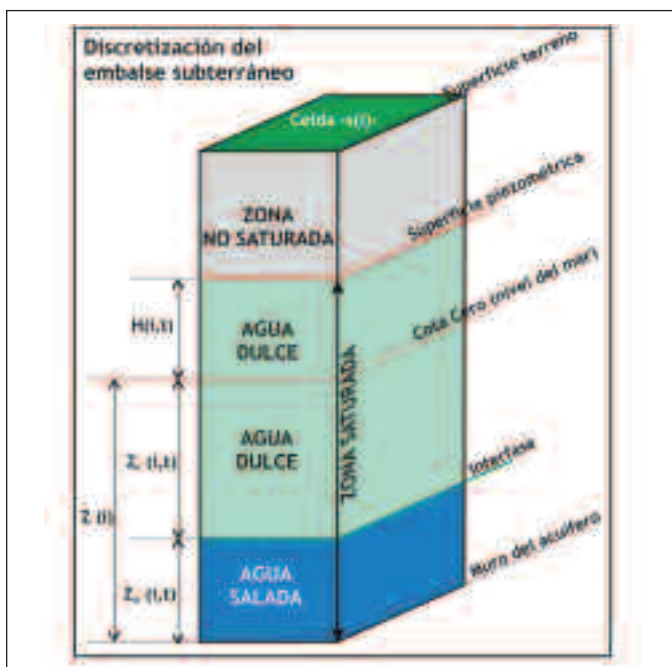


Figura 3. Discretización de un embalse subterráneo costero
Figure 3. Discretization of a coastal underground reservoir

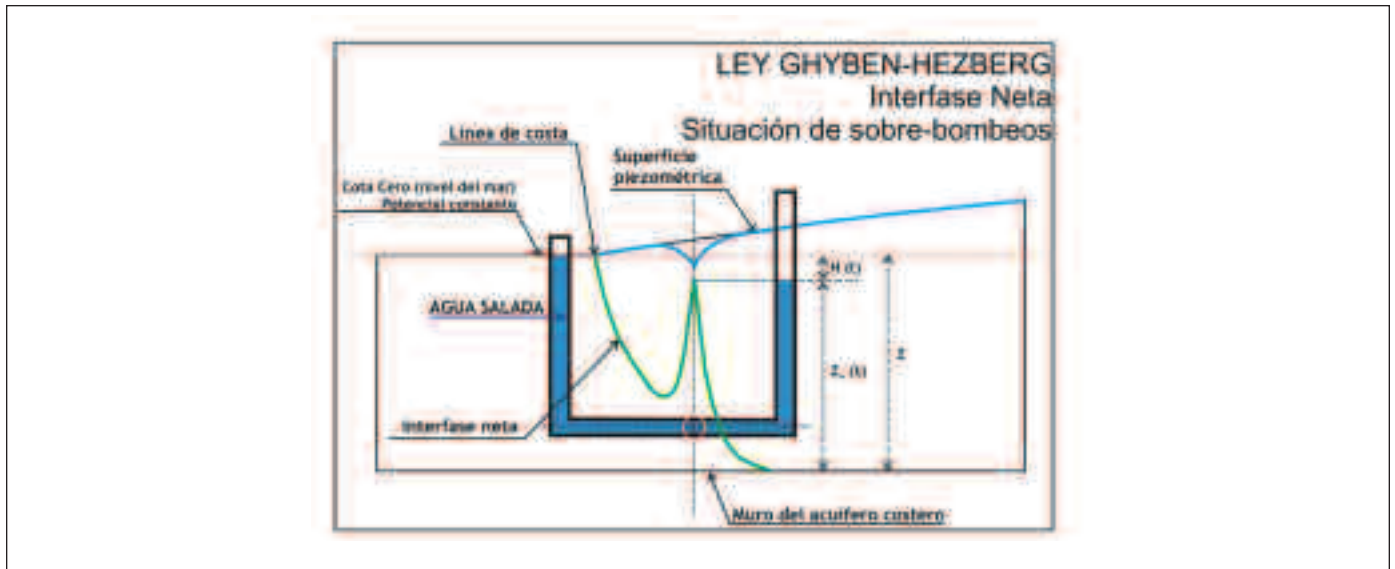


Figura 4. Esquema representativo de una situación de sobrebombeo.
 Figure 4. Representative diagram of an overpumping situation.

$$IEI(t) = \frac{C_m \cdot V_m(t)}{C_d \cdot V_o(t) + C_m \cdot V_m(t)} \quad [14]$$

$$IEI(t) = \frac{1}{1 + \Psi(t)} \quad [15]$$

$$\Psi(t) = \frac{C_d \cdot V_o(t)}{C_m \cdot V_m(t)} \quad [16]$$

donde:

IEI(t), índice del estado de la intrusión de una MAS costera (estado cuantitativo y cualitativo).

C_m , concentración del agua del mar para el parámetro característico de la intrusión.

$V_m(t)$, volumen de embalse subterráneo saturado con agua salada. Es un volumen dinámico.

C_d , concentración del agua del acuífero para el parámetro característico de la intrusión.

$V_o(t)$, volumen de embalse subterráneo saturado con agua dulce bajo la cota cero (nivel del mar). Es un volumen dinámico.

$\psi(t)$, parámetro del estado intrusivo que toma un valor cero si todo el almacenamiento del embalse subterráneo bajo la cota cero se saturase de agua salada, por el avance de la cuña salina:

$$C_d \rightarrow C_m \quad \text{y} \quad V_o(t) = 0 \Rightarrow \\ V_m(t) = V_{s,o} \Rightarrow \Psi(t) = 0 \Rightarrow IEI = 1$$

El parámetro característico de la intrusión a considerar correspondería al ión cloruro, medido en las redes de control de la intrusión junto con la conductividad. Así, el parámetro característico de la intrusión corresponde a la siguiente expresión:

$$C(i, t) = a \cdot |Cl_{ppm}(i, t)|^b \quad [17]$$

El parámetro a depende de la concentración en cloruros del agua del mar y del parámetro b considerado, definiéndose mediante la expresión:

$$a = \frac{C_m}{|Cl_{ppm(mar)}|^b}$$

$$C(i, t) = \frac{C_m}{|Cl_{ppm(mar)}|^b} \cdot |Cl_{ppm}(i, t)|^b = C_m \cdot \left[\frac{|Cl_{ppm}(i, t)|}{|Cl_{ppm(mar)}|} \right]^b \quad [18]$$

Si se opta (Figura 6) por conceder un valor 10 para el parámetro característico al agua del mar ($C_m=10$), se recomienda utilizar para el parámetro b un valor de 0,50 ($a=0,0527$).

Para el cálculo del IEI se parte de la discretización mediante una malla rectangular definida para el embalse subterráneo, pero las redes de control de aguas subterráneas (piezometría e intrusión) corresponden a datos discretos (puntuales) de piezometría

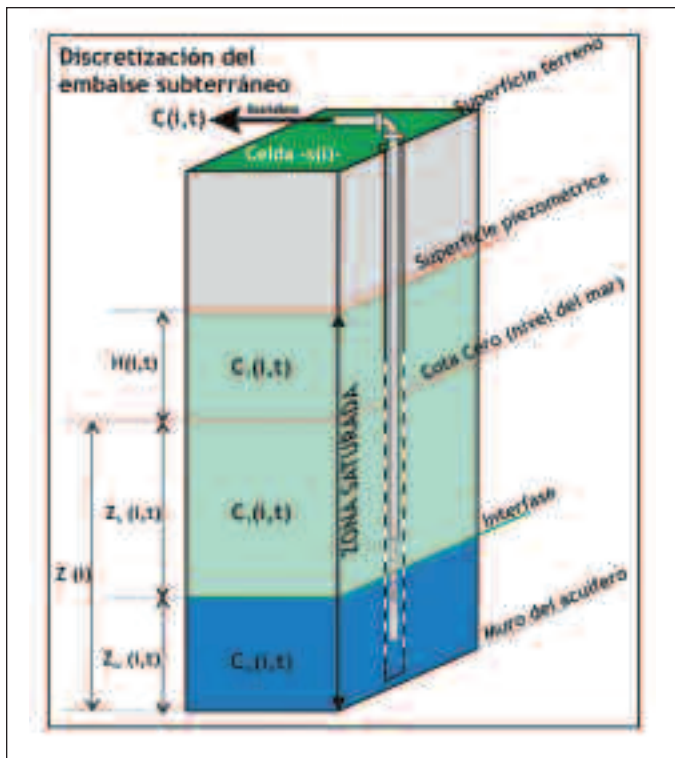


Figura 5. Discretización de un embalse subterráneo costero bajo una situación de bombeo.
 Figure 5. Discretization of a coastal underground reservoir in over-pumping conditions.

o del parámetro característico de la intrusión. Para obtener un dato de piezometría o del parámetro de calidad en cada una de las celdas en que ha sido discretizado el embalse subterráneo es necesario acudir a técnicas de interpolación matemática, siendo aconsejable utilizar interpoladores exactos, esto es, que intentan mantener los valores de partida en aquellos puntos del mallado próximos o coincidentes con algunos de los datos de partida (redes de control). De los interpoladores matemáticos existentes se aconseja utilizar los siguientes:

- Inverso de la distancia (es conveniente introducir un parámetro de suavizado para evitar los problemas de "ojos de sapo")
- Kriging.
- *Radial Basis Function* (permite introducir un mayor grado de suavizado en los resultados evitando elevados gradientes en los datos interpolados).
- Método de Shepard modificado.

Partiendo de los datos discretos de piezometría $h(n,t)$ y calidad del agua $-C_{ppm}(n,t)-$ se obtiene, mediante la utilización de los interpoladores matemáticos:

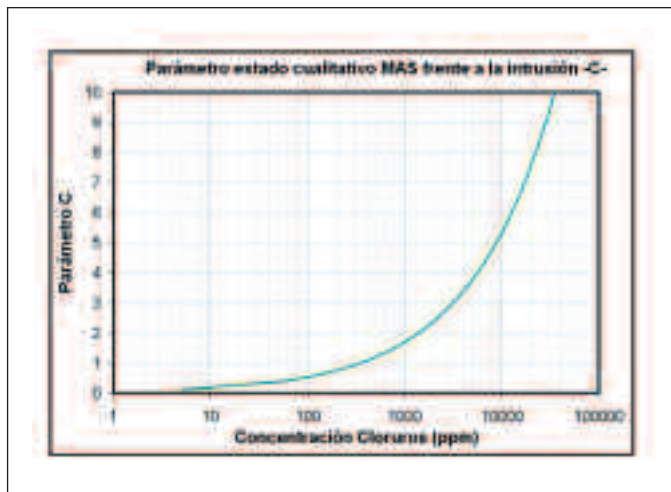


Figura 6. Representación del parámetro característico de la intrusión.
 Figure 6. Representation of the characteristic intrusion parameter.

- Un valor de piezometría en cada celda del mallado para los diferentes periodos de simulación de la serie de datos disponible $-H(i,t)-$.
- Un dato de calidad en cada celda para los diferentes periodos de simulación de la serie de datos disponible $-C(i,t)-$.

Los datos de calidad $-C(i,t)-$ corresponden a aguas de mezcla de la zona saturada del acuífero (columna de agua dulce y columna de agua salada), ya que se obtienen mediante el bombeo en sondeos penetrantes en el acuífero. De forma que en las zonas donde hay cuña salina la concentración calculada mediante interpolación a partir de los datos registrados en las redes de control pueden expresarse como aguas de mezcla:

$$C(i, t) = \frac{C_d(i, t) \cdot z_d^*(i, t) + C_m \cdot z_m^*(i, t)}{z^*(i, t)} \quad [19]$$

donde:
 $C(i,t)$, concentración para el parámetro característico de la intrusión correspondiente a la columna saturada de la celda i en el instante t .
 $C_d(i,t)$, concentración para el parámetro característico de la intrusión correspondiente a la columna de agua dulce de la celda i en el instante t .
 $z_d^*(i,t)$, espesor de la columna de agua dulce en la celda i -ésima para el instante t . En principio:

$$z_d^*(i, t) = Z_d(i, t) = H(i, t) + Z_h(i, t) = (1 + \alpha) \cdot H(i, t) \quad [20]$$

C_m , concentración para el parámetro característico de la intrusión en el agua del mar. Es un valor constante a efectos prácticos.

$z_m^*(i,t)$, espesor de la columna de agua salada en la celda i -ésima para el instante t . En principio:

$$\begin{aligned} z_m^*(i, t) &= Z_m(i, t) = Z(i, t) - Z_h(i, t) \\ &= Z(i, t) - \alpha \cdot H(i, t) \end{aligned} \quad [21]$$

$z^*(i,t)$, espesor de la columna de agua en la celda i -ésima para el instante t . En principio:

$$\begin{aligned} z^*(i, t) &= H(i, t) + Z(i) = z_d^*(i, t) + z_m^*(i, t) \\ &= Z_d(i, t) + Z_m(i, t) \end{aligned} \quad [22]$$

El valor de $C(i,t)$ es conocido a partir de la interpolación de los valores registrados en la red de intrusión. Asimismo, el valor de C_m es constante, por lo que se puede obtener el valor de $C_d(i,t)$:

$$\begin{aligned} C_d(i, t) &= \frac{C(i, t) \cdot z^*(i, t) - C_m \cdot z_m^*(i, t)}{z_d^*(i, t)} = \\ &= \frac{C(i, t) \cdot [z_d^*(i, t) - z_m^*(i, t)] - C_m \cdot z_m^*(i, t)}{z_d^*(i, t)} \Rightarrow \\ C_d(i, t) &= C(i, t) - \frac{z_m^*(i, t)}{z_d^*(i, t)} [C_m - C(i, t)] = \\ &= C(i, t) - \delta(i, t) \cdot [C_m - C(i, t)] \end{aligned} \quad [23]$$

Asimismo se puede expresar:

$$V_o(t) = \sum_{s(i) \in S_o} s(i) \cdot n_e(i) \cdot z_h^*(i, t) \quad [24]$$

$$V_m(t) = \sum_{s(i) \in S_o} s(i) \cdot n_e(i) \cdot z_m^*(i, t) \quad [25]$$

Por tanto:

$$\Psi(t) = \frac{C_d \cdot V_o(t)}{C_m \cdot V_m(t)} = \frac{\sum_{s(i) \in S_o} C_d(i, t) \cdot s(i) \cdot n_e(i) \cdot z_h^*(i, t)}{\sum_{s(i) \in S_o} C_m \cdot s(i) \cdot n_e(i) \cdot z_m^*(i, t)} \quad [26]$$

$$\Psi(t) = \frac{C_d \cdot V_o(t)}{C_m \cdot V_m(t)} =$$

$$\frac{\sum_{s(i) \in S_o} [C(i, t) - \delta(i, t) \cdot (C_m - C(i, t))] \cdot s(i) \cdot n_e(i) \cdot z_h^*(i, t)}{C_m \cdot \left[\sum_{s(i) \in S_o} s(i) \cdot n_e(i) \cdot z_m^*(i, t) \right]} \quad [27]$$

Considerando la casuística que puede presentarse en la evolución hidrodinámica de una MAS costera, las variables geométricas se pueden calcular de acuerdo con las expresiones que se indican a continuación.

Caso a: nivel piezométrico en la celda (i) se sitúa bajo cota cero:

$$\text{Si } H(i, t) < 0 \Rightarrow \left\{ \begin{aligned} z_m^*(i, t) &= \bar{z}_m(i, t) \\ z_h^*(i, t) &= Z(i) + H(i, t) - \bar{z}_m(i, t) \\ z_d^*(i, t) &= Z(i) + H(i, t) < Z(i) \end{aligned} \right\} \quad [28]$$

donde:

$C_d(i,0)$, concentración para el parámetro característico de la intrusión correspondiente al valor de fondo, es un valor a definir en función de los datos históricos del acuífero, correspondiendo a la situación no influenciada en el acuífero y que, por tanto, sitúa la interfase en la posición correspondiente al régimen natural.

$$C(i, 0) = C_d(i, 0) \cdot (1 + \alpha) \cdot H(i, 0) + C_m \cdot Z_m(i, 0)$$

$$C(i, t) = C_d(i, t) \cdot [Z(i) + H(i, t)] C_m \cdot \bar{z}_m(i, t)$$

$$\begin{aligned} C_d(i, t) &\approx C_d(i, 0) \Rightarrow C(i, t) \approx \\ &C_d(i, 0) \cdot [Z(i) + H(i, t)] + C_m \cdot \bar{z}_m(i, t) \end{aligned} \quad [29]$$

$$Z_d(i, t) = Z(i) + H(i, t) - \bar{z}_m(i, t) \Rightarrow$$

$$[Z(i) + H(i, t) - \bar{z}_m(i, t)] \cdot C_d(i, 0) =$$

$$C(i, t) - C_m \cdot \bar{z}_m(i, t) \quad [30]$$

$$\bar{z}_m(i, t) = Z_m(i, 0) + \Delta Z_m(i, t) =$$

$$\frac{C(i, t) - C_d(i, 0) \cdot [Z(i) + H(i, t)]}{C_m - C_d(i, 0)} \quad [31]$$

Caso b: la carga hidráulica positiva en la celda (i), que permite la presencia de columna de agua salada en la celda i -ésima considerada:

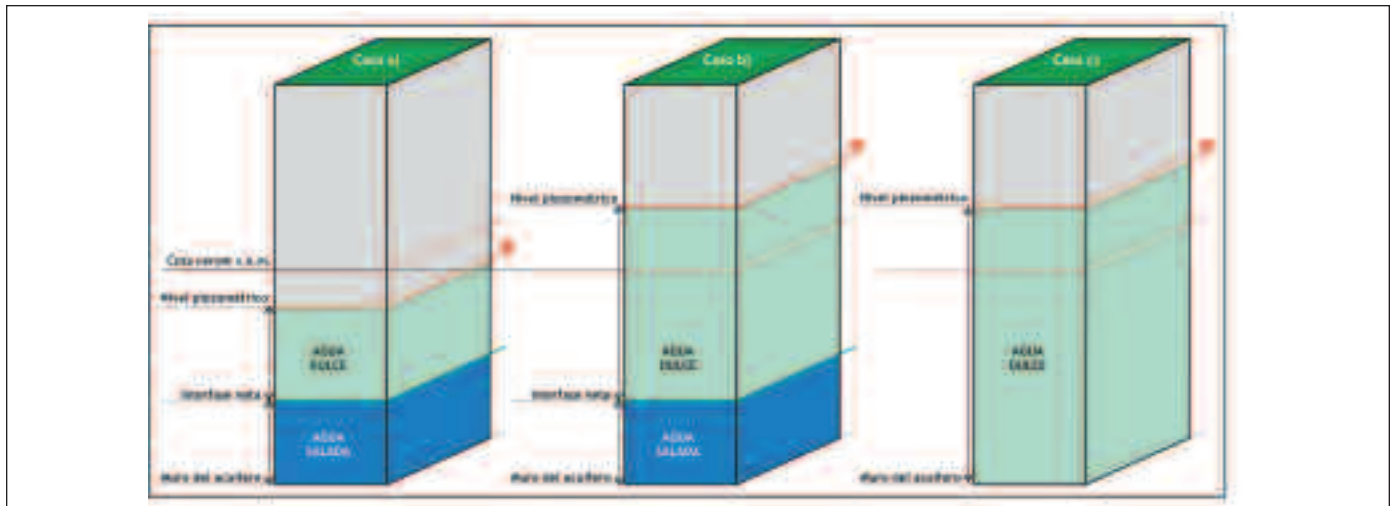


Figura 7. Casuística que puede presentarse en la evolución hidrodinámica de una MAS costera
 Figure 7. Casuistry which can be noticed in the hydrodinamic development of a coastal groundwater body

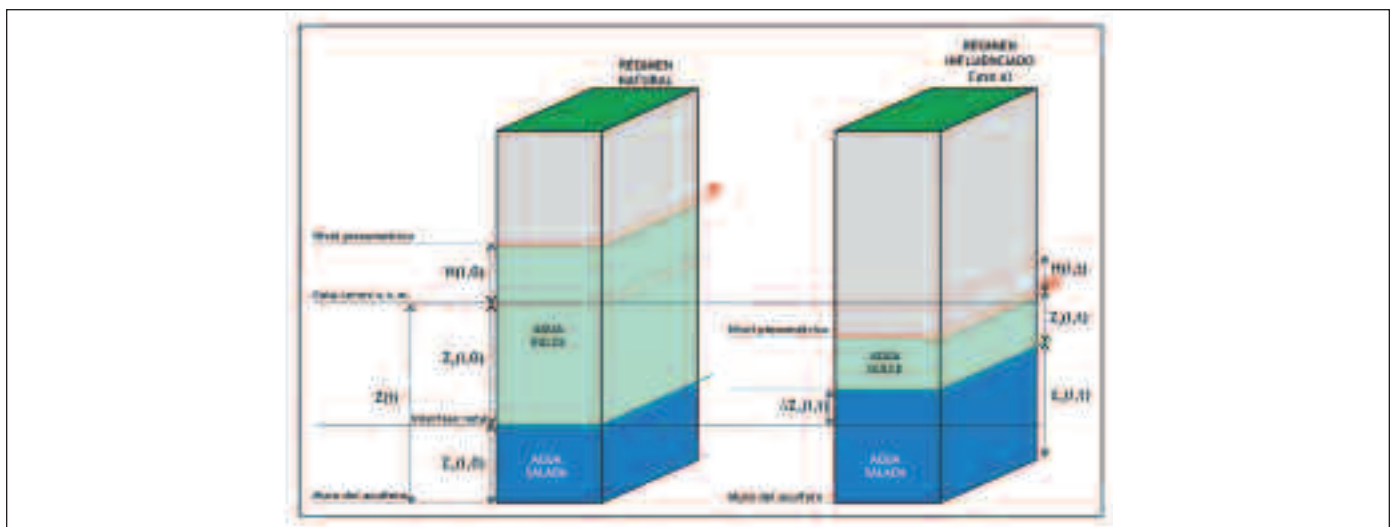


Figura 8. Representación del régimen natural y el régimen influenciado para el caso a
 Figure 8. Representation of natural and influenced regime in case a

$$\text{Si } \alpha \cdot H(i, t) < Z(i) \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} z_m^*(i, t) = Z(i) - \alpha \cdot H(i, t) \\ z_h^*(i, t) = \alpha \cdot H(i, t) \\ z_d^*(t) = (1 + \alpha) \cdot H(i, t) \end{array} \right\} [32]$$

Caso c: la carga hidráulica positiva en la celda (i) impide la presencia de columna de agua salada en la celda i-ésima considerada:

$$\text{Si } \alpha \cdot H(i, t) \geq Z(i) \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} z_m^*(i, t) = 0 \\ z_h^*(i, t) = Z(i) \\ z_d^*(t) = Z(i) + H(i, t) \end{array} \right\} [33]$$

Por tanto, el método propuesto para establecer el estado cualitativo de una MAS costera respecto a la intrusión marina puede resumirse en los siguientes pasos:

- Delimitación del área de acuífero correspondiente a la isohipsa cero $\rightarrow S_0$.
- Fijar el valor de la calidad del agua dulce para el régimen natural que correspondería con el buen estado cualitativo de la MAS costera frente a la intrusión marina $\rightarrow C_1(i,0)$.
- Obtener la morfología del muro del acuífero:

$$\forall s(i) \in S_0 \rightarrow Z(i)$$

- Definir el parámetro de Ghyben-Herzberg:

$$\alpha = \frac{\rho_a}{\rho_m - \rho_a}$$

ρ_a (densidad del agua dulce en t/m³) y ρ_m (densidad del agua salada del mar en t/m³).

- Calcular mediante interpolación matemática el estado hidrodinámico del acuífero en los diferentes periodos de simulación a considerar, obteniendo un valor para la cota piezométrica en cada celda definida y para cada periodo de tiempo $\rightarrow H(i,t)$.
- Interpoliar los datos del almacenamiento $\rightarrow n_e(i)$.
- Interpoliar los datos de calidad de la red de intrusión marina en los diferentes periodos de simulación a considerar, obteniendo un valor para el parámetro característico de la intrusión en cada celda definida y para cada periodo de tiempo $\rightarrow C(i,t)$.
- Se calculan los valores de $z_m^*(i,t)$, $z_h^*(i,t)$ y $z_i^*(i,t)$ de acuerdo con las expresiones 26 a 33.
- Se calcula el parámetro del estado intrusivo $\psi(t)$ para cada paso de tiempo considerado utilizando la ecuación 27.
- Se calcula el IEI(t) para cada paso de tiempo considerado utilizando la ecuación 15.

Partiendo de la ecuación (26) si se considera el volumen $V_m(t)$ como un porcentaje del volumen fijo máximo que puede ser intruído ($V_{s,o}$), se pueden obtener valores del IEI en función del contenido medio en cloruros del acuífero (agua dulce del embalse subterráneo - C_d -).

$$\begin{aligned} IEI(t) &= \frac{1}{1 + \frac{C_d \cdot V_o(t)}{C_m \cdot V_m(t)}} = \\ &= \frac{1}{1 + \frac{0,0527 \cdot |Cl_{ppm}|^{0,5} \cdot (1-\beta(t)) \cdot V_{s,o}}{10 \cdot \beta(t) \cdot V_{s,o}}} = \\ &= \frac{1}{1 + 0,00527 \cdot \frac{(1-\beta(t))}{\beta(t)} \cdot |Cl_{ppm}|^{0,5}} \end{aligned} \quad [34]$$

donde:

$$\beta(t) = \frac{V_m(t)}{V_{s,o}}$$

Representando la ecuación (34) para diferentes valores de β y de concentración en cloruros promedio para el agua dulce en el embalse subterráneo, se obtiene la gráfica de la figura 9. En función de un tratamiento exhaustivo de los datos de piezometría e intrusión marina en las MAS costeras se obtendrían valores reales del IEI, que permitirían fijar una clasificación para el estado de la intrusión de una MAS costera.

Expresión simplificada

El método descrito en los párrafos anteriores para el cálculo del IEI exige disponer de datos exhaustivos del muro del acuífero, lo cual no siempre es posible, por lo que a continuación se presenta una versión reducida del IEI - $IEI_r(t)$ - que corresponde a un índice bidimensional, donde no se considera el espesor del embalse subterráneo.

Este índice del estado de la intrusión reducido quedaría expresado como:

$$IEI_r(t) = \frac{\sum^n C_d(n,t) \cdot S^*(n)}{C_m \cdot S_o} \quad [35]$$

donde:

$C_d(n,t)$, parámetro característico de la intrusión, que corresponde con la medida de cloruros que se ha efectuado en el punto (n) de la red de intrusión marina para el tiempo (t). Es función del valor de fondo

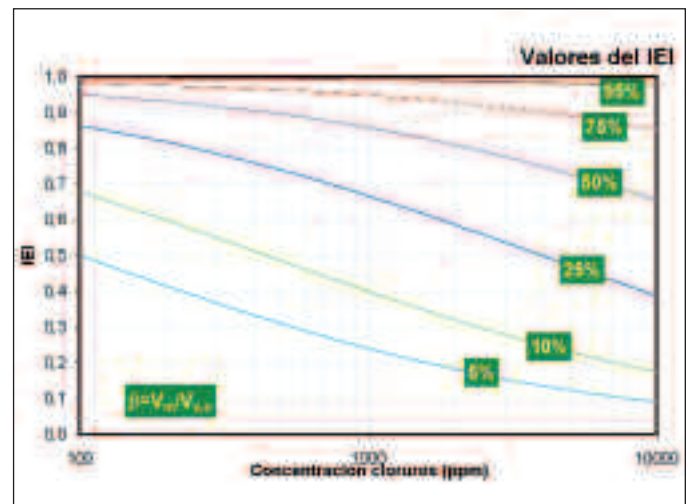


Figura 9. Valores de IEI
Figure 9. Values for IEI

$-C_d(i,0)-$, de la evolución hidrodinámica del acuífero y de los procesos de contaminación que se hayan producido.

$S^*(n)$, superficie de referencia asociada al punto de medida (n). Se consideran todos los puntos de medida de la red de intrusión, de forma que:

$$\sum_n S^*(n) = S_o$$

Estas superficies de referencia se pueden trazar utilizando los polígonos de Thiessen, de manera que si los puntos de la red de intrusión considerados no varían en el tiempo, toman valores que son independientes del tiempo y sólo es función de factores geométricos y, por tanto, se puede expresar:

$$IEI_r(t) = \frac{1}{C_m} \sum_n \varphi(n) \cdot C_d(n, t) = 0,00527 \cdot \sum_n \varphi(n) \cdot |Cl_{ppm}(n, t)|^{0,5} \quad [36]$$

donde:

$$\varphi(n) = \frac{S^*(n)}{S_o} \quad \text{y} \quad \sum_n \varphi(n) = 1$$

superficie porcentual del polígono de Thiessen correspondiente al punto de medida (n) de la red de intrusión marina; y $Cl_{ppm}(n,t)$ es la concentración en cloruros obtenidas en el punto (n) de la red de control de la intrusión marina, para el periodo de tiempo (t). El $IEI_r(t)$ toma un valor máximo unidad si toda el agua que satura el volumen de acuífero situado bajo el nivel del mar corresponde a agua salada.

El IEI_r correspondiente al régimen natural $-IEI_r(0)-$ vendría dado por los valores de fondo del contenido en cloruros para los puntos de la red de control de la

$$IEI_r(0) = 0,00527 \cdot \sum_n \varphi(n) \cdot |Cl_{ppm}(n, 0)|^{0,5} \quad [37]$$

Si se opta por definir un mallado rectangular para discretizar la superficie de la MAS correspondiente a la cota cero (S_o), la formulación del índice de estado de intrusión reducido quedaría como sigue:

$$IEI_r(t) = \frac{\sum_{\forall s(i) \in S_o} C_d^*(i, t) \cdot s(i)}{C_m \cdot S_o} \quad [38]$$

donde:

$C_d^*(n,t)$, parámetro característico de la intrusión, que corresponde con el valor interpolado (mediante interpolador exacto) en la celda (i) para el tiempo (t) procedente de la interpolación de las medida de cloruros que se han efectuado en los puntos de la red de intrusión marina para el tiempo (t).

$s(i)$, superficie de la celda (i) del mallado, de forma que:

$$\sum_{\forall s(i) \in S_o} s(i) = S_o$$

$$IEI_r(t) = \frac{1}{C_m} \sum_{\forall s(i) \in S_o} \varphi^*(i) \cdot C_d^*(i, t) = 0,00527 \cdot \sum_{\forall s(i) \in S_o} \varphi^*(i) \cdot |Cl_{ppm}^*(i, t)|^{0,5} \quad [39]$$

donde:

$$\varphi^*(i) = \frac{s(i)}{S_o} \quad \text{y} \quad \sum_{\forall s(i) \in S_o} \varphi(i) = 1$$

superficie porcentual de la celda (i) en la superficie que define la superficie de cota cero (S_o).

$Cl_{ppm}^*(i,t)$, valor interpolado del contenido en cloruros en la celda (i) para el tiempo (t).

Si el mallado definido es regular $-s(i)=cte-$:

$$\varphi^*(i) = \frac{s(i)}{S_o} = \sigma \Rightarrow IEI_r(t) = 0,00527 \cdot \sigma \cdot \sum_{\forall s(i) \in S_o} |Cl_{ppm}^*(i, t)|^{0,5} \quad [40]$$

El IEI_r correspondiente al régimen natural $-IEI_r(0)-$ vendría dado por los valores de fondo interpolados en las celdas del mallado del contenido en cloruros $-Cl_{ppm}(i,0)-$, esto es:

$$IEI_r(0) = 0,00527 \cdot \sigma \cdot \sum_{\forall s(i) \in S_o} |Cl_{ppm}(i, 0)|^{0,5} \quad [41]$$

Conclusiones

El IEI desarrollado constituye una herramienta para establecer la evolución que ha registrado el estado cualitativo y cuantitativo de las MAS costeras de una forma simple, utilizando los datos de las series piezométricas y de intrusión de que dispone el IGME o cualquier otro Organismo encargado de la vigilancia y control de aguas subterráneas.

También puede ser utilizado para fijar el buen estado cualitativo y cuantitativo de las MAS costeras, como objetivo de la DMA, y cuanto se desvía la situación actual del objetivo fijado.

Se ha desarrollado un procedimiento de cálculo que ha permitido fijar la necesidad de hacer intervenir en el cálculo datos morfológicos (cota muro), datos referentes al estado cuantitativo (piezometría) y al estado cualitativo (red de intrusión marina), discretizando el almacenamiento bajo la cota cero m s.n.m. mediante un mallado rectangular, lo que exige realizar cálculos de interpolación de los datos de partida (cotas muro, piezometría e intrusión), utilizando para ello interpoladores exactos.

Considerando que en muchos casos la informa-

ción geométrica de la MAS es insuficiente para determinar con garantías de éxito el muro del acuífero, se presenta un índice de estado de intrusión reducido - IEI, -donde se utilizan sólo los datos de calidad (red de intrusión), puesto que se obvia la dimensión vertical (geometría e hidrodinámica). Este IEI, resulta de fácil aplicación y para los autores del presente artículo el que tiene sentido aplicar para obtener de una forma rápida y sencilla una visión del estado en que se encuentra un determinado acuífero en referencia a la intrusión marina.

Referencias

- Pernía Llera, J.M. y Corral, M. (2001) Análisis del Llenado de los acuíferos en función de diferentes periodos históricos de referencia. *Hidrogeología y Recursos hidráulicos*. XXIII 3-12 pp
- Pernía Llera, J.M. y Lambán Jimenéz (2007) Groundwater indicators in Serra de Estepa (Seville, Spain). En: *Groundwater Resources Sustainability Indicators*. UNESCO, IAEA,IAH. Editors Jaroslav Vrba y Annukka Lipponen. IHP-VI, Series on Groundwater N^o 14. 44-50 pp.

Recibido: marzo 2007

Aceptado: agosto 2007