

ENCOMIENDA DE GESTIÓN PARA LA REALIZACIÓN DE TRABAJOS CIENTÍFICO-TÉCNICOS DE APOYO A LA SOSTENIBILIDAD Y PROTECCIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

Actividad 7:
Establecimiento de indicadores de
intrusión marina y cálculo de los
volúmenes ambientales al mar

Volumen I
PROPUESTA DE INDICADOR DE
ESTADO DE INTRUSIÓN MARINA
Aplicación a las masas de agua
subterránea de la provincia de
Castellón



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE CIENCIA
E INNOVACIÓN

MINISTERIO
DE MEDIO AMBIENTE
Y MEDIO RURAL Y MARINO



Instituto Geológico
y Minero de España

DIRECCIÓN GENERAL
DEL AGUA



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE CIENCIA
E INNOVACIÓN

MINISTERIO
DE MEDIO AMBIENTE
Y MEDIO RURAL Y MARINO



Instituto Geológico
y Minero de España

DIRECCIÓN GENERAL
DEL AGUA

PROPUESTA DE INDICADOR DE ESTADO DE INTRUSIÓN MARINA

Aplicación a las masas de agua subterránea de la provincia de Castellón

Diciembre, 2009



UNIVERSITAT
JAUME I

Con fecha 27 de mayo de 2008 el Instituto Geológico y Minero de España y la Universitat Jaume I de Castellón formalizaron un contrato para la realización de los trabajos necesarios para el establecimiento de indicadores de intrusión marina y cálculo de volúmenes ambientales de descarga al mar en tres masas de agua subterránea que corresponden a las tres planas costeras de la provincia de Castellón. Este trabajo se enmarca dentro de la Actividad 7 del acuerdo de Encomienda de Gestión entre el Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino (Dirección General del Agua) y el Instituto Geológico y Minero de España. El correspondiente proyecto del IGME está dirigido por Juan de Dios Gómez Gómez, y coordinado desde la DGA por Manuel Varela Sánchez.

Por parte de la Universitat Jaume I, el equipo encargado de elaborar estos trabajos es el Grupo de Investigación de Gestión de Recursos Hídricos, perteneciente al Instituto Universitario de Plaguicidas y Aguas, bajo la dirección del profesor Ignacio Morell, Catedrático de Hidrogeología.

El presente documento es la memoria que se presenta con los resultados obtenidos de los trabajos encaminados a establecer indicadores de intrusión marina.

EQUIPO DE TRABAJO

Universitat Jaume I

Ignacio Morell Evangelista

Arianna Renau Pruñonosa

Jorge Mateu Mahiques

Instituto Geológico y Minero de España

Juan de Dios Gómez Gómez

Bruno J. Ballesteros Navarro

Juan Antonio López Geta

David Pulido Velázquez

Dirección General del Agua

Manuel Varela Sánchez

Isaac Sánchez Navarro

INDICE GENERAL

1. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	9
2. LA INTRUSIÓN MARINA. CONCEPTOS BÁSICOS	10
2.1. Aproximación conceptual	10
2.2. Aproximación hidrodinámica	11
2.3. Aproximación hidrogeoquímica	13
2.4. El problema espacial	16
2.5. El problema temporal	16
2.6. Caracterización de la intrusión marina	17
3. INDICADORES DE INTRUSIÓN MARINA. ANTECEDENTES	19
3.1. Necesidad de un índice de aplicación universal	19
3.2. Tipos de indicadores	19
3.3. Algunos índices propuestos	22
4. INDICE PROPUESTO: INDICE SITE	27
4.1. Introducción	27
4.2. Índice SITE	28
4.3. Datos necesarios	28
4.4. Criterio superficie (S)	29
4.4.1. Introducción	29
4.4.2. Valores de referencia	30
4.4.3. Corrección de superficie	31
4.4.4. Datos necesarios	31
4.4.5. Procedimiento	32
4.4.6. Asignación de códigos	32
4.5. Criterio intensidad (I)	33
4.5.1. Introducción	33
4.5.2. Datos necesarios	33
4.5.3. Procedimiento	33
4.5.4. Asignación de códigos	34
4.6. Criterio temporalidad (T)	34
4.6.1. Introducción	34
4.6.2. Datos necesarios	35
4.6.3. Procedimiento	35
4.6.4. Asignación de códigos	36
4.7. Criterio evolución (E)	36
4.7.1. Introducción	36
4.7.2. Datos necesarios	37
4.7.3. Procedimiento	37
4.7.4. Asignación de códigos	37
4.8. Confección del índice SITE	37
4.8.1. Índice SITE alfanumérico	38
4.8.2. Índice SITE numérico	39
4.8.3. Índice SITE general	39
5. INDICE SITE DE LA PLANA DE VINARÓZ	40
5.1. Aplicación del criterio S	40
5.2. Aplicación del criterio I	43

5.3. Aplicación del criterio T	43
5.4. Aplicación del criterio E	45
5.5. Índice SITE de la Plana de Vinaroz	46
6. INDICE SITE DE LA PLANA DE OROPESA - TORREBLANCA	47
6.1. Aplicación del criterio S	47
6.2. Aplicación del criterio I	50
6.3. Aplicación del criterio T	50
6.4. Aplicación del criterio E	52
6.5. Índice SITE de la Plana de Oropesa - Torreblanca	53
7. INDICE SITE DE LA PLANA DE CASTELLÓN	54
7.1. Aplicación del criterio S	54
7.2. Aplicación del criterio I	57
7.3. Aplicación del criterio T	59
7.4. Aplicación del criterio E	60
7.5. Índice SITE de la Plana de Castellón	61
8. SÍNTESIS DE LOS ÍNDICES OBTENIDOS	62
8.1. Parámetro S	62
8.2. Parámetro Su	62
8.2. Parámetro I	62
8.3. Parámetro T	63
8.4. Parámetro E	63
8.5. Resultados finales	64
9. REFERENCIAS	65

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Modelo conceptual simplificado del proceso de intrusión marina	11
Figura 2. Esquema de la consideración hidrostática de la intrusión marina	11
Figura 3. Las líneas equipotenciales en la sección de salida	12
Figura 4. Potenciales del agua dulce y el agua de mar en las proximidades de la interfase	13
Figura 5. Anisotropía del acuífero en función de las variaciones verticales de conductividad hidráulica	16
Figura 6. Ascenso vertical de la interfase bajo áreas de intensa explotación	16
Figura 7. Piezómetro rasurado en toda su longitud y que penetra hasta el agua de mar. Ejemplo de perfil de conductividad eléctrica.	17
Figura 8. Situación de los puntos de la red de control de intrusión marina en el acuífero de Vinaroz	40
Figura 9. Mapa de isocloruros de valores medios del periodo 1998-2001. Plana de Vinaroz	42
Figura 10. Valores medios de cloruros en la Plana de Vinaroz	44
Figura 11. Valores de las concentraciones medias de cloruros en periodos discretos de cuatro años en la Plana de Vinaroz	45
Figura 12. Situación de los puntos de la red de control de intrusión marina en el acuífero de la Plana de Oropesa-Torreblanca	47
Figura 13. Mapa de isocloruros de valores medios del periodo 1998-2001. Plana de Oropesa-Torreblanca	49
Figura 14. Valores medios de cloruros en la Plana de Oropesa - Torreblanca	51
Figura 15. Valores de las concentraciones medias de cloruros en periodos discretos de cuatro años en la Plana de Oropesa - Torreblanca	52
Figura 16. Situación de los puntos de la red de control de intrusión marina en el acuífero de Castellón	54
Figura 17. Mapa de isocloruros de valores medios del periodo 1998-2001. Plana de Castellón	56
Figura 18. Valores medios de cloruros en la Plana de Castellón	60
Figura 19. Valores de las concentraciones medias de cloruros en periodos discretos de cuatro años en la Plana de Castellón	60
Figura 20. Valores del parámetro E en los tres acuíferos estudiados	63

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Caracterización, valores y códigos del parámetro S	32
Tabla 2. Valor medio de la concentración de cloruros asignado al intervalo mayor de los mapas de isocloruros	33
Tabla 3. Caracterización, valores y códigos del parámetro I	34
Tabla 4. Caracterización, valores y códigos del parámetro T	36
Tabla 5. Caracterización, valores y códigos del parámetro E	37
Tabla 6. Síntesis de los valores y códigos establecidos para cada uno los criterios	38
Tabla 7. Estado de la intrusión o presión debida a la intrusión	39
Tabla 8. Datos utilizados para la elaboración del mapa de isocloruros (mg/l). Plana de Vinaroz	41
Tabla 9. Distribución de superficies de los rangos de cloruros diferenciados. Plana de Vinaroz	42
Tabla 10. Superficies ocupadas por cada uno de los rangos de los cloruros en la Plana de Vinaroz	43
Tabla 11. Valores medios de cloruros y diferencias con la media (valores absolutos) en la Plana de Vinaroz	44
Tabla 12. Variaciones de las concentraciones medias de cloruros en periodos discretos de cuatro años en la Plana de Vinaroz	45
Tabla 13. Códigos y valores del índice SITE en la Plana de Vinaroz	46
Tabla 14. Datos utilizados para la elaboración del mapa de isocloruros (mg/l). Plana de Oropesa-Torreblanca	48
Tabla 15. Distribución de superficies de los rangos de cloruros diferenciados en la Plana de Oropesa-Torreblanca	48
Tabla 16. Superficies ocupadas por cada uno de los rangos de cloruros en la Plana de Oropesa-Torreblanca	50
Tabla 17. Valores medios de cloruros y diferencias con la medias (valores absolutos)	51
Tabla 18. Variaciones de las concentraciones medias de cloruros en periodos discretos de cuatro años en la Plana de Oropesa - Torreblanca	52
Tabla 19. Códigos y valores del índice SITE en la Plana de Oropesa - Torreblanca	53
Tabla 20. Datos utilizados para la elaboración del mapa de isocloruros (mg/l). Plana de Castellón	55
Tabla 21. Distribución de superficies de los rangos de cloruros diferenciados en la Plana de Castellón	57
Tabla 22. Distribución de superficies de los rangos de cloruros diferenciados, referidas a la franja litoral de 10 kilómetros, en la Plana de Castellón	57
Tabla 23. Superficies ocupadas por cada uno de los rangos de los cloruros en la Plana de Castellón	58
Tabla 24. Superficies ocupadas por cada uno de los rangos de cloruros, referido a la franja litoral de 10 Km de anchura, en la Plana de Castellón	58
Tabla 25. Valores medios de cloruros y diferencias con la medias (valores absolutos)	59
Tabla 26. Variaciones de las concentraciones medias de cloruros en periodos discretos de cuatro años en la Plana de Castellón	60
Tabla 27. Códigos y valores del índice SITE en la Plana de Castellón	61

Tabla 28. Códigos y valores del parámetro S en los acuíferos estudiados	62
Tabla 29. Códigos y valores del parámetro Su en los acuíferos estudiados	62
Tabla 30. Códigos y valores del parámetro I en los acuíferos estudiados	62
Tabla 31. Códigos y valores del parámetro T en los acuíferos estudiados	63
Tabla 32. Códigos y valores del parámetro E en los acuíferos estudiados	63
Tabla 33. Resultados finales	64
Tabla 34. Valores del índice SITE	64

1. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

Uno de los principales objetivos de las Directivas 2000/60/CE y 2006/118/CE es alcanzar el buen estado cuantitativo y químico de las masas de agua subterránea en el año 2015. Los trabajos previos consisten en coordinar las metodologías que permitan caracterizar el estado de las masas de agua y adaptar las redes de control y seguimiento.

La necesidad de identificar y caracterizar la intrusión marina en España viene recogida en la instrucción de planificación hidrológica (orden ARM/2656/2008, de 10 de septiembre), en su punto 3.2.3.5. "OTRAS PRESIONES":

"Se identificarán otras presiones significativas sobre las masas de agua subterránea, en particular la intrusión salina u otro tipo de intrusiones.

Para cada intrusión se señalará de forma aproximada el perímetro de la zona afectada, indicando las coordenadas de cada vértice.

Además se indicará, cuando sea posible, la superficie de la zona afectada, los niveles piezométricos, las direcciones de flujo y los valores de cloruros y conductividad. Se señalarán también las causas principales de la intrusión."

La casuística de la intrusión marina es muy variada ya que depende, a grandes rasgos, de factores intrínsecos (tipo de acuífero, tamaño y parámetros hidráulicos) y de factores extrínsecos (recarga y bombeos) muy variables. Como consecuencia de esta influencia múltiple, la caracterización del proceso es compleja y sólo en aproximaciones muy simples se puede hacer con criterios universales. Realmente, la evaluación espacial y temporal de la intrusión marina requiere un tratamiento específico en cada caso, que debe fundamentarse en el conocimiento del funcionamiento hidrogeológico del acuífero afectado y en la información obtenida de las redes de control y seguimiento. El grado de complejidad aumenta si se quiere evaluar también la reversibilidad de proceso (viabilidad y requisitos) y las sinergias que puedan existir con otros procesos de salinización (flujos regionales salinos, movilización de aguas congénitas, efectos del riego agrícola, vertidos).

Como consecuencia de lo anterior, queda claro que no existen escenarios canónicos y que tanto la intensidad del proceso como su evolución espacial y temporal debe ser objeto de aproximaciones multiparámetricas específicas.

No obstante lo anterior, y a los efectos de disponer de una metodología que permita hacer valoraciones globales y definir una escala de referencia de la intensidad y evolución del proceso, se hace necesario definir un Índice del Estado de Intrusión (IEI) que cumpla dos requisitos básicos: 1) fácil elaboración a partir de datos habitual o fácilmente disponibles, y 2) capaz de proporcionar información realista, discriminatoria y comprensible.

Algunas de las presiones que sufren las masas de agua subterránea son de relativamente fácil caracterización y pueden ser resumidas en índices sencillos y elocuentes. Tal es el caso, por ejemplo, del índice de sobreexplotación (K) que se define como la relación entre las extracciones por bombeo y los recursos

disponibles. La aparente simplicidad de este índice no debe ocultar que se basa en dos magnitudes cuya determinación está sujeta a notables imprecisiones y que, por otra parte, la “intensidad” de la sobreexplotación no tiene porqué ser espacialmente homogénea.

Respecto a la intrusión marina, a menudo relacionada con la sobreexplotación, el problema es aún más complejo puesto que no sólo se trata de relacionar dos magnitudes sino que es necesario reflejar propiedades del proceso tales como la temporalidad, evolución y oportunidad de regeneración.

2. LA INTRUSIÓN MARINA. CONCEPTOS BÁSICOS

2.1. Aproximación conceptual

En los acuíferos costeros se establece un equilibrio entre el flujo de agua dulce y el flujo de agua salada que, en condiciones no influenciadas, sólo se altera a consecuencia de variaciones de la recarga natural. Estas variaciones son de rango estacional en sistemas de elevada inercia, como puede esperarse en acuíferos notablemente karstificados o detríticos de muy alta transmisividad, pero frecuentemente se producen de manera muy lenta.

En general, el proceso de intrusión marina, entendido como la intensificación del flujo de agua salada hacia el interior del acuífero, se produce como consecuencia del aumento de la explotación del acuífero y/o por disminución de la recarga natural. El descenso piezométrico provocado por la explotación altera el equilibrio y favorece el avance del agua salada. En consecuencia, puede afirmarse que en primera aproximación la intrusión marina es una consecuencia inmediata de situaciones de sobreexplotación, cualquiera que sea la interpretación que se quiera dar a este controvertido concepto. De hecho, existe una notable correlación cualitativa entre la intensidad de la explotación (expresada como índice de explotación, K) y la intensidad de la intrusión marina.

En ocasiones, el desequilibrio puede tener otros orígenes, como por ejemplo la alteración drástica del flujo de un curso natural debida a actuaciones de regulación, o la modificación severa del uso del suelo.

El proceso de intrusión marina tiene como principal consecuencia la alteración de la calidad de las aguas del acuífero que a causa de procesos de mezcla del agua dulce y del agua salada y de procesos de interacción agua - roca modifican de manera sustancial las características físicas y químicas del agua original. El hecho más llamativo de estas modificaciones es el rápido y notable aumento de la concentración de cloruros en las aguas subterráneas, que va acompañado de otras modificaciones de menor intensidad pero de gran interés para la caracterización del proceso.

Si bien los principios básicos necesarios para conocer el proceso son comunes, la irregularidad pluviométrica (que controla parte de la recarga), la litología (que

controla los procesos modificadores) y las propiedades hidráulicas del acuífero (que controlan el flujo) proporcionan una gran variedad de escenarios y de comportamientos, tanto para el progreso de la intrusión marina como para su hipotética recuperación.

Mayor grado de complejidad puede esperarse si además se superponen otros procesos de salinización, que ocurren muy frecuentemente, como pueden ser los flujos regionales salinos, la puesta en juego de agua salinas congénitas o la existencia de procesos contaminantes de diversa naturaleza que puedan añadir salinidad al sistema (vertidos, riego con aguas salinas,..).

Una vez establecida la complejidad del proceso, conviene acotar el alcance del presente informe, cuyo objetivo es "simplemente" establecer un índice de intrusión sencillo que contenga información básica para categorizar la intensidad del proceso. En este contexto, parece recomendable asumir un modelo conceptual simple y común a todos los acuíferos costeros, consistente en la existencia de dos fases (dulce y salada) que se mezclan en el seno de un acuífero homogéneo. La aproximación más simple puede corresponder al

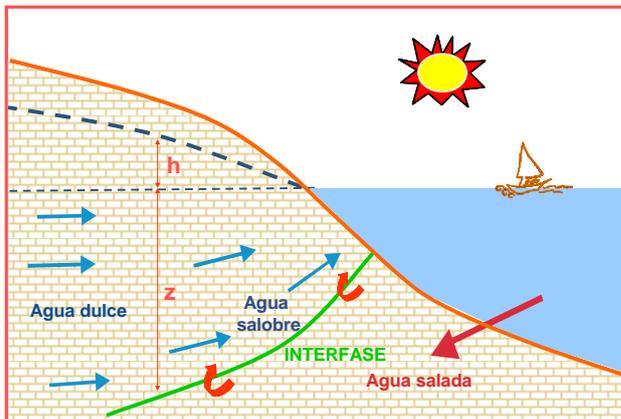


Figura 1. Modelo conceptual simplificado del proceso de intrusión marina.

esquema mostrado en la figura 1, en el que se define la interfase como la superficie de separación entre el agua dulce y el agua salada, lo que facilita la visión hidrodinámica del proceso pero obvia las implicaciones hidrogeoquímicas. La realidad del control del proceso de intrusión en los acuíferos es que sólo suele proporcionar información de los sectores del acuífero que contienen agua estrictamente dulce o agua salina

en diferentes grados, pero nunca de la existencia de agua de mar, salvo en situaciones muy específicas. En estas condiciones, se puede considerar que cuando se trata de caracterizar la intrusión a través de las redes de control realmente se caracteriza la distribución de la salinidad en la zona de mezcla, cuyo desarrollo es tanto mayor cuanto más intenso sea el proceso. En rigor, no se trata tanto de conocer el proceso como de determinar sus consecuencias.

2.2. Aproximación hidrodinámica

La determinación de la posición de la interfase se lleva a cabo, tradicionalmente,

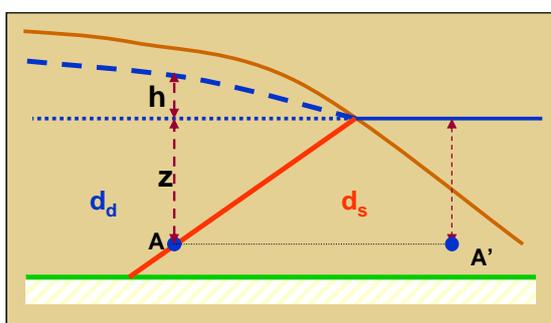


Figura 2. Esquema de la consideración hidrostática de la intrusión marina

a partir de medidas piezométricas, aplicando fórmulas más o menos restrictivas cuya aplicabilidad depende de la infraestructura disponible para la obtención de datos

básicos. Las fórmulas más utilizadas son las de Ghyben-Herzberg, Hubbert y Luszczynsky. Las dos primeras teorías tienen en común considerar inmiscibles el agua dulce y salina pero difieren en la forma de considerar el proceso.

Los postulados de **Ghyben-Herzberg** consideran el fenómeno como si no hubiera movimiento entre los dos fluidos: el agua dulce y el agua de mar. Se basa en el equilibrio estático de dos columnas de agua de diferente densidad.

En este caso se supone que el agua dulce "flota" sobre la salada, separadas ambas por una superficie neta o interfase. Se asume que no hay flujo de agua salada y que el flujo del agua dulce es radial en un acuífero homogéneo e isótropo en el que la sección de salida del agua dulce al mar es un punto infinitesimal.

El equilibrio en el punto A responde a la ecuación:

$$(h + z) d_d = z d_s \Rightarrow z = (d_d / d_s - d_d) h$$

Haciendo $d_d / d_s - d_d = 1/\beta \Rightarrow z = 1/\beta h$

Si $d_d = 1 \text{ g/cm}^3$ y $d_s = 1,025 \text{ g/cm}^3$ $1/\beta = 40$ ($50 > 1/\beta > 30$)

$$z = 40 h$$

Siendo **h**: cota s.n.m. del agua dulce en la vertical del punto A; **z**: profundidad b.n.m. del punto A; **d_d**: peso específico del agua dulce; **d_s**: peso específico del agua salada.

En la práctica, para aplicar la fórmula de Ghyben-Herzberg se requiere conocer el nivel piezométrico y las densidades del agua dulce y salada, si bien estos dos últimos parámetros se consideran iguales a 1000 y 1025 g/cc, respectivamente.

La aproximación hidrodinámica presupone la existencia de un flujo de agua dulce hacia el mar, y de agua de mar hacia el continente, lo cual requiere la existencia de un gradiente en ambos sentidos, es decir, requiere un flujo de agua dulce y uno de agua salada. Debe asumirse que el flujo de agua dulce deja de ser radial a medida que se aproxima a la salida al mar (figura 3).

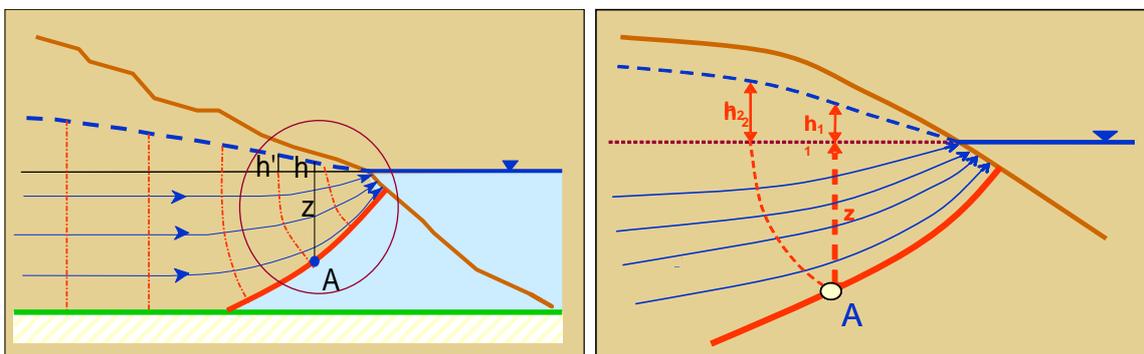


Figura 3. Las líneas equipotenciales son verticales en el interior del acuífero pero no en la sección de salida del agua dulce. El potencial correspondiente al punto A no es el que se puede medir en su vertical.

En este caso, Hubbert propuso la siguiente expresión:

$$(z + h_d) d_d = (z + h_s) d_s$$

$$z = (d_d / d_s - d_s) h_d - (d_s / d_s - d_d) h_s$$

$$z = 1/\beta h_d - (1 + 1/\beta) h_s$$

Esto último implica que en el continente el potencial de agua salada es menor que en el mar (figura 4). Dado que h_s (altura piezométrica del agua salada) está

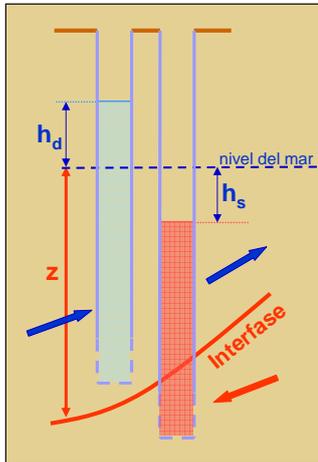


Figura 4. Potenciales del agua dulce y el agua de mar en las proximidades de la interfase

por debajo del nivel del mar, el segundo sumando será negativo y por tanto se sumará al primero y, por ello, la interfase estará más profunda que la calculada por la fórmula de Ghyben y Herzberg.

La fórmula de Hubbert demuestra que en las proximidades del borde del mar existe una diferencia entre la verdadera profundidad del agua salada y la profundidad calculada mediante la fórmula de Ghyben-Herzberg. Por consiguiente, el valor de z según Hubbert es mayor que el valor calculado con la fórmula de Ghyben y Herzberg. En este caso es necesario disponer de dos piezómetros ranurados respectivamente en el agua dulce y en el agua salada, y muy cerca de la interfase

Finalmente, más realista es considerar la interfase como una zona de mezcla con un espesor determinado, donde el contacto entre las fases se considera neto. En este caso se requieren tres sondeos ranurados: uno en el agua dulce, otro en el agua salada y un tercero en la zona de mezcla, lo que supone una infraestructura realmente compleja.

La principal limitación de estas fórmulas teóricas radica en la frecuente heterogeneidad y anisotropía del medio, tanto en acuíferos kársticos como detríticos. Las diferencias de permeabilidad y la existencia de procesos de semiconfinamiento conllevan dificultades en la precisión de las determinaciones piezométricas e impiden la geometría regular de la interfase.

2.3. Aproximación hidrogeoquímica

Desde el punto de vista hidrogeoquímico el proceso de intrusión marina implica dos mecanismos principales:

- Mezcla entre el agua dulce y el agua salada
- Modificadores derivados de la interacción agua-roca

El primero de ellos supone una serie de modificaciones en la composición del agua que se traducen en un notable incremento de la mineralización, como consecuencia del aporte de sales por el agua de mar.

El segundo proceso hace referencia a que la mezcla de dos fases físico-químicas diferentes origina un agua que está inicialmente en desequilibrio y que debe

encontrar un nuevo estado de equilibrio con el acuífero, produciéndose reacciones entre la fracción sólida y el agua salina, que son de mayor o menor intensidad en función de factores tales como el porcentaje de mezcla, la litología del acuífero y otras condiciones de carácter específico. Este comportamiento reactivo implica la existencia de una serie de procesos yuxtapuestos al propio proceso de mezcla, que afectarán selectivamente a los diferentes iones.

Cuando dos fluidos miscibles de características físico-químicas diferentes entran en contacto, se origina una zona de mezcla con características que pueden considerarse intermedias entre las dos fases iniciales. Los procesos que intervienen directamente en este mecanismo son la *dispersión* y la *difusión*.

La *dispersión* es un proceso ligado al movimiento del agua a través de un medio poroso, según líneas de corriente de velocidad variable, que aprovechan los canales porosos irregulares del medio sólido. Es evidente la relación entre el proceso de dispersión y la permeabilidad del medio que atraviesa el fluido, de manera que en determinados tipos de sedimento este mecanismo será más eficaz que en otros.

La *difusión* se manifiesta a escala molecular o iónica y tiene lugar principalmente en el agua intersticial. Consiste en la migración de especies químicas como resultado de la existencia de un gradiente en su concentración. En una primera aproximación, la difusión de un ión es proporcional al gradiente de su concentración absoluta y, como consecuencia, en el proceso de intrusión marina, el Cl⁻ se difundirá más rápidamente en el sedimento que el Mg²⁺, que lo hará más rápidamente que el K⁺ o el Ca²⁺.

Contrariamente a lo que ocurre con el mecanismo de dispersión, la difusión no requiere movimiento del fluido, por lo que parece ser que el primer proceso será predominante en los casos de alta velocidad de flujo, mientras que con movimientos lentos cobrará mayor importancia la difusión.

A efectos de nomenclatura, el resultado conjunto de los procesos de dispersión mecánica y difusión molecular se conoce como *dispersión hidrodinámica*.

El proceso de mezcla entre soluciones de composición muy diversa produce aguas con un quimismo que resulta fundamentalmente de una combinación lineal entre los miembros involucrados, aunque no siempre se cumple esta norma. Se ha comprobado que sin la intervención de las reacciones sólido-agua, tienen lugar fenómenos químicos que modifican la composición final del agua de mezcla y la hacen diferente de la teórica si se atiende a la proporción de la mezcla. De manera que si bien algunos iones responden de manera precisa a este porcentaje de mezcla, otros presentan concentraciones que difieren de las previsiones teóricas. Concretamente estas anomalías se refieren a las concentraciones de los iones calcio y bicarbonato.

En cualquier caso, el principal efecto que conlleva el proceso de intrusión marina es el incremento de la concentración de determinados iones en el agua, cuya concentración en el agua de mar es muy superior a la que habitualmente se encuentra en el agua dulce.

Si se atiende a la concentración iónica del agua de mar, hay que decir que esta agua se caracteriza por un contenido alto en sólidos disueltos y un predominio de iones Cl^- , SO_4^{2-} , Na^+ y Mg^{2+} sobre las especies HCO_3^- y Ca^{2+} , que son las que habitualmente caracterizan las aguas dulces naturales no afectadas por procesos contaminantes.

Por tanto, por la invasión de agua de mar, el agua subterránea sufre una serie de modificaciones en su contenido de sólidos disueltos y en determinadas especies iónicas. Las especies mayoritarias que sufren los aumentos más significativos en sus contenidos son los cloruros, sulfatos, sodio y magnesio. Suponiendo al ión cloruro como un ión conservativo que no se ve afectado por procesos modificadores y cuyo origen está ligado estrechamente a las contribuciones de agua de mar, su concentración es una guía excelente para conocer el porcentaje de agua de mar en la mezcla y para conocer las concentraciones que deben tener los otros iones, si no intervienen otros procesos. En resumen es un indicador del proceso de mezcla.

Si en las aguas salinas sólo ha intervenido el proceso de mezcla las concentraciones iónicas serían iguales a las que establece el porcentaje de agua de mar en la mezcla; sin embargo, el contenido de cada uno de los iones no sólo depende de las concentraciones de las facies originales, salada y dulce, sino también de la intervención de los procesos físico-químicos que tienen lugar en la interacción agua-roca. Básicamente, los principales procesos involucrados son los relacionados con la disolución y/o precipitación de carbonatos, los procesos redox (reducción de sulfatos) y el intercambio iónico.

Los procesos físico-químicos deben abordarse como fenómenos modificadores que alteran la composición teórica de una mezcla conservativa agua dulce-agua de mar.

Cuando se conocen las composiciones químicas de los dos miembros que intervienen en la mezcla (agua dulce y agua de mar), puede establecerse la composición de un agua de mezcla, a partir del contenido en ión cloruro. Este es el indicador de salinización utilizado habitualmente para establecer los porcentajes de mezcla, por su carácter conservativo.

Se debe tener en cuenta que la importancia de todos y cada uno de los procesos depende de factores como la salinidad de las aguas resultantes de la mezcla, litología del acuífero, fases minerales presentes en la matriz, grado de saturación de las aguas para estas u otras fases minerales, parámetros físico-químicos (pH, Eh, temperatura). El tema es complejo en su conjunto, pues no siempre es posible reconocer con precisión cada uno de estos factores.

El problema alcanza mayor complejidad cuando intervienen dos o más procesos, que es lo más habitual, pues cada uno de ellos tiene consecuencias que inciden directa o indirectamente en los otros. En ocasiones, además, dos procesos diferentes pueden dar aparentemente resultados parecidos si se analizan desde un único punto de vista. Así, por ejemplo, la disolución de la calcita puede contribuir al exceso de alcalinidad, incremento que puede también explicarse biológicamente, por simultánea oxidación de la materia

orgánica y reducción de sulfato. Por tanto, abordar el problema argumentando de forma simplista los posibles procesos que justifiquen las anomalías observadas, inducen a errores de diagnóstico.

2.4. El problema espacial

El proceso de intrusión no suele afectar con la misma intensidad a la totalidad del acuífero. Ello es debido, básicamente, a dos circunstancias: la primera es que la vulnerabilidad intrínseca y específica a la intrusión no es homogénea y la segunda, que las presiones que dan lugar a la intrusión no se reparten de manera regular en el espacio.

En un acuífero aceptablemente homogéneo, los dos factores que en mayor medida condicionan la distribución espacial del proceso son la recarga diferencial y la existencia de situaciones de sobreexplotación más o menos localizadas. En cada caso se establecen diferentes situaciones de equilibrio que pueden dar lugar a avances diferenciales de la interfase (figura 5) e incluso a la formación de conos salinos localizados (“upconing”) (figura 6).

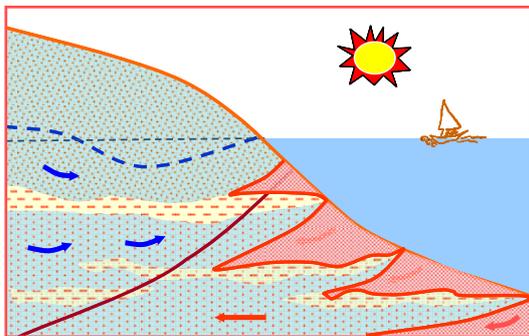


Figura 5. La anisotropía del acuífero puede dar lugar a diferentes equilibrios agua dulce - agua salada en función de las variaciones verticales de conductividad hidráulica

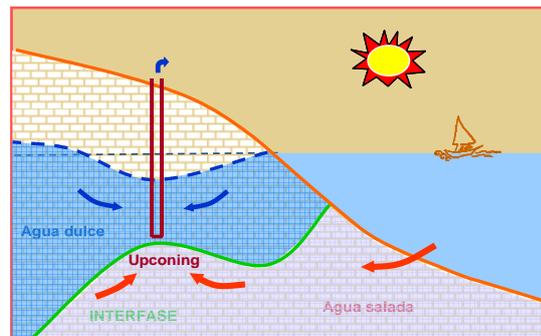


Figura 6. Ascenso vertical de la interfase bajo áreas de intensa explotación

La caracterización espacial de la intrusión está dificultada por el frecuentemente dispar grado de penetración de las captaciones que se utilizan para recabar datos hidroquímicos y piezométricos.

2.5. El problema temporal

El proceso de intrusión marina es discontinuo en el tiempo. Su evolución depende básicamente de la relación entre los bombeos y la recarga. En primera aproximación, se puede asumir que en un determinado acuífero el régimen de explotación sea constante a escala hiperanual y que sólo la ocurrencia de periodos excepcionalmente secos puede incrementar significativamente los bombeos y que, en sentido contrario, periodos húmedos pueden dar lugar a una apreciable reducción de los mismos. Naturalmente, a escala estacional pueden existir notables diferencias sobre todo si los bombeos tienen un destino

agrícola. En cualquier caso, si la demanda, como suele ocurrir, es apreciablemente constante, el efecto de los bombeos sobre la hidrodinámica de la intrusión varía considerablemente en función de la recarga que, como es sabido, es un proceso altamente variable.

Por otra parte, y a igualdad de condiciones externas, la influencia de estas variaciones temporales puede ser más o menos intensa en función de factores intrínsecos entre los que los más importantes son el tamaño del acuífero y, sobre todo, su inercia, la cual, a su vez, es función de su estructura interna.

Estas consideraciones ponen de manifiesto que la caracterización de la intrusión marina debe reflejar no sólo la situación en un momento dado sino su evolución temporal y, si fuera posible, su dinámica temporal en función de los factores externos. Especialmente importante puede ser esta cuestión en los casos en que la inercia del acuífero sea muy baja, como puede ocurrir en acuíferos altamente karstificados o, en general, en acuíferos de elevada conductividad hidráulica.

2.6. Caracterización de la intrusión marina

En general, existen dos líneas de trabajo para caracterizar el proceso de intrusión marina: la primera consiste básicamente en determinar la posición de la interfase y sus variaciones, y la segunda se basa en estudiar los procesos hidrogeoquímicos asociados al proceso.

La determinación de la posición de la interfase se puede abordar a partir de medidas piezométricas y la aplicación de las fórmulas que relacionan estas medidas con la profundidad a la interfase, o bien mediante medidas directas de su posición a partir de la conductividad eléctrica. Sin duda alguna, las medidas directas aportan mayor fiabilidad e informan de la zona de mezcla en su conjunto pero requieren una infraestructura de la que raramente se dispone (figura 7).

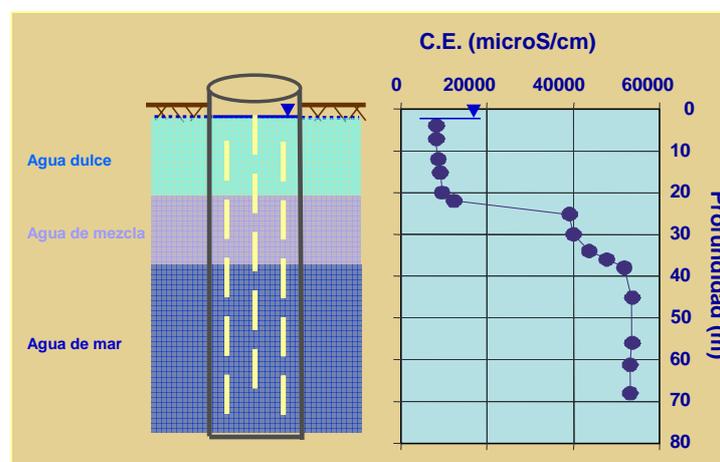


Figura 7. Piezómetro ranurado en toda su longitud y que penetra hasta el agua de mar. Ejemplo de perfil de conductividad eléctrica.

Algunos métodos geofísicos también permiten determinar de manera indirecta la zonación hidroquímica.

La caracterización hidrogeoquímica de la intrusión permite obtener una visión realista de las consecuencias del proceso. Más allá de la simple distribución espacial de la salinidad, y singularmente del ión cloruro, el estudio conjunto de los iones mayoritarios, algunos minoritarios (Br, Sr, I, B, Li,..) y ciertas relaciones isotópicas (B^{10}/B^{11}) pueden ayudar a conocer con cierta precisión los procesos de mezcla y sus variaciones. El estudio de los procesos de cambio iónico, por ejemplo, ha permitido determinar las fases de avance y retroceso de la intrusión en la Plana de Oropesa - Torreblanca (Giménez y Morell, 1997).

3. INDICADORES DE INTRUSIÓN MARINA. ANTECEDENTES

3.1. Necesidad de un índice de aplicación universal

Debe quedar claramente asumido que un **índice de intrusión** debe tener utilidad práctica y sólo tiene la función de reflejar de manera sencilla las principales características del proceso de intrusión. No obstante, la información proporcionada por el índice debe ser amplia, inequívoca, descriptora y discriminatoria. Se pretende que el índice ofrezca información cuantitativa y cualitativa sobre la afección espacial, la intensidad del proceso, la temporalidad y la probable evolución a medio o largo plazo.

Se establece también como requisito básico del índice que se elabore con datos sencillos y habitualmente disponibles, como pueden ser los proporcionados por las redes de control, que son esencialmente datos piezométricos (redes piezométricas) y de concentración de cloruros (redes de intrusión marina). Se pretende con esto que el índice sea de aplicación universal, es decir, que pueda aplicarse en cualquier acuífero costero en el que sólo se tengan datos básicos.

3.2. Tipos de indicadores

Han sido numerosas las propuestas de índices de intrusión marina, con muy diferente complejidad. Todos ellos se basan en la utilización de algún parámetro físico-químico y en algunos, además, en datos morfológicos y/o piezométricos.

En primera aproximación los índices más habituales pueden ser clasificados en las siguientes categorías:

- Índices hidrogeoquímicos (Voudouris, 2004)
- Índices basados en datos morfológicos, piezométricos y de calidad (Navarro y Murillo, 2007)
- Índices basados en datos de calidad (Navarro y Murillo, 2007)
- Índices descriptivos (Ballesteros, 2008)
- Índices basados en mapas de vulnerabilidad (modelo GALDIT, Chachadi, 2005; modelo GOD, Ertekin, 2005)
- Índices basados en modelos matemáticos

La manifestación más evidente del proceso de intrusión marina es la rápida elevación de la salinidad del agua subterránea. Como ya se ha comentado, el proceso de mezcla agua dulce - agua de mar, sean cuales fuere su importancia relativa y los procesos de interacción asociados que se produzcan, da lugar a aguas de concentraciones elevadas de ión cloruro, que es el único ión

involucrado en la mezcla que se comporta como estrictamente conservativo. También se producen aumentos de la concentración de otros iones mayoritarios, tales como sodio, sulfatos, magnesio, calcio y potasio y de algunos iones minoritarios significativos, como el boro, estroncio, litio y bromuros. Con la relativa excepción de los bromuros, el resto de los iones mencionados están o pueden estar afectados por procesos modificadores, a veces muy intensos.

En consecuencia, parece claro que, en ausencia de otros procesos, el ión cloruro es el indicador más fiable de intrusión marina; no obstante, se puede obtener información adicional si se tienen en cuenta otros iones o relaciones entre ellos (índices hidrogeoquímicos).

Ión cloruro

Sin duda alguna, el ión cloruro es el parámetro universalmente utilizado para describir los procesos de intrusión marina. Normalmente, el fondo geoquímico de cloruros en los acuíferos costeros es muy bajo (del orden de 50 mg/l) y está en relación a los procesos de aerosol marino, de evaporación -realmente, evapotranspiración- que sufre el agua de lluvia y al denominado proceso de cycling-salting, que incrementa la salinidad a causa de la utilización cíclica del agua.

Normalmente, el agua subterránea de los acuíferos costeros no adquiere cloruros que no provengan de las fuentes mencionadas o de procesos puntuales de contaminación. Por otra parte, la elevada solubilidad de los compuestos clorurados no permite la precipitación de los mismos; asimismo, el ión cloruro no está sujeto a proceso modificador alguno, lo que le confiere carácter de soluto no reactivo.

En estas condiciones, las variaciones temporales y espaciales de la concentración de ión cloruro están claramente relacionadas con la mezcla agua dulce - agua de mar, y el rango de esas variaciones con la intensidad del proceso. Por otra parte, la determinación analítica de los cloruros resulta sencilla y rutinaria, aún cuando el método utilizado para su determinación sea el volumétrico. Estas dos características convierten al ión cloruro en el mejor trazador de los procesos de intrusión marina y, por tanto, en un elemento clave para la definición de índice de intrusión.

Son muy numerosos los ejemplos que podrían ilustrar la utilización universal de los cloruros como indicador, aunque conviene adelantar que el manejo de la información que proporcionan no es trivial sino que debe hacerse teniendo en cuenta diversos factores entre los que destaca la representatividad espacial de las muestras en un proceso teóricamente dependiente de la profundidad pero en la práctica más complejo.

En 1998, el MIMAM propuso un índice para definir la superficie del acuífero afectado por la intrusión. El índice consiste en calcular el porcentaje de superficie de acuífero afectada por un contenido en cloruros superior a 1.000 mg/L (límite de utilización del agua para aprovechamiento urbano o uso

agrícola) respecto a la superficie total de acuíferos costeros controlados, según la expresión:

Superficie salinizada = (nº puntos con Cl > 1000 mg/l / nº puntos controlados) * superficie del acuífero

El indicador se calcula para cada acuífero (unidad hidrogeológica) costero en que exista una red de control de la calidad del agua subterránea, con una densidad superior a un punto por cada 150 km².

Total de sólidos disueltos

El contenido total en sólidos disueltos (TDS ó TSD) es una medida de la salinidad, y ha sido propuesto por algunos autores (Voudouris et al., 2004) como un método para definir la distribución superficial de la intrusión marina. Según estos autores, si el TDS es menor de 1000 mg/l el agua se considera dulce, si está entre 1.000 y 3.000 mg/l es ligeramente salina, entre 3.000 y 10.000 mg/l se considera moderadamente salina, y por encima de 10.000 mg/l es muy salina. La isolínea de 1.000 mg/l marca el área bajo influencia de la intrusión marina.

Este método tiene dos inconvenientes. Uno de ellos es que para el cálculo del TDS se requiere el análisis de todos los iones mayoritarios, y el otro es que pueden pasar desapercibidos otros procesos de salinización que aporten sales al agua sin relación alguna con el proceso de intrusión.

Una variante del método podría ser la utilización del denominado residuo seco, de engorrosa determinación y de dudosa fiabilidad en agua de moderada a alta salinidad.

En cualquier caso, parece más sencillo utilizar directamente las medidas de conductividad eléctrica, aunque ello no obvia el problema de la superposición de procesos de salinización.

Voudouris et al. (2004) también han utilizado la distribución geográfica de la fuerza iónica, que en las aguas dulces es menor de 0.005, valor que utilizan para diferenciar la zona de afección del proceso.

Relaciones iónicas (mayoritarios)

Las relaciones iónicas equivalentes Mg/Ca, Cl/HCO₃ y SO₄/Cl y Na/Cl son las más comúnmente utilizadas para evaluar el estado de la intrusión.

La relación Mg/Ca en el agua de mar es del orden de 5, mientras que en las aguas dulces varía en un rango de 0,3 a 1,5. La elevación del índice junto al incremento de la concentración de ión cloruro evidencian la existencia de intrusión marina y el índice puede utilizarse para evaluar de manera grosera la intensidad de los procesos de mezcla. El principal inconveniente de este índice es que especialmente el calcio suele estar fuertemente implicado en procesos de intercambio iónico con el sodio y en los de precipitación - disolución de calcita.

En acuíferos aproximadamente homogéneos podría ser de mayor interés el índice, pero la frecuente heterogeneidad litológica e hidrodinámica de los acuíferos costeros desaconseja su uso, en general.

La relación Cl/HCO_3 en el agua de mar varía entre 20 y 50 mientras que en las aguas dulces continentales tiene normalmente un valor entre 0,1 y 5. En ausencia de otros procesos tiene valor indicativo pero la reactividad del ión bicarbonato le resta valor discriminatorio.

La relación SO_4/Cl tiene interés para diferenciar entre procesos de salinidad pero no para establecer rangos de intensidad en procesos simples de intrusión marina.

Finalmente, la relación Na/Cl sólo tiene interés en el estudio de procesos de cambio iónico.

Relaciones iónicas (minoritarios)

Las relaciones iónicas que involucran iones minoritarios pueden proporcionar información de interés. Tal es el caso de las relaciones Br/Cl , I/Cl y Sr/Cl , aunque no es frecuente disponer de análisis de estos iones.

De todos ellos, el más utilizado es el Br/Cl (o Cl/Br) que tiene su mejor aplicación en la identificación del origen de la salinidad (Morell, 1986; Giménez, 1994; Custodio y Alcalá, 2003; Voudouris et al., 2004; Mandilaras et al., 2007). Si la salinidad del agua subterránea se debe a la mezcla con agua marina la relación Cl/Br tiene el mismo valor que la del agua de mar (655 aproximadamente). Valores más elevados pueden deberse a la superposición de procesos contaminantes de origen urbano o industrial (aguas residuales, por ejemplo) mientras que valores más bajos deben asociarse a aportes diferenciales de bromuro (contaminación por plaguicidas o mezclas con salmueras, por ejemplo).

Otros índices hidrogeoquímicos

En los últimos años se han realizado intentos de aplicar nuevos índices hidrogeoquímicos basados en determinaciones analíticas complejas. Tal es el caso de la relación isotópica $\text{B}^{10}/\text{B}^{11}$, que permite discriminar orígenes de salinidad y evaluar procesos de mezcla. No se trata realmente de un índice sino de un parámetro que permite avanzar más en el conocimiento hidrogeoquímico de los acuíferos afectados por intrusión marina (Giménez y Morell, 2008).

Índices basados en mapas de vulnerabilidad

Se han propuesto algunos índices que se basan en la elaboración de mapas de vulnerabilidad, como son el modelo GALDIT (Chachadi, 2005) y el modelo GOD (Ertekin, 2005).

3.3. Algunos índices propuestos

Se recogen, por su interés, algunos índices propuestos que tienen en cuenta la concentración del ión cloruro y otros parámetros de más difícil disponibilidad.

Índice de Edet y Okereke

Estos autores proponen un Índice de Valoración (AI) semicuantitativa de intrusión marina basado en el control de cinco parámetros: total de sólidos disueltos, densidad, concentración de cloruros y sodio y relación Br/Cl, según la expresión:

$$AI = \frac{TDS_C}{TDS_m} \% \frac{D_C}{D_m} \% \frac{Na_C}{Na_m} \% \frac{Cl_C}{Cl_m} \% \frac{Br/Cl_C}{Br/Cl_m}$$

donde TDS_C , D_C , Na_C , Cl_C y Br/Cl_C son las concentraciones medidas de TDS, D, Na, Cl y Br/Cl, y TDS_m , D_m , Na_m , Cl_m y Br/Cl_m son niveles guía o concentraciones máximas admisibles.

Según este índice, los acuíferos costeros se pueden clasificar en tres clases según la intensidad de la intrusión que soportan:

Clase 1	AI < 25	Sin intrusión
Clase 2	25 < AI < 50	Intrusión ligera
Clase 3	AI > 50	Intrusión intensa

Índice particularizado de intrusión marina (IPI)

Este índice fue propuesto por Murillo y Navarro (1991) y fue aplicado al acuífero de la Plana de Castellón y en el acuífero de Motril - Salobreña (Navarro et al., 1995).

El fundamento del índice es el siguiente:

Se divide el acuífero en i elementos

$$IPI_i = \sum_j a_j V_{i,j}$$

donde:

IPI_i es el valor del IPI para el elemento i -ésimo

A_j es el coeficiente de peso para la variable V_j -ésima

$V_{i,j}$ es el valor de la variable V_j -ésima para el elemento i -ésimo

J es el número de variables químicas que se evalúan

Al no disponer de datos suficientes, sólo se tienen en cuenta los datos de la red de intrusión: cloruros y conductividad. Pero dado que en la conductividad influyen también otros factores, sólo se tendrá en cuenta la concentración en cloruros, la cual está directamente relacionada con la intrusión marina.

$$IPI_i = 10 \cdot \frac{\log(\langle Cl^- \rangle_i) - \log(\langle Cl^- \rangle_{\text{mínimo}})}{\log(\langle Cl^- \rangle_{\text{máximo}}) - \log(\langle Cl^- \rangle_{\text{mínimo}})}$$

$\langle Cl^- \rangle_{\text{mínimo}}$ es el mínimo registrado en el acuífero

$\langle Cl^- \rangle_{m\acute{a}ximo}$ es el correspondiente al agua del mar

En forma general:

$$IPI_i = A \cdot (\log(\langle Cl^- \rangle_i) - B)$$

con:

$$A = \frac{10}{\log(\langle Cl^- \rangle_{m\acute{a}ximo}) - \log(\langle Cl^- \rangle_{m\acute{m}imo})}$$

$$B = \log(\langle Cl^- \rangle_{m\acute{m}imo})$$

Este índice oscilará entre 0 y 10, de forma que el valor nulo corresponderá a una concentración mínima, y el valor máximo al agua del mar.

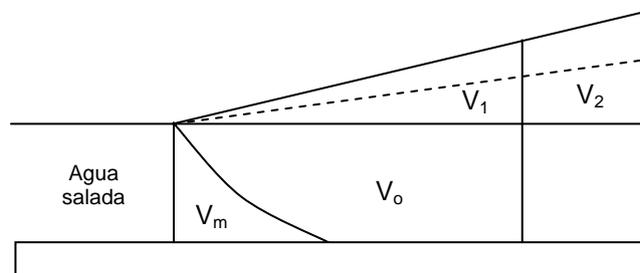
Existe también un índice generalizado de intrusión marina (Murillo y Navarro, 1995) calculado a partir del anterior pero definiendo cuatro clases de profundidad para tratar el problema tridimensionalmente, por lo que se requiere modelización matemática.

Índice del estado de intrusión

Navarro y Murillo (2007) han propuesto un Índice del estado de intrusión (IEI) que tiene en cuenta las características geométricas del acuífero y los datos que se recogen en las campañas de nivel piezométrico y de la calidad de las aguas subterráneas.

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

$$IEI_m(t) = \frac{V_m(t)}{V_{s,0}} = \frac{V_{s,0} - V_0(t)}{V_{s,0}} = 1 - \frac{V_0(t)}{V_{s,0}} = 1 - \Psi_m(t)$$



donde:

IEI_m(t) es el índice de estado de intrusión cuantitativo, que es un concepto dinámico. Toma un valor máximo unidad que implica una intrusión total en la

masa de agua subterránea costera; el valor mínimo correspondería al estado hidrodinámico natural en la época de aguas altas ($V_{m(\min)}$ y $V_{0(\max)}$).

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

$V_{s,o}$ es el 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.

$V_o(t)$ es el volumen de embalse subterráneo saturado bajo la cota cero (nivel del mar). Es un volumen dinámico.

$\Psi_m(t)$ es un parámetro morfodinámico.

El índice de estado de intrusión (IEI) de un acuífero costero se define mediante la expresión:

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

$$IEI(t) = \frac{1}{1 + \Psi(t)}$$

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

donde:

IEI(t) es el índice del estado de la intrusión de una masa de agua subterránea costera (estado cuantitativo y cualitativo).

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

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

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

$V_o(t)$ es el volumen de embalse subterráneo saturado bajo la cota cero (nivel del mar). Es un volumen dinámico.

$\Psi(t)$ es un 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:

$$\text{Para } C_d \rightarrow C_m \text{ y } V_o(t) = 0$$

$$V_m(t) = V_{s,o} \rightarrow \Psi(t) = 0 \rightarrow IEI = 1$$

El parámetro característico de la intrusión debe ser el 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:

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

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

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

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

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

Tanto para el cálculo de este $IEI(t)$ como para el índice $IEI_m(t)$ es necesario discretizar el acuífero mediante una malla rectangular.

El método descrito para la determinación del índice del estado de la intrusión exige disponer de datos exhaustivos del muro del acuífero, lo cual no siempre es posible. Por ello, los mismos autores (Navarro y Murillo, 2007) han propuesto una **expresión simplificada** del IEI que corresponde a un índice bidimensional en el que no se considera el espesor del embalse subterráneo.

Este índice del estado de la intrusión reducido reducido ($IEI_r(t)$) quedaría expresado como:

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

donde:

$C_d(n,t)$ es un 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 para el tiempo (t). Es función del valor de fondo $-C_d(i,0)-$ de la evolución hidrodinámica del acuífero y de los procesos de contaminación que se hayan producido.

S^*n es la superficie de referencia asociada al punto (n), que se puede determinar utilizando los polígonos de Thiessen.

4. INDICE PROPUESTO: INDICE SITE

4.1. Introducción

Generalmente, los índices ambientales de estado de las masas de agua subterránea están enfocados a describir con algoritmos sencillos su situación actual, ya sea en aspectos parciales o de situación general.

Quizás sea un buen ejemplo el índice de explotación, que se calcula mediante el cociente entre el volumen de extracciones de agua subterránea y el volumen de recursos subterráneos disponibles. Este índice se expresa con una cifra mayor o menor de la unidad que indica respectivamente, sobreexplotación en sentido general o situación de superávit de recursos.

En la Instrucción de Planificación Hidrológica (orden ARM/2656/2008, de 10 de septiembre), en su punto 5.2.3.1. se hace referencia a este índice: "Se considerará que una masa o grupo de masas se encuentra en mal estado cuando el índice de explotación sea mayor de 0,8 y además exista una tendencia clara de disminución de los niveles piezométricos en una zona relevante de la masa de agua subterránea".

En los acuíferos costeros, el índice de explotación presenta una notable correlación con el grado de salinización por intrusión marina, de manera que, en primera aproximación, el índice de explotación podría utilizarse para informar cualitativamente sobre dicho grado de salinización o, más precisamente, para informar sobre el riesgo de intrusión.

En la mayor parte de los casos, el proceso de intrusión marina evoluciona con relativa lentitud de forma que el grado de afección no es una situación coyuntural sino que depende, entre otros factores, de la historia más o menos reciente del acuífero, en particular de la relación recarga - explotación. Sin embargo, esta relación puede presentar desfases temporales significativos y, además, no manifestarse de manera espacialmente homogénea.

Con algunas excepciones y a efectos prácticos, se puede asumir que la intrusión marina progresa desde la costa hacia el interior y que el resultado es una cierta zonación hidroquímica, con aguas menos salinas cuanto más lejos de la costa se considere. El estudio de las variaciones de esa zonación puede proporcionar información de interés sobre el proceso evolutivo de la intrusión.

Con estas premisas, un índice de intrusión no sólo debe proporcionar información sobre la situación actual de la intrusión marina sino que además debe ilustrar sobre el grado de afección, su distribución espacial, su evolución temporal y, en cierto modo, sobre la vulnerabilidad intrínseca del acuífero frente a dicho proceso.

4.2. Índice SITE

El índice propuesto es el diseñado por B.J. Ballesteros (2008), quien en un documento interno denominado “*Tipología y caracterización de la intrusión marina en acuíferos litorales. Método SITE*”, estableció las bases esenciales del mismo. En los trabajos contemplados en este proyecto se han redefinido o terminado de perfilar los procedimientos de estimación de algunos de los parámetros que lo conforman, como resultado de la aplicación de diversas formas de cálculo para la confección del mencionado índice en los acuíferos estudiados.

El acrónimo SITE responde a los siguientes parámetros o criterios relacionados con el proceso intrusivo:

S = Superficie afectada

I = Intensidad

T = Temporalidad o estacionalidad

E = Evolución a medio-largo plazo

4.3. Datos necesarios

Para la confección del índice se procura utilizar información de fácil manejo y habitualmente disponible. No se trata de caracterizar con detalle el proceso sino de ofrecer información básica que permita, por un lado, evaluar la situación general de un acuífero y, por otro, discriminar entre acuíferos distintos.

El índice que se propone está basado en los datos proporcionados por las redes de control de intrusión que desde hace más de treinta años se han mantenido en los acuíferos costeros españoles. Concretamente, se utilizan los datos de concentración de cloruros.

Se requiere disponer de una serie histórica suficientemente larga que permita evaluar el comportamiento del acuífero. Las redes de control implantadas por el Instituto Geológico y Minero de España a principios de los años setenta y regularmente mantenidas hasta el año 2001, fueron interrumpidas hasta el 2005 en que se reanudaron, a cargo de las Confederaciones Hidrográficas, aunque con un número de puntos de observación muy reducido. Esta laguna de información en el periodo 2001 - 2005 y la escasa información obtenida en los últimos cuatro años (2005-2008) plantea algunas dificultades para evaluar la situación actual de los acuíferos. Sin embargo, se considera que el adecuado manejo de la base de datos existente proporciona información valiosa que permite caracterizar el proceso.

El tratamiento que se hace de estos datos es básicamente bidimensional. Quiere esto decir que se ha obviado el parámetro profundidad (cota de fondo) que se refiere al grado de penetración de los pozos de observación ya que en la mayoría de los casos no se tiene información suficiente sobre sus características constructivas.

Asimismo, es conveniente disponer de dos medidas anuales que correspondan a situaciones respectivas de aguas altas y bajas (invierno – verano o primavera – otoño).

Por otra parte, es necesario depurar los datos existentes. La depuración debe hacerse con criterios objetivos de acuerdo a los siguientes principios:

- Se parte de la matriz completa que recoja todos los datos de la red de cloruros de la serie histórica disponible
- Se eliminan los datos que puedan ser claramente anómalos. Para ello es útil representar gráficamente la evolución de cloruros en cada punto de observación. Estos datos suelen corresponder a errores de transcripción y se detectan con facilidad.
- Se eliminan los datos de puntos de observación que tengan numerosas lagunas
- Se eliminan las fechas en las que existan numerosas lagunas

Este proceso debe ser realizado para el conjunto de los datos y, separadamente, para los últimos cuatro años disponibles porque en estos últimos se basa la determinación de los parámetros S, I y E.

4.4. Criterio superficie (S)

4.4.1. Introducción

Este criterio tiene por objeto ofrecer una visión bidimensional de la afección de la intrusión marina. Se trata de definir la superficie del acuífero afectada por el fenómeno intrusivo. Se acepta que la información proporcionada por la superficie afectada es suficientemente representativa del grado de intrusión y que la consideración de la profundidad no necesariamente aporta información manejable y fiable, ya que no siempre se conocen las características constructivas de los piezómetros o pozos de observación.

Desde un punto de vista espacial el desarrollo alcanzado por los procesos de salinización da lugar a diferentes tipos o grados de intrusión, que pueden quedar definidos en los siguientes.

Intrusión puntual: cuando se detectan salinidades elevadas en algunos sondeos de forma aislada. Normalmente tiene que ver con una inadecuada construcción de las perforaciones (elevada profundidad), extracciones puntuales excepcionalmente altas o estar localizadas muy próximas a la línea costera. La superficie afectada (S) no debe superar el 10 % de la extensión total del acuífero

Intrusión local: se da cuando el área afectada se restringe a las inmediaciones de un conjunto de pozos con una explotación intensiva, en la que descensos del nivel piezométrico permiten el ascenso de domos salinos (up-coning). La superficie afectada (S) ocuparía entre un 10 y un 30% de la extensión total del acuífero. Como se comentará más adelante, en el caso de acuíferos de cierta

extensión este porcentaje estaría referido solamente a la zona litoral del acuífero.

Intrusión zonal: corresponde a aquélla en la que un sector completo de acuífero se ve afectado, bien por la confluencia de varios domos salinos o por el avance general de la interfase agua dulce-agua marina. El conjunto de estas zonas no debe superar un determinado porcentaje de la superficie total del acuífero ($30 < S < 70\%$).

Intrusión general: es aquélla en la que la una gran parte del acuífero ($S > 70\%$) se encuentra afectada por intrusión y en la que se produce un avance de la interfase, tierra adentro, a lo largo de la totalidad del frente costero del acuífero.

4.4.2. Valores de referencia

Se trata de caracterizar la superficie del acuífero que puede considerarse que está afectada por la intrusión marina, independientemente de su intensidad. El valor de referencia debería ser el fondo geoquímico de cloruros en ese acuífero. La caracterización del fondo geoquímico no es trivial y puede requerir un esfuerzo investigador considerable. En primera aproximación podría considerarse como fondo geoquímico de cloruros la concentración más baja de cloruros encontrada en un cierto acuífero, que podría corresponder en muchos casos con la concentración del agua de alimentación subterránea desde acuíferos de borde, pero pueden existir otros mecanismos que alteren este fondo, tanto naturales, como pueden ser infiltraciones de aguas superficiales, procesos de evaporación en acuíferos someros o de disolución de sales, como inducidos (recirculación de agua de riego, por ejemplo). En cualquier caso, el fondo geoquímico puede variar en un cierto rango en acuíferos de cierta complejidad. Para simplificar el método se propone utilizar como valor de referencia 150 mg/l de cloruros. Se acepta que este valor no se alcanza en ningún sector de los acuíferos estudiados en este informe si no es a causa del proceso de intrusión marina, y se acepta también que este mismo hecho se puede esperar en otros muchos acuíferos costeros.

En otras situaciones, como puede ocurrir por ejemplo en acuíferos de la Cuenca del Segura, pueden encontrarse concentraciones muy superiores a 150 mg/l sin que se relacionen con procesos actuales de intrusión marina. En estos casos, la utilización de este valor de referencia puede seguir siendo eficaz para caracterizar procesos de salinización pero no de intrusión marina. Probablemente, sea más indicado en estas situaciones utilizar como valor de referencia los valores umbral que han sido determinados por la Dirección General del Agua siguiendo los criterios del Documento Guía de la Comisión Europea nº 18 "Guidance on Groundwater Chemical Status and Trend Assessment". Estos valores umbral han sido también aplicados a los tres acuíferos analizados en este estudio.

4.4.3. Corrección de superficie

En el parámetro interviene también el tamaño y la geometría del acuífero. Para los acuíferos con una gran extensión, o con una morfología alargada perpendicular a la costa, será necesario realizar una conversión de manera que sólo se considere la zona más litoral, y no la de la totalidad del acuífero, equivalente a la localizada a menos de una cierta distancia de la línea de costa. En principio dicha distancia se establece en 10 km ya que, al menos en la cuenca del Júcar, raramente la denominada “cuña salina” progresa tierra adentro a esa distancia. No obstante, esta distancia se podría modificar si fuera necesario en función de las características de cada masa de agua.

4.4.4. Datos necesarios

Los datos de partida serán las concentraciones de cloruros en los puntos de la red de intrusión, o de una red de observación establecida al efecto. El número de puntos dependerá de la extensión del acuífero pero, en todo caso, deberá ser suficiente para poder elaborar un mapa de isocloruros con adecuado grado de información.

Se propone que el periodo considerado para reflejar la “situación actual” corresponda a los últimos cuatro años y que los valores utilizados para los cálculos sean la media de los valores de esos cuatro años, preferiblemente correspondientes a la misma época del año (primavera u otoño).

En el caso de acuíferos en los que la red de intrusión no exista o sea muy reducida se deberá calcular el parámetro de acuerdo a los datos de los últimos cuatro años disponibles, considerando que se trata de una situación pasada y que deberá procederse cuando corresponda a actualizar los resultados.

Aunque se considera conveniente tener en cuenta la información de cuatro años, independientemente de la inercia del acuífero estudiado, cuando los datos disponibles sean antiguos podrían reemplazarse por el estudio de la última campaña, si esta es reciente. En este caso, debe tenerse en consideración la variabilidad del proceso.

A efectos prácticos, las redes de intrusión estuvieron vigentes desde 1977 hasta 2001 con dos medidas anuales, normalmente en mayo y octubre, aunque con algunas desviaciones. Desde 2001 hasta 2005 las redes no estuvieron operativas. A partir de 2005 se volvieron a activar pero con un número de puntos de observación muy reducido, lo que permite conocer la evolución del proceso pero no confeccionar mapas de isocloruros. Ya en 2008 se amplió esta red en la Demarcación del Júcar a un mayor número de puntos, que permiten un mejor seguimiento del proceso. Este es el caso de los tres acuíferos seleccionados para aplicar el índice propuesto y, por ello, el periodo seleccionado ha sido 1998 – 2001.

Al margen de las redes específicas de intrusión se dispone actualmente de la Red de Seguimiento del Estado Químico como otra fuente de datos de cloruros, aunque con menor densidad de puntos.

4.4.5. Procedimiento

El procedimiento propuesto para calcular el parámetro S (superficie afectada) es el siguiente:

- Elaboración del mapa de la línea de isocloruros de 150 mg/l para la situación actual. Se puede elaborar al mismo tiempo el mapa con las siguientes isolíneas: 150, 500, 1000, 2000 y 4000 mg/l, ya que servirá para el cálculo del próximo parámetro
- Medir la superficie ocupada por contenidos de ion cloruro superiores a 150 mg/l ($S_{>150}$)
- Calcular S, según

$$S = \frac{S_{>150}}{S_{total}}$$

Alternativamente, se puede utilizar otro parámetro, S_u , que tiene el mismo significado que S si en vez de utilizar para su cálculo la superficie del acuífero en la que la concentración de cloruros es mayor de 150 mg/l se utiliza la superficie de mayor concentración que el valor umbral determinado por la Dirección General del Agua siguiendo los criterios del Documento Guía de la Comisión Europea nº 18 "Guidance on Groundwater Chemical Status and Trend Assessment". En este caso, el parámetro indicador de este criterio sería:

$$S_u = \frac{S_{>Cl_u}}{S_{total}}$$

Siendo Cl_u el valor umbral definido para cada masa de agua.

4.4.6. Asignación de códigos

A cada rango de valores de S se asigna un valor numérico comprendido entre 0 y 4, y un código de identificación (W, L, M, H, E) que se corresponde con las iniciales de Without, Light, Medium, High y Extreme, respectivamente (tabla 1).

Valor de S	Valor de S_u	Caracterización	Valor	Código
0,00 - 0,05	0,00 - 0,01	Sin intrusión	0	W
0,05 - 0,10	0,01 - 0,05	Puntual	1	L
0,10 - 0,30	0,05 - 0,10	Local	2	M
0,30 - 0,70	0,10 - 0,30	Zonal	3	H
0,70 - 1,00	0,30 - 1,00	General	4	E

Tabla 1. Caracterización, valores y códigos de los parámetros S y S_u

4.5. Criterio intensidad (I)

4.5.1. Introducción

El parámetro “intensidad” se refiere a la evaluación de la salinidad media del acuífero referida a la “situación actual” o a los datos más recientes disponibles. Debe entenderse que se trata de una aproximación que no tiene en cuenta de manera explícita variaciones espaciales ni tendencias pero que, en cualquier caso, su valor depende de dichas variaciones y tendencias.

Este criterio permitiría diferenciar cuatro tipos de acuíferos de intensidad de intrusión baja, media, alta y extrema.

4.5.2. Datos necesarios

La obtención de este parámetro se basa en el mapa de isocloruros que ya se ha obtenido para el parámetro S.

4.5.3. Procedimiento

Se parte del mapa de isocloruros de los últimos cuatro años disponibles, con isolíneas de 150, 500, 1000, 2000 y 4000 mg/l.

El índice se obtiene de la siguiente manera:

Se calculan las superficies comprendidas entre las isolíneas (S_i) y a cada superficie se le asigna el valor medio de los cloruros de las isolíneas que la limitan (Cl_i). A la superficie de menos de 150 mg/l se le asigna, por convención, un valor medio de 75 mg/l. A las superficies de concentraciones máximas se les debe asignar, cuando sea el caso, las siguientes medias (tabla 2).

Superficie	Valor asignado
> 500 mg/l	750 mg/l
> 1000 mg/l	1500 mg/l
> 2000 mg/l	3000 mg/l
> 4000 mg/l	5000 mg/l
> 6000 mg/l	7000 mg/l

Tabla 2. Valor medio de la concentración de cloruros (mg/l) asignado al intervalo mayor de los mapas de isocontenidos

El índice será:

$$I = \frac{\sum S_i \cdot Cl_i}{S_{total}}$$

4.5.4. Asignación de códigos

Para cada rango de valores de I se asigna un valor numérico y un código de identificación, según el baremo siguiente (tabla 3).

Valor de I	Caracterización	Valor	Código
0 - 150	Nula	0	W
150 - 500	Baja	1	L
500 - 1000	Media	2	M
1000 - 2000	Alta	3	H
> 2000	Extrema	4	E

Tabla 3. Caracterización, valores y códigos del parámetro I

4.6. Criterio temporalidad (T)

4.6.1. Introducción

La evolución temporal del proceso de intrusión marina es, en primera aproximación, dependiente de las variaciones en la relación recarga - explotación. Durante los periodos secos debe esperarse el avance tierra adentro del "frente salino" no sólo como consecuencia de una disminución de la recarga, que puede llegar incluso a anularse si no se producen eventos de lluvias que superen cierto umbral, sino también del incremento de las extracciones en zonas agrícolas para compensar el déficit hídrico de los cultivos. Por el contrario, en épocas húmedas la recarga se incrementa y las extracciones se reducen, por lo que se puede esperar cierto retroceso de la interfase, entendida esta en sentido amplio.

Con esta aproximación, debe existir una razonable relación entre la sucesión de periodos secos y húmedos y la secuencialidad del proceso intrusivo; sin embargo, pueden existir otros factores que afecten de manera determinante a esa relación, como puede ser el progresivo descenso de la demanda agrícola a causa de la disminución de las superficies cultivadas o de cambios sustanciales en los sistemas de riego.

Debe tenerse en cuenta, además, que la dinámica de la intrusión no sólo depende de factores externos sino que viene impuesta por los parámetros hidráulicos del acuífero que le confieren mayor o menor inercia, o lo que es lo mismo, mayor o menor tiempo de respuesta a los cambios externos.

Atendiendo a criterios temporales y de secuencialidad se pueden distinguir cuatro tipos de intrusión marina.

Intrusión ocasional: es aquélla que se produce como consecuencia de bombeos intensivos esporádicos en el tiempo y al cesar las extracciones el agua recupera su calidad inicial. Por tanto, no presenta secuencialidad ni se ajusta a ningún

módulo temporal, y puede considerarse que tiene una componente aleatoria y con tiempo de afección reducido.

Intrusión estacional: se puede definir como aquélla que se produce de forma secuencial y como respuesta a los periodos húmedos y secos estacionales, potenciadas en esta última época por el incremento de las extracciones durante el verano. En estos casos el agua subterránea recupera su calidad inicial cuando se produce la recarga del acuífero durante la estación húmeda.

Intrusión transitoria: se define como aquélla que se manifiesta por la ocurrencia de periodos secos con varios años de duración y también a consecuencia de las extracciones realizadas en estas épocas, que suelen ser más intensas y en condiciones hidrogeológicas desfavorables. En este caso la amplitud de las oscilaciones es mayor y alcanza varios años, al final de los cuales se restituye en parte la calidad del agua del acuífero. Para confirmar que existe este tipo de intrusión hay que tener muy en cuenta el régimen de precipitaciones del área donde se encuentra el acuífero.

Intrusión permanente: se produce cuando la calidad inicial del agua no se reestablece durante los periodos húmedos en los que se produce la recarga del acuífero.

Este parámetro analiza las variaciones de salinidad media que se registran en el acuífero con una ventana de observación anual.

En el caso de que se disponga de dos valores anuales (primavera y otoño) el procedimiento que se explica a continuación debe ser aplicado a cada una de las dos series, obteniéndose así dos valores del parámetro que reflejarán, respectivamente, las variaciones producidas en aguas altas y aguas bajas. La media de estos dos valores será el parámetro que se considere. Pero, si como es habitual, existen lagunas de datos en alguna de las dos series, o en las dos, no se comete un gran error si el procedimiento se aplica a una sola serie obtenida por los valores medios de cada año. En algún caso podría haber lagunas también en esta última serie; en ese caso, se deberán rellenar con la media de los valores inmediatamente anterior y posterior, asumiendo que las variaciones de salinidad son graduales.

4.6.2. Datos necesarios

Se requiere la serie temporal de la concentración anual media de cloruros en el acuífero, que se obtiene a partir de la matriz de datos de calidad depurada según se explica en el epígrafe 4.3.

4.6.3. Procedimiento

Para obtener este parámetro se calcula el error cuadrático medio de la serie temporal, que se define como:

$$T = \frac{1}{n} \sum_{x=1}^n |f(x) - \bar{f}|$$

que corresponde a la media de los valores absolutos de las diferencias entre los valores de la serie temporal de cloruros y la media de dichos valores.

El significado de este índice es cuantificar las desviaciones respecto de la media, de manera que cuanto mayor sea el índice más alta es la variabilidad. No expresa tendencias sino sensibilidad.

4.6.4. Asignación de códigos

Para cada rango de valores de T se asigna un valor numérico y un código de identificación, según el baremo siguiente (tabla 4).

Valor de T	Caracterización	Valor	Código
0 - 25	Sin variación	0	W
25 - 50	Poco variable	1	L
50 - 75	Variable	2	M
75 - 100	Moderadamente variable	3	H
> 100	Muy variable	4	E

Tabla 4. Caracterización, valores y códigos del parámetro T

4.7. Criterio evolución (E)

4.7.1. Introducción

Este parámetro tiene por objeto describir de manera simple la tendencia actual del proceso de intrusión.

Según este criterio se distinguen tres tipos.

Intrusión estable: Corresponde a aquellos acuíferos en los que no se observa tendencia clara a medio-largo plazo

Intrusión decreciente o en retroceso: Se puede definir en aquellos acuíferos donde se observa una recuperación continua de calidad de sus aguas, normalmente ligada al descenso de las explotaciones. Esta evolución puede ser moderada o fuerte.

Intrusión en progreso: Se observa una tendencia a medio-largo plazo al incremento de la salinidad de las aguas del acuífero, independientemente de la existencia de estacionalidad o secuencialidad. Al igual que en el caso anterior, esta evolución puede ser moderada o fuerte.

4.7.2. Datos necesarios

Se requiere la serie temporal de la concentración anual media de cloruros en el acuífero, que se obtiene a partir de la matriz de datos de calidad depurada según se explica en el epígrafe 4.3.

4.7.3. Procedimiento

El parámetro E se calcula mediante la fórmula:

$$E = \frac{\overline{Cl_n}}{\overline{Cl_{n-1}}}$$

Siendo Cl_n la media de la concentración de cloruros de la situación actual o de los últimos cuatro años disponibles y Cl_{n-1} la media de la concentración de cloruros de los cuatro años inmediatamente anteriores.

4.7.4. Asignación de códigos

Para cada rango de valores de E se asigna un valor numérico y un código de identificación, según el baremo siguiente (tabla 5).

Valor de E	Caracterización	Valor	Código
> 1,05	Fuerte incremento	2	2
1,01 - 1,05	Incremento moderado	1	1
0,99 - 1,01	Estable	0	0
0,99 - 0,95	Descenso moderado	-1	-1
< 0,95	Fuerte descenso	-2	-2

Tabla 5. Caracterización, valores y códigos del parámetro E

4.8. Confección del índice SITE

En la tabla siguiente se sintetizan las categorías o rangos establecidos para cada uno de los criterios considerados (tabla 6).

En los parámetros S, I y T se diferencian cinco rangos a los que se asigna un valor numérico comprendido entre 0 y 4. El valor 0 corresponde a la situación más favorable en cada caso y el valor 4 a la más desfavorable. Los códigos correspondientes a estos valores son W (without), L (low), M (medium), H (high) y E (extreme).

El parámetro E expresa la evolución de la situación general en los cuatro últimos años, que puede ser positiva (incremento de la salinidad), negativa

(descenso de la salinidad) o nula (sin variaciones significativas). Estas situaciones se expresan con un código numérico.

El índice SITE tiene dos formas de representación, una alfanumérica, que da una información detallada de cada uno de los parámetros que intervienen en el proceso de salinización, y otra exclusivamente numérica, cuya resultante es una única cifra. Según el fin que se quiera dar al índice, podrá ser utilizada una forma u otra de expresión.

4.8.1. Índice SITE alfanumérico

La composición del código SITE alfanumérico se realiza mediante la agregación de los cuatro códigos correspondientes a cada parámetro. Así, un acuífero en la situación más favorable tendría un código WWW-2 y un acuífero en la situación más desfavorable respondería al código EEE2.

Párametro	Rango	Caracterización	Valor	Código
S	0,00 - 0,05	Sin intrusión	0	W
	0,05 - 0,10	Puntual	1	L
	0,10 - 0,30	Local	2	M
	0,30 - 0,70	Zonal	3	H
	0,70 - 1,00	General	4	E
S_u	0,00 - 0,01	Sin intrusión	0	W
	0,01 - 0,05	Puntual	1	L
	0,05 - 0,10	Local	2	M
	0,10 - 0,30	Zonal	3	H
	0,30 - 1,00	General	4	E
I	0 - 150	Nula	0	W
	150 - 500	Baja	1	L
	500 - 1000	Media	2	M
	1000 - 2000	Alta	3	H
	> 2000	Extrema	4	E
T	0 - 25	Sin variación	0	W
	25 - 50	Poco variable	1	L
	50 - 75	Variable	2	M
	75 - 100	Moderadamente variable	3	H
	> 100	Muy variable	4	E
E	> 1,05	Fuerte incremento	2	2
	1,01 - 1,05	Incremento moderado	1	1
	0,99 - 1,01	Estable	0	0
	0,99 - 0,95	Descenso moderado	-1	-1
	< 0,95	Fuerte descenso	-2	-2

Tabla 6. Síntesis de valores y códigos establecidos para cada uno de los criterios

4.8.2. Índice SITE numérico

Los criterios superficie (S) e intensidad (I) son los que mejor definen el estado general del acuífero ya que dan una idea sobre la salinidad general y su afección espacial. Probablemente por sí mismos podrían ser suficientes para establecer un índice cuantitativo simplificado y manejable. Sin embargo, la inclusión de datos sobre la variabilidad del proceso (T) y su evolución reciente (E) puede suministrar información valiosa para la catalogación del estado de la intrusión y el alcance de la presión sufrida.

Por ello, se considera conveniente ponderar estos criterios de acuerdo a la siguiente expresión:

$$\text{ValorSITE} = \frac{3S + 3I + T + E}{30}$$

El cociente 30 es el máximo valor posible del algoritmo del numerador, por lo que un cierto acuífero totalmente salinizado tendría un valor SITE de 1 mientras que un acuífero sin afección alguna tendría un valor SITE de 0 (a los posibles valores negativos se les haría corresponder igualmente el valor 0). Esto permite, en función de la expresión numérica del valor SITE establecer categorías de estado de la intrusión o de presión debida a intrusión marina, de acuerdo al siguiente baremo (tabla 7):

Valor SITE	Estado de la intrusión
0,00 - 0,20	Leve
0,20 - 0,40	Moderada
0,40 - 0,60	Alta
0,60 - 0,80	Severa
0,80 - 1,00	Extrema

Tabla 7. Estado de la intrusión o presión debida a la intrusión

4.8.3. Índice SITE general

El índice SITE es el resultado de unir el código y el valor SITE.

Así, por ejemplo, un acuífero cuyo índice SITE sea MHL1(0,5) correspondería a un acuífero con intrusión marina local, de intensidad alta y variaciones poco significativas en el que se ha registrado un moderado incremento de la salinidad en el periodo más reciente. La presión debida a intrusión marina es alta.

5. INDICE SITE DE LA PLANA DE VINAROZ

5.1. Aplicación del criterio S

El número de puntos de observación utilizados para la elaboración del mapa de isocloruros es de 55, cuya distribución espacial se muestra en la figura 8.

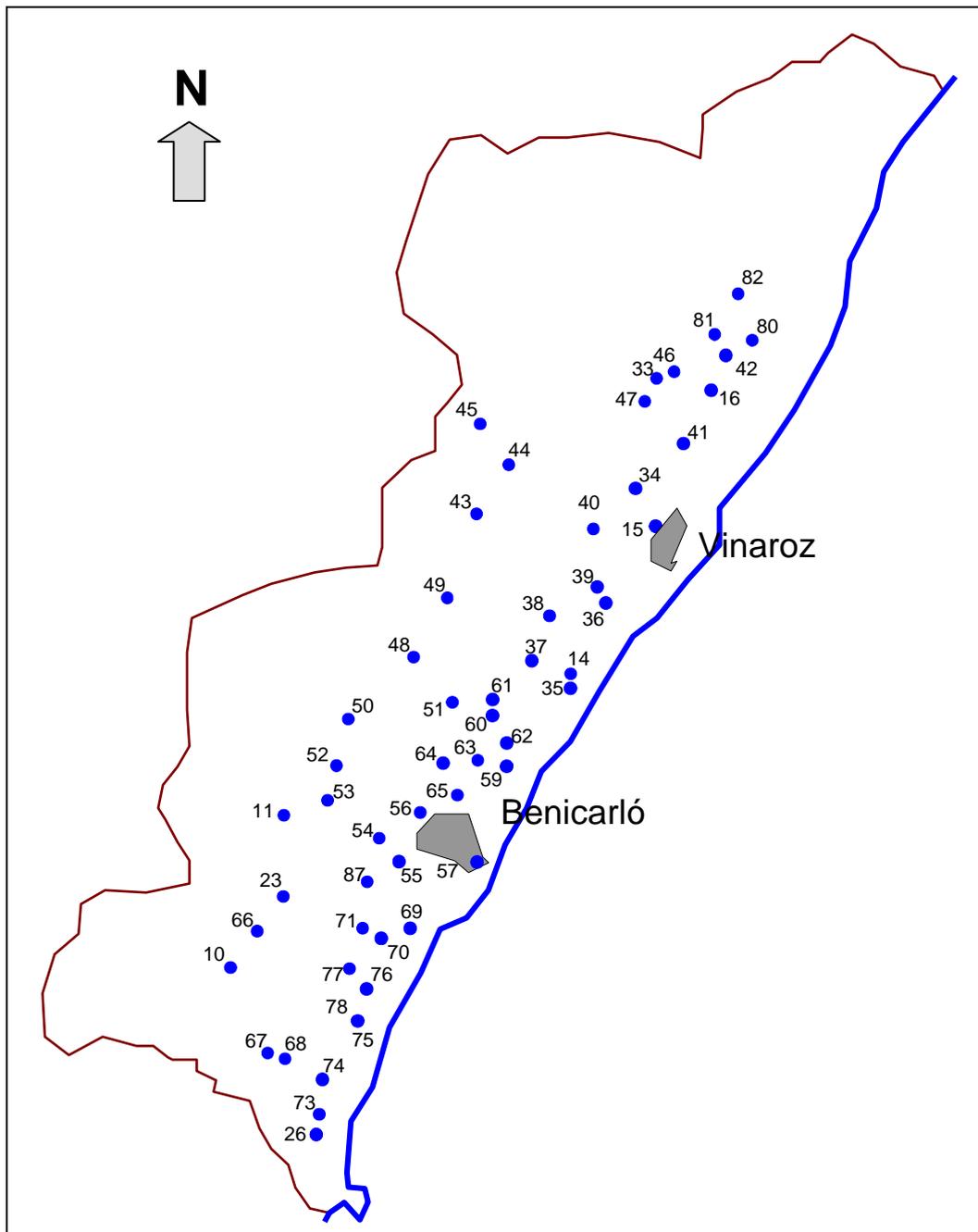


Figura 8. Situación de los puntos de la red de control de intrusión marina en el acuífero de Vinaroz

El periodo seleccionado ha sido 1998 - 2001, que corresponde a los últimos cuatro años disponibles. Se trata de un periodo relativamente seco ya que la media anual de precipitación del periodo es de 402 mm mientras que la media histórica es de 504 mm. Los datos según se refleja en la tabla 8:

Fecha medida	P-26	P-67	P-68	P-73	P-74	P-69	P-70	P-71	P-75	P-76	P-77
21-oct-98	440	142	170	241	241	1534	1079	412		753	
22-oct-99	369	156	142	156	170	1363	1363	369	540	753	440
28-nov-00	312	128	142	312	284	1335	1008	341	511	895	383
31-may-01	369	142	156	256	284	1420	923	355	426	469	454
Media (mg/l)	373	142	153	241	245	1413	1093	369	492	718	426
Fecha medida	P-78	P-87	P-10	P-23	P-66	P-51	P-54	P-55	P-56	P-57	P-59
21-oct-98	355	170	71	57	71	71	398	327	341	1051	128
22-oct-99	369	128	71	57	85	71	298	256	298	980	114
28-nov-00	383	128	156	57	57	57	355	256	298	980	114
31-may-01	398	128	85	57	71	51	388	298	312	880	114
Media (mg/l)	376	139	96	57	71	63	360	284	312	973	118
Fecha medida	P-60	P-61	P-62	P-63	P-64	P-65	P-11	P-48	P-50	P-52	P-53
21-oct-98	71	57	114	128	227	625	57	57	71	99	71
22-oct-99	71	71	114	128	213	497	71	57	71	85	71
28-nov-00	57	57	128	156	227	582	71	57	57	71	71
31-may-01	57	57	128		242	497	57	71	57	71	71
Media	64	61	121	137	227	550	64	61	64	82	71
Fecha medida	P-14	P-15	P34	P-35	P-36	P-39	P-40	P-43	P-44	P-45	P-49
21-oct-98	852	1150	355	355	1718	1193	497	71	71		71
22-oct-99	880	1122	312	341	1718	1150	412	71	71	71	71
28-nov-00	809	1093	270	298	1803	1093	412	57	57	57	57
31-may-01	852	1122	312	369	1945	1150	440	71	99	99	57
Media (mg/l)	848	1122	312	341	1796	1147	440	68	75	76	64
Fecha medida	P-37	P-38	P-16	P-33	P-41	P-42	P-47	P-46	P-80	P-81	P-82
21-oct-98	128	142	511	99	554	525	241	99	142	99	99
22-oct-99	114	114	511	114	525	525	241	99	142	99	99
28-nov-00	99	99	412	99	497	454	227	99	128	99	85
31-may-01		99	582	114	540	511		270	142	114	99
Media (mg/l)	114	114	504	107	529	504	236	142	139	103	96

Tabla 8. Datos utilizados para la elaboración del mapa de isocloruros del acuífero de Vinaroz

La figura 9 muestra el mapa de isocloruros elaborado con las medias de las concentraciones, por lo que corresponde a la situación media del periodo 1998 - 2001.

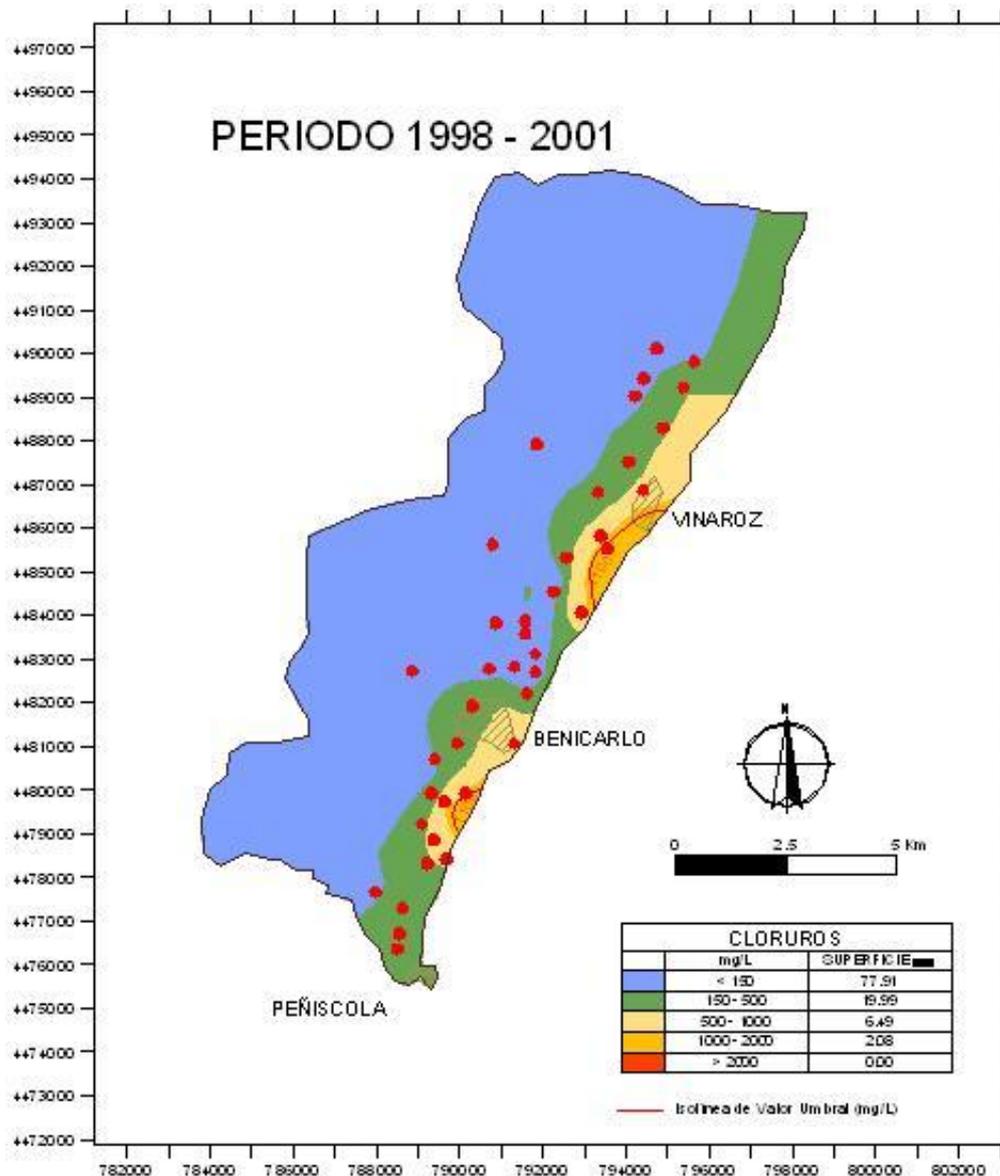


Figura 9. Mapa de isocloruros de valores medios del periodo 1998-2001 en el acuífero de Vinaroz

En la tabla 9 se indican las superficies correspondientes a cada rango de concentraciones:

Rango	Superficie (km ²)	Superficie (%)
< 150	77.91	73.17
150 - 500	19.99	18.77
500 - 1000	6.49	6.10
1000 - 2000	2.08	1.96
> 2000	0.00	0.00
TOTAL	106.48	100.00

Tabla 9. Distribución de superficies de los rangos de cloruros diferenciados

El parámetro S se calcula según:

$$S = \frac{S_{>150}}{S_{total}} = \frac{28,57}{106,48} = 0,268$$

Por consiguiente, el parámetro S toma el valor de 0,27 que corresponde con una situación de intrusión local, valor 2, código M.

El valor umbral de cloruros definido por la DGA en esta masa de agua es 1100 mg/l. La superficie del acuífero en que se supera este valor es de 1,52 km². El parámetro S_u se calcula según:

$$S_u = \frac{S_{>Cl_u}}{S_{total}} = \frac{1,52}{106,48} = 0,0143$$

Por consiguiente, el parámetro Su toma el valor de 0,01 que corresponde con una situación de intrusión puntual, valor 1, código L.

5.2. Aplicación del criterio I

El mapa de la figura 9 muestra la distribución del ión cloruro correspondiente a los valores medios de los últimos cuatro años disponibles (periodo 1998 - 2001).

En la tabla 10 se indican las superficies ocupadas por cada uno de los rangos de cloruros diferenciados, expresadas también en porcentajes. Las dos últimas columnas corresponden al producto de la superficie por la media del rango de cloruros correspondiente a dicha superficie.

Cl (mg/l)	Sup (km ²)	Sup (%)	Cl * S (sup)	Cl * S (%)
< 150	77.91	73.17	11686	10976
150 - 500	19.99	18.77	6497	6102
500 - 1000	6.49	6.10	4869	4573
1000 - 2000	2.08	1.96	3127	2937
> 2000	0.00	0.00	0	0
TOTAL	106.48	100.00	26179	24587

Tabla 10. Superficies ocupadas por cada uno de los rangos de cloruros

El parámetro I se calcula según:

$$I = \frac{\sum S_i \cdot Cl_i}{S_{total}} = \frac{26179}{106,48} = \frac{24587}{100} = 246 \text{ mg / l}$$

El valor de 246 mg/l corresponde a la categoría de acuífero con intrusión de baja intensidad, código L y valor 1.

5.3. Aplicación del criterio T

En la tabla 11 se indican los valores medios de la concentración de cloruros en la Plana de Vinaroz para la serie 1977 - 2001. Asimismo se indican las diferencias

en valor absoluto entre estos valores y el valor medio de los mismos. Estos valores se representan en la figura 10.

Año	Cl, mg/l	Cl - media
1977	645	12,24
1978	563	69,76
1979	564	68,76
1980	659	26,24
1981	673	40,24
1982	712	79,24
1983	575	57,76
1984	638	5,24
1985	701	68,24
1986	772	139,24
1987	673	40,24
1988	691	58,24
1989	708	75,24
1990	760	127,24
1991	629	3,76
1992	615	17,76
1993	601	31,76
1994	604	28,76
1995	634	1,24
1996	571	61,76
1997	542	90,76
1998	591	41,76
1999	572	60,76
2000	567	65,76
2001	559	73,76
Media	632,76	53,83

Tabla 11. Valores medios de cloruros y diferencias con la media (valores absolutos) en la Plana de Vinaroz

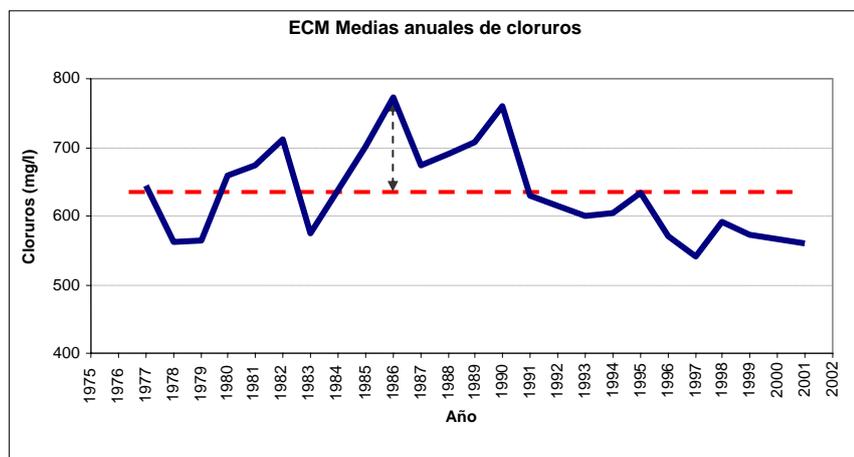


Figura 10. Valores medios de cloruros

El parámetro T se obtiene por medio de la expresión:

$$T = \frac{1}{n} \sum_{x=1}^n |f(x) - \bar{f}|$$

El valor resultante es 53,83, que corresponde a una situación variable a la que se asigna un valor 2 y el código M.

5.4. Aplicación del criterio E

En la tabla 12 se indican los valores medios de cloruros en periodos discretos de cuatro años y la relación entre los mismos obtenida mediante el cociente de cada valor con el inmediatamente anterior.

Periodo	Cl (mg/l)	Cl _n / Cl _{n-1}
1978 - 1981	615	
1982 - 1985	657	1,07
1986 - 1989	711	1,08
1990 - 1993	651	0,91
1994 - 1997	588	0,90
1998 - 2001	572	0,97

Tabla 12. Variaciones de las concentraciones medias de cloruros en periodos discretos de cuatro años en la Plana de Vinaroz

Estas variaciones se representan en la figura 11.

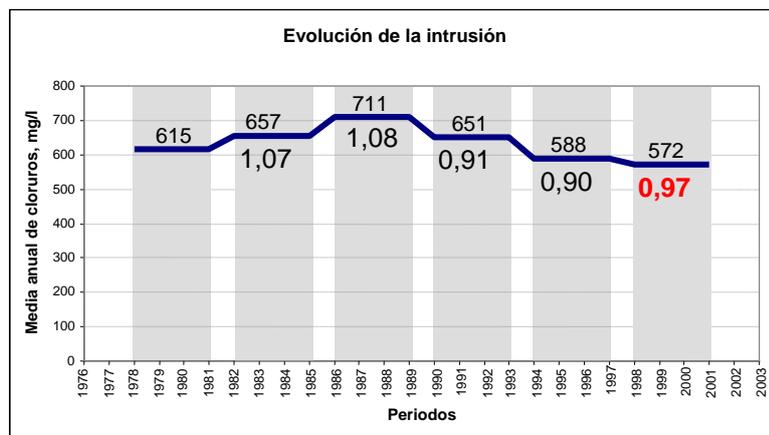


Figura 11. Variaciones de las concentraciones medias de cloruros en periodos discretos de cuatro años en la Plana de Vinaroz

El parámetro E es el cociente entre los valores medios del último periodo y del inmediatamente anterior. El valor así obtenido es 0,97, que caracteriza una situación de moderado descenso de la concentración media de cloruros y se le asigna un valor numérico de -1.

5.5. Índice SITE de la Plana de Vinaroz

Los códigos y valores numéricos que conforman el índice SITE en la masa de agua subterránea de la Plana de Vinaroz se indican en la tabla 13:

Criterio	Valor	Código	Caracterización
S	2	M	Extensión local
S _u	1	L	Extensión puntual
I	1	L	Intensidad baja
T	2	M	Variable
E	-1	-1	Descenso moderado

Tabla 13. Códigos y valores del índice SITE en la Plana de Vinaroz

Si se considera S como criterio de superficie, el valor SITE resultante es el siguiente:

$$ValorSITE = \frac{3 * 2 + 3 * 1 + 2 - 1}{30} = 0,33$$

La presión por intrusión marina es MODERADA.

El índice SITE es: $MLM \bar{1}(0,3)$

Si, por el contrario, se considera S_u como criterio de superficie:

$$ValorSITE = \frac{3 * 1 + 3 * 1 + 2 - 1}{30} = 0,23$$

En este caso, la presión por intrusión marina es MODERADA.

El índice SITE es: $LLM \bar{1}(0,2)$

6. INDICE SITE DE LA PLANA DE OROPESA - TORREBLANCA

6.1. Aplicación del criterio S en la Plana de Oropesa - Torreblanca

El número de puntos de observación utilizados para la elaboración del mapa de isocloruros es de 27, cuya distribución espacial se muestra en la figura 12.

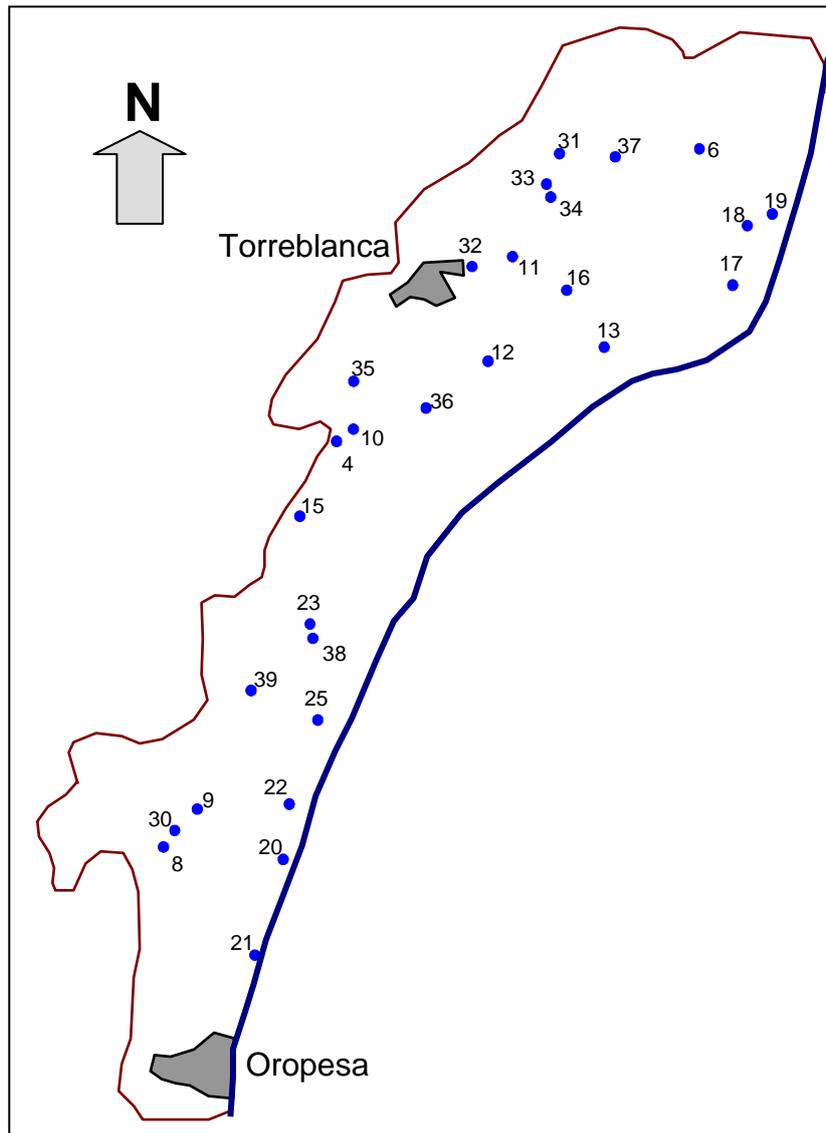


Figura 12. Situación de los puntos de la red de control de intrusión marina en el acuífero de la Plana de Oropesa - Torreblanca

El periodo seleccionado ha sido 1998 - 2001, que corresponde a los últimos cuatro años disponibles. Los datos utilizados se indican en la tabla 14:

Fecha medida	P-21	P-8	P-9	P-30	P-22	P-23	P-25	P-38	P-39
31-oct-98	795	1250	1420	427	923	1207	965	994	894
21-oct-99	511	1349	1420	427	909	1108	781	895	753
17-nov-00	525					1562	667	866	795
21-may-01	568	1306	1747	454	753	1278	710	923	909
Media (mg/l)	599.8	1302	1529	436	861.7	1289	780.8	919.5	837.8
Fecha medida	P-4	P-15	P-10	P-35	P-36	P-12	P-16	P-13	P-11
31-oct-98	539		2357	369	994	980	1065	1349	1306
21-oct-99	483	270	2137		937	980	1022	1179	738
17-nov-00	454	369	2173	327	696	952	1079	1264	724
21-may-01	511	398	2286	398	895	1008	1093	1193	951
Media (mg/l)	496.8	345.7	2238	364.7	880.5	980	1065	1246	929.8
Fecha medida	P-32	P-31	P-33	P-34	P-19	P-6	P-18	P-17	P-37
31-oct-98	1448	895	369	866	1136	895	1321	1037	1349
21-oct-99	1392	767	312	738	1278		1022	1193	1292
17-nov-00	341	824	341	454	1079	1278	1349	1250	1250
21-may-01	994	1235	383	752	1150	852	1321	753	1306
Media (mg/l)	1044	930.3	351.3	702.5	1161	1008	1253	1058	1299

Tabla 14. Datos utilizados para la elaboración del mapa de isocloruros del acuífero de Oropesa - Torreblanca

La figura 13 muestra el mapa de isocloruros elaborado con las medias de las concentraciones, por lo que corresponde a la situación media del periodo 1998 - 2001.

En la tabla 15 se indican las superficies correspondientes a cada rango de concentraciones:

	Sup (km2)	Sup (%)
< 150	0.00	0.00
150 - 500	3.46	3.74
500 - 1000	38.89	41.98
1000 - 2000	50.25	54.25
> 2000	0.03	0.03
TOTAL	92.63	100.00

Tabla 15. Distribución de superficies de los rangos de cloruros diferenciados en el acuífero de Oropesa - Torreblanca

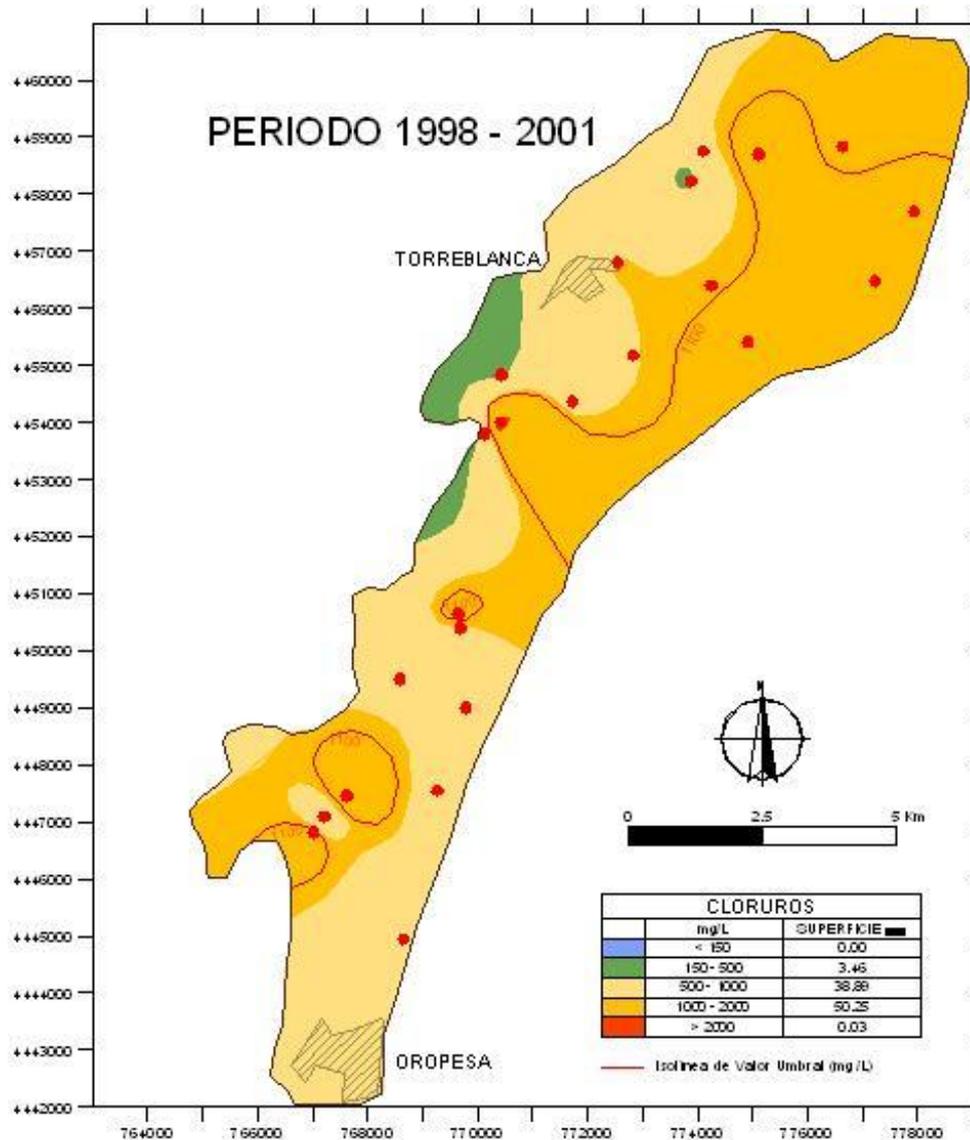


Figura 13. Mapa de isocloruros de valores medios del periodo 1998 - 2001 en el acuífero de Oropesa - Torreblanca

El parámetro S se calcula según:

$$S = \frac{S_{>150}}{S_{total}} = \frac{92,63}{92,63} = 1,00$$

Por consiguiente, el parámetro S toma el valor de 1,00 que corresponde con una situación de intrusión general, a la que se le asigna un valor 4 y código E

El valor umbral de cloruros definido por la DGA en esta masa de agua es 1100 mg/l. La superficie del acuífero en que se supera este valor es de 26,46 km². El parámetro S_u se calcula según:

$$S_u = \frac{S_{>Cl_u}}{S_{total}} = \frac{26,46}{92,63} = 0,286$$

Por consiguiente, el parámetro S_u toma el valor de 0,29 que corresponde con una situación de intrusión zonal, valor 3, código H.

6.2. Aplicación del criterio I

El mapa de la figura 13 muestra la distribución del ión cloruro correspondiente a los valores medios de los últimos cuatro años disponibles (periodo 1998 - 2001).

En la tabla 16 se indican las superficies ocupadas por cada uno de los rangos de cloruros diferenciados, expresadas también en porcentajes. Las dos últimas columnas corresponden al producto de la superficie por la media del rango de cloruros correspondiente a dicha superficie.

Cl (mg/l)	Sup (km ²)	Sup (%)	Cl * S (sup)	Cl * S (%)
< 150	0.00	0.00	0	0
150 - 500	3.46	3.74	1125	1215
500 - 1000	38.89	41.98	29167	31488
1000 - 2000	50.25	54.25	75377	81374
> 2000	0.03	0.03	90	90
TOTAL	92.63	100.00	105759	114167

Tabla 16. Superficies ocupadas por cada uno de los rangos de cloruros en la Plana de Oropesa - Torreblanca

El parámetro I se calcula según:

$$I = \frac{\sum S_i \cdot Cl_i}{S_{total}} = \frac{105759}{92,63} = \frac{114167}{100} = 1141 \text{mg / l}$$

El valor de 1141 mg/l corresponde a la categoría de acuífero con intrusión de alta intensidad, código H y valor 3.

6.3. Aplicación del criterio T

En la tabla 17 se indican los valores medios de la concentración de cloruros en la Plana de Oropesa - Torreblanca para la serie 1977 - 2001. Asimismo se indican las diferencias en valor absoluto entre estos valores y el valor medio de los mismos. Estos valores se representan en la figura 14.

El parámetro T se obtiene por medio de la expresión:

$$T = \frac{1}{n} \sum_{x=1}^n |f(x) - \bar{f}|$$

El valor resultante es 81, que corresponde a una situación moderadamente variable a la que se asigna un valor 3 y el código H.

Año	Cl, mg/l	Cl - media
1978	798	142
1979	837	103
1980	806	134
1981	861	79
1982	835	105
1983	923	17
1984	1012	72
1985	1100	160
1986	1134	194
1987	1166	226
1988	1060	120
1989	1028	88
1990	894	46
1991	890	50
1992	907	33
1993	832	108
1994	834	106
1995	937	3
1996	940	0
1997	997	57
1998	968	28
1999	911	29
2000	958	18
2001	921	19
Media	940	81

Tabla 17. Valores medios de cloruros y diferencias con la medias (valores absolutos)

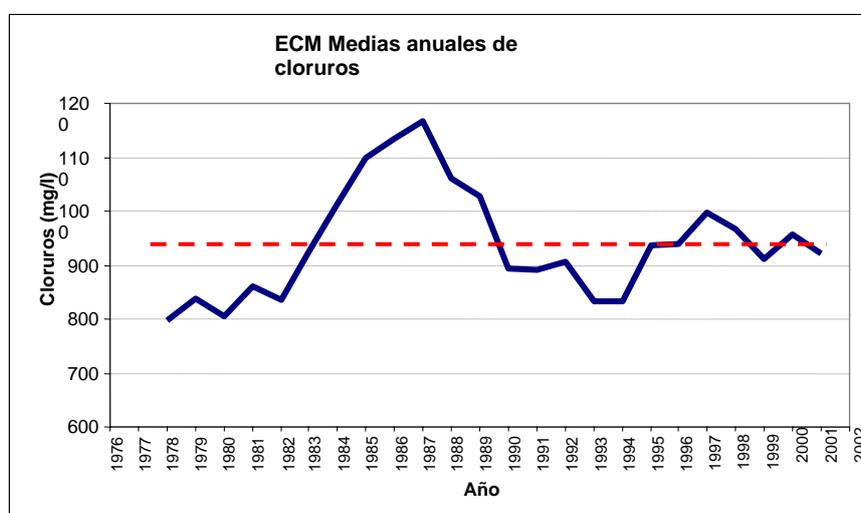


Figura. 14. Valores medios de cloruros en la Plana de Oropesa - Torreblanca

6.4. Aplicación del criterio E

En la tabla 18 se indican los valores medios de cloruros en periodos discretos de cuatro años y la relación entre los mismos obtenida mediante el cociente de cada valor con el inmediatamente anterior.

Periodo	Cl (mg/l)	Cl _n /Cl _{n-1}
1978 - 1981	826	
1982 - 1985	968	1,17
1986 - 1989	1097	1,13
1990 - 1993	881	0,80
1994 - 1997	927	1,05
1998 - 2001	940	1,01

Tabla 18. Variaciones de las concentraciones medias de cloruros en periodos discretos de cuatro años en la Plana de Oropesa - Torreblanca

Estas variaciones se representan en la figura 15.

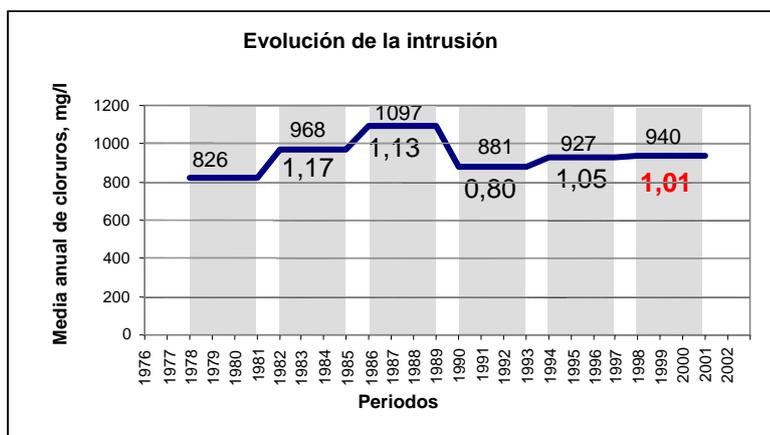


Figura 15. Variaciones de las concentraciones medias de cloruros en periodos discretos de cuatro años en la Plana de Oropesa - Torreblanca

El parámetro E es el cociente entre los valores medios del último periodo y del inmediatamente anterior. El valor así obtenido es 1,01, que caracteriza una situación de moderado incremento de la concentración media de cloruros y se le asigna un valor numérico de 1.

6.5. Índice SITE de la Plana de Oropesa - Torreblanca

Los códigos y valores numéricos que conforman el índice SITE en la masa de agua subterránea de la Plana de Oropesa - Torreblanca se indican en la tabla 19:

Criterio	Valor	Código	Caracterización
S	4	E	Extensión general
I	3	H	Intensidad alta
T	3	H	Moderadamente variable
E	1	1	Incremento moderado

Tabla 19. Códigos y valores del índice SITE en la Plana de Oropesa - Torreblanca

El valor SITE resultante es el siguiente:

$$\text{ValorSITE} = \frac{3 * 4 + 3 * 3 + 3 + 1}{30} = 0,83$$

La presión por intrusión marina es EXTREMA.

El índice SITE es: $EHH1(0,8)$

Si, por el contrario, se considera S_u como criterio de superficie:

$$\text{ValorSITE} = \frac{3 * 3 + 3 * 3 + 3 + 1}{30} = 0,73$$

En este caso, la presión por intrusión marina es SEVERA.

El índice SITE es: $HHH1(0,7)$

7. INDICE SITE DE LA PLANA DE CASTELLÓN

7.1. Aplicación del criterio S

El número de puntos de observación utilizados para la elaboración del mapa de isocloruros es de 52, cuya distribución espacial se muestra en la figura 16.

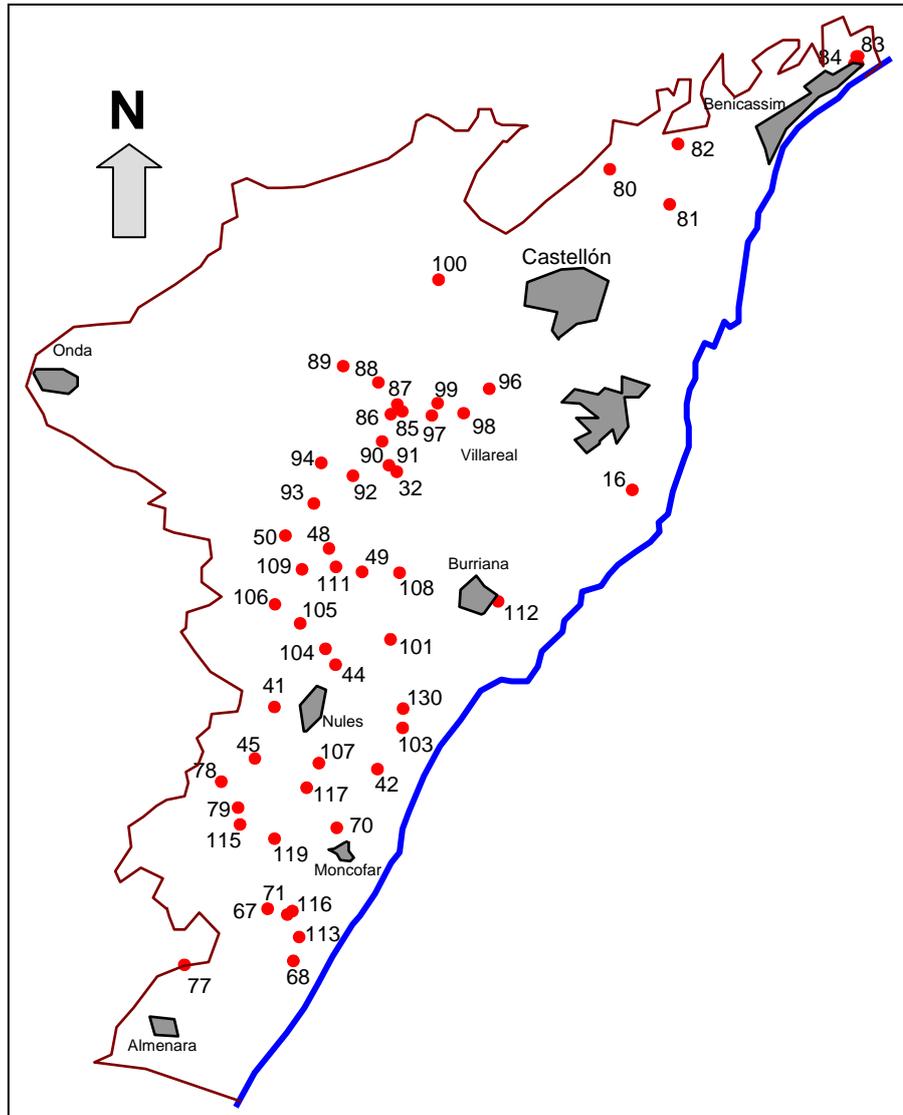


Figura 16. Situación de los puntos de la red de control de intrusión marina en el acuífero de la Plana de Castellón

En la tabla 20 se muestran los datos utilizados para calcular las medias del periodo 1998 - 2001 que corresponde al periodo más reciente del que se tiene información suficiente para elaborar un mapa de isocloruros.

Fecha	P-80	P-81	P-82	P-83	P-84	P-16	P-96	P-97	P-98	P-99
14-oct-98	485	512	485	324	870	156	141	85	71	85
28-oct-99	526	624	373	298	796	128	124		85	
1-nov-00		610	387	312	624	114	124	85		85
16-may-01		584	377	270	800	156	44	152		152
Media (mg/l)	506	582	415	311	763	133	130	85	78	85
Fecha	P-32	P-85	P-86	P-87	P-88	P-89	P-90	P-91	P-100	P-49
14-oct-98	185	85	71	71	85	71	99	128	114	213
28-oct-99	170	85	85	71	71	71	90	131	99	
1-nov-00	128	80	71	71	85	65	71	114	71	185
16-may-01	156	90	85	71	71	90	114	152	55	184
Media (mg/l)	161	83	76	71	80	69	87	124	95	199
Fecha	P-50	P-92	P-93	P-94	P-101	P-108	P-109	P-110	P-111	P-112
14-oct-98	156	185	142	170	128	227	128	142	241	
28-oct-99		184	244	156	156					
1-nov-00	142	184	216	160	142	156	114	170	156	298
16-may-01	156	198	256	170	128	227	114	184	184	
Media (mg/l)	149	184	201	162	142	192	121	156	199	298
Fecha	P-42	P-45	P-70	P-78	P-79	P-107	P-115	P-117	P-119	P-41
14-oct-98	682	128	1648	242	412	241	738	920	920	185
28-oct-99	667		1618	152	398		824	1008	993	
1-nov-00	583	300	1500	170	190	255	810	1221	810	199
16-may-01	625	412	1604	152	440	255	535	1052	964	156
Media (mg/l)	644	214	1589	188	333	248	791	1050	908	192
Fecha	P-44	P-104	P-105	P-106	P-130	P-103	P-67	P-68	P-77	P-113
14-oct-98	170	142	227	114	156	284	720	560	227	1160
28-oct-99	668	142				228		540	128	
1-nov-00	584	156	170	128	170	256	540	512	170	1262
16-may-01	710	170	185	142	156	255	760	1248	156	1268
Media (mg/l)	474	147	199	121	163	256	630	537	175	1211
Fecha	P-116	P-71								
14-oct-98	1220	483								
28-oct-99	1207	426								
1-nov-00	1079	697								
16-may-01	1280	412								
Media (mg/l)	1169	535								

Tabla 20. Datos utilizados para la elaboración del mapa de isocloruros de la Plana de Castellón

Con los datos anteriores se ha elaborado el mapa de isocloruros de la figura 17, que corresponde a la situación media del periodo 1998 - 2001.

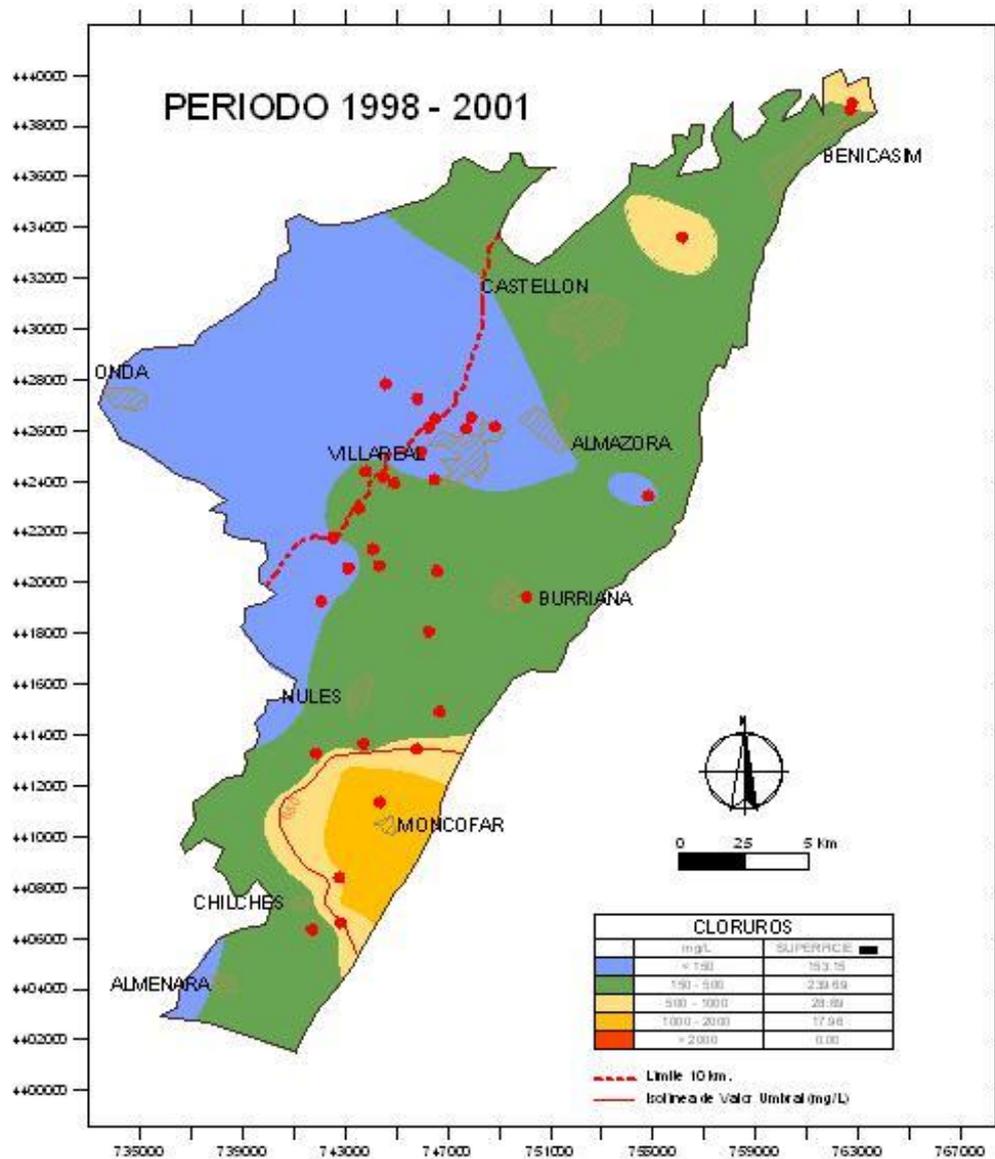


Figura 17. Mapa de isocloruros de valores medios del periodo 1998 - 2001 en la Plana de Castellón

Las superficies correspondientes a cada uno de los rangos se indican en la tabla 21.

De acuerdo con las premisas establecidas, sólo se considera la franja litoral de una anchura de 10 kilómetros, tal como se indica en el mapa anterior. Con estas condiciones, las superficies de isocontenidos son las indicadas en la tabla 22.

Rango (mg/l)	Sup (km ²)	Sup (%)
< 150	153.15	34.85
150 - 500	239.69	54.54
500 - 1000	28.69	6.53
1000 - 2000	17.96	4.09
> 2000	0.00	0.00
TOTAL	439.49	100.00

Tabla 21. Distribución de superficies de los rangos de cloruros diferenciados en la Plana de Castellón

Rango (mg/l)	Sup (km ²)	Sup (%)
< 150	45,94	14,50
150 - 500	224,15	70,77
500 - 1000	28,69	9,06
1000 - 2000	17,96	5,67
> 2000	0	0
TOTAL	316,74	100.00

Tabla 22. Distribución de superficies de los rangos de cloruros diferenciados, referidas a la franja litoral de 10 kilómetros, en la Plana de Castellón

El parámetro S se calcula según:

$$S = \frac{S_{>150}}{S_{total}} = \frac{270,80}{316,74} = 0,855$$

Por consiguiente, el parámetro S toma el valor de 0,86 que corresponde con una situación de intrusión general a la que se le asigna un valor 4 y código E.

El valor umbral de cloruros definido por la DGA en esta masa de agua es 650 mg/l. La superficie del acuífero en que se supera este valor es de 31,18 km². El parámetro S_u se calcula según:

$$S_u = \frac{S_{>Cl_u}}{S_{total}} = \frac{31,182}{316,74} = 0,098$$

Por consiguiente, el parámetro S_u toma el valor de 0,1 que corresponde con una situación de intrusión local, valor 2, código M.

7.2. Aplicación del criterio I

El mapa de la figura 17 muestra la distribución del ión cloruro correspondiente a los valores medios de los últimos cuatro años disponibles (periodo 1998 - 2001).

En la tabla 23 se indican las superficies ocupadas por cada uno de los rangos de cloruros diferenciados, expresadas también en porcentajes. Las dos últimas columnas corresponden al producto de la superficie por la media del rango de cloruros correspondiente a dicha superficie.

El valor de 340 mg/l corresponde a la categoría de acuífero con intrusión de baja intensidad, código L y valor 1.

En la tabla 24 se muestra la distribución de superficies referida a la franja litoral de 10 km de anchura.

Rango	Sup (km ²)	Sup (%)	Cl * S (sup)	Cl * S (%)
< 150	153.15	34.85	22973	5227
150 - 500	239.69	54.54	77900	17725
500 - 1000	28.69	6.53	21514	4895
1000 - 2000	17.96	4.09	26940	6130
> 2000	0.00	0.00	0	0
TOTAL	439.49	100.00	149327	33977

Tabla 23. Superficies ocupadas por cada uno de los rangos de cloruros

El parámetro I se calcula según:

$$I = \frac{\sum S_i \cdot Cl_i}{S_{total}} = \frac{149327}{439,49} = \frac{33977}{100} = 340mg / l$$

Rango	Sup (km ²)	Sup %	Cl * S (sup)	Cl * S (%)
< 150	45.94	14.5	6891	2175
150 - 500	224.15	70.77	72849	23000
500 - 1000	28.69	9.06	21518	6795
1000 - 2000	17.96	5.67	26940	8505
> 2000	0.00	0.00	0	0
TOTAL	316.74	100.00	128197	40475

Tabla 24. Superficies ocupadas por cada uno de los rangos de cloruros, referido a la franja litoral de 10 Km de anchura, en la Plana de Castellón

El parámetro I se calcula según:

$$I = \frac{\sum S_i \cdot Cl_i}{S_{total}} = \frac{128197}{316,74} = \frac{40475}{100} = 405mg / l$$

El valor de 405 mg/l corresponde a la categoría de acuífero con intrusión de baja intensidad, código L y valor 1.

7.3. Aplicación del criterio T

En la tabla 25 se indican los valores medios de la concentración de cloruros en la Plana de Oropesa - Torreblanca para la serie 1977 - 2001. Asimismo se indican las diferencias en valor absoluto entre estos valores y el valor medio de los mismos. Estos valores se representan en la figura 18.

Año	Cl, mg/l	 Cl - media
1978	183	92
1979	241	34
1980	284	9
1981	302	27
1982	319	44
1983	294	19
1984	294	19
1985	293	18
1986	299	24
1987	310	35
1988	285	10
1989	260	15
1990	230	45
1991	215	60
1992	230	45
1993	245	30
1994	263	12
1995	291	16
1996	304	29
1997	293	18
1998	297	22
1999	301	26
2000	279	4
2001	294	19
Media	275.25	28

Tabla 25. Valores medios de cloruros y diferencias con la medias (valores absolutos)

El parámetro T se obtiene por medio de la expresión:

$$T = \frac{1}{n} \sum_{x=1}^n |f(x) - \bar{f}|$$

El valor resultante es 28, que corresponde a una situación poco variable a la que se asigna un valor 1 y el código L.

7.4. Aplicación del criterio E

En la tabla 26 se indican los valores medios de cloruros en periodos discretos de cuatro años y la relación entre los mismos obtenida mediante el cociente de cada valor con el inmediatamente anterior.

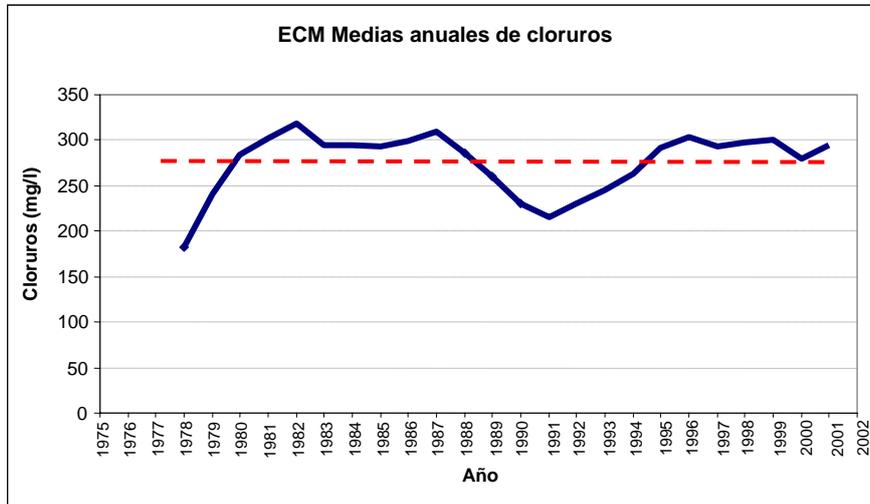


Figura. 18. Valores medios de cloruros en la Plana de Castellón

Periodo	Cl (mg/l)	Cl _n / Cl _{n-1}
1978 - 1981	253	
1982 - 1985	300	1,19
1986 - 1989	289	0,96
1990 - 1993	230	0,80
1994 - 1997	288	1,25
1998 - 2001	293	1,02

Tabla 26. Variaciones de las concentraciones medias de cloruros en periodos discretos de cuatro años en la Plana de Castellón

Estas variaciones se representan en la figura 19.

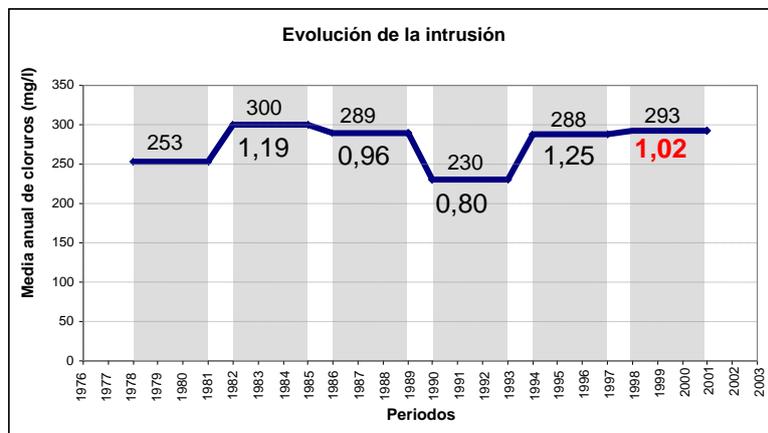


Figura 19. Variaciones de las concentraciones medias de cloruros en periodos discretos de cuatro años en la Plana de Castellón

El parámetro E es el cociente entre los valores medios del último periodo y del inmediatamente anterior. El valor así obtenido es 1,02, que caracteriza una situación de moderado incremento de la concentración media de cloruros y se le asigna un valor numérico de 1.

7.5. Índice SITE de la Plana de Castellón

Los códigos y valores numéricos que conforman el índice SITE en la masa de agua subterránea de la Plana de Castellón se indican en la tabla 27:

Criterio	Valor	Código	Caracterización
S	4	E	Extensión general
I	1	L	Intensidad baja
T	1	L	Poco variable
E	1	1	Incremento moderado

Tabla 27. Códigos y valores del índice SITE en la Plana de Castellón

El valor SITE resultante es el siguiente:

$$ValorSITE = \frac{3 * 4 + 3 * 1 + 1 + 1}{30} = 0,57$$

La presión por intrusión marina es ALTA.

El índice SITE es: $ELL1(0,6)$

Si, por el contrario, se considera S_u como criterio de superficie:

$$ValorSITE = \frac{3 * 2 + 3 * 1 + 1 + 1}{30} = 0,37$$

En este caso, la presión por intrusión marina es MODERADA.

El índice SITE es: $MLL1(0,4)$

8. SÍNTESIS DE LOS INDICES OBTENIDOS

8.1. Parámetro S

Los valores del parámetro S en los tres acuíferos considerados se muestran en la tabla 28:

Acuífero	S	Carácter	Valor	Código
Vinaroz - Peñíscola	0,27	Local	2	M
Oropesa - Torreblanca	1,00	General	4	E
Castellón	0,85	General	4	E

Tabla 28. Códigos y valores y del parámetro S en los acuíferos estudiados

8.2. Parámetro S_u

Los valores del parámetro S_u en los tres acuíferos considerados se muestran en la tabla 29:

Acuífero	S_u	Carácter	Valor	Código
Vinaroz - Peñíscola	0,014	Puntual	1	L
Oropesa - Torreblanca	0,29	Zonal	3	H
Castellón	0,098	Local	2	M

Tabla 29. Códigos y valores del parámetro S_u en los acuíferos estudiados

8.3. Parámetro I

Los valores del parámetro I en los tres acuíferos considerados se muestran en la tabla 30:

Acuífero	I	Carácter	Valor	Código
Vinaroz	246	Baja	1	L
Oropesa - Torreblanca	1141	Alta	3	H
Castellón	405	Baja	1	L

Tabla 30. Códigos y valores del parámetro I en los acuíferos estudiados

8.4. Parámetro T

Los valores del parámetro T en los tres acuíferos considerados se muestran en la tabla 31:

Acuífero	T	Carácter	Valor	Código
Vinaroz	53,8	Variable	2	M
Oropesa - Torreblanca	81	Moderadamente variable	3	H
Castellón	28	Poco variable	1	L

Tabla 31. Códigos y valores y del parámetro T en los acuíferos estudiados

8.5. Parámetro E

Los valores del parámetro E en los tres acuíferos considerados se muestran en la tabla 32:

Acuífero	E	Carácter	Valor	Código
Vinaroz	0,97	Descenso moderado	-1	-1
Oropesa - Torreblanca	1,01	Incremento moderado	1	1
Castellón	1,02	Incremento moderado	1	1

Tabla 32. Códigos y valores y del parámetro E en los acuíferos estudiados

En la figura 20 se sintetizan las variaciones de las concentraciones medias de cloruros en periodos discretos de cuatro años en los tres acuíferos estudiados.

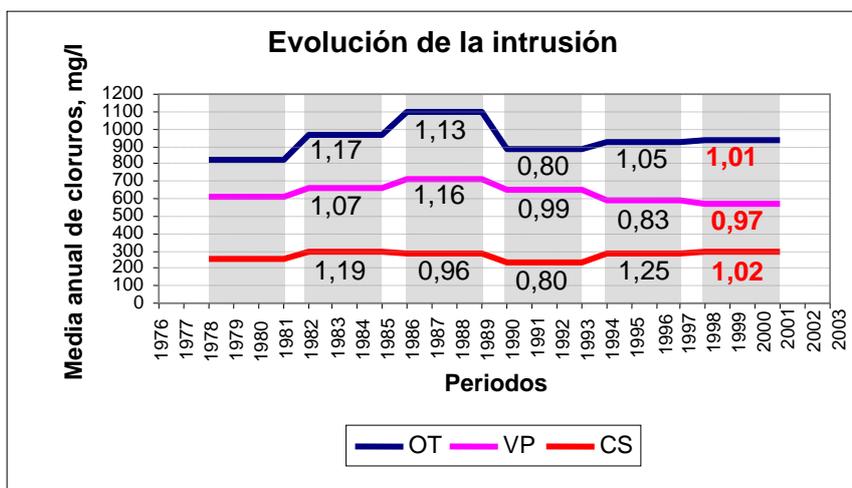


Figura 20. Valores del parámetro E en los tres acuíferos estudiados

8.6. Resultados finales

En la tabla 33 se resumen los resultados obtenidos para los diferentes criterios considerados:

Criterio	Plana de Vinaroz			Plana de Oropesa			Plana de Castellón		
	Indice	Valor	Código	Indice	Valor	Código	Indice	Valor	Código
S	0,27	2	M	1,00	4	E	0,85	4	E
Su	0,014	1	L	0,29	3	H	0,098	2	M
I	246	1	L	1141	3	H	405	1	L
T	53,8	2	M	81	3	H	28	1	L
E	0,97	-1	-1	1,01	1	1	1,02	1	1

Tabla 33. Resultados finales

Los valores del índice SITE calculados para cada una de las masas de agua consideradas se resumen en la tabla 34.

Criterio		Plana de Vinaroz	Plana de Oropesa	Plana de Castellón
S	Valor SITE	0,33	0,83	0,57
	Presión	MODERADA	EXTREMA	ALTA
	Ind. SITE	M L M -1 (0,3)	E H H 1 (0,8)	E L L 1 (0,6)
Su	Valor SITE	0,23	0,73	0,37
	Presión	MODERADA	SEVERA	MODERADA
	Ind. SITE	L L M -1 (0,2)	H H H 1 (0,7)	M L L 1 (0,4)

Tabla 34. Valores del índice SITE

REFERENCIAS

- Ballesteros (2008). Tipología y caracterización de la intrusión marina en acuíferos litorales. Método SITE. (primeras bases). Informe inédito. Instituto Geológico y Minero de España.
- Charchadi, A.G. (2005). Seawater intrusion mapping using modified Galdit indicador model. Case study in Goa. *Jalvigyan Sameeksha*. Vol 20: 29 - 45
- Custodio, E., Alcalá-García, F.J. (2003). El potencial de la relación Cl/Br como indicador del origen de la salinidad de los acuíferos costeros españoles. *TIAC 2003*. 401 - 412
- Edet, A.E, Okereke, C.S. (2001). Monitoring seawater intrusion in the Tertiary-Quaternary aquifer system, Coastal Akwa Ibom area, Southeastern Nigeria-Baseline data. *First Int. Conf. Saltwater Intrusion and Coastal Aquifers*.
- Ertekin, C. (2005). Hydrogeochemical framework and groundwater vulnerability mapping of Izmir Bornova plain, Turkey. *Salt Lake City Annual Meeting*. Paper No. 228-8
- Giménez (1994). Caracterización hidrogeoquímica de los procesos de salinización en el acuífero detrítico costero de la Plana de Castellón (España). Tesis Doctoral. Universidad de Granada.
- Giménez, E., Morell, I. (1997). Hydrogeochemical analysis of salinization processes in the coastal aquifer of Oropesa (Castellón, Spain). *Environmental Geology* 29 (½) : 118-131.
- Giménez, E., Morell, I. (2008). Contributions of boron isotopes to understanding the hydrogeochemistry of the coastal detritic aquifer of Castellón Plain, Spain. *Hydrogeology Journal* 16 (3): 547-557
- Mandilaras, D., Lambrakis, N., Stamatis, G. (2007). The role of bromide and iodide ions in the salinization mapping of the aquifer of Glafkos rives basin (northwest Achaia, Greece). *Hydrological Processes*, 22(5): 611-622
- Morell I. (1985). Caracterización hidrogeoquímica de la intrusión marina de la Plana Oropesa-Torreblanca (Prov. Castellón). Tesis Doctoral.
- Murillo, J.M., Navarro, J.A. (1991). Modelo para el cálculo de un índice del estado de intrusión de un acuífero costero. Aplicación a la Plana de Castellón. *IGME*
- Navarro, J.A., Gavilán, C.J., Ortega, R. (1995). Método para el cálculo de un índice del estado de intrusión en acuíferos costeros (IEI).
- Navarro y Murillo (2007). Consideraciones previas para el desarrollo de un índice de intrusión en masas de aguas subterráneas costeras. *Boletín Geológico y Minero*, 118: 609-620
- Voudouris, K., Mandilaras, D., Antonakos, A. (2004). Methods to define the surface distribution of the SALT intrusion zone. 18th SWIM.

