

# Caracterización de la intrusión marina en las aguas subterráneas de la franja litoral de la cuenca del Júcar y propuestas metodológicas para la aplicación de las directivas europeas 2000/60/CE y 2006/118/CEE

A. Fidalgo<sup>(1)</sup>, J. Ferrer<sup>(1)</sup>, T. Estrela<sup>(2)</sup> y J. Escuer<sup>(3)</sup>

(1) Confederación Hidrográfica del Júcar. Avda. Blasco Ibáñez nº 48, 46010 Valencia. España.  
E-mail: jferrer@chj.mma.es, afidalgo@chj.mma.es

(2) Subdirección General de Planificación y Uso Sostenible del Agua, Ministerio de Medio Ambiente.  
C/ Agustín de Betancourt nº 25, 28003 Madrid. España. E-mail: testrela@mma.es

(3) Eptisa Servicios de Ingeniería, S.A. Avda. de Aragón, nº 4, 46021 Valencia. España.  
E-mail: jmesnaola@eptisa.es

## RESUMEN

Las Directivas 2000/60/CE y 2006/118/CE han configurado un nuevo marco normativo al que se debe adaptar la gestión del agua en la Unión Europea con el objetivo de alcanzar el buen estado cuantitativo y químico de las masas de agua en el año 2015. Los Estados miembros han de coordinar las metodologías de trabajo para caracterizar el estado de las masas de agua y adaptar las redes de seguimiento del estado cuantitativo y químico de las aguas. En este contexto, la evaluación del riesgo de intrusión salina desde el mar es un aspecto clave para alcanzar el buen estado en las aguas subterráneas de los acuíferos costeros. La Confederación Hidrográfica del Júcar ha efectuado un estudio para la caracterización inicial del proceso de la intrusión marina en las masas de agua subterránea de la franja litoral de la cuenca del Júcar. El estudio se ha desarrollado a partir de una metodología consistente en la definición de los modelos conceptuales de los acuíferos costeros, un análisis estadístico previo de las series históricas para establecer los parámetros indicadores del estado cuantitativo y químico con respecto a la intrusión, y la comparación de estas series temporales con los volúmenes drenados al mar que resultan de la aplicación de modelos agregados de flujo en los acuíferos costeros.

Palabras clave: buen estado cuantitativo y químico, cuenca del Júcar, directivas 2000/60/CE y 2006/118/CE, intrusión marina, masa de agua subterránea costera

## ***Characterisation of marine intrusion in the Júcar coastline groundwater and methodological proposal for the application of the european directives 2000/60/CE and 2006/118/CE***

### ABSTRACT

*The Directives 2000/60/CE and 2006/118/CE have formed a new normative frame to which the water management of the European Union must be adapted with the objective to reach a good qualitative and chemical status of all water bodies in the year 2015. The Member States have to coordinate the work methodology for the characterisation of the water bodies' status and to adapt the monitoring networks of the quantitative and chemical status of water. In this context, the risk assessment of saline intrusion from the sea is a key aspect for reaching a good status of coastal aquifers' groundwater. The Júcar River Basin Authority has carried out a study for the initial characterisation of the marine intrusion process in the coastline bodies of groundwater of the Júcar river basin. The study was developed based on a methodology consisting on the definition of conceptual models of the coastal aquifers, the statistical analysis of historical series for the establishment of indicator parameters of the quantitative and chemical status with regards to intrusion, and the comparison of these temporal series with the drainage volumes to the sea which result from the application of aggregated flow models in the coastal aquifers.*

*Key words: good qualitative and chemical status, Júcar river basin, Directives 2000/60/CE and 2006/118/CE, marine intrusion, coastal body of groundwater*

## **Introducción**

La "Directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de octubre de 2000, por la que se

establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas", también conocida como Directiva Marco del Agua, ha fijado los objetivos para la gestión del agua en los Estados miem-

bros, entre los que se encuentra la caracterización del estado de las masas de agua subterránea y el cumplimiento de los objetivos medioambientales en el horizonte de 2015. La caracterización del proceso de intrusión salina tiene especial importancia en las zonas del borde litoral para alcanzar el buen estado cuantitativo y químico de las masas de agua subterránea costeras.

La reciente Directiva 2006/118/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 12 de diciembre de 2006, complementa a la Directiva 2000/60/CE y establece como objetivo la protección de las aguas subterráneas frente a la contaminación química y al deterioro producido, entre otros procesos, por la intrusión salina. Esta protección ofrece un interés añadido en la franja litoral de la cuenca del Júcar, ya que en esta zona se localizan la mayor parte de las captaciones para abastecimiento urbano de los municipios costeros y numerosas zonas húmedas de alto valor ambiental.

Conforme a la Directiva 2006/118/CE es necesario definir normas de calidad, según el anexo I, así como los valores umbral de los contaminantes de las aguas subterráneas y sus indicadores, según el artículo 3 y el anexo II. Esta Directiva define la conductividad como el parámetro indicativo de la intrusión salina. Para el control y seguimiento de las concentraciones salinas originadas por actividades humanas, los Estados miembros deberán establecer los valores umbral de la salinidad, que podrán definirse a partir de las concentraciones de cloruros y sulfatos, o bien a partir de los datos de conductividad de las aguas subterráneas. La Directiva 2006/118/CE obliga a fijar los criterios que permitan determinar la existencia de tendencias significativas y sostenidas al aumento de las concentraciones de los contaminantes que, en el caso de la intrusión, produzcan "salinidad u otras intrusiones"; y también se deben definir los puntos de partida de las inversiones de tendencia, teniendo en cuenta la posibilidad de aparición de efectos adversos en los ecosistemas acuáticos asociados o dependientes de los ecosistemas terrestres.

Los niveles naturales elevados de sustancias o iones resultantes de determinadas condiciones hidrogeológicas específicas no se consideran incluidos en la definición de contaminación y, en consecuencia, no les serán de aplicación las disposiciones relativas al estado químico de las aguas. Tampoco se aplicarán estas disposiciones si se producen cambios de la dirección del flujo o de la composición química con carácter provisional y limitados en el espacio, ya que no se consideran indicativos de un proceso de intrusión.

Según la Directiva 2000/60/CE, para considerar que

una masa de agua subterránea se encuentra en buen estado cuantitativo se debe constatar, entre otros requisitos, que el nivel del agua subterránea no está sujeto a "alteraciones de la dirección del flujo, temporales o continuas en un área limitada, causadas por cambios en el nivel, que no provoquen salinización u otras intrusiones ni indiquen una tendencia continua y clara de la dirección del flujo inducida por la actividad humana que pueda dar lugar a tales intrusiones" (Anexo V.2.1). Para alcanzar el buen estado químico en una masa de agua subterránea, además de otros requisitos, se debe comprobar que "las concentraciones de contaminantes en el agua subterránea no presentan efectos de salinidad u otras intrusiones", y que "las variaciones de la conductividad no indican salinidad u otras intrusiones en la masa de agua subterránea" (Anexo V.2.3).

Conforme a las definiciones contenidas en la Directiva 2000/60/CE, el proceso de intrusión salina desde el mar condiciona tanto el buen estado cuantitativo como el buen estado químico de las masas de agua subterránea, por lo que la caracterización y el estudio de la evolución de la intrusión marina deben integrar ambos aspectos.

A continuación se describen diferentes líneas de trabajo que actualmente está desarrollando la Confederación Hidrográfica del Júcar (en adelante, CHJ) con objeto de establecer una metodología para la caracterización del proceso de intrusión marina.

### **Planteamiento metodológico para la evaluación del buen estado cuantitativo y químico con respecto a la intrusión marina**

Según los criterios establecidos en las Directivas 2000/60/CE y 2006/118/CE, la caracterización de la contaminación por intrusiones salinas producidas por la actividad humana debe tener en cuenta la composición natural de las aguas subterráneas con el fin de establecer un nivel de referencia de la salinidad y su posible afección posterior por las actividades humanas.

Hay que tener en cuenta que las aguas subterráneas en la franja litoral pueden presentar niveles naturales de salinidad elevados por causas diversas, como la presencia de formaciones geológicas evaporíticas o de aguas formacionales de alto contenido en sales, además de la influencia directa desde el mar, especialmente en ambientes semiáridos (cfr. Custodio, 2005; Morell y Hernández, 2000).

La caracterización de la contaminación por intrusión marina inducida o favorecida por la actividad humana debe apoyarse en los datos proporcionados



Figura 1: Criterios metodológicos conforme a la normativa europea para la caracterización de la contaminación por intrusiones salinas producidas por la actividad humana

Figure 1: Methodological criteria in accordance with the European regulation for the characterisation of saline intrusion contamination produced by human activity

por las redes de observación del estado cuantitativo y químico de las aguas subterráneas (véase la figura 1).

Las series históricas procedentes de la red operativa de piezometría (estado cuantitativo) y de las redes de observación de la intrusión y de la calidad de las aguas subterráneas (estado químico) en la cuenca del Júcar cubren, con mayor o menor continuidad, un periodo considerablemente largo de medidas que comprende los últimos 30 años.

Si bien no es fácil identificar las condiciones iniciales de referencia y, por tanto, el efecto directo de la influencia humana en las variaciones de salinidad por intrusión marina, los registros disponibles en la cuenca del Júcar presentan una importante amplitud temporal y espacial. Esto ha permitido efectuar un estudio estadístico de las series históricas mediante la correlación de los parámetros indicadores del estado cuantitativo y químico, así como el análisis evolutivo de estos parámetros en las masas de agua subterránea costeras.

### **Definición de los modelos conceptuales de flujo y de intrusión marina**

En la fase inicial de los trabajos de caracterización de la intrusión marina, conforme a los criterios de la

Directiva 2000/60/CE, se ha definido el modelo conceptual de funcionamiento hidrodinámico de los acuíferos costeros de la franja litoral de la cuenca del Júcar a partir de la información hidrológica, geológica e hidrogeológica obtenida de los estudios clásicos y de las series históricas procedentes de las redes de observación del estado cuantitativo y químico de las aguas subterráneas gestionadas por la CHJ, con el objetivo de caracterizar las condiciones de contorno del flujo subterráneo y su relación con los procesos de intrusión salina (véase la figura 2). El tratamiento de esta información se ha apoyado en las herramientas que ofrecen los sistemas de información geográfica (SIG) integrados actualmente en el sistema de información hidrológica Geshidro de la CHJ (cfr. Estrela, 2003 y Ferrer, 2004).

### **Análisis previo de la información de las redes de observación para la caracterización del proceso de intrusión marina en los acuíferos costeros**

Conforme a las Directivas anteriormente citadas, la red de control piezométrico debe suministrar la información acerca del nivel de las aguas subterráneas para el seguimiento del estado cuantitativo, mientras que las redes de calidad y de observación de la intru-

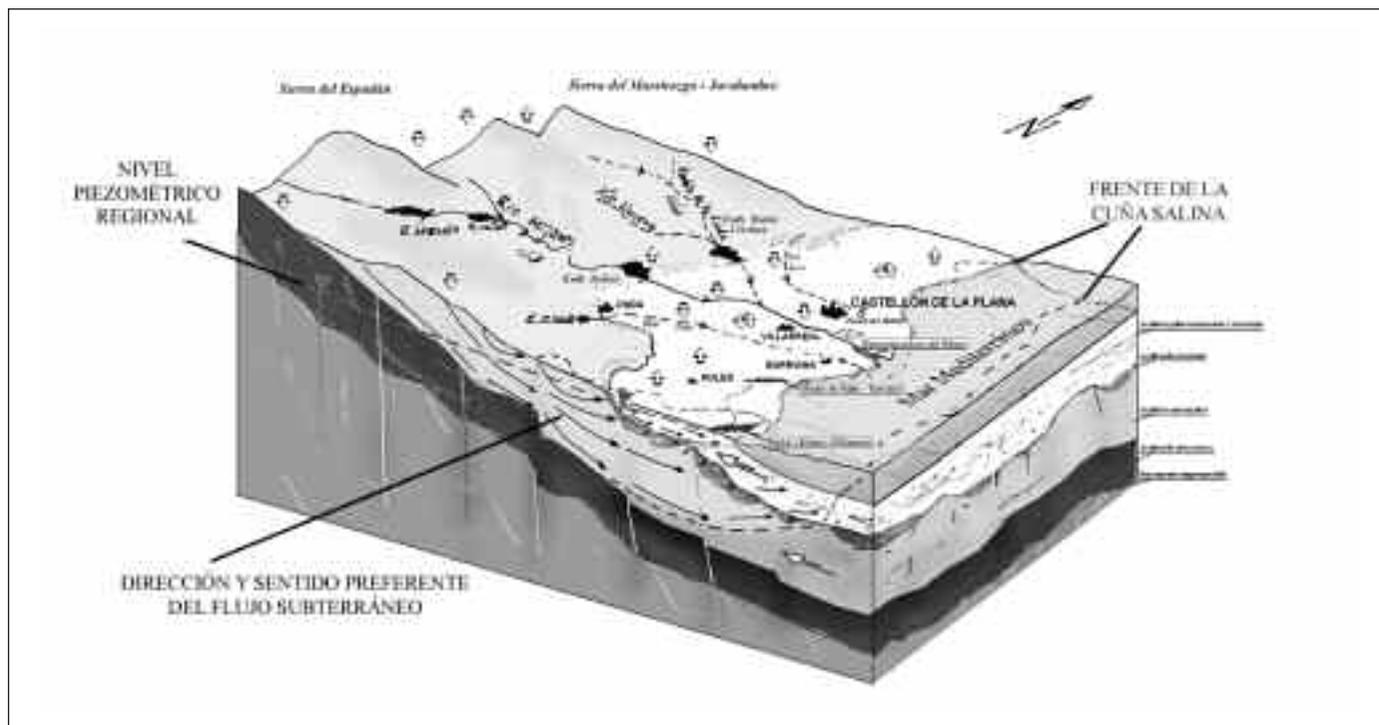


Figura 2: Modelo conceptual de los acuíferos costeros y de los procesos de intrusión salina desde el mar en la masa de agua subterránea 080.021 Plana de Castellón

Figure 2: Conceptual models of coastal aquifers and saline intrusion processes from the sea in the coastal body of groundwater 080.021 Plana de Castellón

sión marina han de proporcionar información sobre los parámetros físico-químicos y, en particular, sobre la conductividad y la concentración en cloruros de las aguas subterráneas como parámetros indicadores del proceso de intrusión marina. A partir de esta información se puede analizar la evolución espacial y temporal de los valores obtenidos en cada punto de control y el grado de correlación existente entre los pares de valores comparables para una misma fecha a lo largo de las series registradas en los puntos de control del estado cuantitativo y químico de las masas de agua subterránea.

Para caracterizar el flujo subterráneo y analizar con carácter general las tasas de intercambio entre las masas de agua subterránea en el ámbito de la CHJ se ha formado un mapa piezométrico general, a escala original 1:200.000, mediante el trazado de las isopiezas representativas del nivel piezométrico regional actual de las aguas subterráneas.

En el proceso de elaboración de este mapa se ha tomado como principal referencia las lecturas de nivel obtenidas en los puntos de la red oficial de piezometría en la campaña de mayo de 2005. Para trazar las isopiezas se ha interpretado la información de los niveles piezométricos con el apoyo de diversos datos

hidrológicos procedentes de los estudios efectuados por la CHJ sobre las descargas subterráneas en manantiales, las relaciones río-acuífero y las cotas absolutas de presas y embalses. Para afinar el trazado de las isopiezas y optimizar la superficie cubierta por el mapa piezométrico se ha tenido en cuenta la información adicional proporcionada por los mapas geológicos e hidrogeológicos oficiales publicados en el ámbito de la cuenca del Júcar para distintas fechas y escalas, y también se ha analizado la evolución de los niveles registrados en el inventario de piezometría de la CHJ constituido por 1.254 puntos de control.

El ajuste final de las isopiezas se ha efectuado mediante su digitalización y contraste con un modelo digital de elevaciones del terreno discretizado con una resolución de píxel de 20 metros.

El mapa piezométrico resultante, que se ha integrado como una capa geotemática en el sistema de información hidrológica Geshidro, cubre prácticamente la totalidad del ámbito territorial de la cuenca del Júcar, a excepción de los bordes montañosos noroccidental y suroccidental por ausencia de datos de piezometría. Su aplicación en las masas de agua subterránea costeras ha permitido identificar, por sectores y zonas, el sentido de flujo preferente entre el

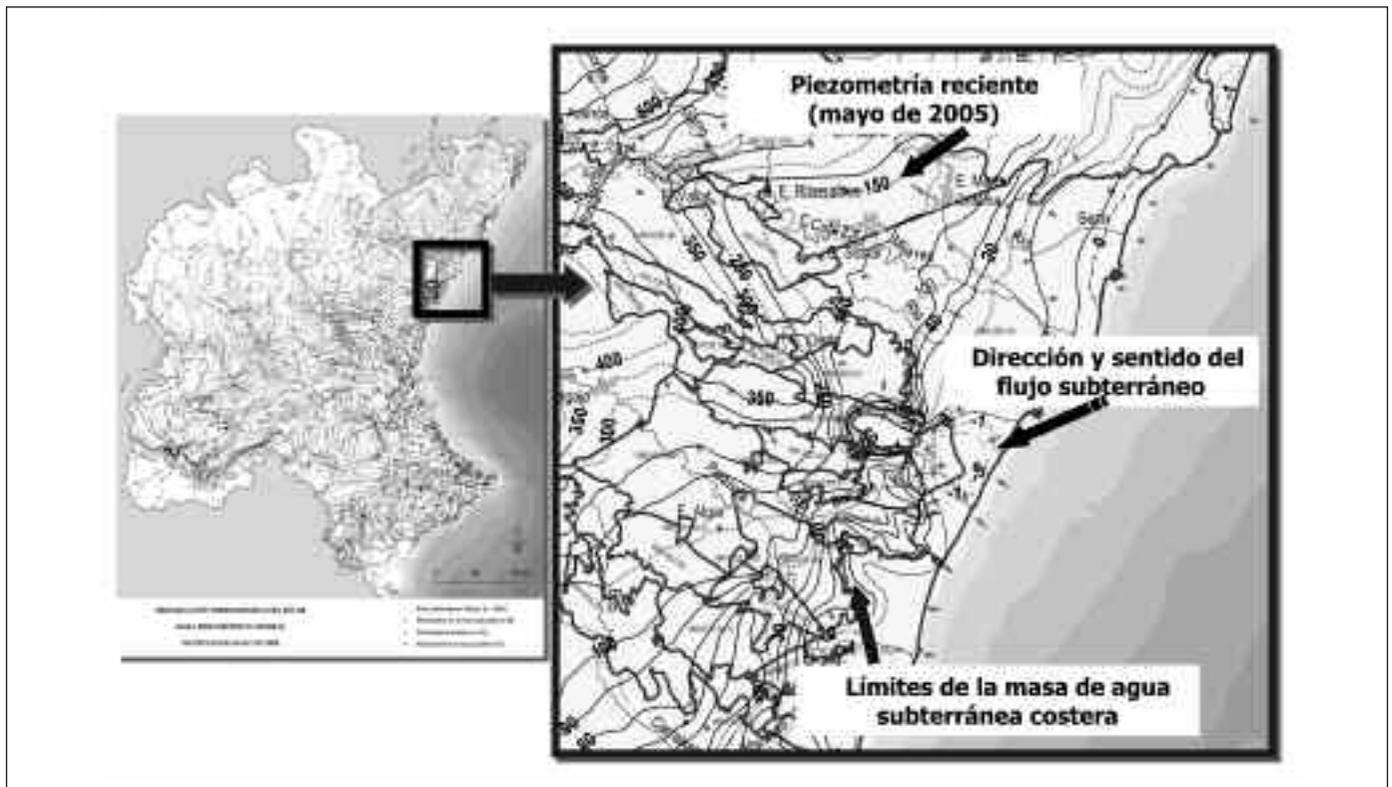


Figura 3: Detalle del mapa piezométrico general de la Confederación Hidrográfica del Júcar en la masa subterránea costera 080.021 Plana de Castellón

Figure 3: Detail of the general piezometric map of the Júcar River Basin in the coastal body of groundwater 080.021 Plana de Castellón

borde costero y el mar, así como la cota piezométrica reciente con respecto al nivel medio del mar (véase la figura 3).

En cuanto a los parámetros físico-químicos indicadores de la intrusión salina desde el mar, se ha estudiado la evolución temporal de la concentración de cloruros y la conductividad en todos los puntos de control en que están disponibles estos datos.

El análisis inicial indica que ambos parámetros suelen presentar una tendencia semejante en cada punto de control, aunque su análisis en detalle reviste cierta complejidad, ya que incluso un mismo acuífero puede presentar distintas tendencias según zonas o sectores, por lo que no es fácil la definición de patrones generales que caractericen su evolución temporal.

Como prueba complementaria para la validación de las series paramétricas que tienen registros históricos de Geshidro se ha efectuado un estudio estadístico de los valores de cloruros y conductividades en los 28 puntos de control comunes de las redes de calidad de aguas subterráneas y de observación de la intrusión. Estos puntos cubren toda la franja litoral de

la cuenca del Júcar, a excepción del borde meridional. Teniendo en cuenta que históricamente ambas redes se han controlado, muestreado y analizado de forma independiente, el estudio se ha planteado con dos objetivos:

- a) Aplicar en cada punto de control un análisis de regresión lineal a los pares de valores de cloruros - conductividad obtenidos en cada campaña de muestreo, considerando por separado los resultados de la red de calidad y los de la red de observación de la intrusión.
- b) Determinar, para cada punto de control, el grado de semejanza existente entre los valores de un parámetro (cloruros o conductividad) procedentes de una y otra red de control mediante el análisis de regresión lineal de los pares de valores (valor de la red de intrusión - valor de la red de calidad) obtenidos para fechas de muestreo comparables. Este análisis se ha efectuado por separado para los pares de valores de cloruros y para los de conductividad de las aguas subterráneas.

Como resultado de este estudio se concluye que

en esta muestra se obtiene una alta correlación lineal cuando se comparan los pares cloruros – conductividad procedentes de una misma red, ya que 15 de los 28 puntos estudiados presentan un coeficiente de determinación  $R^2 \geq 0,75$ , tanto en los datos de la red de intrusión como en los de calidad de las aguas subterráneas.

Sin embargo, cuando se comparan los pares de valores de un mismo parámetro (comparativa de red de intrusión - red de calidad) la condición  $R^2 \geq 0,75$  sólo se cumple en 4 puntos los pares de valores de conductividad, y en 5 puntos si se comparan los pares de valores de cloruros. No es fácil identificar las causas de esta baja correlación entre pares de valores que, en principio, deberían ser muy similares, ya que se han comparado los resultados analíticos de muestras obtenidas en un mismo punto y en una misma fecha. Cabe suponer que estas diferencias se deben, en buena parte, a la diversidad de procedimientos de muestreo y métodos analíticos que se han venido aplicando en ambas redes de control desde el origen de las series.

Otra limitación inherente a los datos históricos de parámetros físico-químicos es la repetición sistemática de ciertos valores que se observa en algunas series históricas, tanto en cloruros como en conductividades, sin que haya quedado constancia del procedimiento empleado en la posible restitución de estas series antes de su integración en el inventario de la CHJ.

Como resultado del análisis de las series históricas de piezometría, de concentración en cloruros y conductividad de las aguas subterráneas se puede concluir que, con carácter general, los valores registrados en cada punto de control de la franja litoral se han mantenido estables en el tiempo o con tendencias de variación muy suave en registros considerablemente largos y continuos, que en algunos casos llegan a superar los 30 años desde el origen de las medidas. Por otra parte, del análisis comparativo entre los indicadores del estado cuantitativo y químico de las masas de agua subterránea costeras por intrusión marina se desprende que las mayores concentraciones de cloruros y los valores más altos de conductividad suelen localizarse en las zonas en que el nivel piezométrico se encuentra deprimido permanentemente o durante largos períodos con respecto al nivel medio del mar.

No obstante, dada la complejidad del proceso de intrusión y las características de los datos disponibles, hasta el momento no se han podido identificar patrones generales de evolución para la caracterización de la intrusión marina que correlacionen las variaciones medias anuales de piezometría y los correspondientes valores físico-químicos.

En definitiva, el análisis previo de la información para los parámetros indicadores del estado cuantitativo y químico de la intrusión marina en la cuenca del Júcar ha resultado de interés en tres aspectos:

- La caracterización de los valores máximos y mínimos registrados históricamente en cada masa, así como su magnitud con respecto al resto de masas de la franja litoral.
- El análisis de tendencias evolutivas de los valores históricos y de las limitaciones inherentes a las series registradas.
- La identificación de las masas en las que es necesario incrementar el número de puntos de control del estado cuantitativo y químico de la intrusión salina y optimizar el diseño de las redes en el marco de los trabajos de planificación hidrológica, conforme a las obligaciones de las Directivas europeas.

A partir del diagnóstico inicial se han iniciado los estudios estadísticos de detalle en las masas de agua subterránea costeras que disponen de suficiente cobertura actual en las redes de observación del estado cuantitativo y químico, con el objetivo de analizar en detalle la evolución de los parámetros indicadores por sectores o zonas.

En la figura 4 se muestra un ejemplo del análisis de detalle efectuado en la masa 080.021 Plana de Castellón sobre la distribución geográfica del coeficiente de correlación cloruros - conductividad obtenida en un estudio de 74 puntos de control de la red de observación de la intrusión en las aguas subterráneas para el periodo 1977-2001.

Se observa que los puntos con coeficiente de correlación lineal  $r \geq 0,75$  para la comparación de ambos parámetros se sitúan en tres sectores de la masa bien diferenciados: en los bordes septentrional (Z1) y meridional (Z3) de la plana costera, situados en las proximidades del mar y de formaciones geológicas salinas, en los que se localizan aguas subterráneas de alta salinidad; y en el borde interior central (Z2), alimentado por formaciones carbonatadas de baja salinidad.

En esta figura también se han representado las gráficas de evolución temporal cloruros-conductividad de dos puntos de control. El punto A, que está emboquillado a 18 metros sobre el nivel del mar y con una profundidad de obra de 18 metros, se localiza de la zona central costera de la Plana de Castellón, caracterizada por procesos de mezcla de aguas subterráneas y superficiales y por bajos coeficientes de correlación cloruros-conductividad. El punto B, emboquillado a 36 metros sobre el nivel del mar y con 45 metros de profundidad, se sitúa en el borde

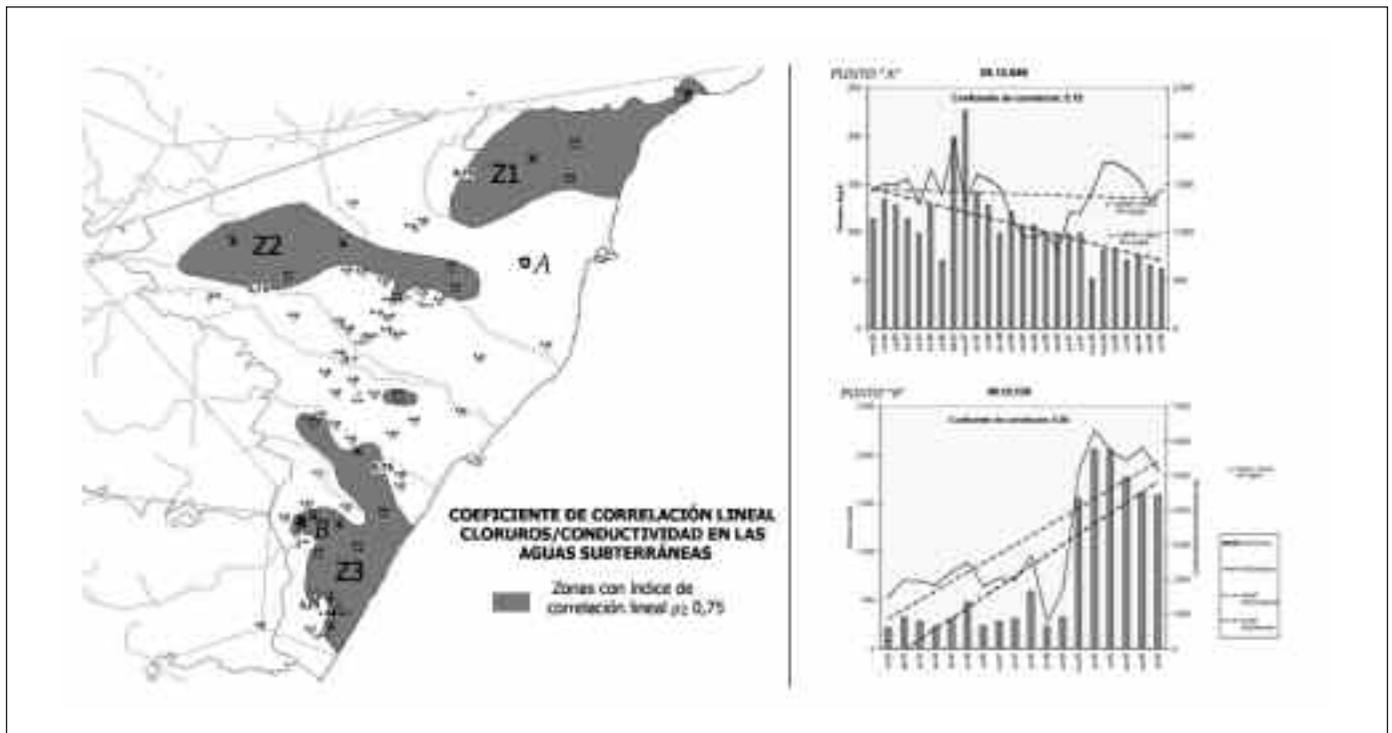


Figura 4: Distribución geográfica del índice de correlación cloruros-conductividad con medidas de la red de observación de la intrusión en la masa de agua subterránea 080.021 Plana de Castellón

Figure 4: Geographic distribution of the correlation index (chlorides /conductivity) with measures from the observation network for intrusion in the coastal body of groundwater 080.021 Plana de Castellón

meridional de la plana costera (Z3), caracterizada por una alta salinidad de las aguas subterráneas y por coeficientes de correlación altos entre ambos parámetros. Los coeficientes de correlación entre los cloruros y la conductividad de las aguas subterráneas en los puntos A y B son de 0,15 y 0,98, respectivamente.

En esta línea de trabajo está previsto efectuar un análisis detallado de las zonas próximas a la costa que presentan altas salinidades, ya que, en principio, parecen las zonas que reúnen mejores condiciones para identificar posibles indicadores del avance o retroceso de la cuña salina desde el mar.

#### Desarrollo de una metodología para la evaluación de presiones, impactos y riesgos por intrusión salina desde el mar

Una vez definido el marco conceptual de las masas de agua subterránea costeras y tras efectuar el análisis de validación de las series procedentes de las redes de observación, la CHJ ha desarrollado una metodología para caracterizar las presiones y los impactos por intrusión salina desde el mar y para

evaluar, mediante la combinación de presiones e impactos, el riesgo de no alcanzar los objetivos medioambientales en 2015 por intrusión salina desde el mar. El desarrollo metodológico se ha basado en los criterios definidos por el Ministerio de Medio Ambiente (MMA, 2005) y la Comisión Europea (EC, 2003) para la identificación de las presiones y análisis del impacto en aguas superficiales. Estos criterios se han adaptado al estudio de las 16 masas de agua subterránea costeras de la cuenca del Júcar y se han definido los indicadores específicos de las presiones e impactos de la intrusión marina, conforme a la metodología y los criterios que se describen a continuación.

#### A. Identificación de las presiones por intrusión marina

Las presiones que soportan las masas de agua subterránea y que pueden afectar al proceso de intrusión marina se han caracterizado a partir del índice de explotación y del índice de densidad de captaciones en la franja costera y se han clasificado en tres nive-

les: presión significativa, presión no significativa y sin datos.

### *Índice de explotación*

El índice de explotación de una masa de agua subterránea "K" se define como la relación entre el bombeo total de aguas subterráneas y el recurso disponible:

$$K = \text{Bombeo} / \text{Recurso disponible}$$

Para calcular este índice se ha evaluado el volumen de bombeo total de aguas subterráneas a partir de la estimación de bombeos para usos urbanos, agrícolas e industriales. El uso de las aguas subterráneas en la cuenca del Júcar es muy importante, especialmente en la franja litoral, y representa una fuente fundamental del recurso para atender las demandas existentes. En conjunto, los recursos subterráneos totales extraídos en el ámbito de la CHJ se han estimado mediante procedimientos indirectos en 1.704 hm<sup>3</sup>/año, de los cuales 1.171 hm<sup>3</sup>/año se destinan al uso agrícola, 413 hm<sup>3</sup>/año al uso urbano y 120 hm<sup>3</sup>/año al uso industrial (cfr. CHJ, 2005). Si bien la Administración hidráulica ha iniciado diversos programas para el control directo de las extracciones subterráneas, todavía no se dispone, con carácter general, de información completa sobre los volúmenes extraídos en las captaciones subterráneas, por lo que las extracciones se han estimado de forma indirecta mediante los procedimientos que se describen a continuación.

Los bombeos de agua subterránea para uso urbano se han estimado asumiendo que, aproximadamente, coinciden con los datos de demanda bruta para uso urbano satisfechos con recursos de origen subterráneo. La estimación de estas demandas se ha tomado de los trabajos de seguimiento del Plan Hidrológico de cuenca del Júcar, referidos al año 2003. Los cálculos de las demandas urbanas de los trabajos de seguimiento se han obtenido a partir de los datos de población total (permanente y estacional) conforme a los censos de población municipales, y de las dotaciones asignadas en la planificación hidrológica (MOPT, 1992). Al volumen resultante de esta primera estimación se ha descontado el volumen satisfecho con recursos no convencionales en cada municipio mediante la desalación.

Posteriormente se ha establecido un factor de reparto para asignar la fracción de origen superficial o subterráneo del agua utilizada, según la información procedente de la Comisaría de Aguas y del cono-

cimiento de los usos existentes. El volumen extraído de aguas subterráneas en cada término municipal para abastecimiento urbano se ha asignado, en el entorno de los SIG, a la masa de agua subterránea correspondiente cuando se conoce la localización precisa del punto de extracción, y si no se dispone de esta información se ha supuesto que el punto de extracción se localiza en las inmediaciones del núcleo urbano.

La estimación de las demandas de agua subterránea para uso agrícola se ha realizado con la información facilitada por el Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, a partir del "Formulario 1T" de declaración anual de superficies en regadío por términos municipales. A estas superficies posteriormente se les han aplicado las dotaciones de riego, por tipo de cultivo y comarca, y la eficiencia de los sistemas de riego según las determinaciones del CEDEX (1991). Al igual que en la estimación de la demanda urbana, se han tenido en cuenta los recursos no convencionales, procedentes principalmente de la reutilización. A continuación se ha definido la procedencia del agua aplicada (superficial, subterránea o mixta), y se ha calculado, por último, el volumen de agua utilizada de origen subterráneo. Una vez determinadas las extracciones del acuífero para cada unidad de demanda agraria (UDA) el siguiente paso ha consistido en localizar los puntos de extracción y asignarlos a la masa de agua subterránea correspondiente.

El cálculo de los bombeos para uso industrial se ha basado en las estadísticas disponibles sobre instalaciones industriales que no están conectadas a las redes de abastecimiento urbano, clasificadas por términos municipales, y en los datos procedentes de la Comisaría de Aguas de la CHJ.

El segundo parámetro necesario para el cálculo del índice de explotación es el recurso disponible. La Directiva 2000/60/CE ha introducido este concepto en su artículo 2.27, y lo define como "el valor medio interanual de la tasa de recarga total de la masa de agua subterránea, menos el flujo interanual medio requerido para conseguir los objetivos de calidad ecológica para el agua superficial asociada para evitar cualquier disminución significativa en el estado ecológico de tales aguas, y cualquier daño significativo a los ecosistemas terrestres asociados".

La evaluación del recurso disponible requiere, en consecuencia, determinar el volumen de descarga de aguas subterráneas a los ríos, manantiales o al mar necesario para satisfacer los volúmenes ambientales. Para el presente trabajo se ha tomado el recurso disponible estimado en el informe para la Comisión Europea (CHJ, 2005), que resulta de descontar al recurso renovable de cada masa de agua subterránea

los volúmenes ambientales requeridos (véase la tabla 1).

El recurso renovable se calcula por agregación de los siguientes parámetros: la recarga por la infiltración de la lluvia y directa desde los cauces, la recarga por retorno de regadíos, y el 80 por ciento de las entradas laterales subterráneas desde otras masas. El volumen ambiental resulta de la suma de los siguientes parámetros: el caudal ecológico o mínimo en las descargas subterráneas a los cauces, las descargas al mar y a las zonas húmedas, y el 80 por ciento de las descargas subterráneas laterales a otras masas.

Para obtener el recurso disponible se ha considerado que el volumen ambiental no puede superar el volumen del recurso renovable en cada masa de agua subterránea. En algún caso, como en la masa 080.056 Ondara-Denia, los requerimientos ambientales del artículo 26 del texto de disposiciones de contenido normativo del Plan Hidrológico de cuenca del Júcar (CHJ, 1999) podrían conllevar unas necesidades de agua superiores al volumen de recurso renovable calculado para esa masa.

Finalmente, a partir de los valores del recurso disponible y de los bombeos totales de aguas subterráneas se ha obtenido el índice de explotación K de cada masa de agua subterránea costera que se muestra en la tabla 2.

Para el estudio de caracterización de la intrusión marina se ha considerado el valor K=1 como un valor umbral, a partir del cual existe una presión significativa por bombeo en las masas de agua subterránea. Esta condición se cumple en 6 de las 16 masas de agua subterránea costeras.

#### *Índice de densidad de las captaciones subterráneas*

La extracción intensiva de aguas subterráneas en los acuíferos próximos a la costa es una de las actividades humanas que puede favorecer la intrusión marina. El bombeo en los acuíferos costeros, y también en los acuíferos adyacentes de los que éstos se alimentan lateralmente, puede provocar una reducción en las tasas de flujo de aguas subterráneas hacia el mar

CÓDIGO	NOMBRE	RECURSO RENOVABLE	VOLUMEN AMBIENTAL	RECURSO DISPONIBLE
080.007	PLANA DE VINAROZ	65,78	40,00	25,78
080.008	MAESTRAZGO ORIENTAL	292,62	110,92	181,70
080.009	PLANA DE OROPESA-TORREBLANCA	37,76	8,00	29,76
080.021	PLANA DE CASTELLÓN	158,83	74,00	84,83
080.022	PLANA DE SAGUNTO	48,34	29,92	18,43
080.035	PLANA DE VALENCIA NORTE	109,51	41,36	68,15
080.036	PLANA DE VALENCIA SUR	272,51	132,63	139,89
080.044	PLANA DE JARACO	30,20	8,10	22,10
080.045	PLANA DE GANDÍA	45,10	14,75	30,35
080.055	OLIVA-PEGO	20,92	15,45	5,47
080.056	ONDARA-DENIA	13,02	20,10	0,00
080.057	PEÑÓN-MONTGÓ-BERNIA	24,56	0,82	23,73
080.068	DEPRESIÓN DE BENISA	33,79	3,90	29,89
080.069	JÁVEA	1,50	0,10	1,40
080.073	SAN JUAN-BENIDORM	12,02	0,00	12,02
080.079	BAJO VINALOPÓ	14,87	0,00	14,87

Tabla 1: Recurso disponible en las masas de agua subterránea costeras (hm<sup>3</sup>/año)  
 Table 1: Available resources in coastal bodies of groundwater (hm<sup>3</sup>/year)

CÓDIGO	NOMBRE	EXTRACCIÓN TOTAL (hm <sup>3</sup> /año)	RECURSO DISPONIBLE (hm <sup>3</sup> /año)	ÍNDICE DE EXPLOTACIÓN K
080.007	PLANA DE VINARÓZ	40,49	25,76	1,57
080.008	MAESTRAZGO ORIENTAL	36,52	181,70	0,20
080.009	PLANA DE OROPESA-TORREBLANCA	25,39	29,76	0,85
080.021	PLANA DE CASTELLÓN	129,99	84,83	1,53
080.022	PLANA DE SAGUNTO	44,71	18,43	2,43
080.035	PLANA DE VALENCIA NORTE	58,20	68,15	0,85
080.036	PLANA DE VALENCIA SUR	70,72	139,89	0,51
080.044	PLANA DE JARACO	10,15	22,10	0,46
080.045	PLANA DE GANDÍA	25,59	30,35	0,84
080.055	OLIVA-PEGO	21,81	5,47	3,95
080.056	ONDARA-DENIA	21,81	0,00	(>1)
080.057	PEÑÓN-MONTGÓ-BERNIA	9,40	23,73	0,40
080.068	DEPRESIÓN DE BENISA	14,65	29,89	0,49
080.069	JÁVEA	1,53	1,40	1,09
080.073	SAN JUAN-BENIDORM	10,31	12,02	0,86
080.079	BAJO VINALOPO	9,51	14,87	0,64

Tabla 2: Índice de explotación K en las masas de agua subterránea costeras  
 Table 2: Exploitation index K of coastal bodies of groundwater

y un aumento de la salinización por avance de la interfase agua dulce - agua salada hacia el interior.

En algunos casos estas extracciones se efectúan en la proximidad de materiales geológicos salinos evaporíticos que pueden intensificar el proceso de salinización. Con carácter provisional, hasta que finalicen los estudios de cuantificación directa que está efectuando la CHJ, se ha utilizado como indicador de la presión por intrusión marina la densidad de puntos de extracción inventariados que se sitúan en la franja costera de 10 kilómetros de anchura desde la línea de costa hacia el interior (véase la figura 5).

Se ha considerado que existe una presión significativa en la masa de agua subterránea costera cuando en esta franja se alcanza una densidad igual o superior a un punto de extracción por cada 2 kilómetros cuadrados de superficie. Conforme a este criterio se ha establecido la existencia de una presión significativa por extracción de aguas subterráneas próxi-

mas a la costa en 10 de las 16 masas de agua subterránea costeras (véase la figura 6).

#### *Presión global significativa*

En la última fase del proceso de caracterización de presiones sobre las masas de agua subterránea costeras se ha definido el indicador de presión global por intrusión marina a partir del resultado obtenido con los dos indicadores de presión descritos anteriormente. Se ha considerado que una masa de agua subterránea está sometida a una presión global significativa con influencia en la intrusión marina si existe al menos una presión significativa en el análisis de los indicadores de presión. En la tabla 3 se resumen las presiones significativas identificadas en las masas de aguas subterráneas costeras y la presión global significativa resultante.



Figura 5: Captaciones de agua subterránea en una franja de 10 kilómetros de anchura desde la línea de costa hacia el interior de las masas de agua subterránea costeras

*Figure 5: Groundwater abstractions in a 10 kilometres strip from the coastal line towards the interior of coastal bodies of groundwater*



Figura 6: Presión significativa en las masas de agua subterránea costeras conforme al índice de densidad de captaciones subterráneas

*Figure 6: Significant pressure in coastal bodies of groundwater in accordance with the groundwater abstraction density index*

En la figura 7 se ha representado el resultado de la caracterización de las presiones globales significativas por intrusión marina en las masas de agua subterránea costeras.

### **B. Evaluación de impactos por intrusión marina**

Tal como establece la Directiva 2000/60/CE (artículo 5 y anejo II) se ha efectuado un estudio de las repercusiones de la actividad humana sobre el estado de las aguas subterráneas costeras. Con tal propósito se ha considerado con impacto probable las masas de agua subterránea en que posiblemente se incumplan los objetivos medioambientales previstos para el año 2015 por esta causa. Por otra parte, se ha asignado un impacto comprobado a las masas que en la actualidad no cumplen los requisitos de la legislación vigente sobre parámetros indicativos de la calidad de las aguas o están declaradas provisionalmente sobreexplotadas.

Los impactos se han clasificado en cuatro tipos:

impacto comprobado, impacto probable, sin impacto aparente y sin datos. Para la determinación de los impactos probables y comprobados se han analizado los aspectos cuantitativos y químicos por separado, y posteriormente se han combinado para obtener los correspondientes impactos globales por intrusión marina.

#### **B.1 Impacto probable cuantitativo y químico**

El impacto probable por intrusión marina se ha estudiado a partir de los indicadores de impacto cuantitativo y químico. Se describen a continuación los criterios utilizados para seleccionar estos indicadores y el resultado obtenido en la caracterización del impacto probable.

Indicadores del impacto probable cuantitativo

El parámetro indicativo para la definición del estado

CÓDIGO	NOMBRE	PRESIÓN CON INFLUENCIA EN LA INTRUSIÓN MARINA		
		SEGÚN EL ÍNDICE DE EXPLOTACIÓN DE LA MASA DE AGUA SUBTERRÁNEA COSTERA	SEGÚN EL ÍNDICE DE DENSIDAD DE CAPTACIONES EN LA FRANJA COSTERA	PRESIÓN GLOBAL
080.007	PLANA DE VINARÓZ	SIGNIFICATIVA	SIGNIFICATIVA	SIGNIFICATIVA
080.008	MAESTRAZGO ORIENTAL	NO SIGNIFICATIVA	NO SIGNIFICATIVA	NO SIGNIFICATIVA
080.009	PLANA DE DROPESA-TORREBLANCA	NO SIGNIFICATIVA	SIGNIFICATIVA	SIGNIFICATIVA
080.021	PLANA DE CASTELLÓN	SIGNIFICATIVA	SIGNIFICATIVA	SIGNIFICATIVA
080.022	PLANA DE SAGUNTO	SIGNIFICATIVA	SIGNIFICATIVA	SIGNIFICATIVA
080.035	PLANA DE VALENCIA NORTE	NO SIGNIFICATIVA	SIGNIFICATIVA	SIGNIFICATIVA
080.036	PLANA DE VALENCIA SUR	NO SIGNIFICATIVA	NO SIGNIFICATIVA	NO SIGNIFICATIVA
080.044	PLANA DE JARACO	NO SIGNIFICATIVA	SIGNIFICATIVA	SIGNIFICATIVA
080.045	PLANA DE GANDÍA	NO SIGNIFICATIVA	SIGNIFICATIVA	SIGNIFICATIVA
080.055	OLIVA-PEGO	SIGNIFICATIVA	SIGNIFICATIVA	SIGNIFICATIVA
080.056	ONDARA-DENIA	SIGNIFICATIVA	SIGNIFICATIVA	SIGNIFICATIVA
080.057	PERÓN-MONTGÓ-BERNA	NO SIGNIFICATIVA	NO SIGNIFICATIVA	NO SIGNIFICATIVA
080.068	DEPRESIÓN DE BENISA	NO SIGNIFICATIVA	NO SIGNIFICATIVA	NO SIGNIFICATIVA
080.069	JÁVEA	SIGNIFICATIVA	SIGNIFICATIVA	SIGNIFICATIVA
080.073	SAN JUAN - BENDORN	NO SIGNIFICATIVA	NO SIGNIFICATIVA	NO SIGNIFICATIVA
080.079	BAJO VINALOPÓ	NO SIGNIFICATIVA	NO SIGNIFICATIVA	NO SIGNIFICATIVA

Tabla 3: Caracterización de la presión global significativa por intrusión marina en las masas de agua subterránea costeras  
 Table 3: Characterisation of the total significant pressure of marine intrusion in coastal bodies of groundwater

cuantitativo de las aguas subterráneas, conforme a la normativa europea, es el nivel del agua subterránea. Se debe garantizar el buen estado de la masa de agua subterránea de tal modo que la tasa media anual de extracción a largo plazo no rebase los recursos disponibles de aguas subterráneas, ya que la extracción intensiva puede ocasionar problemas por el descenso continuado de los niveles piezométricos.

El indicador del impacto probable cuantitativo se ha definido a partir de la evolución de niveles piezométricos, de forma que se consideran masas con impacto probable cuantitativo aquellas en las que se constata la existencia de descensos significativos debidos a la acción humana por bombeos de aguas subterráneas. Para su determinación se ha efectuado

el análisis de tendencias en los puntos de control representativos, con series históricas largas de más de 10 años registros, y se han interpretado aplicando el criterio de experto (véase la figura 8).

En segundo indicador del impacto probable cuantitativo se ha definido a partir del estudio de las cotas de los niveles piezométricos recientes con respecto al nivel medio del mar. Este estudio se ha apoyado en los resultados del mapa general de piezometría descrito anteriormente y en el análisis de los niveles recientes de los piezómetros situados en la franja costera. Se ha considerado que existe un impacto probable cuantitativo cuando los niveles piezométricos recientes de una masa de agua subterránea costera se encuentran deprimidos con respecto al nivel



Figura 7: Presión global por intrusión marina en las masas de agua subterránea costeras  
 Figure 7: Total pressure of marine intrusion in coastal bodies of groundwater

medio del mar, ya que se trata de una situación propensa para el avance de la cuña salina desde el mar hacia el interior del borde litoral.

#### Indicadores del impacto probable químico

La evaluación del impacto probable químico de las masas de agua subterránea se ha realizado siguiendo las disposiciones del punto 2.3.2 del anejo V de la Directiva 2000/60/CE, que establece las siguientes condiciones para alcanzar el buen estado químico:

- Indicadores generales: las concentraciones de los agentes contaminantes no rebasan las normas de calidad aplicables, y por lo tanto, no impiden que las masas de agua superficiales y los ecosistemas terrestres asociados alcancen los objetivos ambientales asociados especificados.
- Conductividad: las variaciones no indican salinidad u otras intrusiones

La existencia de un impacto probable químico por intrusión marina en las masas de agua subterránea se ha determinado a partir de los parámetros de concentración en cloruros y conductividad proporcionados para el periodo 2000-2006 por la red de observación de la intrusión, que se muestrea con una cadencia

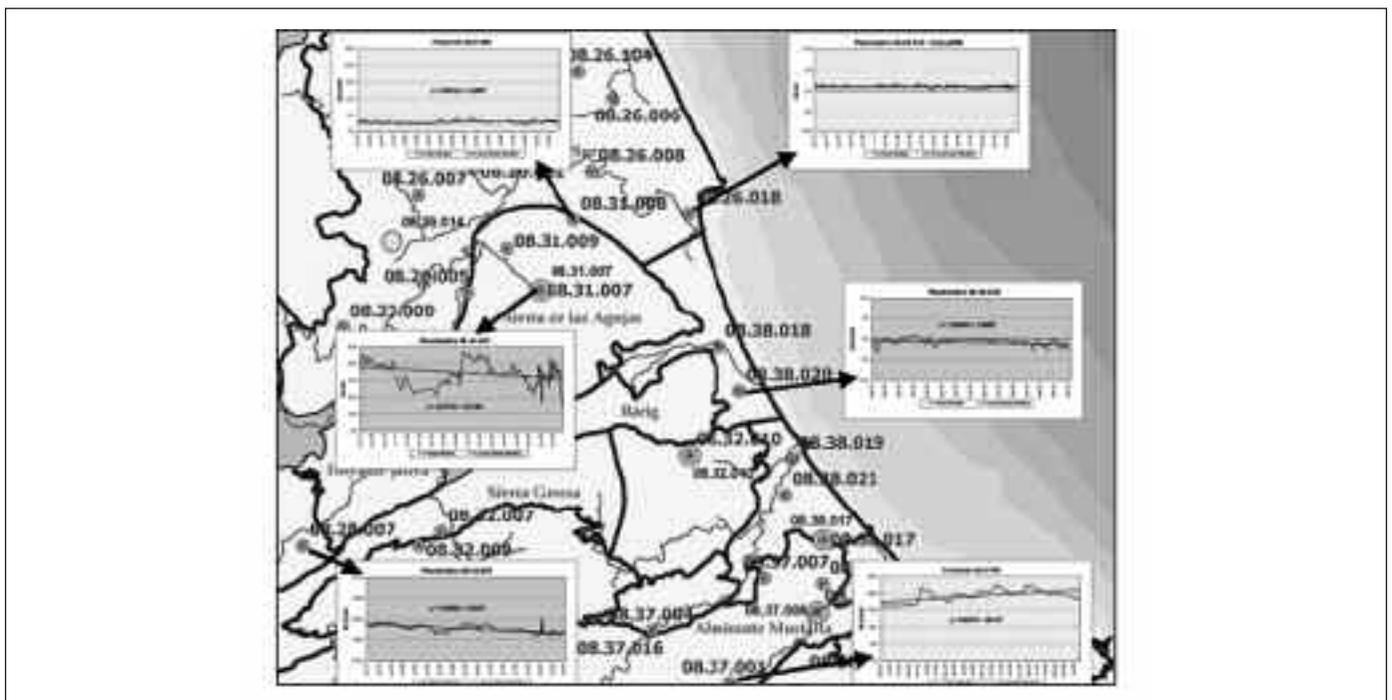


Figura 8: Hidrogramas y análisis de tendencias piezométricas en los puntos de control piezométrico de las masas de agua subterránea costeras  
 Figure 8: Hydrographs and piezometric trends analysis of piezometric control points in coastal bodies of groundwater

semestral. La cobertura espacial de esta red se ha complementado con la que proporcionan los puntos de la red de la calidad de las aguas subterráneas situados en la franja costera. Para obtener resultados representativos se ha impuesto una doble restricción a los datos registrados: en el periodo estudiado cada punto de control debe disponer de, al menos, dos medidas del parámetro correspondiente, y en cada masa de agua subterránea se debe disponer de, al menos, dos puntos de control representativos.

En los puntos seleccionados se ha calculado el valor de la mediana correspondiente a cada parámetro, y el valor promedio de cada masa se ha calculado a partir de las medianas de los puntos correspondientes.

Por último se ha caracterizado el impacto probable químico para cada parámetro y masa de agua subterránea. Como estimación preliminar, en aplicación del principio de precaución y teniendo en cuenta que en la zona litoral de la cuenca del Júcar se localizan la mayor parte de las captaciones para abastecimiento urbano, se ha establecido el valor umbral de conductividad en 2.500 microSiemens/centímetro y el de concentración en cloruros en 250 miligramos/litro, conforme a los valores de los parámetros indicadores

del anexo I del Real Decreto 140/2003, de 7 de febrero, por el que se establecen los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano. Está previsto avanzar en esta línea de trabajo para definir con mayor precisión estos valores umbral en el ámbito de la cuenca del Júcar, a la escala de masa de agua subterránea, a partir de los resultados del análisis estadístico efectuado en las series históricas de cloruros y conductividades.

### B.2 Impacto comprobado cuantitativo y químico

Los impactos comprobados por intrusión marina se han caracterizado conforme a la aplicación de la normativa vigente sobre el estado cuantitativo y químico, a partir de los indicadores que se describen a continuación.

#### Indicador del impacto comprobado cuantitativo

Se considera que una masa de agua subterránea tiene un impacto comprobado cuantitativo si, conforme al procedimiento establecido en la normativa de

IMPACTO GLOBAL (PROBABLE O COMPROBADO)		IMPACTO (INDICADOR A)		
		SI	NO	SIN DATOS
IMPACTO (INDICADOR B)	SI	SI	SI	SI
	NO	SI	NO	NO
	SIN DATOS	SI	NO	SIN DATOS

Tabla 4: Matriz para la determinación del impacto global mediante la combinación de los aspectos cuantitativo y químico de los impactos  
 Table 4: Matrix for the determination of the total impact by the combination of quantitative and chemical aspects of the impacts

IMPACTO		IMPACTO GLOBAL COMPROBADO		
		SI	NO	SIN DATOS
IMPACTO GLOBAL PROBABLE	SI	IMPACTO COMPROBADO	IMPACTO PROBABLE	IMPACTO PROBABLE
	NO	IMPACTO COMPROBADO	SIN IMPACTO	SIN DATOS
	SIN DATOS	IMPACTO COMPROBADO	SIN DATOS	SIN DATOS

Tabla 5: Criterios de combinación de impactos para las masas de agua subterránea costeras  
 Table 5: Criteria for the combination of impacts for coastal bodies of groundwater

aguas, se ha aprobado una declaración formal de sobreexplotación. En las masas de agua subterránea costeras de la cuenca del Júcar no se da esta situación y, por lo tanto, se ha considerado que no presentan impacto comprobado cuantitativo.

**Indicador del impacto comprobado químico**

El indicador de existencia de un impacto comprobado químico en las masas de agua subterránea es la superación de los valores establecidos en la normativa vigente sobre calidad del agua. En la actualidad no existen en la normativa valores umbral para los parámetros que permiten caracterizar la intrusión marina

y, por lo tanto, se ha considerado que no existe impacto comprobado químico en las masas de agua subterránea costeras de la cuenca del Júcar.

**B.3 Criterios para la determinación del impacto global por intrusión marina**

El impacto por intrusión marina en cada masa de agua subterránea costera se ha obtenido mediante la combinación de los indicadores de impacto descritos anteriormente, siguiendo los criterios que se muestran en la tabla 4.

Esta matriz de combinación se ha aplicado en las sucesivas fases de la evaluación para obtener el

CÓDIGO	NOMBRE	EVALUACIÓN DE IMPACTOS CON INFLUENCIA EN LA INTRUSIÓN MARINA		
		IMPACTO PROBABLE GLOBAL	IMPACTO COMPROBADO GLOBAL	IMPACTO GLOBAL
080.007	FLANA DE VINARÓZ	PROBABLE	PROBABLE	PROBABLE
080.008	MAESTRAZGO ORIENTAL	SIN IMPACTO	SIN IMPACTO	SIN IMPACTO
080.009	FLANA DE ORDPESA-TORREBLANCA	PROBABLE	PROBABLE	PROBABLE
080.021	FLANA DE CASTELLÓN	PROBABLE	PROBABLE	PROBABLE
080.022	FLANA DE SAGUNTO	PROBABLE	PROBABLE	PROBABLE
080.035	FLANA DE VALENCIA NORTE	PROBABLE	SIN IMPACTO	PROBABLE
080.036	FLANA DE VALENCIA SUR	PROBABLE	SIN IMPACTO	PROBABLE
080.044	FLANA DE JARACO	PROBABLE	PROBABLE	PROBABLE
080.045	FLANA DE GANDÍA	PROBABLE	SIN IMPACTO	PROBABLE
080.055	OLIVA-PEGO	PROBABLE	PROBABLE	PROBABLE
080.056	ONDARA-BENIA	PROBABLE	SIN IMPACTO	PROBABLE
080.057	PEÑÓN-MONTGÓ-BERNA	SIN IMPACTO	SIN IMPACTO	SIN IMPACTO
080.068	DEPRESIÓN DE BENISA	PROBABLE	SIN IMPACTO	PROBABLE
080.069	JÁVEA	PROBABLE	PROBABLE	PROBABLE
080.073	SAN JUAN - BENDORM	SIN DATOS	SIN DATOS	SIN DATOS
080.079	BAJO VINALOPÓ	SIN DATOS	SIN DATOS	SIN DATOS

Tabla 6: Evaluación del impacto por intrusión marina en las masas de agua subterránea costeras  
 Table 6: Impact assessment of marine intrusion in coastal bodies of groundwater

RIESGO		IMPACTO			
		COMPROBADO	PROBABLE	SIN IMPACTO	SIN DATOS
PRESIÓN	SIGNIFICATIVA	RIESGO SEGURO	RIESGO SEGURO	RIESGO NULO	RIESGO EN ESTUDIO
	NO SIGNIFICATIVA		RIESGO EN ESTUDIO		RIESGO NULO
	SIN DATOS		RIESGO SIN DEFINIR		

Tabla 7: Determinación del nivel de riesgo mediante combinación de presión e impacto, conforme a los criterios de informe para la Comisión Europea

Table 7: Determination of the risk level by combination of pressure and impact according to the criteria of the report for the European Commission

impacto probable global y el impacto comprobado global por intrusión marina, conforme se describe a continuación.

- Evaluación del impacto probable cuantitativo, mediante la combinación de los indicadores de evolución piezométrica y del nivel piezométrico reciente con respecto al nivel del mar.
- Evaluación del impacto probable químico, mediante la combinación de los indicadores de salinización conforme a los umbrales de contenido en cloruros y de conductividad de las aguas subterráneas.
- Evaluación del impacto probable global por intrusión marina, mediante la combinación de los impactos obtenidos en (1) y (2).
- Evaluación del impacto comprobado cuantitativo, conforme a la normativa de declaración formal de sobreexplotación.
- Evaluación del impacto comprobado químico, conforme al cumplimiento de la normativa vigente de aplicación sobre calidad química.
- Evaluación del impacto comprobado global por intrusión marina, mediante la combinación de los impactos obtenidos en (4) y (5).

Tras la identificación de los impactos globales (probable y comprobado) se ha caracterizado, finalmente, la categoría del impacto resultante en cada masa de agua subterránea por intrusión marina mediante los criterios de combinación de impactos globales de la tabla 5, de la que se obtienen cuatro tipos posibles de impacto: con impacto comprobado, con impacto probable, sin impacto y sin datos.

Con esta metodología se ha obtenido la evalua-

ción del impacto por intrusión marina en la cuenca del Júcar que se muestra en la tabla 6, de la que resultan 12 masas con impacto probable, 2 sin impacto y 2 sin datos.

### C. Evaluación del riesgo de no alcanzar los objetivos medioambientales por intrusión marina

El riesgo por intrusión salina desde el mar en cada masa de agua subterránea se ha obtenido mediante la matriz propuesta recientemente (abril de 2007) por el Ministerio de Medio Ambiente para la combinación de la presión y del impacto que caracteriza a cada masa (véase la tabla 7), dando lugar a tres niveles de riesgo conforme a los criterios de informe para la Comisión Europea: riesgo seguro, riesgo en estudio y riesgo nulo. Esta matriz considera "riesgo sin definir" cuando no existen datos de presión ni de impacto, supuesto que no aplica en el presente estudio de intrusión marina en la cuenca del Júcar.

En la tabla 8 se muestra el resultado obtenido en las 16 masas de agua subterránea costeras, con 10 masas en riesgo seguro por intrusión marina como resultado de haberse identificado un impacto comprobado por intrusión marina, o bien por estar sometida la masa a un impacto probable y a una presión significativa.

La figura 9 muestra la distribución del riesgo de no alcanzar en 2015 los objetivos medioambientales por intrusión marina en las masas de agua subterránea costeras de la cuenca del Júcar.

En la tabla 9 se observa que 10 de las 16 masas de

CÓDIGO	NOMBRE	RIESGO POR INTRUSIÓN MARINA
080.007	PLANA DE VINARÓZ	SEGURO
080.008	MAESTRAZGO ORIENTAL	NULO
080.009	PLANA DE OROPESA-TORREBLANCA	SEGURO
080.021	PLANA DE CASTELLÓN	SEGURO
080.022	PLANA DE SAGUNTO	SEGURO
080.035	PLANA DE VALENCIA NORTE	SEGURO
080.036	PLANA DE VALENCIA SUR	EN ESTUDIO
080.044	PLANA DE JARACO	SEGURO
080.045	PLANA DE GANDÍA	SEGURO
080.055	OLIVA-PEDO	SEGURO
080.056	ONDARA-DENIA	SEGURO
080.057	PEÑON-MONTGO-BERNIA	NULO
080.068	DEPRESIÓN DE BENISA	EN ESTUDIO
080.069	JÁVEA	SEGURO
080.073	SAN JUAN - BENIDORM	NULO
080.079	BAJO VINALOPÓ	NULO

Tabla 8: Evaluación del riesgo por intrusión marina en las masas de agua subterránea costeras  
 Table 8: Risk assessment by marine intrusion in coastal bodies of groundwater

agua subterránea costeras se encuentran en riesgo de intrusión marina y representan el 62,5 por ciento con respecto al total. El restante 37,5 por ciento se distribuye entre las 4 masas a las que se les ha asignado riesgo nulo por intrusión marina, y las 2 masas con riesgo en estudio, en las que sería necesario obtener información suplementaria para la caracterización de este proceso.

*Modelos agregados de simulación de los acuíferos costeros*

Se ha elaborado un modelo agregado de cada acuífero costero como instrumento de apoyo para efectuar un análisis sobre el grado de correlación existente entre las descargas subterráneas teóricas que se pro-

ducen hacia el mar y el avance o retroceso de la interfase agua dulce-agua salada a partir de las correspondientes series piezométricas y de parámetros físico-químicos de las aguas subterráneas. El objetivo final de estos trabajos, que actualmente se encuentran en su fase inicial, es evaluar la posibilidad de definir indicadores de la evolución del proceso a escala anual o plurianual.

El modelo agregado de cada acuífero costero se ha elaborado a partir del modelo conceptual de cada acuífero, en el que se ha integrado tanto la información procedente de los estudios previos (MMA, 2000; ITGE, 2000) como los resultados de las evaluaciones del recurso efectuadas por la CHJ y las series de datos disponibles en Geshidro. Se ha calculado el balance hidrológico anual de cada acuífero costero correspondiente al periodo 1974-2002 con los



Figura 9: Niveles de riesgo por intrusión marina de las masas de agua subterránea costeras  
 Figure 9: Risk levels by marine intrusion of coastal bodies of groundwater

siguientes términos: como volúmenes de entrada se han considerado la infiltración por precipitación, la infiltración desde los cauces fluviales, los retornos de riego y las recargas laterales del acuífero; y como volúmenes de salida se han contabilizado los bombes brutos de aguas subterráneas, las descargas por

cauces, manantiales y zonas húmedas, y las descargas laterales.

Las condiciones de contorno se han simplificado en un esquema de “entradas por salidas” en cada balance anual, con el objeto de estimar el volumen drenado al mar como una fracción de las salidas laterales del sistema.

Como criterio de contraste se han comparado los volúmenes drenados subterráneamente al mar obtenidos mediante modelos agregados para este periodo con los obtenidos en el modelo de simulación del ciclo hidrológico “Patrical” (Pérez, 2005) aplicado al ámbito de la CHJ en régimen alterado para el mismo periodo, obteniéndose una alta correlación lineal (véase la figura 10).

Posteriormente se ha efectuado un análisis estadístico de correlación lineal entre los valores obtenidos para las salidas subterráneas al mar en cada masa de agua subterránea costera y los datos de piezometría, de conductividad y de concentración en cloruros en las aguas subterráneas procedentes de los puntos de control de la correspondiente masa.

En el análisis inicial se han obtenido, en general, bajos coeficientes de correlación entre los volúmenes anuales drenados al mar y los correspondientes valores medios de piezometría, de concentración en cloruros y de conductividad en todas las masas de agua subterránea costeras de la CHJ.

Se observa, asimismo, que los coeficientes suelen ser de signo positivo cuando se comparan los volúmenes de drenaje subterráneo al mar y los niveles piezométricos (véase la figura 11), mientras que presentan signo negativo cuando se comparan los volúmenes drenados con respecto a las concentraciones en cloruros y la conductividad. Estas pautas generales serán objeto de análisis de detalle en posteriores

RIESGO POR INTRUSIÓN MARINA	NÚMERO DE MASAS DE AGUA SUBTERRÁNEA COSTERAS	PORCENTAJE CON RESPECTO AL TOTAL
RIESGO SEGURO	10	62,5
RIESGO EN ESTUDIO	2	12,5
RIESGO NULO	4	25,0

Tabla 9: Resumen de la evaluación del riesgo por intrusión marina en las masas de agua subterránea costeras  
 Table 9: Summary of the risk assessment for marine intrusion in coastal bodies of groundwater



Figura 10: Correlación entre el volumen de salida al mar obtenido por el modelo agregado y el modelo Patrical en la masa 080.008 Maestrazgo Oriental

*Figure 10: Correlation between outgoing volume to the sea obtained by the aggregated model and Patrical model in the body of groundwater 080.008 Maestrazgo Oriental*

trabajos en el marco de la planificación hidrológica con el objetivo de establecer unos indicadores de la evolución de la cuña salina desde el mar.

En síntesis, el análisis efectuado hasta el momento ha puesto de manifiesto, una vez más, la gran complejidad e inercia que caracteriza el proceso de intrusión marina y la utilidad de las herramientas de modelación que se irán desarrollando y alimentando con nueva información procedente de nuevos puntos de control y de nuevos parámetros a controlar en la red de intrusión, en el marco de los trabajos de la planificación hidrológica.

## Conclusiones

La metodología desarrollada para la adaptación a las obligaciones de las Directivas 2000/60/CE y 2006/118/CE ha permitido evaluar el riesgo por intrusión marina en las masas de agua subterránea situadas en la franja costera de la cuenca del Júcar a partir de la definición y caracterización de los parámetros indicadores de las presiones e impactos de las actividades humanas que tienen incidencia en el avance de la cuña salina desde el mar.

La definición de los modelos conceptuales de los acuíferos costeros y el uso de diversas herramientas informáticas integradas en el sistema de información

hidrológica Geshidro de la Confederación Hidrográfica del Júcar han permitido analizar e interpretar la abundante información disponible procedente tanto de la red de control de piezometría, como de las dos redes en las que se controla la evolución de los parámetros físico-químicos: red de observación de la intrusión y red de calidad de las aguas subterráneas.

El análisis estadístico preliminar de los datos físico-químicos históricos de las redes de observación de la intrusión y de calidad de aguas subterráneas permite concluir que las series disponibles son útiles para conocer los órdenes de magnitud en cada masa de agua subterránea costera y su evolución a lo largo de un período temporal considerablemente largo, con más de 30 años de registros en algunos casos.

Asimismo, el análisis espacial y temporal de las series largas puede ser útil para estimar los niveles de referencia de salinidad en condiciones próximas al régimen natural. No obstante, el resultado del análisis de validación de las series disponibles también indica que los valores registrados se deben considerar con ciertas cautelas a la hora de efectuar interpretaciones sobre las variaciones puntuales en el frente de intrusión salina desde el mar.

Los análisis estadísticos que se han efectuado hasta el momento sobre las series históricas ponen de manifiesto la complejidad que conlleva la caracterización del proceso de intrusión marina, así como la conveniencia de efectuar análisis multiparámetros para determinar el grado de correlación existente entre los indicadores del estado cuantitativo y químico de las masas de agua subterránea costeras, teniendo en cuenta que los valores aportados por las series históricas presentan importantes incertidumbres y que la intrusión salina producida por las actividades humanas, considerada en sentido amplio, no ha de atribuirse únicamente al avance del frente de intrusión desde el mar.

Además, es necesario continuar con los trabajos ya iniciados con el fin de definir un indicador que permita evaluar y realizar un seguimiento del proceso de intrusión marina así como estimar el volumen ambiental para prevenir el avance de la cuña salina y mantener los ecosistemas asociados.

El diagnóstico resultante de este estudio también ha servido como referencia para la formulación de propuestas de adaptación y ampliación de las redes de control cuantitativo y químico conforme a las Directivas 2000/60/CE y 2006/118/CE. Estas actuaciones, junto con el desarrollo de aplicaciones informáticas para la simulación del flujo subterráneo y de las variaciones de la salinidad de las aguas subterráneas en el marco de los trabajos de la planificación hidro-

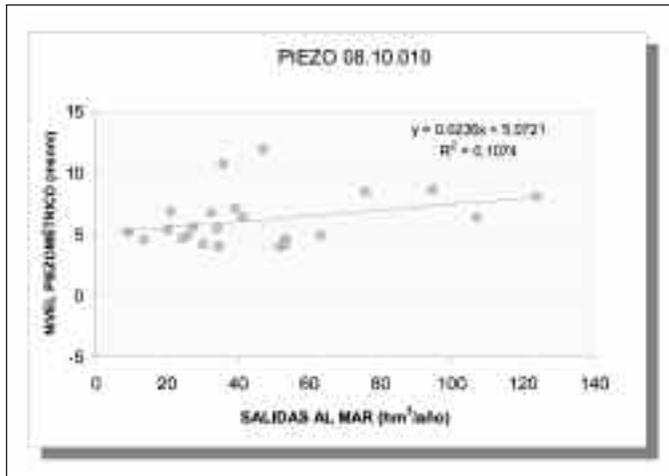


Figura 11: Correlación entre los volúmenes de salidas al mar estimadas mediante el modelo Patricial y el nivel piezométrico medio en un punto de control de la masa 080.007 Plana de Vinaroz  
 Figure 11: Correlation between outgoing volume to the sea obtained by the Patricial model and the average piezometric level in a control point of the body of groundwater 080.007 Plana de Vinaroz

lógica, permitirán incrementar progresivamente el conocimiento sobre el proceso de intrusión marina y servirán de apoyo para la adopción de los programas de medidas que garanticen la protección de las aguas subterráneas en la franja costera de la cuenca del Júcar.

## Referencias

- CEDEX. 1991. *Determinación de las dotaciones de riego en los planes de regadío de la cuenca del Júcar*. Centro de Estudios y Experimentación. Ministerio de Obras Públicas y Transportes.
- CHJ. 1999. *Plan Hidrológico de la cuenca del Júcar*. Confederación Hidrográfica del Júcar. Ministerio de Medio Ambiente. Depósito legal V-3211-1999. Valencia.
- CHJ. 2005. *Informe para la Comisión Europea sobre los artículos 5 y 6 de la Directiva Marco del Agua. Demarcación Hidrográfica del Júcar. Abril de 2005*. Ministerio de Medio Ambiente. Confederación Hidrográfica del Júcar. 528 pp. 26/03/2007. [http://www.chj.es/web/pdf/DMA\\_Art5&6\\_Jucar.pdf](http://www.chj.es/web/pdf/DMA_Art5&6_Jucar.pdf).
- Custodio, E., 2005. Myths about seawater intrusion in coastal aquifers. In: *Groundwater and Saline Intrusion*, 18 SWIM, Cartagena 2004. Instituto Geológico y Minero de España. Serie: *Hidrogeología y Aguas Subterráneas*, 15. Madrid. 599–608.
- Diario Oficial de la Comunidad Europea. 2000. *Directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de octubre de 2000, por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas*. Diario Oficial L 327 de 22.12.2000.
- Diario Oficial de la Unión Europea. 2006. *Directiva 2006/118/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 12 de diciembre de 2006, relativa a la protección de las aguas subterráneas contra la contaminación y el deterioro*. Diario Oficial L 372 de 27.12.2006.
- EC. 2003. *Guidance Document No. 3, Analysis of Pressures and Impacts*. Common Implementation Strategy for the Water Framework Directive 2000/60/CE. Working Group 2.1 IMPRESS. European Commission. 149 pp.
- Estrela, T. 2003. *La evaluación de las guías de la Directiva Marco europea en política de aguas en aspectos relacionados con las aguas subterráneas en la cuenca del Júcar, España*. Confederación Hidrográfica del Júcar. 15 pp. 26/03/2007. <http://www.chj.es/web/pdf/DMApilotojuc4ESP.pdf>.
- Ferrer, J. 2004. *La Directiva Marco del Agua y las aguas subterráneas*. Jornadas técnicas sobre sondeos de captación de aguas subterráneas. Secretaría General de Agricultura y Alimentación. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. 56 pp. 26/03/2007. <http://www.chj.es/CPJ3/REUNIONES/descarga/DMA-Madrid1.pdf>.
- ITGE, 2000. *Unidades hidrogeológicas de España. Mapa y datos básicos*. Instituto Tecnológico Geominero de España. Ministerio de Ciencia y Tecnología. 34 pp., mapa y CD-ROM.
- MMA. 2000. *Libro Blanco del Agua en España*. Ministerio de Medio Ambiente. 637 pp. y CD-ROM.
- MMA. 2005. *Manual para la identificación de las presiones y análisis del impacto en aguas superficiales*. Dirección General del Agua. Ministerio de Medio Ambiente. Febrero de 2005. 63 pp.
- MOPT. 1992. *Orden de 24 de septiembre de 1992 por la que se aprueban las instrucciones y recomendaciones técnicas complementarias para la elaboración de los Planes Hidrológicos de cuencas intercomunitarias*. Ministerio de Obras Públicas y Transportes. Boletín Oficial del Estado, 249/1992 de 16-10-1992, p. 35023.
- Morell, I. y Hernández, F. 2000. *El agua en Castellón: un reto para el siglo XXI*. Athenea. Publicacions de la Universitat Jaume I. 538 pp.
- MP. 2003. *Real Decreto 140/2003, de 7 de febrero, por el que se establecen los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano*. Ministerio de la Presidencia. Boletín Oficial del Estado, 45/2003, de 21-2-2003. p. 7228- 7245.
- Pérez, M.A. 2005. *Modelo distribuido de simulación del ciclo hidrológico y calidad del agua, integrado en sistemas de información geográfica, para grandes cuencas. Aportación al análisis de presiones e impactos de la Directiva Marco del Agua*. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Valencia. 387 pp.

Recibido: marzo 2007  
 Aceptado: agosto 2007