

Aplicación de la tomografía remota térmica a la investigación de la hidrogeología y dinámica de flujos de las aguas subterráneas de la cuenca del río Júcar

Fernando Esteban Moratilla

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Dirección General del Agua. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente

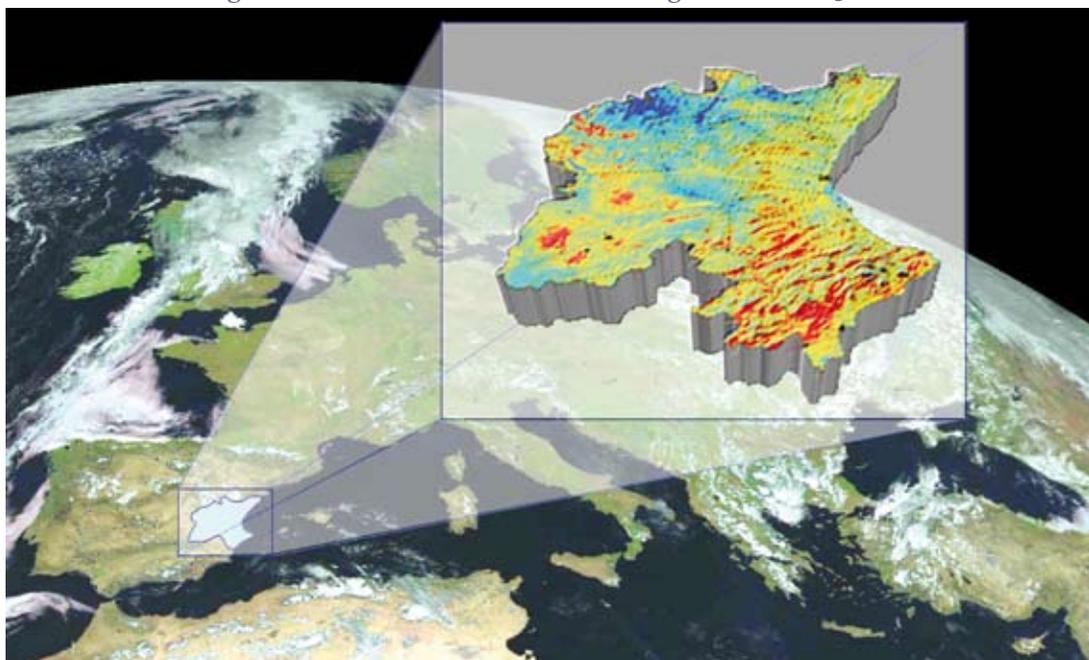
Carlos Manuel Ordóñez Pérez

Ingeniero del ICAI. Técnicas de Investigación Hidrogeológica, S.A. THIGSA

La Cuenca Hidrográfica del río Júcar comprende todas las cuencas que vierten al mar Mediterráneo, entre la margen izquierda de la Gola

del Segura, en su desembocadura, y la desembocadura del río Cenia, además de la cuenca endorreica de Pozohondo.

Figura 1. Ubicación de la cuenca hidrográfica del río Júcar



La extensión total es de 42 988,6 km² y se extiende por las provincias de Albacete, Alicante, Castellón, Cuenca, Valencia y Teruel, además de una pequeña zona en la provincia de Tarra-gona.

Dentro de la cuenca hidrográfica se diferencian dos zonas:

- Interior, montañoso, con altitudes superiores a los 1 500 m.
- Llanuras litorales o “planas”.

Su territorio está sometido a un clima básicamente mediterráneo, caracterizado por un intenso y largo periodo estival. Sin embargo, y debido a la geografía y relieve, se producen marcadas diferencias climáticas, que actúan como efecto regulador de los vientos en superficie y potencian los efectos climáticos zonales (efecto Fohën, efecto de Crestería o las Inversiones térmicas).

Las temperaturas más bajas y precipitaciones más elevadas se dan en las cabeceras de Júcar y Cabriel (Uña: 5°C, 929 mm). Los puntos de menor pluviosidad también se deben al relieve como el efecto pantalla de las sierras Béticas sobre la franja meridional seca o el entorno cerrado por montañas en el caso de Ayora-Cofrentes y Utiel-Requena.

En estas circunstancias el territorio puede definirse de manera global como una zona semiárida o incluso árida. La humedad del suelo es pobre y más teniendo en cuenta que la precipitación es de tipo convectivo, lo que ocasiona un estado de gran fragilidad frente a los procesos erosivos de los suelos.

La red fluvial que constituye la Confederación Hidrográfica del Júcar tienen un régimen marcadamente mediterráneo, con sólo tres ríos que superan un caudal medio de 10 m³/s, el Mi-jares, el Turia y el Júcar, siendo el Júcar el más caudaloso, con una aportación media de 1 825 hm³ anuales, si bien entre los tres alcanzan el 80% de los recursos superficiales existentes en la cuenca.

En cuanto a los recursos subterráneos suponen aproximadamente el 50% de los recursos totales aunque es necesario tener en cuenta algunos casos de sobreexplotación en ciertas zonas.

Los datos correspondientes a la caracterización inicial de las aguas subterráneas permiten concretar que el recurso disponible es de 396,63 hm³/año y las extracciones totales alcanzan los 379,92 hm³/año.

Si bien el recurso disponible supera a las demandas en términos generales en frecuentes ocasiones, asociadas a la estacionalidad y la irregularidad de las precipitaciones, la cuenca soporta un significativo “estrés hídrico” agravándose en los periodos de sequía. En estas circunstancias, la cuenca presenta un cada vez mayor riesgo de desertización, que llega a alcanzar un preocupante porcentaje elevado de su superficie.

EL PROYECTO Y SUS OBJETIVOS

En el año 2004, la Administración Pública de España, a través del Departamento responsable del medio ambiente, inicia una campaña de búsqueda de nuevos sistemas de detección de aguas subterráneas, para mejorar el conocimiento de las zonas susceptibles de ofrecer nuevos recursos, en el caso de que los habituales vieran mermada su disponibilidad.

En el transcurso de esta investigación tecnológica se vio la posibilidad de poner en práctica la técnica, basada en la Tomografía Remota Térmica, desarrollada por el Instituto de Tecnología Aeroespacial de Rusia para detectar la existencia de flujos fríos y calientes en la corteza terrestre, en un rango de 0 a 2 000 metros de profundidad (más tarde se vio la posibilidad de alcanzar los 4 000 metros de profundidad).

Este procedimiento se puso a prueba en dos proyectos piloto:

- La provincia de Madrid y su entorno (8023 km²).

La Tomografía Remota Térmica, desarrollada por el Instituto de Tecnología Aeroespacial de Rusia para detectar la existencia de flujos fríos y calientes en la corteza terrestre, supone un nuevo sistema de detección de aguas subterráneas, para mejorar el conocimiento de las zonas susceptibles de ofrecer nuevos recursos, en el caso de que los habituales vieran mermada su disponibilidad

- El Maestrazgo y La Plana en la provincia de Castellón (5 100 km²).

Dado que los estudios piloto, realizados durante el año 2005, dieron resultados positivos, se optó por abordar una investigación completa de una cuenca hidrográfica: la del río Segura. La investigación realizada entre los años 2006 y 2008 incluyó no solo la superficie de la cuenca (19 525 km²) sino también una banda limítrofe para que ninguna unidad hidrogeológica quedase partida en el estudio. En total se estudiaron más de 27 000 km².

Una vez reconocida la calidad de la información suministrada por esta tecnología, en el año 2008 se inició el proyecto de investigación de las características hidrogeológicas de la Cuenca del Júcar, concluyendo a principios del año 2010. La superficie investigada ha sido superior a los 42 989 km² de la cuenca, al incluirse otras superficies terrestres y marinas de su entorno.

El objetivo inicial del estudio es la generación de una cartografía térmica sintetizada de la totalidad de la Cuenca del Júcar, con representación hasta una profundidad máxima de 3 500-4 000 metros y discriminada mediante cortes tomográficos distribuidos aproximadamente cada 100 m.

A partir de esta cartografía térmica y de la interpretación de los tomogramas se identifican los cuerpos geológicos profundos y las unidades hidrogeológicas de toda el área de estudio, así como sus límites, el funcionamiento hidrogeológico (recarga y descarga) y la identificación de las zonas o sectores de mayor interés para su posible explotación, siendo estos los objetivos científicos del trabajo.

A partir de esta información se ha podido:

1. Determinar la geometría y caracterización de las masas de agua subterránea en profundidad.
2. Identificar y localizar las zonas saturadas y no saturadas de cada masa de agua y, como resultado de ello y de su geometría, la valoración de sus posibilidades hidrogeológicas.
3. Establecer el funcionamiento hidrogeológico del intercambio de flujos profundos entre masas de agua (de especial interés en las unidades intercuencas) y de posibles procesos de sobreexplotación y salinización (caso de los acuíferos costeros).

Con toda esta información adicional, debidamente analizada de manera conjunta con otras técnicas de investigación tradicionales (como interpretaciones geológico-estructurales e hidrogeológicas), se ha mejorado el conocimiento del sistema hidrogeológico de todas las unidades de la cuenca, así como de la valoración de sus disponibilidades de recursos hídricos, de cara a poder determinar sus posibilidades reales de explotación racional.

Bajo la dirección del entonces Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino de la Administración Pública española, la ejecución del proyecto fue encomendada a la empresa Técnicas de Investigación Hidrogeológica S.A. (TIHGSA).

El soporte científico fue suministrado por un equipo de expertos en la materia, constituido específicamente por científicos de la Academia

de Ciencias, y del Instituto de Tecnología Aeroespacial de la Federación Rusa y se ha contado con la colaboración de la Facultad de Física de la Universidad Estatal de Kazán.

EL ENFOQUE Y LA METODOLOGÍA

En síntesis, la técnica denominada Tomografía Remota Térmica permite determinar las anomalías térmicas del subsuelo en base a la información suministrada directamente por el nivel de variación de la capacidad de radiación térmica profunda de las zonas investigadas.

Estas anomalías térmicas, frías o calientes, a través de los algoritmos correspondientes, son interpretadas como zonas susceptibles de contener flujos o almacenes de agua en el subsuelo. Y por tanto, la acotación de estas anomalías permite determinar las zonas donde más probabilidad hay de encontrar acuíferos explotables.

El concepto de **tomografía**, al que hace referencia esta técnica, se refiere a la capacidad para determinar las características de la radiación térmica en cortes dados cada 60, 90 o 100 metros de profundidad, hasta llegar a la zona límite de investigación (4000 m o el zócalo inalterado subyacente).

El concepto de **remota**, se refiere a que la información se obtiene a partir de las características de la radiación terrestre detectada por sensores montados en satélites comerciales (LANDSAT y TERRA-EOS) (información del espectro electromagnético irradiado por la Tierra en las bandas útiles para este tipo de análisis).

El concepto de **térmica**, se refiere precisamente a las bandas de infrarrojos (próximos, medios y lejanos) que disponen los sensores de los mencionados satélites.

Principios físicos de Tomografía Remota Térmica

La Tomografía Remota Térmica (TRT) se basa en la medición de los campos térmicos en la

superficie terrestre mediante sistemas remotos, ofreciendo datos sobre el campo endogeo-térmico de la Tierra lo que permite la rápida obtención de información sobre la distribución de temperatura mediante sistemas óptico-electrónicos infrarrojos instalados en plataformas cósmicas y/o aéreas.

El sistema parte de la posibilidad de obtener mediante un radiómetro térmico un escenario que visualiza la densidad del flujo integral efectiva ($W \cdot estereoradian/m^2$), cuantificada discretamente en píxeles procedente de la superficie terrestre, que puede ser calibrada respecto a un cuerpo negro perfecto, en una escala de temperatura de radiación expresada en grados Kelvin. Este escenario refleja con mayor precisión, y con un notable incremento de calidad, la radiación de la superficie terrestre motivada por el relieve y por las fuentes geológicas sub-superficiales que corresponden al comportamiento básicamente exogénico.

La Tomografía Remota Térmica permite determinar las anomalías térmicas del subsuelo en base a la información suministrada directamente por el nivel de variación de la capacidad de radiación térmica profunda de las zonas investigadas. Estas anomalías, a través de los algoritmos correspondientes, son interpretadas como zonas susceptibles de contener flujos o almacenes de agua en el subsuelo. Y por tanto, su acotación permite determinar las zonas donde más probabilidad hay de encontrar acuíferos explotables

Por otro lado se conoce que todas las fuentes de calor que actúan sobre la Tierra corresponden a dos grupos: internos (endógenos) y externos (exógenos). Los externos son los flujos térmicos de la Tierra generados bajo la influencia de la radiación solar, incendios forestales y de la acción de sistemas industriales y energéticos (acción antrópica). Los internos son los flujos de calor generados por la transformación de los elementos radioactivos, compresión y tensión gravitacional, transformaciones de cristalización y polimórficas, transformaciones de fase y reacciones químicas. Estas fuentes de calor también se generan cuando existe actividad volcánica e hidrotermal, en la combustión de los recursos naturales y en la oxidación de yacimientos sulfúricos.

Fundamentos tecnológicos

El calor emitido por la superficie terrestre se compone del calor exógeno del sol, que calienta la capa más superficial, y del calor endógeno de la Tierra. Esta imagen térmica es capturada por el sensor multiespectral ETM+ a bordo del satélite LANDSAT-7, utilizando el canal 6L y 6H del infrarrojo térmico y analizada en combinación con otras imágenes capturadas por el sensor ASTER a bordo del satélite TERRA.

Se procesan los datos extraídos de la imagen IR térmica, que muestra la emitancia monocromática espectral de la Tierra, de acuerdo a su temperatura y comportamiento térmico. Esta imagen representa el calor emitido por los distintos cuerpos del subsuelo.

El tratamiento algorítmico de la información contenida en las imágenes de satélite permite la obtención de información tomográfica endógena a partir de imágenes de la superficie terrestre, así como la obtención de los termogramas en cualquier punto y a cualquier profundidad de la zona estudiada.

Los datos geofísicos obtenidos se interpretan de forma parecida a otras tecnologías geofísicas de campo natural, estudiando, en este caso, el comportamiento térmico de los cuerpos y estructuras geológicas en forma de anomalías y contrastes.

Se estudia la estructura del campo térmico, que presenta anomalías frías y calientes. Estas guardan estrecha relación con los materiales geológicos presentes, las estructuras, la orografía, la recarga hídrica y el movimiento de fluidos, etc.

Las anomalías termodinámicas frías son zonas de elevada permeabilidad y concentración de flujos subterráneos, generalmente descendentes por convección. Se estudia la magnitud de la anomalía, su prolongación en profundidad y su comunicación con zonas de recarga; todo ello dependiente de la geología y la orografía.

Las anomalías termodinámicas calientes son también zonas de elevada permeabilidad, por donde se producen flujos térmicos ascendentes, transportando energía desde zonas más internas de la Tierra. Es importante observar su continuidad en profundidad.

Metodología de interpretación de los resultados

La metodología de trabajo seguida para el análisis de los resultados obtenidos con la Tomografía Remota Térmica (TRT) ha sido la siguiente:

- Se han considerado tres niveles de estudio:

El primer nivel ha sido el de la totalidad de la cuenca hidrográfica, con objeto de poder obtener una visión completa de la distribución térmica y poder realizar un primer análisis comparativo de los grandes dominios geológicos de la cuenca. La escala de trabajo a este nivel de estudio (cuenca hidrográfica completa) ha sido 1:200 000, al considerarse la más adecuada para la visualización de las representaciones gráficas elaboradas (planos tomográficos a diferentes profundidades y perfiles).

El segundo nivel de estudio ha sido una focalización de la investigación en los grandes dominios geológicos identificados en la cuenca en función de sus características geológico-estructurales zonales, que condicionan y caracterizan el funcionamiento hidrogeológico de las unidades y acuíferos que se integran

en ellos. La escala de trabajo a este nivel de estudio (dominios geológicos) ha sido la 1:100 000, que permite el grado de detalle necesario para analizar los resultados obtenidos.

El tercer y último nivel de estudio ha sido el de las unidades hidrogeológicas (52 en total), consideradas estas como “uno o varios acuíferos agrupados a efectos de conseguir una racional y eficaz administración del agua”. La escala de trabajo a este tercer nivel de estudio (unidades hidrogeológicas) ha sido también la 1:100 000, que permite el grado de detalle necesario para analizar los resultados obtenidos.

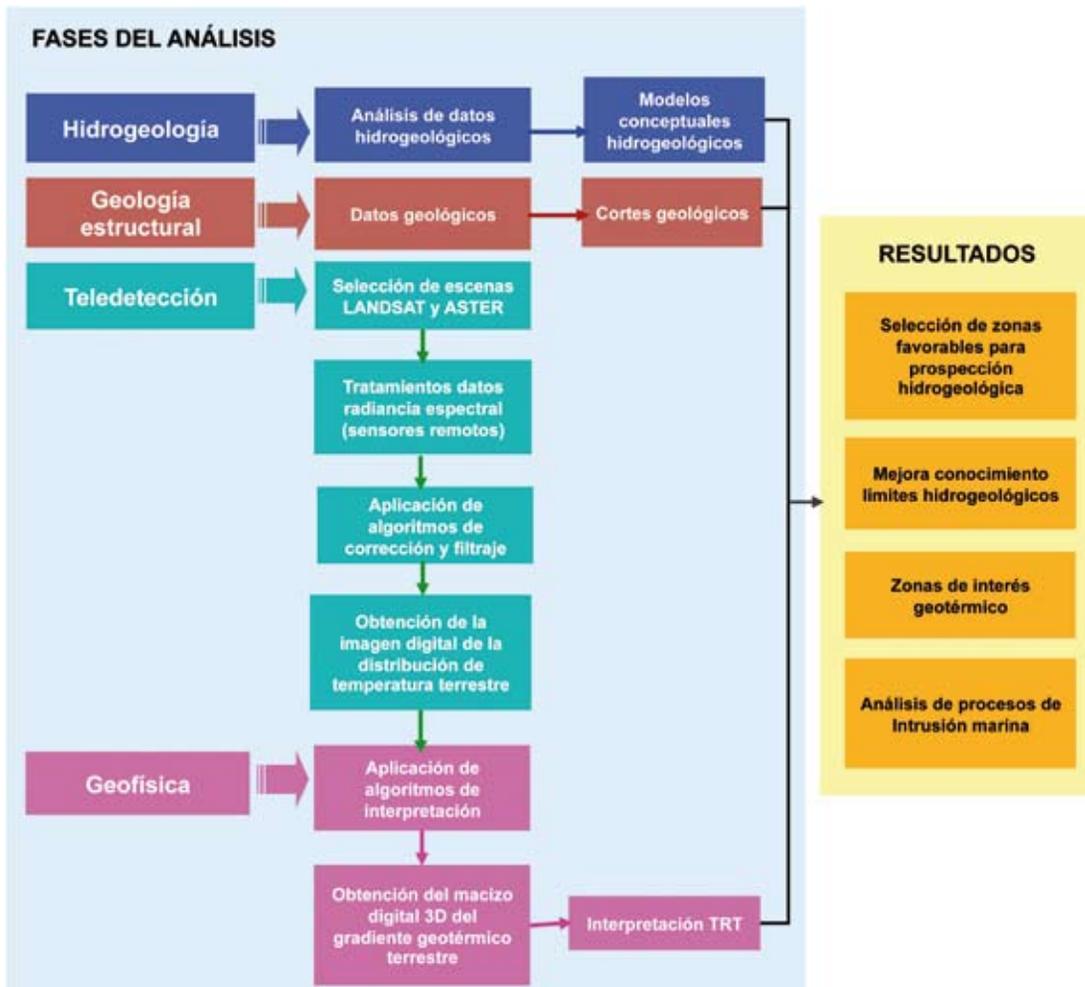
- En los tres niveles de estudio (cuenca, dominios geológicos y unidades hidrogeológicas)

se ha partido de un análisis previo de la información bibliográfica más relevante y actualizada disponible, que ha constituido la base de partida para establecer la caracterización y el funcionamiento hidrogeológico de cada ámbito de estudio y de comparación con los resultados de Tomografía Remota Térmica (TRT).

- La información de TRT se ha procesado de acuerdo con la metodología expuesta y se ha analizado detenidamente por diferentes especialistas (en TRT, geólogos estructuralistas e hidrogeólogos), tras de lo que se han elaborado los diferentes planos temáticos, perfiles, esquemas y memorias resumen.

En el gráfico adjunto se sintetizan las fases principales y la estructura de la investigación.

Figura 2. Fases y flujos del proceso de la investigación TRT Júcar



PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Información sobre límites de funcionamiento hidrogeológico

A grandes rasgos, la Demarcación Hidrográfica del Júcar presenta una serie de dominios hidrogeológicos con ciertos rasgos diferenciadores:

- **Los sistemas hidrogeológicos asociados a las formaciones Béticas (zona 1)** del sector meridional de la Demarcación Hidrográfica del Júcar (Prebético de Alicante-Murcia), donde los sistemas hidrogeológicos presentan una gran compartimentación como consecuencia de la compleja estructura geológica que condiciona su funcionamiento hidrogeológico (límites estructurales), como ocurre con la estructura diapírica del Vinalopó, y las direcciones preferenciales de flujo.
- **Los sistemas cretácicos existentes entre las estructuras diapíricas de Ayora y Buñol y la Falla de Fuente de la Higuera (zona 2).** Corresponde a la zona de entronque de los sistemas transicionales al Prebético y la Cordillera Bética. Aparecen sistemas hidrogeológicos extensos asociados a formaciones del Cretácico Superior (Sierra Grossa, Caroch Norte y Sur, Sierra del Ave, etc.). Estos grandes sistemas acuíferos carbonatados cretácicos descarga de forma natural por manantiales y ríos (Júcar, Albaida, Cañoles, etc.) y por transferencia lateral subterránea hacia la Plana de Valencia. Se trata de sistemas hidrogeológicos con una importante cantidad de recursos hidrogeológicos de buena calidad y que almacenan una muy significativa cantidad de reservas hidrogeológicas, si bien, su capacidad de regulación natural es muy limitada por su elevada transmisividad (sistemas hidrogeológicos de funcionamiento kárstico).
- **Los sistemas jurásico-cretácicos y terciarios carbonatados de la Mancha Oriental (zona 3),** que conforman el mayor sistema hidrogeológico de la DH-Júcar, con descarga preferencial en régimen natural al río Júcar.

Se trata de un sistema hidrogeológico multicapas de gran importancia estratégica, que ha sido intensamente explotado, provocando una intensa modificación de los flujos hidrogeológicos naturales.

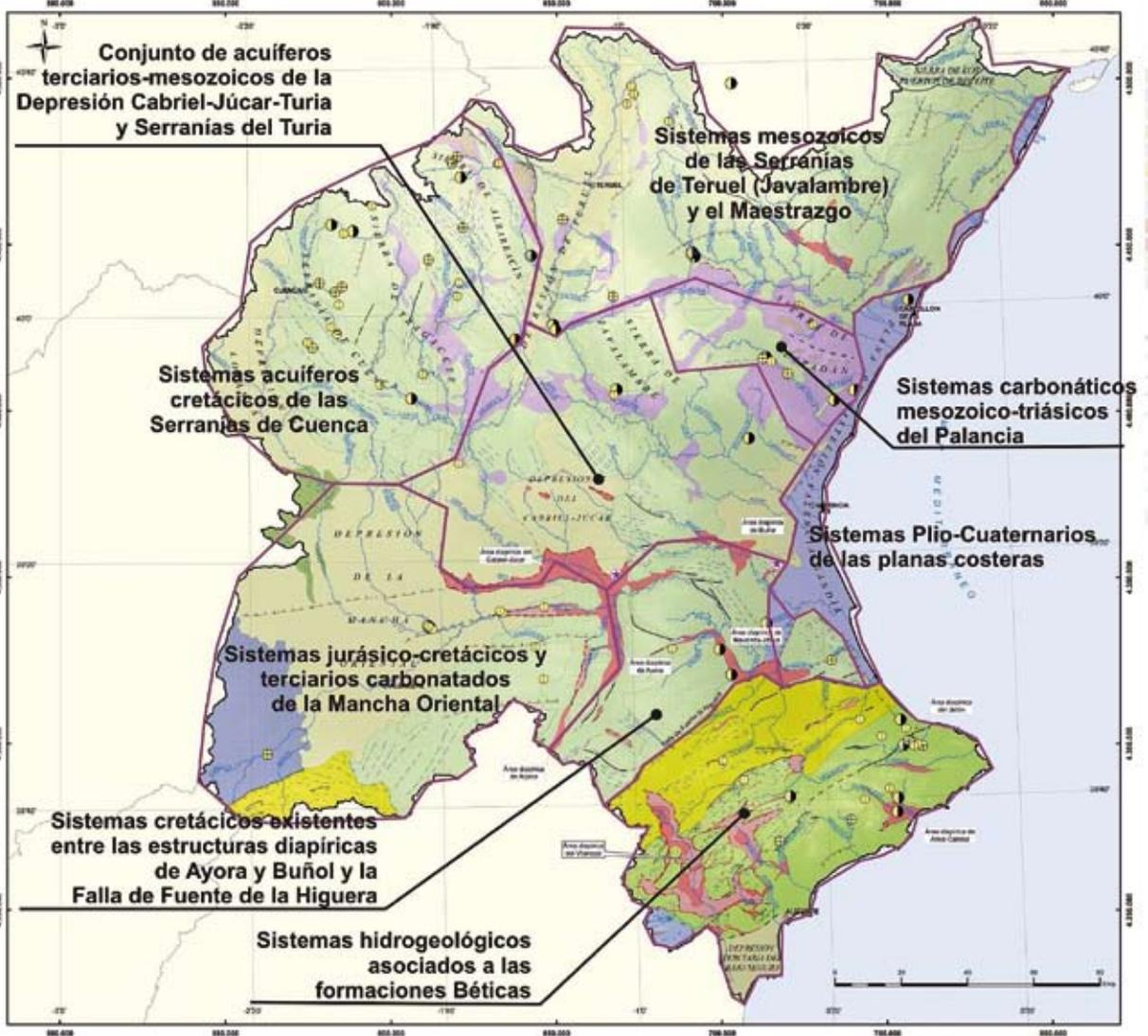
- **Los sistemas acuíferos cretácicos de las Serranías de Cuenca (Altos Júcar-Turia) (zona 4),** que constituyen los grandes reservorios de la zona central de la cuenca del Júcar, manteniendo los caudales base de los principales cauces del sistema fluvial (Júcar y Turia). Funcionan, prácticamente, en régimen natural, pero su capacidad de regulación es limitada (funcionamiento kárstico).
- **El conjunto de acuíferos terciarios-mesozoicos de la Depresión Cabriel-Júcar-Turia y las Serranías del Turia (zona 5).** Junto con los acuíferos cretácico-jurásicos de Las Serranías que conforman sistemas hidrogeológicos muy condicionados por la estructura geológica y drenan fundamentalmente al río Turia, aparecen un conjunto de sistemas hidrogeológicos asociados a amplias cubetas terciarias que reciben la transferencia lateral subterránea de los acuíferos mesozoicos de Las Serranías del Turia (Buñol-Cheste al Norte y Utiel-Requena al sur), descargando, en régimen natural, hacia los ríos Cabriel y afluentes (Magro) y al río Turia. A su vez, los sistemas terciarios septentrionales (miocenos carbonáticos de Buñol-Cheste y Liria-Casinos) transfieren recursos a la Plana de Valencia Norte de forma subterránea.
- **Los sistemas carbonáticos mesozoico-triásicos del Palancia (zona 6),** situados entre las depresiones del Turia y la Sierra de Espadán, al norte, donde predominan los acuíferos jurásicos y triásicos (Muschelkalk) de funcionamiento marcadamente kárstico con descargas puntuales muy significativas y que alimentan lateralmente a la Planas de Sagunto y el sector meridional de la Plana de Castellón.
- **Los sistemas mesozoicos de las Serranías de Teruel (Javalambre) y el Maestrazgo**

(zona 8), con potentes series de formaciones cretácico-jurásicas, caracterizado por presentar un funcionamiento kárstico, con una gran compartimentación hidrogeológica en función de una estructura geológica compleja. En el sector oriental disponer su cota piezométrica a gran profundidad, con un flujo preferencial en dirección al Mar Mediterráneo, dando lugar a significativas surgencias subterráneas de aguas dulces (Sierra de Irta).

- Los sistemas hidrogeológicos asociados a las planas costeras (zona 9) (Denia-Javea, Valencia Norte y Sur, Sagunto, Castellón y

Oropesa y Vinaroz), asociados a formaciones geológicas plio-cuaternarias, que reciben una significativa aportación lateral subterránea de los sistemas mesozoicos y terciarios colindantes y cuya descarga fundamental se desarrolla hacia los ríos que las cruzan, a los humedales costeros y al mar. Están sometidas a una intensa explotación que ha provocado problemas de intrusión marina y a un fuerte impacto derivado de la intensa actividad antrópica que se desarrolla en superficie, que ha generado diversos problemas de contaminación y una importante degradación en la calidad de las aguas subterráneas.

Figura 3. Dominios Hidrogeológicos de la CH del Júcar

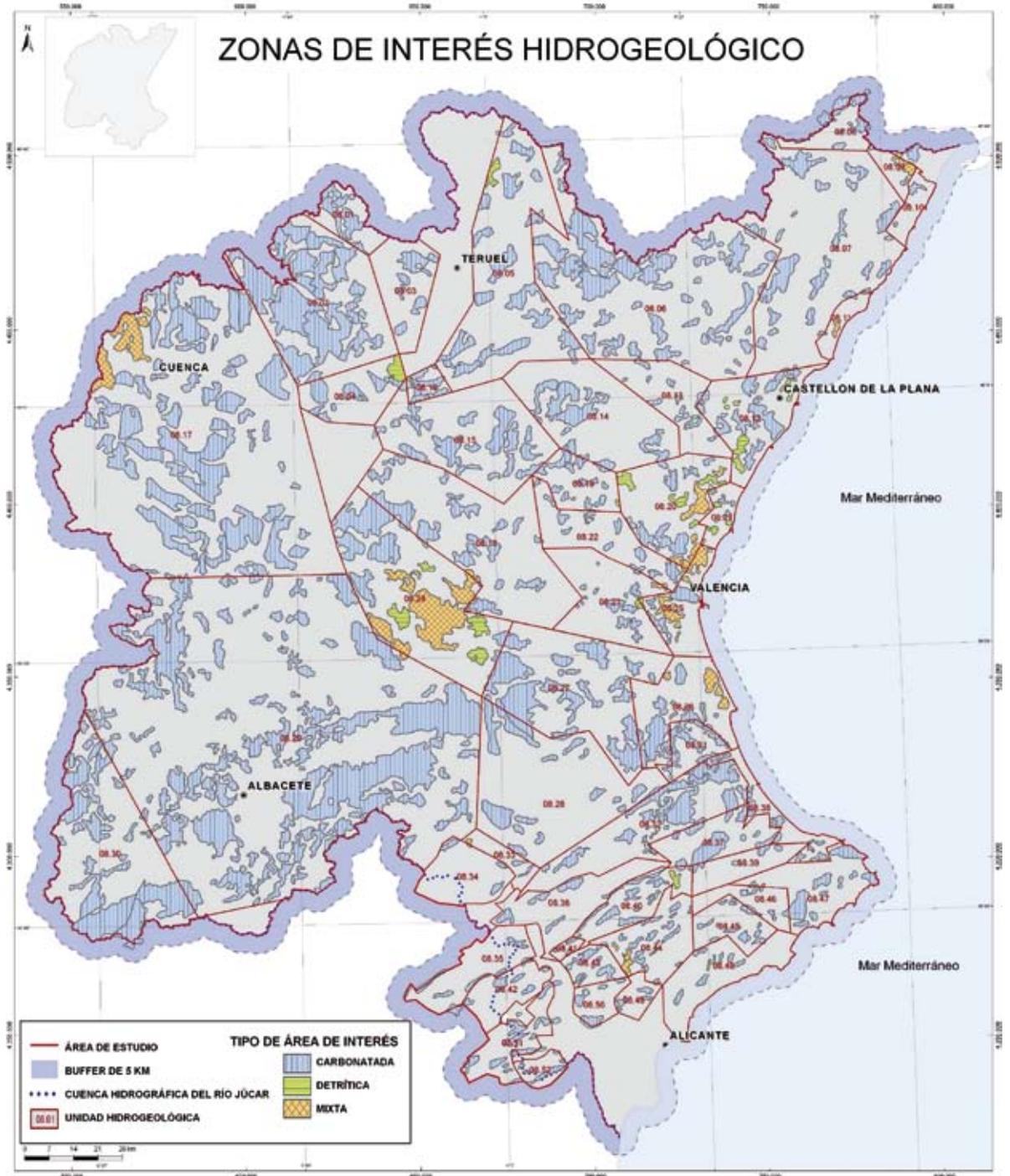


Identificación de anomalías térmicas favorables relacionadas con zonas de mayor interés hidrogeológico

Tanto a nivel de cuenca, como de dominios geológicos y de unidades hidrogeológicas,

se han identificado una serie de anomalías térmicas negativas (frías), que, posteriormente, han sido contrastadas mediante interpretaciones geológicas e hidrogeológicas tradicionales. Dichas anomalías frías presentarán las condiciones más favorables para la

Figura 4. Mapa de las zonas de interés hidrogeológico de la CH del Júcar



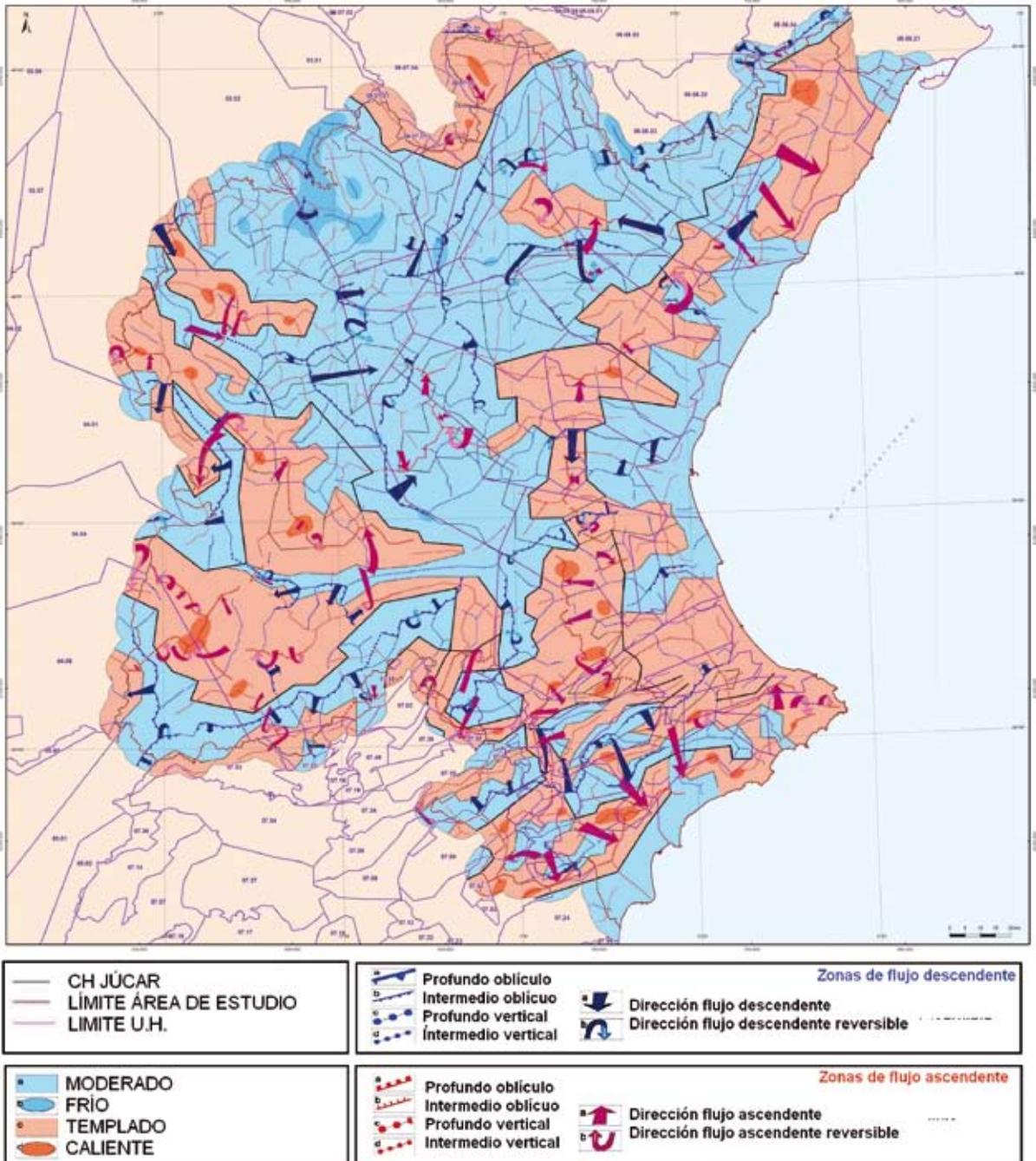
recarga y la acumulación de recursos subterráneos y, por tanto, para su posible explotación.

La identificación de dichas zonas se ha realizado a partir de los planos y perfiles de distribución térmica elaborados a diferentes profundi-

dades, con apoyo de la interpretación geológica e hidrogeológica de cada zona.

En total, en el conjunto de las 52 UHs analizadas, se han definido un total de 688 zonas de interés hidrogeológico (ZIH), que ocupan una superficie total de 10 723 km², que corresponde

Figura 5. Mapa de la dinámica del agua subterránea de la CH del Júcar



al 26,5% de la superficie total abarcada por las unidades hidrogeológicas objeto de análisis.

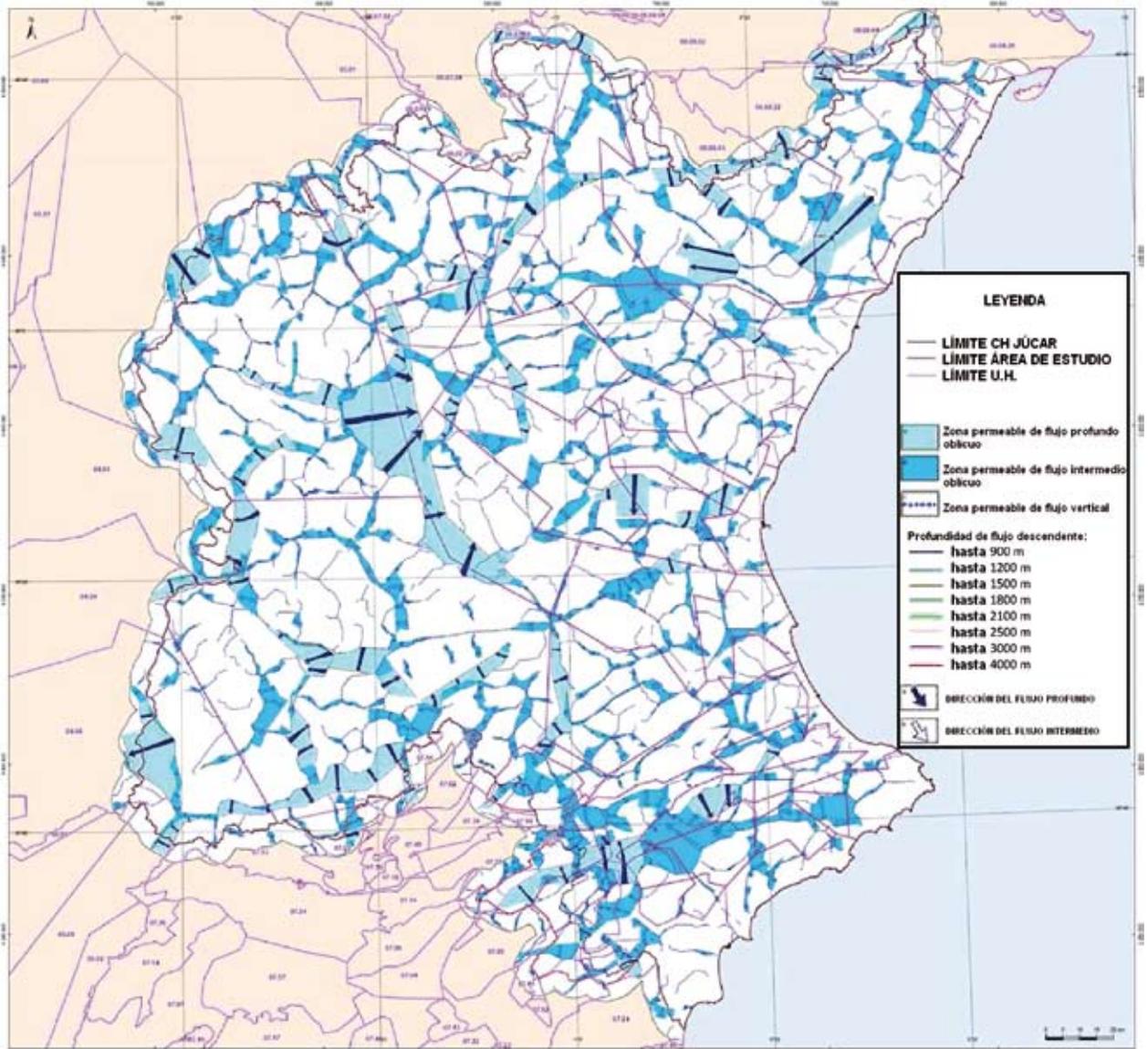
Mapa fluido dinámico e hidrodinámico

El mapa fluidodinámico se confecciona analizando individualmente los resultados de cada uno de los termogramas (corte del campo térmico cada 60, 90 o 100 m de profundidad) definiendo las zonas de anomalía térmica positivas y negativas relacionadas con la existencia de flujos de infiltración y ascenso. La superposición espacial de estas anomalías define planos de di-

ferente buzamiento que indican el tipo de flujo (infiltración de agua o ascenso), la dirección de los mismos y la profundidad que alcanza.

Estos planos pueden se asocian en ocasiones, con grandes estructuras geológicas, límites tectónicos, vergencias regionales de materiales, etc., que definen un modelo regional de funcionamiento de los flujos de infiltración de aguas superficiales y zonas preferentes de ascenso de aguas. Asimismo, las zonas de influencia de estos flujos permiten segmentar el medio en “Bloques Fluidodinámicos” que presentaran características geotérmi-

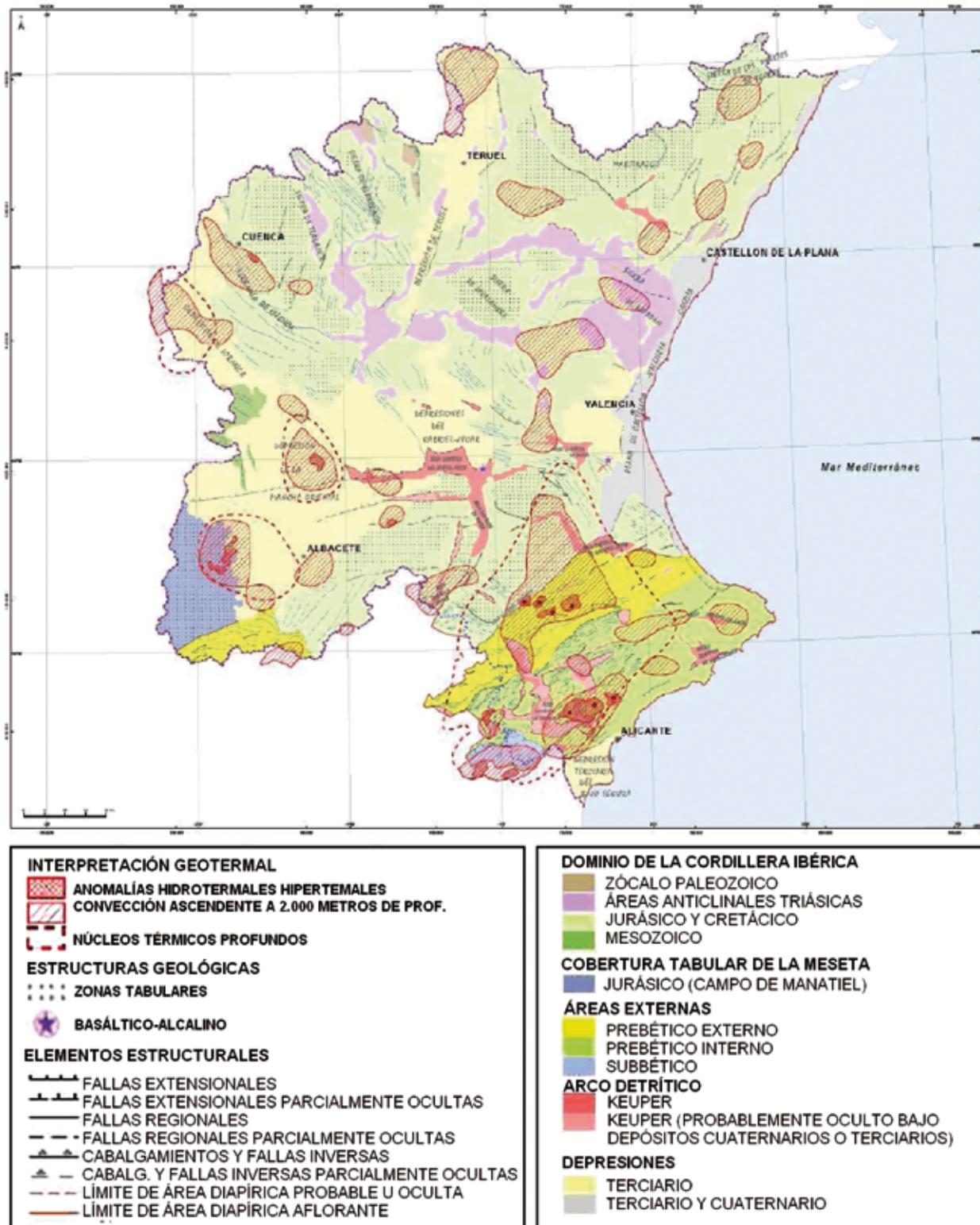
Figura 6. Mapa de las zonas de infiltración del agua en la CH del Júcar



cas diferenciadas en función del tipo de flujo que predomine en las mismas, así como con la exis-

tencia de anomalías geotérmicas que le afecten (definidas en el plano de Potencial Geotérmico).

Figura 7. Mapa de las zonas de interés geotermal en la CH del Júcar



En la figura 5 se muestra el plano correspondiente al mapa fluidodinámico elaborado a partir de los datos TRT.

A partir del análisis de flujos de infiltración de las aguas meteóricas se pueden determinar las zonas de recarga favorable de los acuíferos a una escala regional de la cuenca. En el mapa adjunto se muestran las zonas de mayor interés.

Identificación de zonas de interés geotérmico

El plano de zonas de Potencia Geotérmica es el resultado del análisis conjunto de las diferentes anomalías térmicas que se observan en los planos en planta (planos LT) y perfiles verticales (perfiles VT). Este análisis permite describir y representar las principales zonas de anomalías geotérmicas dentro de la zona de estudio así como una definición de puntos de interés para el aprovechamiento de dichos recursos geotermales.

En la descripción del plano se aborda la génesis de dichas anomalías relacionándolas con aspectos geológicos y estructurales.

En la figura 7 se muestra el plano de zonas de potencial geotérmico elaborado a partir de los datos TRT.

Sectores de salidas de aguas continentales al mar y de intrusión marina

La longitud de costa tan significativa de la Demarcación Hidrográfica del río Júcar y la presencia de numerosos sistemas hidrogeológicos costeros en los que se produce conexión hidráulica con el mar, obliga a tomar en especial consideración el análisis de los flujos costeros. Por esta razón se ha realizado un especial esfuerzo en esta materia.

Así, partiendo de la información hidrogeológica de referencia relativa a los problemas de intrusión marina se han analizado los flujos costeros, diferenciando entre:

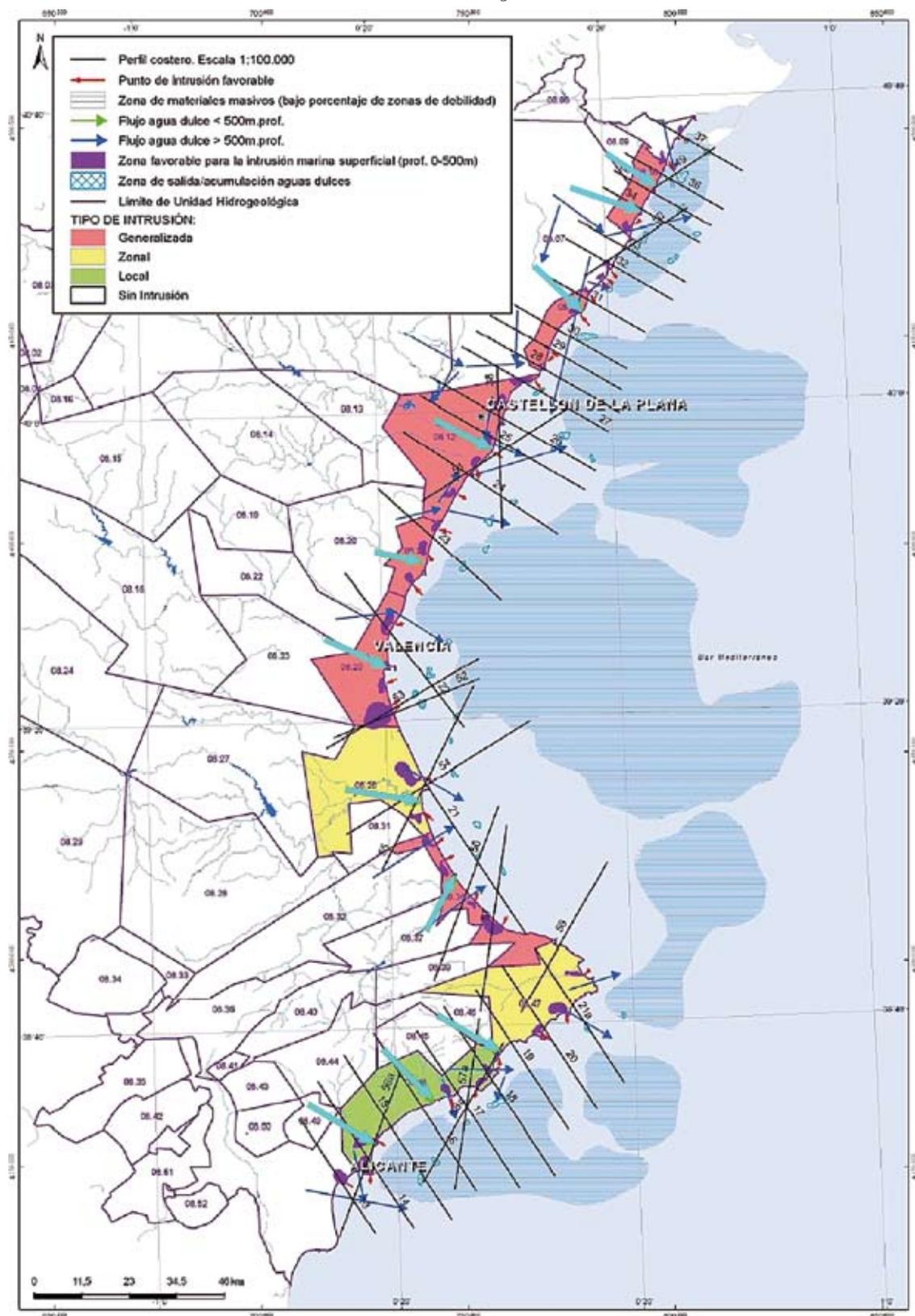
- Flujos de agua dulce que se producen a menos de 500 m de profundidad.
- Flujos de agua dulce que se producen a más de 500 m de profundidad.
- Detección de zonas favorables para la intrusión marina superficial (< 500 m de profundidad).
- Detección de zonas de salida y/o acumulación de aguas dulces.
- Detección de zonas donde predominan zonas muy masivas sin zonas de debilidad.
- Detección de puntos favorables de intrusión.

Para ello se han realizado un total de 40 perfiles de investigación mediante TRT en la zona costera, utilizando como datos de partida la información radiométrica contenida en 11 escenas ASTER de la zona costera.

Como resumen de conclusiones al estudio de Flujos Costeros en la DH-Júcar se puede indicar que, a escala regional se puede decir que la mayoría de las alineaciones de flujos profundos identificados presentan dos direcciones prácticamente ortogonales entre sí, OSO-ENE y NMO-SSE, aunque con cierta variación local. Además, son mayoritarios los flujos a profundidades mayores a los 500 metros, asociándose por tanto de forma general, a los materiales carbonatados mesozoicos presentes en toda la costa del ámbito de la Cuenca Hidrográfica del Júcar.

Las zonas de acumulación y/o salidas profundas de aguas continentales al mar, se han detectado en su mayoría en una banda de entre 6 y 13 kilómetros de distancia de la línea de costa, presentando en ocasiones conexión con las líneas preferenciales de flujos profundos, de donde se deduce que gran parte de ellas deben estar asociadas a los mismos materiales. Por otra parte, localmente parece existir cierta coincidencia en la alineación de estas zonas de acumulación con respecto a las direcciones dominantes de las alineaciones de flujos preferenciales.

Figura 8. Mapa de zonificación de los flujos de aguas continentales y marinas en el litoral de la DH del Júcar



CONCLUSIONES

Tal y como era el objeto del trabajo “Estudio Tomográfico Remoto Térmico de la Cuenca del Júcar” se ha conseguido determinar la existencia de zonas de interés hidrogeológico para posibles explotaciones estratégicas de las aguas subterráneas de la cuenca, identificándose las referencias geográficas de los acuíferos y masas de agua.

Se han detectado posibles variaciones de los límites de las unidades hidrogeológicas conocidas y se han observado posibles zonas de interconexión tanto entre las unidades internas de la cuenca como con unidades hidrogeológicas externas, pertenecientes a cuencas vecinas.

Se han detectado numerosas zonas de posible explotación de acuíferos, delimitadas en superficie, desde escasas decenas de kilómetros cuadrados hasta extensiones de centenares de kilómetros cuadrados, y con profundidades entre 200 y 400 m hasta más de 900, y potencias que, en algunos casos, superan el centenar de metros de espesor.

Se han localizado zonas de posible explotación geotermal como resultado de la detección de flujos térmicos ascendentes.

Se han localizado los flujos de agua salobre y agua dulce que interactúan en la zona costera, originadores, en un caso, de la intrusión marina y en el otro, de las descargas de agua continental al mar. ❁

REFERENCIAS

- Adams J. A. y Gillespie A. G., 2006. *Remote Sensing of Landscapes with Spectral Images. A Physical Modeling Approach*. Cambridge University Press.
- Berdnik V. V. y Mukhamedyarov R. D., 2001. “Radiation Transfer in Plant Leaves”. *Optics and Spectroscopy*. 90, No. 4, 580-591.
- Berdnik V. V., 2005. “Reconstruction of the characteristics of a light – scattering layer from its reflectance and transmittance: The neural network method”. *Optics and Spectroscopy*. 99, No. 1, 98-105.
- Chavez, P. S., Jr., 1996. “Image-based atmospheric corrections – revised and improved”. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 62(9), 1025-1036.

Mediante el estudio, se han detectado numerosas zonas de posible explotación de acuíferos, delimitadas en superficie, desde escasas decenas de kilómetros cuadrados hasta extensiones de centenares de kilómetros cuadrados, y con profundidades entre 200 y 400 m hasta más de 900, y potencias que, en algunos casos, superan el centenar de metros de espesor

- Gillespie A. R., Rokugawa S., Hook S. J., Matsumaga T. y Kahle A. B., 1999. *Temperature/ Emissivity Separation Algorithm Theoretical Basis Document*, Version 2.4.
- Gorniy B. I., Shilin B. V. y Yasinskiy G. I., 1993. “Investigación térmica aeroespacial”. *M. Nedra*, p. 128.
- Gupta R. P., 2003. *Remote Sensing Geology*. Springer – Verlag, Berlin, 655 p.
- Haykin S., 1998. *Neural Networks. A Comprehensive Foundation*. Prentice Hall, 1104 p.
- Kahle, A. B., 1987. “Surface emittance, temperature, and thermal inertia derived from thermal infrared multispectral scanner (TIMS) data for Death Valley, California”. *Geophysics*, 52, pp. 858-874.
- Kahle A. B. y Goetz A. F. H., 1983. “Mineralogic Information from a New Airborne Thermal Infrared Multispectral Scanner”. *Science*, 222(4619), p. 24-27.
- Krasnopolsky V. M. y Schiller H., 2003. “Some neural network applications in environmental sciences. Part I: forward and inverse problems in geophysical remote measurements”. *Neural Networks*, 16, No. 3-4: 321-334.
- Moran, M. S., Jackson R. D., Slater P. N. y Teillet, P. M., 1992. “Evaluation of simplified procedures for retrieval of land surface reflectance factors from satellite sensor output”. *Remote Sensing of Environment*. 41: 169-184.
- Ozizik M. N., 2000. Orlande H. R. B. *Inverse Heat Transfer*. N.Y. Taylor & Francis, 330 p.
- Schwander H., Kaifel A., Ruggaber A. y Koepke P., 2001. “Spectral Radiative Transfer Modeling with Minimized Computation Time by Use of a Neural-Network Technique”. *Applied Optics*, 40, No. 3: 331-335.
- Shilin B.V., Investigación aérea térmica aplicada al estudio de recursos naturales. *L. Hidrometeoizdat*, 1980, p. 248.
- Siegel B. S. and Gillespie A. R. *Remote Sensing Geology*. John Wiley and Sons, N.Y., 1980, 702 p.