

# Características y dinámica de las aguas subterráneas de la cuenca hidrográfica del río Segura

## Characteristics and dynamics of groundwater in the Segura River Basin

**Fernando Esteban Moratilla.** Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos  
Dirección General del Agua. MARIM (España). festeban@mma.es

**Carlos Manuel Ordóñez Pérez.** Ingeniero del ICAI.  
Presidente de TIHGSA. Académico de la Academia de Ciencias Ecológicas  
y de Seguridad Vital de la Federación Rusa. (España). cmordonez@tihgsa.net

**Resumen:** La utilización de técnicas de teledetección para la determinación de las características hidrogeológicas de la Cuenca del río Segura, mediante tomografía térmica del subsuelo, ha permitido determinar tanto las zonas de mayor probabilidad de existencia de zonas acuíferas, como las zonas de potencial geotérmico relevante. Adicionalmente, ha permitido realizar propuestas de modificación de los límites de las unidades hidrogeológicas, para la mejor configuración de las masas de agua subterránea, así como la localización de las áreas donde se produce la intrusión de agua marina en el litoral y las zonas de mayor probabilidad de descarga de aguas continentales al mar.

**Palabras Clave:** Teledetección; Tomografía Remota Térmica; Cuenca del Segura; Hidrología; Geotermia; Intrusión marina

**Abstract:** The implementation of the Remote Sensing in the hydrogeological characterization of the Basin of the Segura River through Remote Thermal Tomography has permitted to determine the areas of a major probability of the aquifer zones presence, as well as the areas of important geothermic potential. Additionally there were elaborated proposals of the modification of the hydrogeological zones limits that would permit to improve the configuration of the surrounding water masses, as well as to locate the sea water intrusion zones and the groundwater discharge zones.

**Keywords:** Remote Sensing; Remote Thermal Tomography; The Basin of the Segura River; Hydrology; Geothermal; Sea water intrusion

### 1. Introducción y aspectos generales de la cuenca

La cuenca del Segura se sitúa al SE de la península Ibérica y ocupa una superficie total de 19.525 km<sup>2</sup>, que se distribuyen por las comunidades autónomas de Murcia (57%), Castilla-La Mancha (28%), Comunidad Valenciana (7%) y Andalucía (8%).

Dentro de la superficie de la cuenca del Segura se consideran tradicionalmente relacionadas con ella una serie de cuencas endorreicas situadas en la divisoria con la cuenca del Júcar (Peñas de San Pedro y Pétrola), así como otras costeras y abiertas al mar, situadas entre el río Segura y el límite la provincia de Almería (rambla del Albuñón y otras de menor extensión).

Las precipitaciones medias anuales de la cuenca del Segura son las más bajas de las registradas en las grandes cuencas peninsulares españolas y alcanzan

valores medios próximos a los 360 mm/año, lo cual supone unas infiltraciones medias anuales por recarga de lluvia de unos 470-500 hm<sup>3</sup>/año para toda la superficie de la cuenca, que se reduce a prácticamente la mitad en años secos y períodos de sequía prolongada (unos 220 hm<sup>3</sup>/año). Estos volúmenes infiltrados suponen, aproximadamente, el 15% de las precipitaciones totales caídas sobre los materiales permeables de la cuenca y el 7% de las caídas sobre la totalidad de la cuenca (sobre materiales permeables y no permeables). A las bajas precipitaciones medias se une la desigual distribución espacial y temporal de las mismas, que hace que estas varíen entre los 200 mm/año de la zona de Águilas y los 1.100 mm/año en la cabecera del Segura.

Además de las recargas por infiltración de la lluvia, en la cuenca se registran otros tipos de entradas de origen subterráneo, como son las infiltraciones por exce-

dentes de riego (estimadas entre 50 y 100 hm<sup>3</sup>/año) y las transferencias subterráneas desde otras masas de agua limítrofes (evaluadas en unos 20-25 hm<sup>3</sup>/año), con lo que los recursos totales de origen subterráneo renovables anualmente llegan a alcanzar entre los 300 y 600 hm<sup>3</sup>/año, dependiendo del año hidrológico.

Las características de la cuenca (orografía, climatología, litologías y vegetación) hacen que la porción de lluvia que pasa a componer la escorrentía superficial sea de tan solo el 16% (el porcentaje más bajo de la península), evaporándose y transpirándose el resto.

Por todo lo anterior, la cuenca del Segura es una de las cuencas españolas que más intensamente utiliza los recursos subterráneos, con extracciones por bombeos variables entre 300 y 470 hm<sup>3</sup>/año, que suponen entre el 86 y el 100 % de sus recursos anuales renovables de origen subterráneo. Estas extracciones, unidas a unas descargas naturales de unos 440 hm<sup>3</sup>/año, ocasionan una situación de sobreexplotación, que a nivel de cuenca, se estima de unos 310 a 400 hm<sup>3</sup>/año.

La situación de sobreexplotación ha variado en las últimas décadas, registrando ligeros descensos a principios de los años 90 del pasado siglo XX (hasta unos 270 hm<sup>3</sup>/año), para volver a incrementarse posteriormente (años 1994-1995) hasta los 400-500 hm<sup>3</sup>/año, como consecuencia de la escasez de recursos disponibles en la cuenca y del incremento de las extracciones desde más de 450 nuevos pozos de sequía.

Las previsiones para un futuro relativamente próximo es que se van a alcanzar en breve los límites físicos de sobreexplotación de los acuíferos de la cuenca, debido a los progresivos descensos de niveles piezométricos. A este respecto, se estima que en un plazo máximo de 10 años no será posible extraer más de 125 hm<sup>3</sup>/año, lo que reducirá entre 2 y 3 veces los actuales niveles de explotación de aguas subterráneas en la cuenca.

### 1.1. Existencia de un déficit estructural importante

La cuenca presenta un balance hídrico general negativo (déficit hídrico estructural estimado en unos 460 hm<sup>3</sup>/año), debido a que sus recursos propios renovables son del orden de los 930-970 hm<sup>3</sup>/año y sus demandas totales se aproximan a los 1.960-2.000 hm<sup>3</sup>/año.

Para su solución o disminución se utilizan recursos externos a la cuenca (variables entre 300 y 540 hm<sup>3</sup>/año), que proceden del trasvase Tajo-Segura, así como otros adicionales procedentes de desalación de agua de mar, reutilización de aguas residuales, etc.

### 1.2. El problema añadido de los periodos de sequía

La cuenca está sujeta a un proceso de "stress hídrico" prácticamente continuo, que, en los últimos años ha venido agravándose con los periodos, cada vez más frecuentes de sequía, con consecuencias o impactos negativos muy importantes sobre la agricultura y el medio ambiente (descensos tanto en superficies de cultivo, como de rendimientos y cantidades producidas, aumento del riesgo de incendios, afección al estado fitosanitario de las masas forestales, disminución o desaparición de caudales ecológicos y afección a los ecosistemas del río Segura, erosión de suelos, etc.).

En estas circunstancias, la cuenca presenta un cada vez mayor riesgo de desertización, que llega a alcanzar un preocupante porcentaje de una superficie superior al 95% de la cuenca, lo cual triplica la media nacional.

## 2. El proyecto

En el año 2004, el Ministerio de Medio Ambiente inicia una campaña de búsqueda de sistemas de detección de aguas subterráneas, más allá del conocimiento científico del que se disponía entonces. Con esta iniciativa, se pretendía 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 evaluó la posibilidad de poner en práctica la técnica desarrollada por el Instituto de Investigación Aeroespacial de Kazán (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
- El Maestrazgo en la provincia de Castellón

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 Segura.

Esta investigación, iniciada en el año 2006, incluyó no sólo la superficie de la cuenca (19.525 km<sup>2</sup>) sino también una banda limítrofe para que ninguna unidad hi-

drogeológica quedase partida en el estudio. En total se están estudiando más de 27.000 km<sup>2</sup>.

### 3. El enfoque y la metodología

El conocimiento científico-técnico actual y los medios tecnológicos existentes posibilitan la realización de estudios complejos de investigación de las aguas subterráneas. Se dan, en todo caso, las condiciones para apoyar un esfuerzo de investigación en este campo, que no sería posible sin la masa crítica de investigadores que en este momento ya existe dentro y fuera de nuestro país.

En síntesis, esta 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 almacenamientos 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 metros de profundidad, hasta llegar a la zona límite de investigación (4.000 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.

#### 3.1. 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 endogeotérmico 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 aéreas.

Como antecedente del sistema Golubiatnikov, en el año 1906, establece la primera descripción de la aplicación especial del método termométrico en la prospección de petróleo; en 1934, Van Orstand descubrió la presencia de anomalías geotérmicas en amplias zonas de estructuras de petróleo y gas.

Fundamentalmente este método TRT se desarrolló en el estudio de los procesos de dinámica de flujos geotérmicos ligados a la prospección de petróleo, la hidrogeología, la caracterización de la zona criolita y la hidrosfera en general, el cálculo del flujo térmico de la Tierra y en la elaboración de mapas de barreras térmicas horizontales y verticales ligadas a estructuras geológicas situadas en diferentes plantas geológicas y estructurales.

El método fue desarrollado en diversos institutos científicos: Instituto de los Problemas de Geotermia, Instituto de Física de la Tierra, Instituto Científico de Oceanología, Instituto Científico de Prospección de Petróleo y Prospección Geológica, Instituto Científico de Hidrogeología e Ingeniería Geológica, Instituto Científico de Geofísica y otros pertenecientes a la Academia y Centros de la Federación de Rusia.

No obstante, siempre se ha hecho el comentario de que la investigación geotérmica tiene que realizarse en combinación con otros sistemas de investigación geológica, geofísica y geoquímica.

Las posibilidades que ofrece el sistema TRT en geología son amplias lo que ha generado numerosas aplicaciones y, en consecuencia, gran cantidad de publicaciones, algunas de las cuales se recogen en la bibliografía (véanse [1 - 7]).

El sistema parte de la posibilidad de obtener mediante un radiómetro térmico un escenario que visualiza la densidad del flujo integral efectiva ( $W/m^2sr$ ), 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.

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 sulfurados.

Por lo tanto la tarea principal del sistema TRT consiste en la obtención de información de la estructura del campo de temperatura interna de la Tierra en profundidad. Esta información está relacionada con la estructura geológica de la Tierra y la distribución de las fuentes de calor endógenas. La resolución de la tarea principal presenta unos problemas que se pueden estructurar en dos clases:

El primer grupo de problemas está relacionado con la detección de las anomalías térmicas causadas por las fuentes de calor endógenas sobre un fondo de interferencias. La mayoría de las interferencias son campos térmicos generados por la radiación solar. La mayor parte de la energía de radiación solar se concentra en la zona de radiación Visible y TIR Próximo, tal y como se muestra en la figura 1.

En el intervalo comprendido hasta 2,25  $\mu\text{m}$  se concentra el 95% de la radiación solar incidente en la Tierra. Las variaciones de la temperatura de la capa superficial de la Tierra causadas por la radiación solar dependen, principalmente, de la intensidad de la radiación solar en el Visible y TIR Próximo, de la reflectancia de la superficie terrestre en la zona del espectro indicada y de la inclinación de la superficie respecto a la orientación al Sol. Desde el punto de vista de su utilización son de aplicación especial los métodos que realizan la corrección en base a sondeos remotos (Morán *et al*, 1992, Chávez *et al*, 1996 y Gillespie *et al*, 1999).

El segundo grupo de problemas está relacionado con la modelización de campo térmico generado por las fuentes de calor situadas en la profundidad de la Tierra y con la determinación de las características de las fuentes de calor a partir de los datos de sondeo remoto. Precisamente la resolución de esta tarea permite obtener los datos sobre la estructura geológica profunda.

El campo térmico en una capa heterogénea viene determinado por la siguiente ecuación:

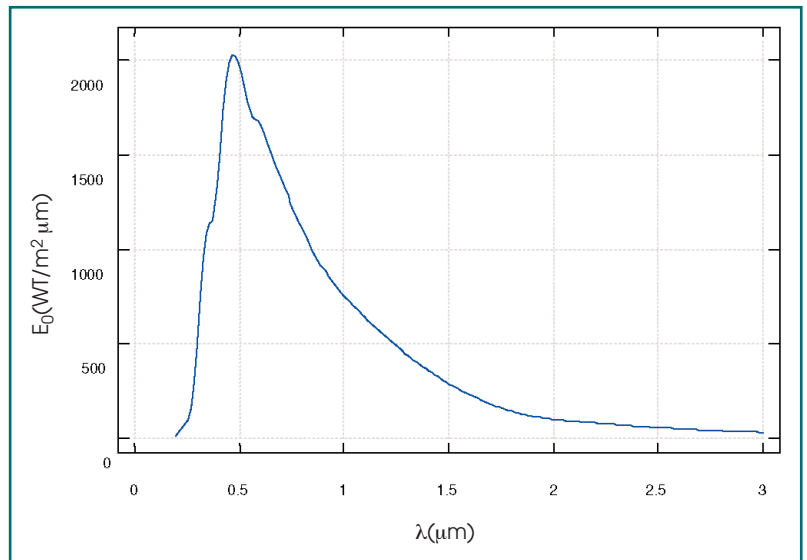


Fig. 1. Dependencia de la densidad del flujo de radiación solar en el límite superior de la atmósfera en relación con la longitud de onda.

$$c\rho(r)\frac{\partial T(r,t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda(r)\frac{\partial T(r,t)}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda(r)\frac{\partial T(r,t)}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda(r)\frac{\partial T(r,t)}{\partial z}\right) + F(r) \quad (1)$$

Donde:

$r = (x,y,z)$ . Vector de posición;

$t(\text{sec})$ . Tiempo;

$T(r,t)(\text{K})$ . Temperatura;

$c(\text{J/kg.K})$ . Capacidad térmica;

$\rho(\text{kg/m}^3)$ . Densidad;

$\lambda(\text{W/m.K})$ . Coeficiente de conductividad térmica;

$F(r)(\text{W/m}^3)$ . Densidad volumétrica de la fuente

El campo térmico satisface a las siguientes condiciones límite:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial z} = \alpha(T - T_a) + q_s, \quad \text{para } z = 0 \quad (2)$$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial z} = q_i \quad \text{para } z = z_0 \quad (3)$$

Donde:

$T_a(\text{K})$ . Temperatura de la atmósfera;

$\alpha(\text{W/m}^2 \cdot \text{K})$ . Coeficiente de la transmisión de calor entre la superficie terrestre y la atmósfera;

$q_s(\text{W/m}^2)$ . Densidad de las fuentes externas (flujo térmico causado por la radiación solar);

$q_i(\text{W/m}^2)$ . Densidad de las fuentes internas (flujo térmico causado por las fuentes de calor profundas);

$z_0$ . Potencia de la capa.

La determinación del campo de temperatura generado por las fuentes profundas se realiza mediante la resolución de la tarea inversa de la ecuación de conductibilidad de calor. Dado que este sistema tiene una alta sensibilidad con respecto a los ruidos provenientes de los datos de entrada, la resolución de la tarea inversa se realiza normalmente mediante métodos de selectivos (Ozisik, 2000) y sistemas de autoaprendizaje de redes neuronales (Haykin, 1998).

#### 4. Objetivos

El objetivo inicial del estudio es la generación de una cartografía térmica sintetizada de la totalidad de la Cuenca del Segura, 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 éstos los objetivos científicos del trabajo.

A partir de esta información se concretan los denominados objetivos operativos, que, de forma resumida y esquemática, son los siguientes:

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, y escasamente conocida hasta la fecha, debidamente analizada de manera conjunta con otras técnicas de investigación tradicionales (como interpretaciones geológico-estructurales e hidrogeológicas), se puede obtener un mejor conocimiento de la caracterización y funciona-

miento 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.

#### 5. Fundamentos tecnológicos

El sistema de investigación de la Tomografía Remota Térmica (TRT) ha sido desarrollado por la Academia de las Ciencias de la Federación Rusa y se basa en la idea de que cualquier cuerpo emite una radiación, con la condición de que no se encuentre a temperatura de cero absoluto (0 K ó -273,16 °C).

Cualquier cuerpo, por tanto, presenta una radiación térmica propia, la cual recuerda su nacimiento, recorrido y cuerpos encontrados. (Hipótesis desarrollada en el Instituto de Investigación Aeroespacial de Kazán en 1988).

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. El primero es cientos de veces más significativo que el segundo. La información digital así obtenida se procesa mediante el uso de programas y algoritmos específicos para eliminar la componente exógena del campo de temperatura interno.

Esta imagen térmica es captada por el canal térmico lejano del sensor ETM+ a bordo del satélite LANDSAT-7, y usada en combinación con la imagen visible captada por el sensor ASTER a bordo del satélite TERRA.

Se procesan los datos extraídos de la imagen IR térmica, cuyo sensor recibe la emitancia 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 extrapolación de la información tomográfica a partir de imágenes de la superficie terrestre, así como la obtención de un termograma en cualquier punto 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. Éstas guardan estre-

cha 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.

## 6. 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 a diferentes profundidades, de todo el ámbito territorial a estudiar, y poder realizar un primer análisis comparativo (y conjunto) de los resultados por grandes dominios geológicos de la cuenca. La escala de trabajo a este nivel de estudio (cuenca hidrográfica completa) ha sido la 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 el de los grandes dominios geológicos identificados en la cuenca (Sector meridional de la Cordillera Ibérica, Prebético Externo, Prebético Interno, Subbético, Bético y Depresiones Postectónicas), al presentar estos unas características geológico-estructurales zonales que condicionan 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 (y de mayor grado de detalle) ha sido el de las unidades hidrogeológicas (57 en total), consideradas éstas (y de acuerdo con el Reglamento de la Administración Pública del Agua y de la Planificación Hidrológica) 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) obtenidos.
- La información de TRT obtenida 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.
- La secuencia normal del trabajo de interpretación realizado ha sido la siguiente:
  1. Elaboración de planos de distribución térmica a diferentes profundidades (120, 180, 300, 600, 900, 1.200 m) y perfiles bidimensionales, longitudinales y transversales al área de estudio, a escala 1:100.000, de los que se obtiene la identificación espacial de las anomalías térmicas negativas (zonas con influencia de la recarga) y positivas (zonas sin influencia de la recarga), así como su relación con la geología (materiales y estructuras). De estos planos de anomalías se obtiene la información necesaria para la identificación de los límites hidrogeológicos de cada unidad (abiertos, cerrados o mixtos) y su variación espacial en profundidad, así como la posible recomendación de modificación de éstos (haciéndolos coincidir, lo máximo posible, con límites cerrados o estancos).
  2. Elaboración de perfiles bidimensionales, longitudinales y transversales al área de estudio, con la 1ª

derivada térmica (gradiente térmico), de los que se obtiene la geometría (distribución en profundidad y forma) de las anomalías negativas (frías) y positivas (calientes) identificadas, así como de las zonas de interés hidrotermal.

3. Elaboración de perfiles bidimensionales, longitudinales y transversales al área de estudio, con la 2ª derivada térmica (gradiente del gradiente térmico), de los que se obtiene la distribución de estructuras térmicas en profundidad, que pueden interpretarse, posteriormente, como fallas, contactos y cambios litológicos o geométricos, etc.
4. Elaboración de perfiles bidimensionales, longitudinales y transversales al área de estudio, con la interpretación geológica de los perfiles térmicos y sus dos derivadas correspondientes, de los que se obtiene la distribución, en profundidad (hasta 1.500-2.000 m.), de los distintos conjuntos de materiales de mayor relevancia (depósitos postorogénicos del Terciario y del Cuaternario, Cretácico superior e inferior, Jurásico, Triásico y Paleozoico), así como su estructura geológica general. Nótese que en esta cuenca la profundidad del zócalo inalterado se encuentra a escasos 1.200 a 1.500 m. de profundidad. Razón por la que no era operativo continuar con la investigación a profundidades mayores
5. Elaboración de perfiles bidimensionales, longitudinales y transversales al área de estudio, con la interpretación hidrogeológica de los perfiles térmicos y sus dos derivadas correspondientes, de los que se obtiene la distribución, en profundidad, de la denominada "zona de intercambio activo del agua", de las zonas con mayor interés hidrogeológico (reservorios de agua subterránea), las fracturas o estructuras que actúan como conductos preferentes de la recarga, las zonas con aguas de no renovación (aguas fósiles), y los distintos conjuntos de materiales de mayor relevancia (Cuaternario y Terciario, Cretácico superior e inferior, Jurásico, Triásico y Paleozoico).
6. Elaboración de planos, a escalas variables entre 1:200.000 y 1:100.000, con la interpretación hidrogeológica de las anomalías térmicas y de la hidrogeología de la zona, de los que se obtiene la localización en superficie de las zonas con mayor interés hidrogeológico (reservorios de agua subterránea más destacables). Posteriormente, y de la información procedente de los perfiles hidrogeológicos

elaborados, se obtiene una primera estimación aproximada (y con el margen de error de la propia escala de trabajo utilizada, que es del orden del 10-20%) sobre su distribución espacial, la profundidad de su techo, desde la superficie del terreno, y la de su espesor saturado).

## 7. Información sobre límites de funcionamiento hidrogeológico

Mediante la interpretación de los planos del campo térmico a diversas profundidades, se ha obtenido una valiosa información sobre los límites de funcionamiento de las 57 unidades hidrogeológicas que se integran en la Cuenca Hidrográfica del Segura, que, en muchos casos, eran escasamente conocidos o sobre las que existían dudas razonables sobre su comportamiento, sobre todo a partir de cierta profundidad, al existir una escasa información sobre la geometría de los acuíferos en profundidad.

La información utilizada ha sido, básicamente, los datos del campo térmico a 60, 120, 180, 300, 600, 900, 1.200 m., al considerarse que, a partir de dicha profundidad, en prácticamente todos los ámbitos de la cuenca, se encuentra el zócalo o substrato impermeable. Todo lo cual se ha contrastado y verificado con la información geológica disponible.

Con toda la información obtenida, se han revisado y concretado, hasta la citada profundidad de 1.200 m., los límites de funcionamiento hidrogeológico de las 57 unidades hidrogeológicas de la cuenca, definiéndolos por sectores y subsectores como abiertos y en conexión hídrica con unidades o zonas contiguas, cerrados o estancos hídricamente, y mixtos (semiabiertos), en función de las anomalías térmicas identificadas.

En los casos de límites abiertos, se ha indicado explícitamente con qué unidad o zona contigua se produce la conexión hídrica, así como el sentido de la misma, si se ha dispuesto de la información complementaria necesaria (piezometría, modelos de simulación, etc.).

Asimismo, en las unidades intercuenas, se ha indicado cómo es el límite entre ambas cuencas, identificando su tipo de funcionamiento y sentido, lo cual puede resultar de especial interés y ayuda a la hora de distribuir los recursos y de realizar sus correspondientes planes de explotación.

Por último, y como resultado de toda la información utilizada, se han propuesto posibles modificaciones de

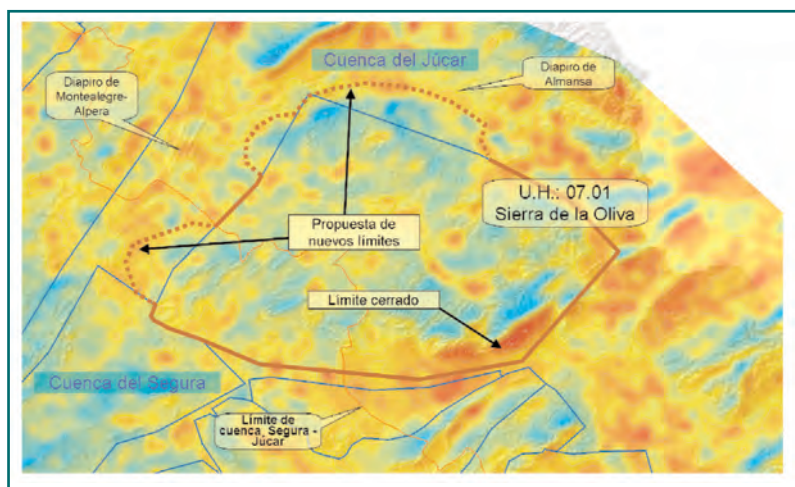


Fig. 2. Propuesta de modificación de límites de la U.H Sierra de la Oliva.

los actuales límites de funcionamiento hidrogeológico en una serie de unidades hidrogeológicas, haciéndolos coincidir, lo máximo posible, con la geometría de las anomalías positivas o calientes identificadas, que son las que constituyen los límites estancos, desde el punto de vista térmico.

El importante volumen de información obtenida y su grado de detalle de identificación, sobre los límites de funcionamiento hidrogeológico, impide poderlos reflejar en este artículo.

No obstante y a título de ejemplo, se incluye la propuesta de modificación del límites de la Unidad Hidrogeológica UH.07.01 Sierra de la Oliva, que comparten las cuencas del Júcar y del Segura (Figura 2).

## 8. Zonas Térmicas y de Recarga de la cuenca

A partir de la utilización e interpretación de la morfología del campo geotérmico de toda la cuenca, obtenida entre 60 m y 3.500 m de profundidad (fundamentalmente de las profundidades de 60, 120, 180, 300, 600, 900, 1.200, 1.500, 2.000 y 3.500 m), se han identificado tres grandes zonas térmicas en la Cuenca del Segura, relacionadas, directamente, con la recarga hídrica (figura 3):

- **Zonas de Recarga Preferente (ZRP):** distribuidas por el noroeste y suroeste de la cuenca y corresponde con los sectores orientales la zona jurásica plegada y de escamas del Prebético Externo (Prebéx) y del Prebético Interno (Prebin), así co-

mo de la zona jurásica del Subbético suroccidental, que, estructuralmente, se caracterizan por presentar una alta deformación, que da como resultado un desplazamiento alóctono y un apilamiento de los materiales que van desde el Triásico al Cretácico. Estas zonas se caracterizan por el predominio de un carácter térmico negativo o frío, que tiene una relación directa con la recarga y con el mencionado apilamiento y superposición de grandes potencias de materiales permeables. Constituirá, por tanto, la mejor zona de recarga de la cuenca, tanto en superficie, como en comunicación entre ellas, y, consecuentemente con ello, de mayor acumulación potencial de recursos hídricos subterráneos.

- **Zonas de Recarga Intermedia (ZRI):** distribuidas por una amplia zona del norte, centro y sureste de la cuenca, que corresponde con sectores muy diversos que abarcan desde el borde meridional de la Ibérica y los occidentales de las zonas mesozoicas plegadas del Prebético Externo (Prebéx) y del Prebético Interno (Prebin), así como de la zona jurásica del Subbético y del sector

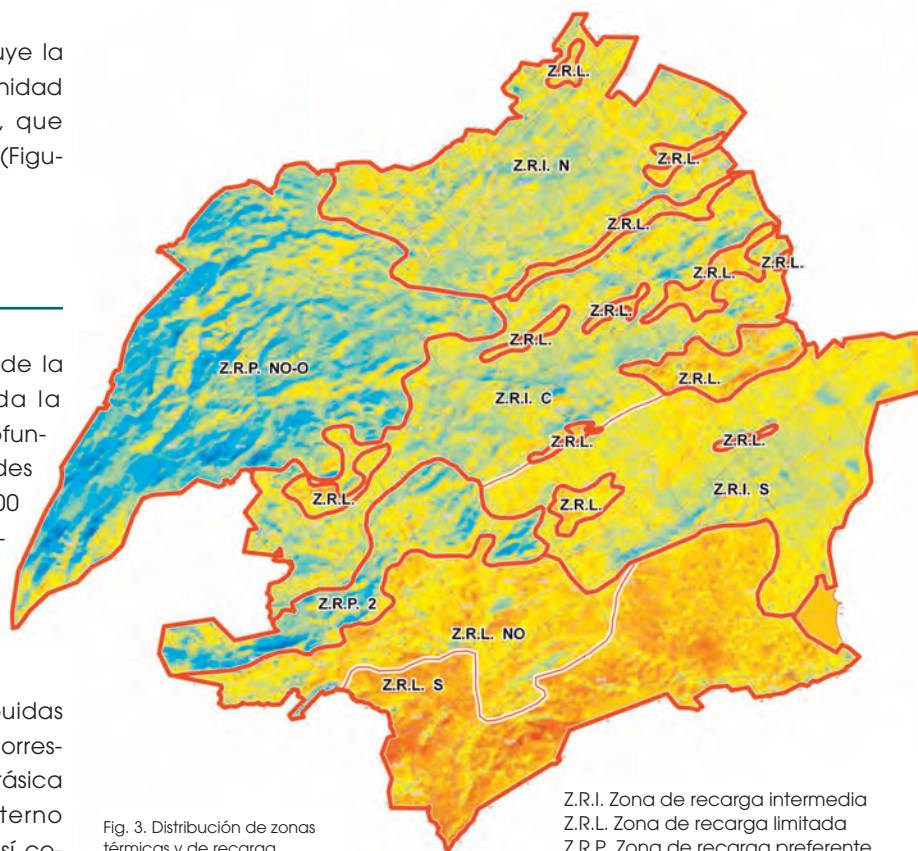


Fig. 3. Distribución de zonas térmicas y de recarga.

Z.R.I. Zona de recarga intermedia  
Z.R.L. Zona de recarga limitada  
Z.R.P. Zona de recarga preferente

oriental del Bético (Triásico de Carrasco y, Vegas Media y Baja del Segura, Terciario de Torrevieja y parte noreste del Campo de Cartagena). Esta amplia zona se caracteriza por unos valores térmicos intermedios, debido a la alternancia de anomalías térmicas negativas (frías) y positivas (calientes), lo cual revertirá en una recarga intermedia y más limitada y sectorial. Estos valores térmicos intermedios (o de menor intensidad que en la Zona de Recarga Preferente) se deben a que la estructura geológica no es tan favorable como en dicha zona, al ser la potencia de los materiales permeables y su continuidad lateral menor, llegando a aflorar, en múltiples zonas, el impermeable regional (Triásico arcilloso-yesífero).

- **Zona de Recarga Limitada (ZRL):** distribuida por el sector costero meridional de la cuenca y por pequeñas zonas con afloramientos diapíricos diseminados por la parte centro oriental de la cuenca, viene definida por el predominio de un carácter térmico positivo o caliente, que implicará una recarga escasa y limitada únicamente a determinados sectores aislados o escasamente comunicados entre sí. Estructuralmente, esta zona se caracteriza por la elevación del zócalo paleozoico, el cual se encuentra fragmentado en bloques, con límites que presentan un carácter subvertical (teclas de piano). Todo ello se traduce en el carácter térmico positivo o caliente de la zona, en el que existe un predominio total de anomalías positivas (calientes) de alta intensidad, incluso a escasa profundidad.

## 9. Identificación de anomalías térmicas favorables y relacionables 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 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

Fig. 4. Diagrama del Campo Térmico.

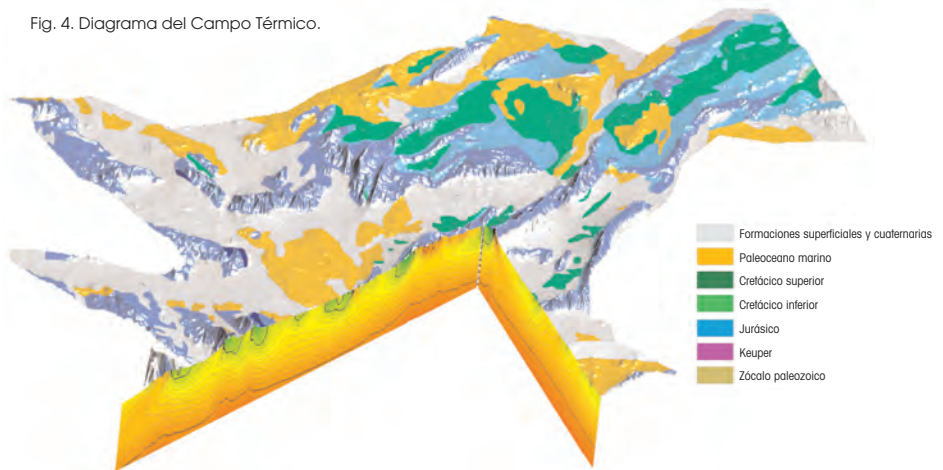


Fig. 5. Diagrama de Interpretación Geológica.

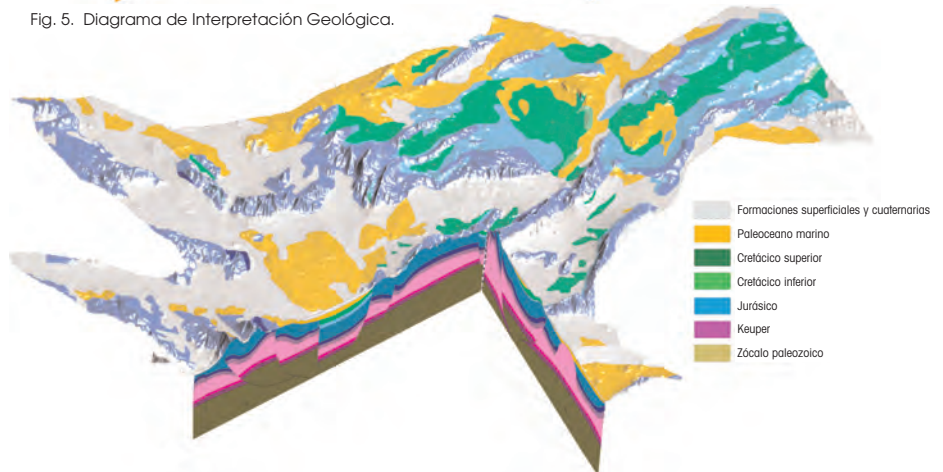
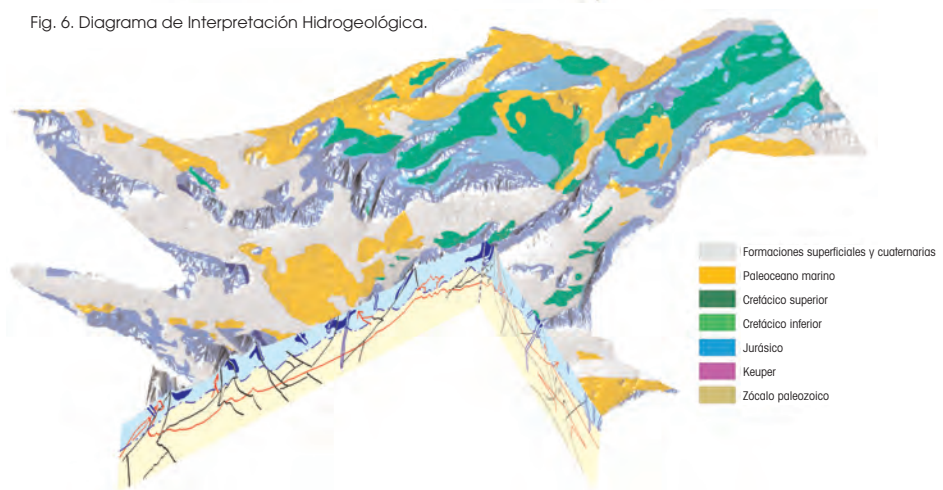
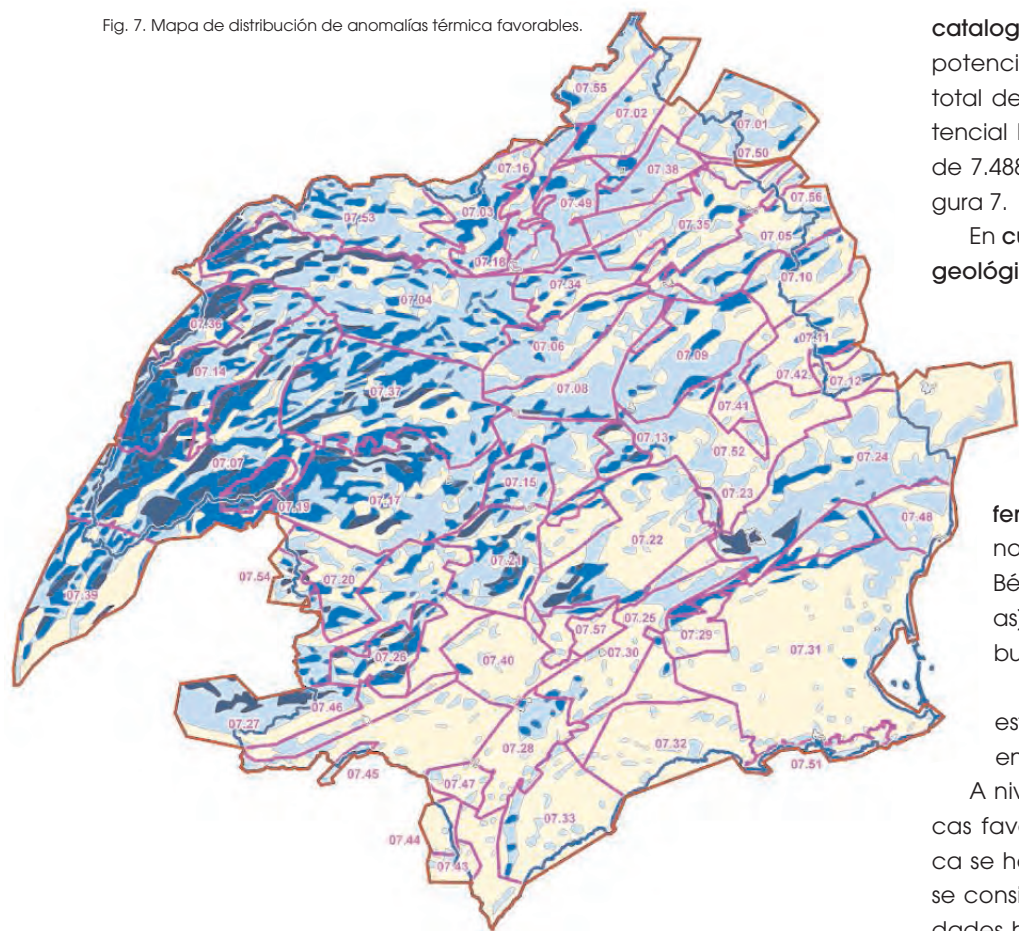


Fig. 6. Diagrama de Interpretación Hidrogeológica.



ca elaborados (LT a diferentes profundidades y 1ª y 2ª derivada térmica), con apoyo de la interpretación geológica e hidrogeológica de cada zona. A título de ejemplo se incluyen las figuras 4, 5 y 6 en las que se puede apreciar el proceso de interpretación.

Fig. 7. Mapa de distribución de anomalías térmica favorables.



El estudio general de la cuenca ha permitido llegar a los siguientes resultados:

A nivel general de toda la cuenca (y con valores y rangos térmicos generales para todo el ámbito de la misma), se han identificado 806 anomalías térmicas favorables (frías), con una extensión total de 11.434 km<sup>2</sup>, (que supone el 58,5 de la superficie total de la cuenca). De estas anomalías favorables el 5,8% (140 anomalías, con una extensión total de 976,5 km<sup>2</sup>) se

catalogan como de potencial alto, el 18% como de potencial medio (348 anomalías, con una extensión total de 2.969,5 km<sup>2</sup>) y el 45% restante como de potencial bajo (318 anomalías, con una extensión total de 7.488,6 km<sup>2</sup>). Su identificación se presenta en la figura 7.

En cuanto a su distribución superficial por dominios geológicos, la mayor superficie de anomalías térmicas favorables se han identificado en los dominios geológicos Prebético Interno (3.271,5 km<sup>2</sup> distribuidos en 225 anomalías) y Subbético (2.937,8 km<sup>2</sup> distribuidos en 227 anomalías), coincidentes con las anteriormente indicadas Zonas de Recarga Preferente, seguidos de los dominios Prebético Externo (2.013,2 km<sup>2</sup> distribuidos en 136 anomalías), Bético (1.859,9 km<sup>2</sup> distribuidos en 184 anomalías) y de la Cordillera Ibérica (1.352,2 km<sup>2</sup> distribuidos en 34 anomalías).

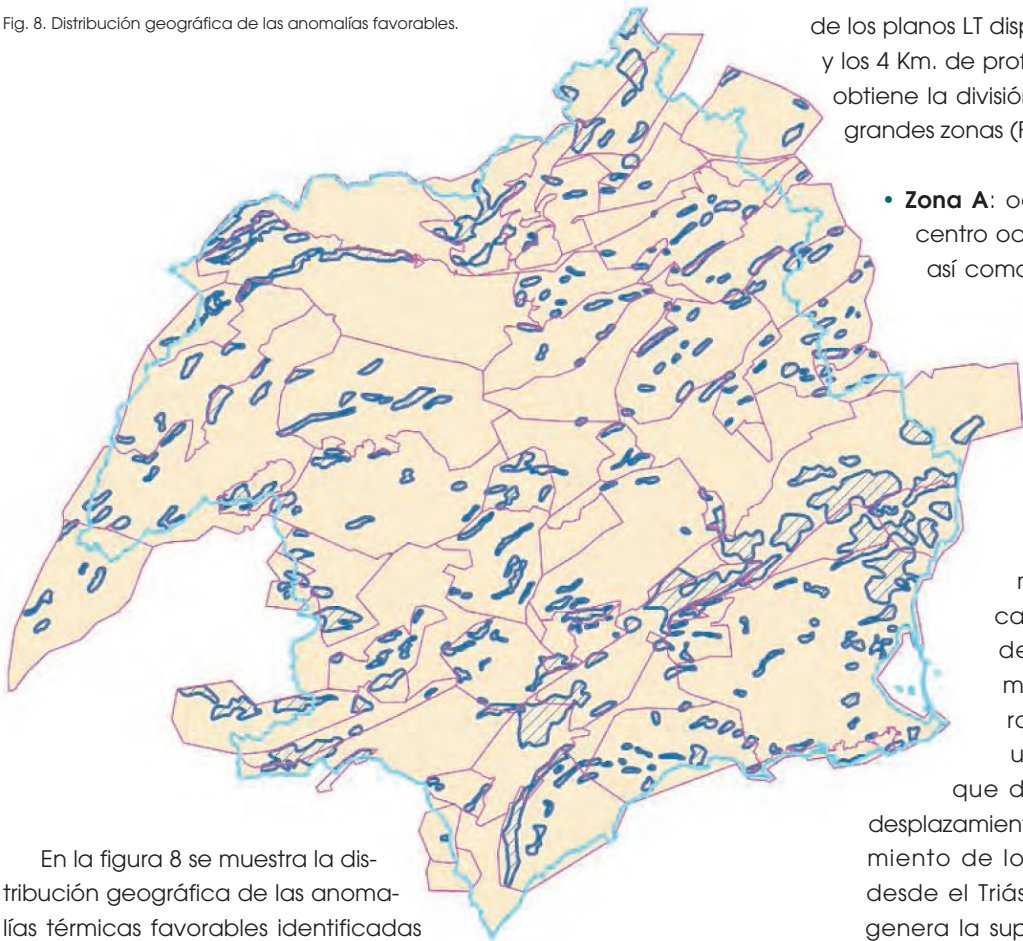
Su distribución detallada por dominios y por estimación de su grado de potencial se incluye en el cuadro 1.

A nivel más detallado, estas 806 anomalías térmicas favorables (frías) identificadas a nivel de cuenca se han filtrado y reducido a 296, que son las que se consideran de mayor interés dentro de las 57 unidades hidrogeológicas estudiadas. En esta segunda selección (Figura 8) se han incluido las 140 identificadas en el estudio general como de potencial alto, junto con otras 156 de potencial medio y bajo que se han considerado como de mayor interés. En su totalidad suponen una superficie total de 2.017,5 km<sup>2</sup>, que representa el 12,2% de la superficie total de las unidades hidrogeológicas de la cuenca y, aproximadamente (incluyendo las zonas sin unidades hidrogeológicas catalogadas) el 10,3 % de la superficie total de la cuenca (considerada ésta como de unos 19.525 km<sup>2</sup>).

Cuadro 1.

| Dominio geológico  | Superficie total de las UU.HH. del dominio (en km <sup>2</sup> ) | Superficies de las anomalías favorables (en km <sup>2</sup> ) |                |                | Superficie total de anomalías favorables (en km <sup>2</sup> ) | % con respecto al total de UU.HH. del dominio |
|--------------------|------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|----------------|----------------|----------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|
|                    |                                                                  | Alto                                                          | Medio          | Bajo           |                                                                |                                               |
| Cordillera Ibérica | 1.638,4                                                          | 0,0                                                           | 188,9          | 1.163,3        | 1.352,2                                                        | 82,5%                                         |
| Prebético externo  | 2.799,8                                                          | 121,7                                                         | 536,7          | 1.354,8        | 2.013,2                                                        | 71,9%                                         |
| Prebético interno  | 3.421,1                                                          | 485,1                                                         | 1.249,6        | 1.536,8        | 3.271,5                                                        | 95,6%                                         |
| Subbético          | 3.377,3                                                          | 326,6                                                         | 757,7          | 1.853,5        | 2.937,8                                                        | 86,9%                                         |
| Bético             | 5.178,0                                                          | 43,1                                                          | 236,6          | 1.580,2        | 1.859,9                                                        | 35,9%                                         |
| <b>Total</b>       | <b>16.414,6</b>                                                  | <b>976,5</b>                                                  | <b>2.969,5</b> | <b>7.488,6</b> | <b>11.434,6</b>                                                | <b>69,6%</b>                                  |

Fig. 8. Distribución geográfica de las anomalías favorables.



En la figura 8 se muestra la distribución geográfica de las anomalías térmicas favorables identificadas en esta segunda selección, y en el cuadro 2 se muestra la distribución detallada por dominios del número de anomalías favorables seleccionadas.

10. Identificación de zonas de interés geotérmico

La identificación de zonas de interés geotérmico de la cuenca se ha realizado mediante la interpretación de la morfología del campo geotérmico a partir

de los planos LT disponibles entre los 180 m y los 4 Km. de profundidad, de los que se obtiene la división de la cuenca en tres grandes zonas (Figura 9):

- **Zona A:** ocupa la mitad norte y centro occidental de la cuenca, así como el sector costero septentrional, y se caracteriza por el predominio de un carácter térmico negativo o frío. Es la más amplia de las tres diferenciadas y coincide geográficamente con la zona de cabecera de la Cuenca del Segura. Estructuralmente, esta zona se caracteriza por presentar una alta deformación, que da como resultado un desplazamiento alóctono y un apilamiento de los materiales que van desde el Triásico al Cretácico, que genera la superposición de grandes

potencias de materiales permeables, lo cual, unido a la topografía (abrupta y montañosa) y a unas condiciones climáticas favorables (alta precipitación), favorece unos elevados índices de infiltración, que es responsable del carácter térmico frío o negativo de toda la zona (siempre asociable a áreas de recarga hídrica).

Esta amplia zona A puede ser dividida, a su vez, en dos subzonas, en función de la intensidad de las anomalías identificadas, directamente relacionada con sus espesores saturados:

| Cuadro 2.          |                  |                                         |                                                           |                                                   |                                       |
|--------------------|------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|---------------------------------------|
| Dominio geológico  | Número de UU.HH. | Superficie total de las UU.HH. (en km²) | Número de las anomalías favorables identificadas (en km²) | Superficie total de anomalías favorables (en km²) | % con respecto al total de las UU.HH. |
| Cordillera Ibérica | 9                | 1.638,4                                 | 24,0                                                      | 215,5                                             | 13,1%                                 |
| Prebético externo  | 7                | 2.799,8                                 | 42,0                                                      | 208,5                                             | 7,4%                                  |
| Prebético Interno  | 8                | 3.421,1                                 | 55,0                                                      | 266,9                                             | 7,8%                                  |
| Subbético          | 16               | 3.377,3                                 | 77,0                                                      | 379,7                                             | 11,2%                                 |
| Bético             | 17               | 5.178,0                                 | 98,0                                                      | 946,9                                             | 18,3%                                 |
| Total              | 57               | 16.414,6                                | 296,0                                                     | 2.017,5                                           | 12,2%                                 |

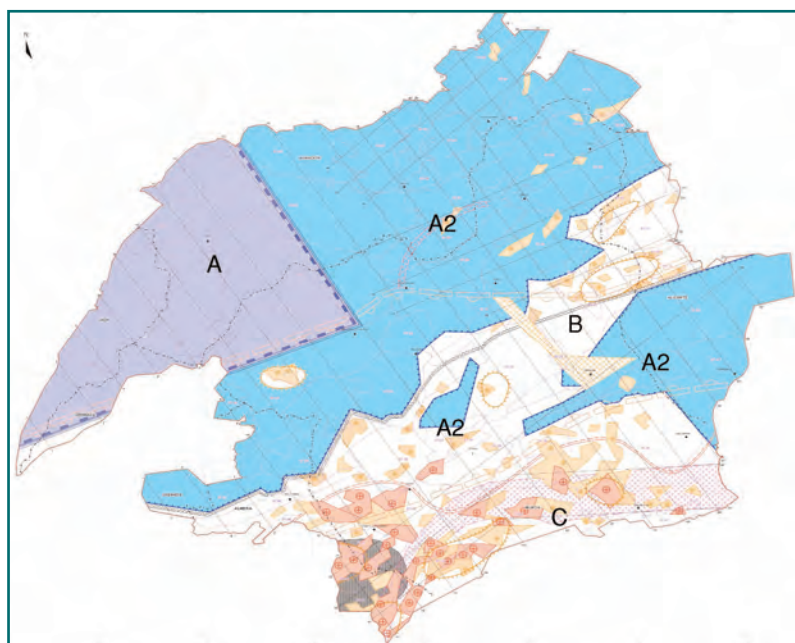


Fig. 9.  
Zonificación  
de la Cuenca  
en función del  
potencial de  
recursos  
geotermiales.

- **Subzona A1:** caracterizada por predominancia de anomalías térmicas negativas (frías) de alta intensidad. Por lo tanto, **esta zona se clasifica como no interesante desde el punto de vista del potencial geotérmico.**
- **Subzona A2:** caracterizada por anomalías térmicas negativas (frías) de intensidad moderada. Por lo tanto, **esta zona se clasifica como de bajo interés o interés puntual desde el punto de vista del potencial geotérmico.**
- **Zona B:** se distribuye por una banda central de la cuenca, de dirección SO-NE y corresponde a una zona de transición e intermedia entre las dos anteriores, con un comportamiento térmico igualmente intermedio, representado por una distribución heterogénea de anomalías geotérmicas positivas y negativas, típica de una dinámica tectónica horizontal que genera deformación, apilamientos y fracturación. Por lo tanto, **esta zona se clasifica como de interés local desde el punto de vista del potencial geotérmico.**  
Geológicamente coincide, en su límite norte, con el límite aproximado de las denominadas Zonas Externas con la cobertera despegada y las Zonas Internas, mientras que el sur se pone en contacto con la zona meridional de la cuenca, caracterizada por presentar una deformación subvertical.

- **Zona C:** ocupa el sector meridional de la cuenca, extendiéndose por la zona costera en dirección SO-NE. Estructuralmente, esta zona se caracteriza por la elevación del zócalo paleozoico, el cual se encuentra fragmentado en bloques, cuyos límites presentan un carácter subvertical (teclas de piano). Esta característica influye en la dinámica térmica de la zona, que se caracteriza por el rápido ascenso de masas de calor, favorecidas por el carácter compresional existente. Asociados a los citados ascensos de masas de calor, se producen también ascensos de fluidos mineralizados, que, igualmente favorecidos por el citado carácter compresional de la zona, llegan a alcanzar la superficie.

Todo ello, se traduce en el carácter térmico positivo o caliente de la zona, en el que existe un predominio total de anomalías positivas (calientes) de alta intensidad, incluso a escasa profundidad. Por lo tanto, **esta zona se clasifica como de alto interés desde el punto de vista del potencial geotérmico.**

Dentro de esta zona, existen afloramientos volcánicos coincidentes con la posición del máximo de la anomalía térmica positiva de la Cuenca del Segura, la cual se relaciona con la posición de la cámara magmática que alimentó el volcanismo, cuya profundidad de emplazamiento debe situarse muy por debajo de los 10 km. de profundidad. Existe una clara relación entre el volcanismo mioceno-pleistoceno y la formación de los recursos geotermiales (generación de una dinámica convectiva por el calor residual existente, que afecta a las aguas de infiltración), no siendo tan evidente el que este volcanismo sea el causante de la extensa anomalía térmica regional existente. Dicha anomalía regional, parece deberse, muy posiblemente, a la actividad magmática profunda, correspondiendo al vulcanismo subaéreo existente una pequeña manifestación de la misma.

Asimismo, y por medio de la Tomografía Remota Térmica (cuya información aportada es totalmente concordante con los datos procedentes de la testificación térmica de sondeos de investigación petrolífera realizados en la Cuenca del Segura), **se han detectado más de 70 anomalías térmicas positivas (calientes)**, las cuales se han clasificado en función de las características del recurso previsto, dentro de los grupos Hipertérmicos (>50°C), Mesotérmicos (25 - 50°C) o Hipotérmicos (< 25°C).

Un importante número de las anomalías identificadas coincide con sectores conocidos y de explotación de recursos geotermales actuales o históricos, como son los casos de los sectores de Archena, Fortuna, Campo de Cartagena y Mazarrón, etc. Sin embargo, otro importante número de anomalías detectadas se identifican en zonas donde no existe información sobre la existencia de recursos geotermales, pudiendo destacar, por su importancia y posible interés, los de la Zona central del Campo de Cartagena, prácticamente la totalidad de la U. H. 07.33: Águilas, los sectores occidental y oriental de Lorca, la Sierra de Almagro, la vertiente Sur de la Sierra de Mojantes (límite entre las UU.HH. 07.20: Alto Quipar y 07.17: Caravaca) y el norte y noreste de Cieza.

### 11. Sectores de salidas de aguas continentales al mar y de intrusión marina

La identificación de los sectores de la cuenca donde se producen procesos de intrusión marina o de descarga de aguas continentales al mar se ha realizado a partir de los datos obtenidos por el sensor infrarrojo térmico (TIR) ASTER instalado en el satélite TERRA. Para dicha identificación se ha utilizado, igualmente, la información de los mapas LT 600 y LT 1.000 m de profundidad, así como la procedente los cortes hidrodinámicos que se han elaborado para el área de estudio (cortes hidrodinámicos 16 a 29, integrados en la figura 10).

El resultado ha sido la **identificación de quince sectores con intercambio activo hídrico con el mar**, ya sea como salidas de aguas continentales subterráneas al mar, o como procesos de intrusión marina, en los cuales, y, de forma generalizada, **parecen influir claramente las lineaciones de fracturas subparalelas y subverticales a la costa** (con direcciones predominantes N-45° y N-120°) al condicionar éstas tanto los factores litológicos y de dirección de las progradaciones, como la morfología del litoral y las vías preferenciales de los flujos subterráneos.

Los sectores de intercambio activo con el mar identificados y sus características dentro de las cuatro unidades hidrogeológicas de las que se ha dispuesto de la mencionada información del sensor infrarrojo térmico (TIR) ASTER, son los reflejados en los cuadros 3,4,5 y 6.

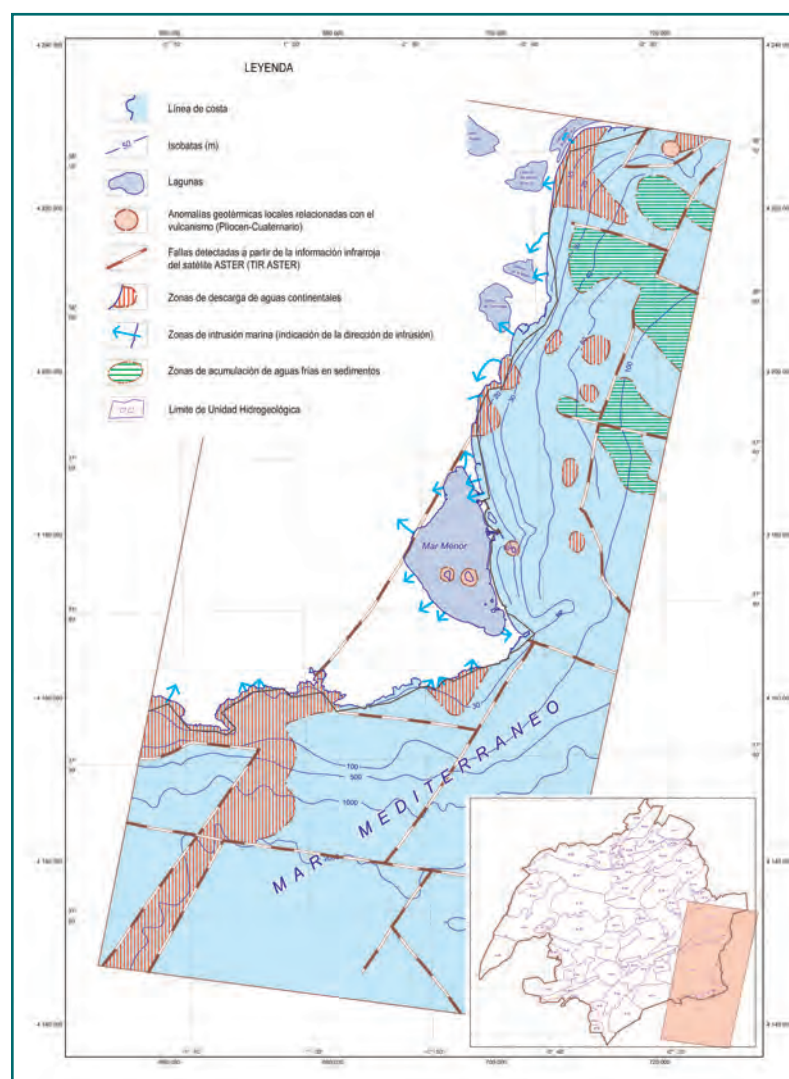


Fig. 10. Mapa de Intrusión marina y de Descargas de Aguas Continentales al mar.

Cuadro 3.

#### Unidad Hidrogeológica 07.24: Vega media y baja del Segura

| Sector                                                                                                                                                 | Tipo de relación                                                                                               | Nivel acuífero afectado         |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|
| Sector entre Playa Lisa y Guardamar del Segura (1)                                                                                                     | Salida de agua continental subterránea al mar (dirección predominante ONO-ESE y entre 0 y 45 m de profundidad) | Depósitos del Cuaternario       |
| Sector de Playa Lisa (2)                                                                                                                               | Intrusión marina (dirección predominante SE-NO)                                                                | Areniscas del Plioceno inferior |
| Sector de La Marina (3)                                                                                                                                | Intrusión marina (dirección predominante SE-NO)                                                                | Areniscas del Plioceno inferior |
| Diversos sectores dentro de la plataforma marina, frente a Playa Lisa y Cabo de Santa Pola, con fondos comprendidos entre 20 y 40 m de profundidad (4) | Posibles salidas subterráneas de aguas continentales al mar                                                    | No determinado                  |

Cuadro 4.

| Unidad Hidrogeológica 07.48: Terciario de Torre Vieja                                                                             |                                                             |                                                                      |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|
| Sector                                                                                                                            | Tipo de relación                                            | Nivel acuífero afectado                                              |
| Sector del norte de Torrelamata (1)                                                                                               | Intrusión marina (dirección predominante SE-NO)             | Areniscas del Plioceno inferior                                      |
| Sector de Torrelamata (2)                                                                                                         | Intrusión marina (dirección predominante E-O)               | Areniscas del Plioceno inferior                                      |
| Sector entre Punta Prima y Torre Vieja (3)                                                                                        | Intrusión marina (dirección predominante SE-NO)             | Areniscas del Plioceno inferior                                      |
| Diversos sectores dentro de la plataforma marina, frente Torre Vieja y con fondos comprendidos entre 40 y 80 m de profundidad (4) | Posibles salidas subterráneas de aguas continentales al mar | Posiblemente procedentes de las calizas bioclásticas del Andalucense |

Cuadro 5.

| Unidad Hidrogeológica 07.31: Campo de Cartagena                                                                                   |                                                                                 |                                                                      |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|
| Sector                                                                                                                            | Tipo de relación                                                                | Nivel acuífero afectado                                              |
| Sector de La Zenia-Cabo Roig                                                                                                      | Salida de agua continental subterránea al mar (1)                               | Depósitos del Cuaternario                                            |
|                                                                                                                                   | Intrusión marina (dirección predominante SO) (2)                                | Areniscas del Plioceno inferior                                      |
| Sector de la Punta de La Horadada                                                                                                 | Salida de agua continental subterránea al mar (3)                               | Depósitos del Cuaternario                                            |
|                                                                                                                                   | Intrusión marina (dirección predominante SO) (4)                                | Areniscas del Plioceno inferior                                      |
| Sectores de la costa interior del Mar Menor (Santiago de la Ribera, Los Alcázares, Rambla de Miranda, Los Urrutias y Playa Honda) | Intrusión marina (con direcciones predominantes O, NO y SO, según sectores) (5) | Areniscas del Plioceno inferior                                      |
| Diversos sectores dentro de la plataforma marina con fondos comprendidos entre 40 y 80 m de profundidad                           | Posibles salidas subterráneas de aguas continentales al mar (6)                 | Posiblemente procedentes de las calizas bioclásticas del Andalucense |

Cuadro 6.

| Unidad Hidrogeológica 07.51: Sierra de Cartagena                                                                                          |                                                                 |                                                                                |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|
| Sector                                                                                                                                    | Tipo de relación                                                | Nivel acuífero afectado                                                        |
| Sector entre Calblaque y Cabo Negrete                                                                                                     | Salida de agua continental subterránea al mar (1)               | Niveles superiores de mármoles triásicos                                       |
|                                                                                                                                           | Intrusión marina (dirección predominante S-N) (2)               | Niveles inferiores de mármoles triásicos                                       |
| Sector entre Escombreras y la Azohía                                                                                                      | Salida de agua continental subterránea al mar (3)               | Niveles superiores de mármoles triásicos y depósitos cuaternarios y terciarios |
|                                                                                                                                           | Intrusión marina (dirección predominante S-N) (4)               | Niveles inferiores de mármoles triásicos en el sector de El Portus             |
| Diversos sectores dentro de la plataforma marina, entre Cartagena y Cabo Tiñoso, con fondos comprendidos entre 30 y 2000 m de profundidad | Posibles salidas subterráneas de aguas continentales al mar (5) | No determinado                                                                 |

12. Conclusiones

Tal y como era el objeto del trabajo “Estudio Tomográfico Remoto Térmico de la Cuenca del Segura” 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 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:

–1. B.S. Siegel, and A.R. Gillespie. Remote Sensing Geology. John Wiley and Sons, N.Y., 1980, 702 p.  
–2. R.P. Gupta. Remote Sensing Geology. Springer – Verlag, Berlin, 2003, 655 p.  
–3. J. A. Adams, and A.G. Gillespie. Remote Sensing of Landscapes with Spectral Images. A Physical Modeling Approach. Cambridge University Press, 2006.  
–4. B.V. Shilin. Investigación aérea térmica aplicada al estudio de recursos naturales. L. Hidrometeorizdat, 1980, pag. 248.  
–5. B.I. Gorniy, B.V. Shilin, G.I. Yasinskiy. Investigación térmica aerospacial. M. Nedra, 1993, pag. 128.  
–6. Kahle, A. B. (1987) Surface emittance, temperature, and thermal inertia derived from thermal infrared multispectral scanner (TMS) data for Death Valley, California.. Geophysics, 52, pp. 858-874.  
–7. A. B. Kahle, A. F. H. Goetz. Mineralogic Information from a New Airborne Thermal Infrared Multispectral Scanner. Science, 1983, 222(4619), p.24 – 27.  
–8. Moran, M.S., Jackson R.D., Slater P.N., and Teillet P.M. Evaluation of simplified procedures for retrieval of land surface reflectance factors from satellite sensor output. Remote Sensing of Environment. 41, 169 – 184 (1992).  
–9. Chavez P.S., Jr. Image-based atmospheric corrections – revised and improved. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. 62(9), 1025 – 1036 (1996).  
–10. A.R. Gillespie, S. Rokugawa, S.J. Hook, T. Matsumaga, and A.B. Kahle. Temperature/ Emissivity Separation Algorithm Theoretical Basis Document, Version 2.4, 1999.  
–11. M.N. Ozisik, H.R.B. Orlande. Inverse Heat Transfer. N.Y. Taylor&Francis. 2000, 300 p.  
–12. S. Haykin. Neural Networks. A Comprehensive Foundation. Prentice Hall, 1998, 1104p.