

La estratigrafía en la modelación matemática de los acuíferos. El caso del embalse subterráneo de Torrevieja (Alicante)

R. Mediavilla⁽¹⁾, J.M. Murillo⁽²⁾ y J.I. Santisteban⁽³⁾

(1) Dirección de Geología y Geofísica, IGME. C/ Ríos Rosas, 23, Madrid 28003
r.mediavilla@igme.es

(2) Dirección de Hidrogeología y Aguas Subterráneas. IGME. C/ Ríos Rosas, 23, Madrid 28003
jm.murillo@igme.es

(3) Dpto. Estratigrafía, Fac. CC Geológicas, UCM. Ciudad Universitaria. Madrid

RESUMEN

En el presente artículo se muestra el análisis estratigráfico realizado en el embalse subterráneo de Torrevieja, a partir de una serie de sondeos realizados en el mismo, para desvelar las incertidumbres surgidas en el modelo conceptual del acuífero. Éstas hacían referencia a la posible conexión con el mar de este acuífero, pues los datos hidroquímicos, que se tenían, no explicaban claramente ésta. Inicialmente se realizaron dos sondeos, que dieron lugar a tres posibles hipótesis, en función de donde se situó en el pasado la línea de costa, que barajaban la posibilidad de que dicho acuífero no estaba conectado con el mar, que existía conexión con el mar o que esta conexión era parcial, por lo que no concretaban la incertidumbre inicial que se planteaba sobre el modelo conceptual relativa a las altas concentraciones de cloruros que se presentaban en zonas relativamente alejadas de la costa, por lo que la contaminación por este ión podía ser debida a otras causas antrópicas o naturales distintas de la intrusión de agua de mar. Al objeto de poder definir un único modelo conceptual se perforaron otros cinco sondeos de investigación hidrogeológica, cuya interpretación paleogeográfica, que se presenta en este artículo, concreta un único modelo conceptual de funcionamiento del acuífero compatible con la existencia de intrusión marina.

Palabras clave: acuíferos costeros, estratigrafía, intrusión marina, modelo conceptual

Stratigraphy in the mathematical modelization of aquifers. The case of Torrevieja underground reservoir (Alicante)

ABSTRACT

The current article shows the stratigraphic analysis carried out in Torrevieja underground reservoir from its multiple wells, in order to reveal the uncertainties arisen from the conceptual model as a consequence of hydrochemical data, whose study was not able to determine the connection between the aquifer and the sea. Taking into account the coastal line which was defined in the past, two first wells were made in the aquifer, giving rise to three possible hypothesis: its complete connection with the sea, the total absence of connection with it or a partial connection between both of them. Under these circumstances, the initial uncertainty posed, further to the cause of high chloride concentrations detected in some zones located far away from the sea, could not be specified, and this was the reason why it was necessary to consider other causes for this kind of pollution instead of the connection with the sea, either the anthropic or another natural one. Lastly, the paleogeographic interpretation of five other investigation wells were made in the aquifer with the purpose of defining an only conceptual model, compatible with the existence of seawater intrusion.

Key words: coastal aquifers, conceptual model, seawater intrusion, stratigraphic

Introducción

La realización de un modelo matemático de simulación hidrogeológica, independientemente de su tipología y finalidad, precisa, como paso previo a la construcción del mismo, de la confección de un modelo conceptual y de un extenso y detallado proceso de captura y tratamiento de datos.

De la correcta definición del modelo conceptual depende la credibilidad y fiabilidad de las predicciones obtenidas a través del modelo de simulación, ya que, aunque el código numérico que se emplee tenga unas especificaciones técnicas adecuadas, los resultados serán erróneos si se elige un modelo conceptual equivocado. De aquí que el apropiado diseño del modelo conceptual sea un factor clave dentro de las

distintas etapas que conforman el proceso de modelado de un acuífero.

Se entiende por modelo conceptual a una representación del sistema de flujo, que se realiza, frecuentemente en forma de bloque diagrama o sección transversal, para sintetizar un problema real y proceder a la organización y comprobación de los datos existentes (Anderson y Woessner, 1992).

En este mismo sentido se decantan un importante número de modelistas españoles (Sahuquillo, 1972; Delgado y López, 1983; Lucena, 1986; García, 1986; Martí, 1986; Estrela, 1992; Samper *et al.*, 1995), que lo consideran una simplificación de una situación real que permite representar cualitativamente el esquema de funcionamiento de un sistema hidrogeológico, aunque cada autor realiza sus propias matizaciones como se puede apreciar en la tabla 1.

Una definición reciente (CSN, 2000) lo concibe como una hipótesis descriptiva de la geología, hidrogeología e hidrodinámica y de cómo estas se relacionan y estructuran a fin de concretar sus repercusiones en los fenómenos de flujo y transporte de contaminantes en el medio geológico.

En esencia, un modelo conceptual de un sistema hidrogeológico no es otra cosa que la caracterización de sus rasgos, componentes y funcionamiento. Su construcción se fundamenta en un exhaustivo estudio de síntesis en el que se recoge, analiza y depura la información existente. En ocasiones, el resultado de este trabajo no conduce a un único modelo conceptual o incluso a la identificación de un modelo cla-

ramente definido. En estos casos, donde la incertidumbre de la información utilizada es importante, es preciso proceder a una concreción más detallada del medio físico mediante la realización de alguna investigación complementaria o a la reconsideración de alguna de las hipótesis formuladas.

La construcción de un modelo conceptual puede implicar la realización de dos etapas secuenciales. En la primera de ellas se recoge, analiza y depura la información tratada en estudios anteriores. Su objetivo es evaluar el grado de incertidumbre que pesa sobre dicha información o sobre alguno de los modelos conceptuales que se han elaborado a partir de la misma. La segunda, que no siempre se precisa realizar, hace referencia a la necesidad de desarrollar nuevos trabajos e investigaciones tendentes a completar y mejorar el grado de información que existe en un determinado acuífero, ya que de lo contrario no se podría abordar con fiabilidad la construcción del modelo conceptual.

En la tabla 2 se sintetizan y clasifican los datos que intervienen en las distintas etapas que conforman el proceso de construcción, ajuste y explotación de un modelo matemático y en la tabla 3 los métodos de obtención de dichos datos.

En lo que respecta a la geología del sistema hidrogeológico que se quiere modelar cabe indicar que la misma contribuye a precisar aspectos tales como el número y la tipología de las formaciones acuíferas, elementos confinantes, condiciones existentes en los bordes del modelo, características hidrodinámicas de

Modelista	Definición de modelo conceptual
Andreu (1993)	Es una conceptualización de un sistema físico que conserva sus características esenciales para el fin que se persigue, por lo que no siempre es necesario considerar todas sus facetas.
Delgado y López-García (1983)	Es el resultado de una síntesis hidrogeológica del sistema que se quiere reproducir matemáticamente.
Estrela (1992)	Es una idea, fundamentalmente cualitativa, que se tiene del funcionamiento de un sistema.
García (1986)	Es aquella fase del modelo en la que a partir de los datos existentes se establecen las hipótesis de funcionamiento del acuífero que, a veces, puede conducir a la necesidad de determinar nuevos datos.
Lucena (1986)	Es una etapa de la construcción del modelo donde se definen el tipo de discretización, tanto geométrica como temporal, donde se deben de encajar los datos conocidos: las hipótesis teóricas que se han de utilizar para generalizar los datos de que se dispone, los parámetros significativos y las relaciones físicas que existen entre ellos; y, finalmente, el funcionamiento del sistema.
Martí (1986)	Es un esquema general de flujo que se define como paso previo al planteamiento de cualquier modelo matemático por simplificado que este sea.
Sahuquillo (1972)	Es una simplificación de una situación real que solo se conoce puntualmente a través de un número limitado de datos.
Samper (1995)	Es una representación cualitativa del esquema de funcionamiento hidrodinámico e hidroquímico del acuífero.

Tabla 1. Definición de modelo conceptual según diferentes autores
 Chart 1. Definition of the conceptual model according to different authors

Fase o etapa del modelo	Característica que representa	Denominación específica del dato considerado	
Construcción	Geometría del sistema	<ul style="list-style-type: none"> Cotas de la base y del techo de cada una de las formaciones consideradas. Límites físicos o hidráulicos de cada una de las formaciones del sistema. 	
	Características hidráulicas	<ul style="list-style-type: none"> Permeabilidad y/o transmisividad. Anisotropía. Porosidad eficaz. Coefficiente de almacenamiento. Factor de goteo y/o resistencia hidráulica de los acuitardos. Capacidad de infiltración de la superficie del terreno y del lecho de ríos y lagos. 	
Construcción y ajuste	Funcionamiento hidráulico	<ul style="list-style-type: none"> Identificación de las áreas de recarga y descarga. Establecimiento y cuantificación de las relaciones existentes entre acuíferos. Establecimiento y cuantificación de las relaciones existentes entre los acuíferos y las aguas superficiales. Tipo de condiciones en los límites. 	
Ajuste	Acciones sobre el sistema	<ul style="list-style-type: none"> Distribución espacial y temporal de la infiltración de la lluvia. 	<ul style="list-style-type: none"> Distribución espacial y temporal de la precipitación. Distribución espacial y temporal de la evapotranspiración real. Distribución espacial y temporal de la escorrentía superficial. Distribución espacial y temporal del agua de lluvia y del agua freática en zonas sin riego ni poblaciones.
		<ul style="list-style-type: none"> Distribución espacial y temporal de las pérdidas de agua del acuífero por evaporación y evapotranspiración. 	
		<ul style="list-style-type: none"> Infiltración de excedentes de riego. 	
	Variaciones del potencial hidráulico	<ul style="list-style-type: none"> Distribución longitudinal y temporal de la recarga o descarga de acuíferos al mar y cursos superficiales de agua (ríos, arroyos, canales, acequias, manantiales, zonas encharcadas, embalses, lagos). Superficie piezométrica de cada formación acuífera para cada intervalo de tiempo. Hidrogramas en puntos representativos del sistema. 	
Explotación	Leyes o reglas que permiten generar el comportamiento futuro del sistema	<ul style="list-style-type: none"> Evolución de bombeos y recargas. Evolución de la recarga por infiltración de la lluvia. Evolución de la infiltración de excedentes de riego. Evolución de la recarga por ríos o canales. Evolución de la recarga o descarga a partir de grandes masas de agua superficial. Evolución de la recarga o descarga a partir de acuíferos vecinos. 	

Tabla 2. Datos que es preciso considerar en la elaboración de un modelo matemático. Elaborado a partir de Custodio (1972)
 Chart 2. Data to consider in the development of a mathematical model. Elaborated from Custodio (1972)

los distintos materiales que conforman un determinado sistema acuífero, áreas por donde se recarga o descarga el mismo, zonas donde se genera escorrentía superficial y espesores de material acuífero, aunque es necesario puntualizar que el estudio de la geología no da siempre lugar a una concreción

cuantitativa de la geometría, hidrodinámica y funcionamiento del sistema hidrogeológico.

La estratigrafía, como rama de la geología que estudia los estratos, contribuye a discernir, reconocer y reconstruir secuencias y eventos geológicos tales como el avance o el retiro del mar, las extinciones

CARACTERÍSTICA QUE PERSIGUE DEFINIR	MÉTODO
Geometría	<ul style="list-style-type: none"> • Sondeos. • Cartografía geológica e hidrogeológica. • Geofísica. • Piezometría. • Ensayos de bombeo e hidrogramas.
Características hidráulicas	<ul style="list-style-type: none"> • Ensayos de bombeo. • Ensayos de descenso. • Ensayos en piezómetros. • Permeámetros. • Granulometría. • Trazadores. • Balances. • Neutrónicos. • Eficiencia a la marea barométrica. • Métodos ambientales.
Funcionamiento hidráulico	<ul style="list-style-type: none"> • Superficie piezométrica. • Hidrogramas. • Trazadores. • Métodos geohidroquímicos y ambientales.
Acciones sobre el sistema	<ul style="list-style-type: none"> • Medidas hidrometeorológicas. • Medidas toronómicas. • Medidas químicas. • Medidas piezométricas. • Análisis estadístico.
Respuestas del sistema	<ul style="list-style-type: none"> • Piezometría. • Aforos.

Tabla 3. Métodos de obtención de datos para su incorporación a un modelo matemático (Custodio, 1972)
 Chart 3. Data acquisition methods for their introduction in a mathematical model (Custodio, 1972)

ocurridas a determinados organismos en el transcurso del tiempo geológico y los plegamientos acaecidos en determinados lugares, lo que proporciona una mejor comprensión de la forma y geometría de los estratos, de su composición litológica, y de sus propiedades y características físicas y químicas, que al final se traduce en un mayor conocimiento hidrogeológico de los acuíferos y en una modelación matemática de los mismos más precisa y plausible.

Lo novedoso del presente artículo radica en la utilización de la estratigrafía como una técnica de apoyo para confirmar que entre el acuífero de Torre Vieja y el mar Mediterráneo existe conexión hidráulica.

Modelo conceptual del acuífero de Torre Vieja

El acuífero costero de Torre Vieja se sitúa en la zona sur de la provincia de Alicante (Figura 1). El modelo

conceptual que se ha venido barajando para este acuífero considera que el mismo está compuesto por areniscas y carbonatos pliocenos, con un espesor que oscila entre 30 y 100 m, una superficie de afloramientos permeables de 13 km² y una extensión total de 167 km². El nivel permeable presenta como base una capa impermeable margosa del Mioceno superior, mientras que una marga blanca pliocena situada a techo lo confina en aquellos lugares donde el acuífero no aflora en superficie. El acuífero está completamente rodeado de límites impermeables, excepto en el borde oriental, donde se cree que está en contacto con el mar (García Aróstegui *et al.*, 2003). Esta incertidumbre se debe a que el acuífero presenta altas concentraciones de cloruros en zonas relativamente alejadas de la costa, por lo que la contaminación por este ión puede ser debida a otras causas antrópicas o naturales distintas de la intrusión de agua de mar.

En la zona existen dos lagunas saladas, la de Torrevieja y la de La Mata. Estas lagunas están conectadas entre sí y con el mar mediante canales artificiales, y se utilizan para la producción de sal. Tradicionalmente se ha considerado que las lagunas están desconectadas del acuífero (DPA-IGME, 1982), aunque otros autores (Durán *et al.*, 2005) opinan lo contrario.

La explotación intensiva del acuífero comenzó en la década de 1960, debido principalmente a las necesidades de agua para riego. Posteriormente la zona experimenta un importante proceso de urbanización que incrementa la explotación de las aguas subterráneas para este fin. El bombeo que se realiza en este acuífero se estima actualmente en unos 5 hm³/a (Hornero *et al.*, 2003).

La puesta en marcha de un estudio destinado a la caracterización de la intrusión, apoyada en un mode-

lo matemático de densidad variable, ha puesto en evidencia, en sus primeros resultados, la necesidad de concretar más exhaustivamente la forma y relaciones estratigráficas y geometrías de las diferentes formaciones geológicas entre sí, con el mar y con las lagunas, ya que el modelo conceptual que se ha descrito anteriormente para el acuífero de Torrevieja no ha resultado del todo satisfactorio, para la construcción del modelo matemático de densidad variable, que reproduzca los datos de piezometría e ión cloruro medidos en este acuífero (Martínez-Santos *et al.*, 2004).

Para intentar mejorar el modelo conceptual de este acuífero y profundizar en el conocimiento que se tenía sobre la geometría del mismo se programó una campaña de dos sondeos (La Mata 1 y La Mata 2), cuya situación se localiza en la figura 1 y cuyas columnas estratigráficas se muestran en la figura 2.

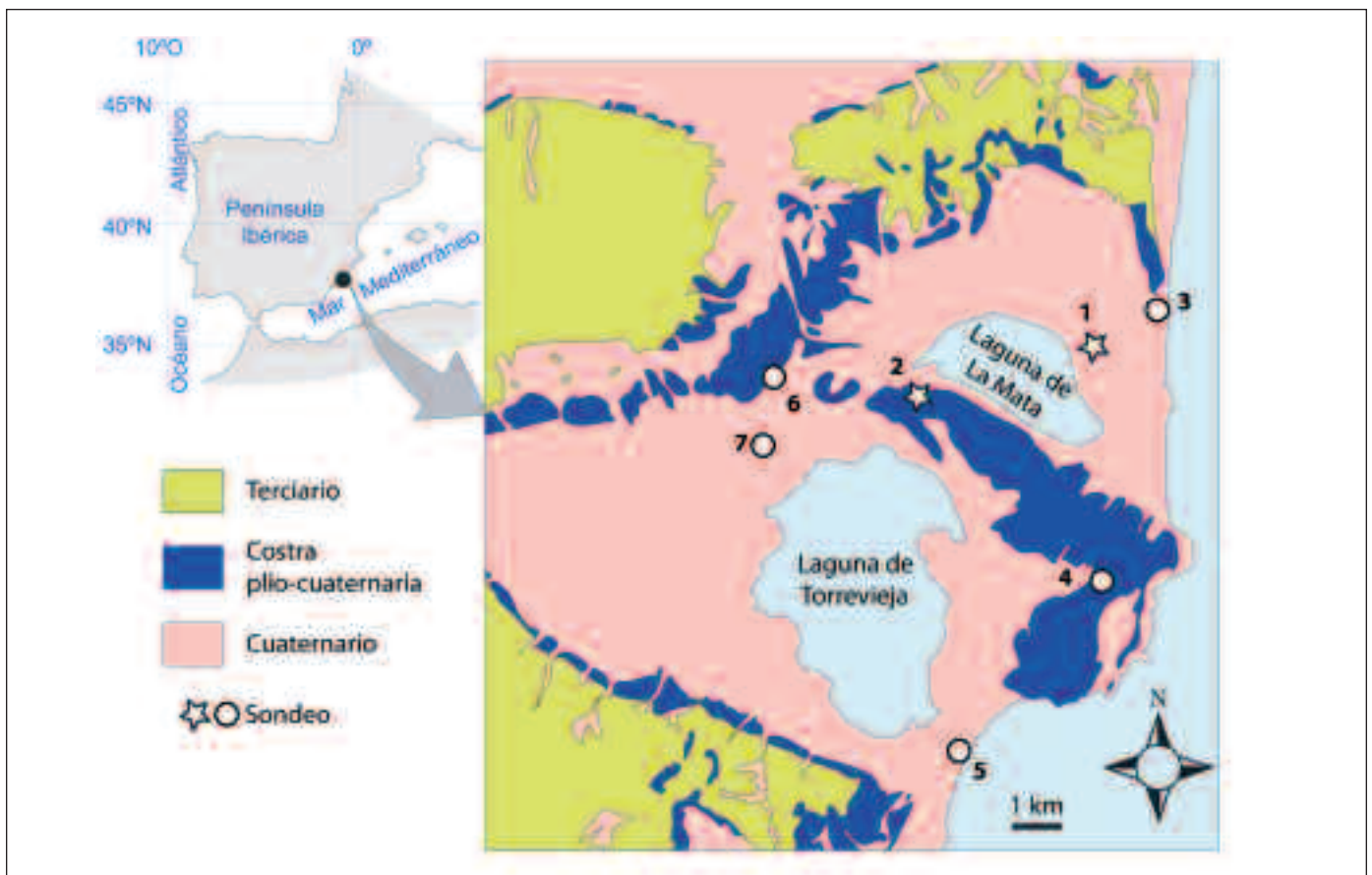


Figura 1. Situación geográfica y geológica de la Laguna de La Mata y situación de los sondeos estudiados. 1: Sondeo de La Mata-1; 2: Sondeo de La Mata-2; 3: Sondeo de Guardamar; 4: Sondeo de Torrevieja-1; 5: Sondeo de Torrevieja-2; 6: Sondeo de Los Montesinos-1; 7: Sondeo de Los Montesinos-2

Figure 1. Geographical and geological situation of La Mata Lake and situation of the studied wells. 1: La Mata-1 well; 2: La Mata-2 well; 3: Guardamar well; 4: Torrevieja-1 well; 5: Torrevieja-2 well; 6: Los Montesinos-1 well; 7: Los Montesinos-2 well

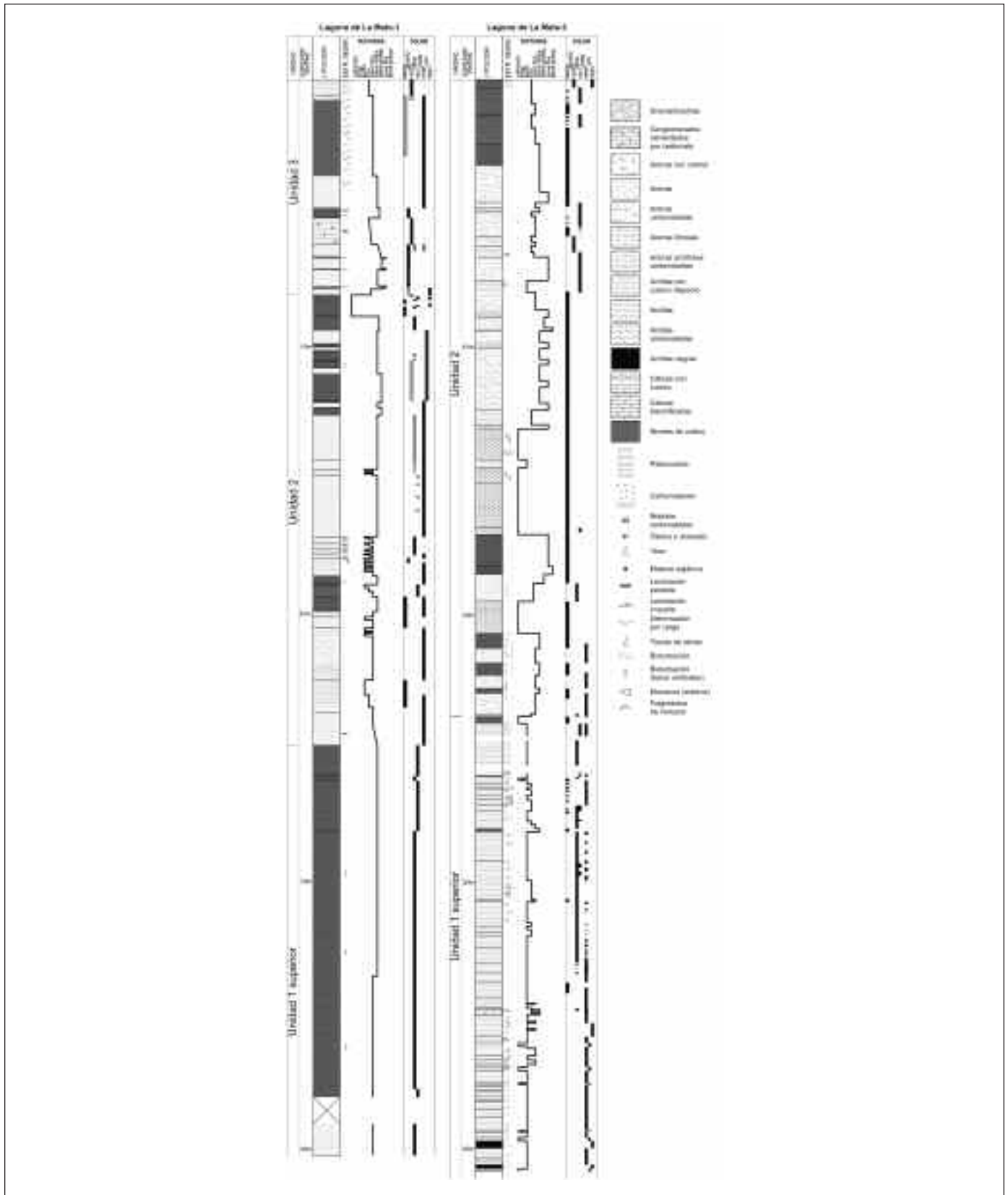


Figura 2. Columnas estratigráficas de los sondeos de La Mata 1 y La Mata 2

Figure 2. Stratigraphic columns of La Mata 1 and La Mata 2 wells

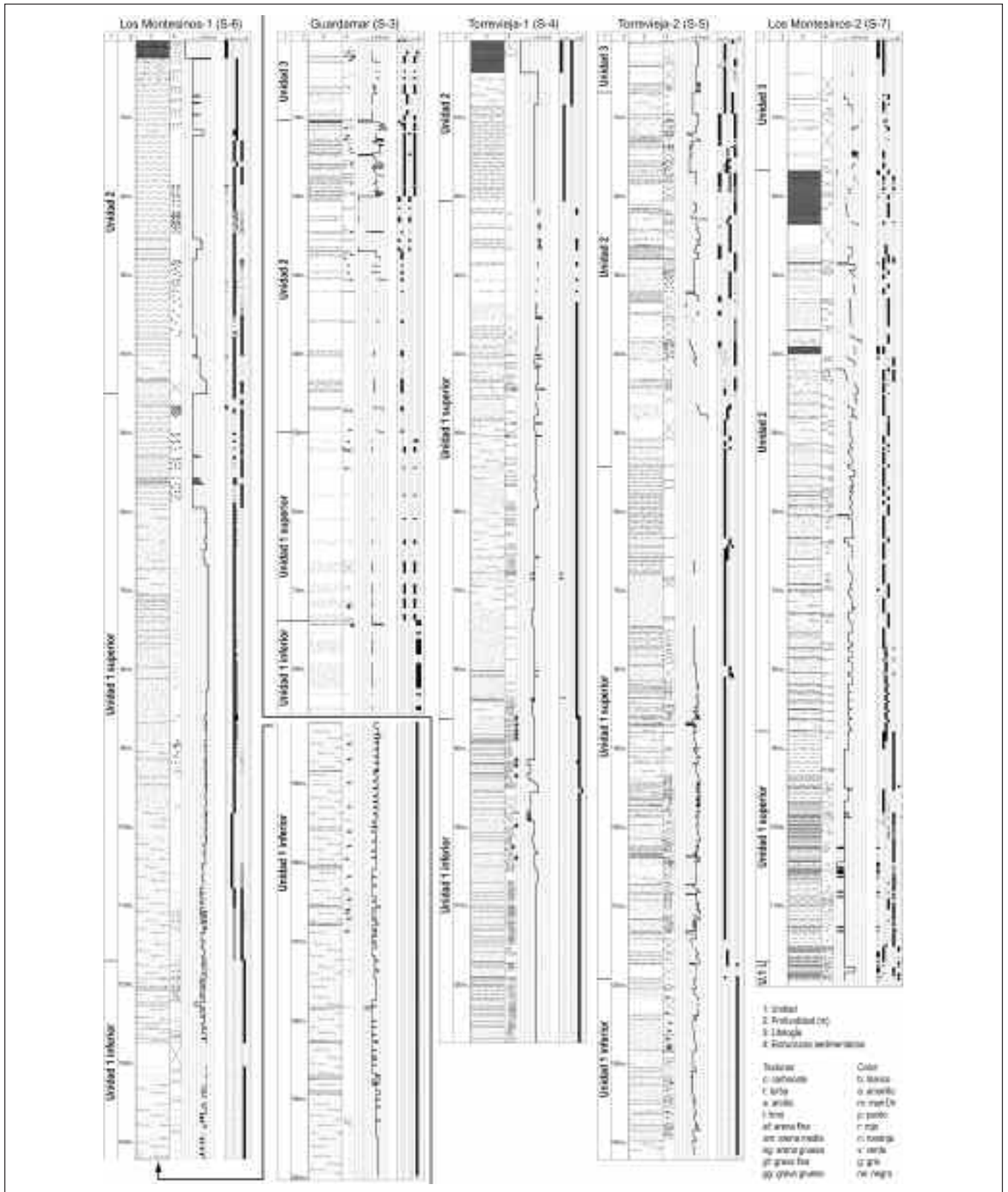


Figura 3. Columnas estratigráficas de los sondeos Guardamar, Torrevieja-1 Torrevieja-2, Los Montesinos-1 y Los Montesinos-2
 Figure 3. Stratigraphic columns of Guardamar, Torrevieja-1, Torrevieja-2, Los Montesinos-1 and Los Montesinos-2 wells

Los resultados que proporcionaron estos sondeos no aclaraban la situación existente y originaron nuevas incertidumbres, ya que planteaban escenarios paleogeográficos que daban lugar a modelos conceptuales muy diferentes, que no permitían abordar la construcción de un modelo matemático de simulación fiable y robusto. Así, entre las posibles configuraciones que se podían barajar, para el acuífero de Torrevieja, en función de donde se situó en el pasado la línea de costa, cabía la posibilidad de contemplar que dicho acuífero no estaba conectado con el mar, que existía conexión con el mar o que esta conexión era parcial (Santiesteban *et al.*, 2004).

Para aclarar esta controversia y poder definir un único modelo conceptual se perforaron otros cinco sondeos de investigación hidrogeológica, cuya situación se localiza en la figura 1 y cuyas columnas estratigráficas se muestran en la figura 3. La interpretación paleogeográfica que se obtiene a partir de las mismas concreta un modelo conceptual de funcionamiento

del acuífero compatible con la existencia de intrusión marina.

Contexto geológico del acuífero de Torrevieja

Las lagunas de Torrevieja y La Mata se sitúan en el extremo oriental de la Cordillera Bética al sur de la denominada Depresión del Bajo Segura.

Esta zona obtuvo su configuración actual en tiempos recientes (Holoceno) y hasta el Pleistoceno se trató de un área con mayor o menor grado de conexión con las restantes cuencas del Prebético (Montenat *et al.*, 1996; Montenat y Ott D'Estevou, 1996).

Su historia reciente, que se inició a finales del Tortonense, está relacionada con los diferentes pulsos tectónicos que, hasta hoy en día, modelan el relieve de la zona y que provocaron el desarrollo de discontinuidades de carácter regional que delimitan

SONDEO (Organismo ejecutor y denominación asignada)	X	Y	Z aprox.	METROS PERFORADOS
La Mata – 1 (Diputación de Alicante; Diputación-1)	705.530	4211.800	< 10 (alrededor de 5 m.s.n.m.)	40,80
La Mata – 2 (Diputación de Alicante; Diputación-2)	700.780	4212.080	3	40,20
Guardamar (IGME; Sondeo-3)	706.090	4213.820	7 aprox.	85
Torrevieja – 1 (IGME; Sondeo-4)	704.740	4208.700	40	127,2
Torrevieja – 2 (IGME; Sondeo-5)	701.840	4204.880	10 aprox.	141,5
Los Montesinos – 1 (IGME; Sondeo MP-1)	697.100	4212.390	55	198,5
Los Montesinos – 2 (IGME; Sondeo-MP-2)	696.540	4210.610	15	119,13

Tabla 4. Coordenadas UTM y metros perforados en los sondeos de investigación en el acuífero de Torrevieja
Chart 4. UTM coordinates and meters drilled in the investigation wells of Torrevieja aquifer

las principales unidades estratigráficas identificadas.

Las principales unidades reconocidas a nivel regional corresponden al Tortoniense superior-Messiniense, Messiniense, Plioceno, Pleistoceno y Holoceno. Todas ellas están separadas por discontinuidades relacionadas con tectónica compresiva o de desgarre (cabalgamientos, fallas transcurrentes y pliegues).

Martínez *et al.* (1977) y Almera *et al.* (1978) identificaron estas unidades en los afloramientos y sondeos realizados en la zona de Torreveja y en la de Guardamar, respectivamente, y las interpretaron en relación a variaciones del nivel del mar ligadas a la tectónica. Tectónica que al mismo tiempo era responsable de importantes variaciones de espesor y facies que se dan en cortos espacios.

Los sondeos realizados se localizan en las proximidades de las lagunas de La Mata y Torreveja y se ubican sobre un nivel de costra plio-cuaternaria (sondeos de La Mata 2, Los Montesinos 1 y Torreveja 1 en la figura 1) y sobre sedimentos cuaternarios (sondeos de Las Mata 1, Los Montesinos 2, Torreveja 2 y Guardamar en la figura 1).

Interpretación estratigrafía y paleogeografía

El registro estratigráfico, representado en los siete sondeos realizados en el área de La Mata-Torreveja (Tabla 4), se divide en tres grandes unidades separadas por discontinuidades de carácter regional y que abarcan desde el Messiniense hasta el Cuaternario. Tradicionalmente se ha venido considerando que de estas unidades es en la unidad pliocena donde se sitúa el acuífero de Torreveja, sin embargo las observaciones realizadas en el estudio que se describe en el presente artículo ponen de manifiesto que, además, de en la unidad pliocena existen niveles permeables en los depósitos messinienses. La justificación de esta afirmación y la caracterización de los depósitos del Messiniense y Plioceno se realiza a continuación.

Unidad 1: Está representada en todos los sondeos, aunque en ninguno se ha alcanzado su límite inferior. Su límite superior es una discontinuidad que se manifiesta por el desarrollo de costras carbonatadas. Muestra gran variabilidad litológica, tanto vertical como lateralmente, y dentro de ésta unidad se diferencian dos tramos.

Tramo inferior: Se observa en los sondeos de Los Montesinos-1, Los Montesinos-2, Torreveja-1, Torreveja-2 y Guardamar (Tabla 4 y Figura 4) y desde un punto de vista hidrogeológico constituye un nivel impermeable. El espesor máximo observado es de 68

m (sondeo de Los Montesinos-1 en tabla 4 y figura 4) y, en los sondeos de Los Montesinos-1, Torreveja-1, Torreveja-2 y Guardamar, está integrado por areniscas grises-negras de tamaño de grano medio-fino, muy bien calibradas, pobres en matriz y con escasos restos fósiles (conchas y fragmentos de vegetales carbonizados). Su estructura interna consiste en estratificación horizontal o cruzada de bajo ángulo, o bien son masivas, en cuyo caso es frecuente observar bioturbación. Suelen estar cementadas por carbonato y, excepcionalmente, presentan cristales milimétricos de yeso intersticial. Por sus rasgos sedimentarios se asimilan estos materiales a depósitos marinos de plataforma. Este tramo muestra una tendencia general granodecreciente que es muy evidente en el sondeo de Torreveja 1 donde las areniscas pasan hacia el techo a limolitas negras.

Los sedimentos siliciclásticos, descritos, cambian hacia el área de Los Montesinos (sondeo de Los Montesinos 2, Tabla 4) a limolitas negras con intercalaciones de niveles de yeso microlenticular, en empalizada e intersticial. Estos depósitos se han interpretado como sedimentos de sebkha.

El límite entre este tramo inferior y el suprayacente es un paso gradual y rápido (se produce en 30 cm) desde las areniscas y limolitas negras a otras versicolores (ocres-verdes) y desde las limolitas negras con yesos a otras verdes con yesos.

Actualmente se carece de datos paleontológicos que permitan precisar la edad de los materiales, por eso se les ha asignado al Messiniense atendiendo a criterios litoestratigráficos regionales.

Tramo superior: Es el tramo de mayor interés hidrogeológico de esta unidad y aparece completo en los sondeos de Los Montesinos-1, Los Montesinos-2, Torreveja-1, Torreveja-2 y Guardamar, mientras que en los sondeos de La Mata-1 y La Mata-2 únicamente está representado su techo (Tabla 4 y figura 4).

Los máximos espesores se sitúan entorno a 60 m, en los sondeos de Los Montesinos-1, Torreveja-1 y Torreveja-2, y disminuyen hasta situarse próximos a 30 m en los sondeos de Los Montesinos-2 y Guardamar. La composición litológica de este tramo muestra un patrón similar a la de los espesores. Así, en los sondeos de Los Montesinos-1, Torreveja-1 y Torreveja-2, está constituido por el apilamiento de secuencias granodecrecientes, de espesor inferior a 1 m, formadas por calcarenitas, areniscas bioclásticas y areniscas de colores verdes-ocres (versicolores) y/o verdes que, ocasionalmente, intercalan niveles decimétricos de limolitas versicolores (verdes-ocres). Las calcarenitas y areniscas bioclásticas presentan un tamaño de grano de grueso a fino, cantos (centil de 1.5 cm) de cuarzo y cuarcita, escasa matriz arcillosa,

escaso cemento carbonatado y una estructura interna que consiste en estratificación cruzada de alto ángulo. La areniscas son de grano medio-fino, bien calibradas, con escasa matriz y muestran un grado de cementación carbonatada muy variable. Su estructura interna consiste en estratificación horizontal o cruzada de bajo ángulo, o bien son masivas, en cuyo caso es frecuente observar bioturbación. En el sondeo de Guardamar los sedimentos bioclásticos son escasos y este tramo superior está constituido, fundamentalmente, por areniscas ocreas verdes y hacia el área de Los Montesinos (sondeo de Los Montesinos 2, Tabla 4 y figura 4) por limolitas verdes con intercalaciones de niveles de yeso intersticial. Por sus rasgos sedimentarios se asimilan estos materiales a depósitos de plataforma somera que pasa hacia Guardamar a un medio de plataforma más profunda y hacia Los Montesinos a un ambiente de tipo sebkha.

Hacia el techo de este tramo superior se observa una gran variabilidad litológica. En los sondeos de Guardamar y Torrevieja-1 las areniscas versicolores forman el techo del tramo. Hacia el Oeste, en los sondeos de La Mata-1 y Torrevieja-2, las arenas versicolores están afectadas por procesos de encostramiento y rubefacción. En los sondeos de La Mata-2 y Los Montesinos-1 sobre las arenas marinas versicolores se disponen sedimentos lutíticos pardos y encostrados de origen continental. En el sondeo de Los Montesinos-2 las limolitas verdes pasan gradualmente a otras pardas con rasgos de exposición (nodulización, encostramiento, hidromorfía) que se interpretan como sedimentos aluviales. Así, esta unidad culmina en todos los sondeos, excepto en Guardamar y Torrevieja-1, con el desarrollo de niveles de encostramiento que constituyen un nivel de discontinuidad sobre el que se depositan los materiales posteriores.

Actualmente se carecen de datos paleontológicos que permitan precisar la edad de los materiales, por eso se han asignado al Messiniense atendiendo a criterios litoestratigráficos regionales.

Desde un punto de vista hidrogeológico los niveles de calcarenitas y areniscas bioclásticas de este tramo constituyen un nivel permeable. En este sentido, cabe destacar que en los sondeos de Los Montesinos-1 y Torrevieja-1 (Tabla 4) son abundantes los tramos fluidificados debido a la presencia de aguas actuales.

Unidad 2: Es una unidad de gran interés hidrogeológico y aparece completa en los sondeos de Los Montesinos-2, Torrevieja-2 y Guardamar. En los sondeos de Los Montesinos-1, Torrevieja-1, La Mata-1 y La Mata-2 esta unidad coincide con la superficie topográfica actual y, por tanto, debe estar en gran parte erosionada. Se dispone sobre los niveles de enco-

stramiento que forman el techo de la Unidad 1 en los sondeos de Los Montesinos-1, Los Montesinos-2, Torrevieja-2, La Mata-1 y La Mata-2 y, en los sondeos de Torrevieja-2 y Guardamar, reposa sobre las areniscas versicolores. Su límite superior está representado por un nivel de encostramiento (Tabla 4 y Figura 4) que se asigna al Plio-Cuaternario (Montenat *et al.*, 1996).

El espesor máximo observado es de 60 m, en el sondeo de Los Montesinos-2, y disminuye hacia el Este donde se observan espesores de 40 m en Torrevieja-2 y 35 m en Guardamar. La composición litológica de ésta unidad también cambia en dirección Oeste-Este. Así, en los sondeos de Los Montesinos-1 y Los Montesinos-2 está constituida por sedimentos siliciclásticos de origen continental. En los sondeos de La Mata-1, Guardamar y Torrevieja-1 está formada por sedimentos siliciclásticos de origen marino somero. La transición entre ambos se registra en los sondeos de La Mata-2 y Torrevieja-2.

Los sedimentos siliciclásticos de origen continental son arenas, mal calibradas y con abundante matriz limo-arcillosa que forman secuencias granodecrecientes con arcillas pardo-rojizas con nódulos y/o niveles de costras carbonatadas. Además se encuentran algunos depósitos de gravas (niveles de cantos embebidos en una matriz arenoso lutítica).

Las secuencias dominadas por arenas son granodecrecientes, de espesor inferior a 2 m, están formadas por arenas y limos pardo-rojizos. Las arenas, con un tamaño de grano desde grueso a fino, pueden presentar cantos dispersos (centil 3 cm) de cuarzo y cuarcita, muestran una selección muy pobre, abundante matriz limoso arcillosa y rasgos edáficos (trazas de raíces y/o nódulos de carbonato).

Hacia el techo esta unidad presenta un importante desarrollo de perfiles de carbonatación constituidos por nódulos que se incrementan hacia el techo hasta formar verdaderas costras carbonatadas.

Es de destacar la presencia de un nivel fluidificado en la base de esta unidad en el sondeo de Los Montesinos-1 relacionado con la presencia de aguas actuales circulando por ese nivel.

Los depósitos marinos están formados por un apiamiento de secuencias granodecrecientes, de espesor inferior a 1 m, formadas por calcarenitas, areniscas bioclásticas y areniscas que, ocasionalmente, intercalan niveles decimétricos de limolitas. Las calcarenitas y areniscas bioclásticas presentan un tamaño de grano de grueso a fino, cantos (centil de 1.5 cm) de cuarzo y cuarcita, escasa matriz arcillosa, escaso cemento carbonatado y una estructura interna que consiste en estratificación cruzada de alto ángulo. Las areniscas son de grano medio-fino, bien calibradas,

con escasa matriz y muestran un grado de cementación carbonatada muy variable. Su estructura interna consiste en estratificación horizontal o cruzada de bajo ángulo, o bien son masivas.

Sobre estos sedimentos se desarrolla un perfil carbonatado y es de destacar que en el sondeo de Guardamar se identifican 2 niveles de karstificación asociados a los cuales el sedimento aparece fluidificado (presencia de aguas actuales).

En el sondeo de Torrevieja-2 esta unidad (44 m) está constituida por arenas y limos pardos aluviales que alternan con calcarenitas y areniscas bioclásticas de origen marino. Estos depósitos marinos muestran un nivel de karstificación y, como en el sondeo anterior, asociado a él se observa fluidificación del sedi-

mento. El techo de la unidad está marcado por un desarrollo de encostramientos carbonatados.

En el sondeo Laguna de La Mata-2 la composición de la unidad (23,8 m de espesor) es mucho más variada. La sucesión comienza por arenas verdes con perfiles de encostramiento. Sobre estas arenas se disponen calizas brechificadas, con porosidad fenestral y trazas de raíces entre las que se intercalan niveles de limos encostrados y un nivel de gravas encostradas con cantos de caliza. A continuación se encuentran secuencias de gravas, arenas y lutitas con un grado de carbonatación variable, trazas de raíces y paleosuelos. Estos materiales, a techo se encuentran fuertemente encostrados. En este sondeo, se observa un tránsito de ambientes marinos someros (arenas ver-

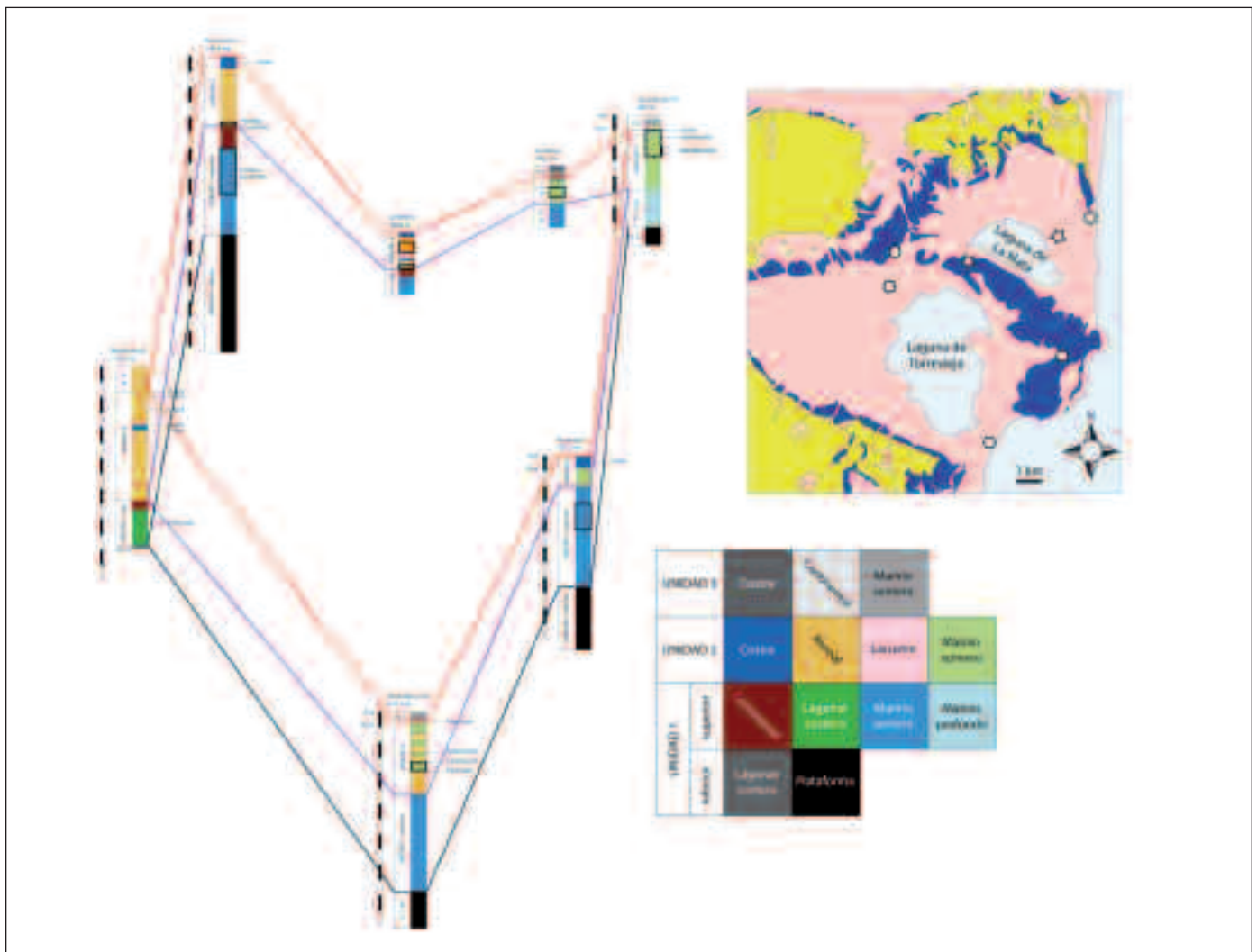


Figura 4. Correlación estratigráfica de los sondeos del área de estudio
 Figure 4. Stratigraphic correlation of the wells located in the study area

des) a continentales, ya sean lacustres litorales (calizas brechificadas) como aluviales (secuencias de gravas, arenas y lutitas).

Es de destacar que, como en el sondeo anterior, la fluidificación por aguas actuales es abundante, si bien cabe destacar que no se encuentra desarrollada en los niveles de calizas brechificadas.

Los sedimentos de esta unidad se asignan al Plioceno por criterios litoestratigráficos regionales.

Unidad 3: Se encuentra representada en el sondeo Laguna de La Mata-1 (8.1 m de espesor), Torrevieja-2 (6.5 m) y Montesinos-2 (20 m).

En los sondeos de La Mata-1 y Torrevieja-2 los sedimentos representados son arenas y limos ricos en fragmentos y conchas enteras de bivalvos y gasterópodos marinos. Estos sedimentos, por su textura y contenido fósil, se interpretan como depósitos marinos litorales cuaternarios.

En el sondeo de Los Montesinos-2 los sedimentos de esta unidad son arenas y lutitas rojas de origen aluvial.

La correlación de los sondeos, junto con los datos de superficie, permite hacer una reconstrucción paleogeográfica en la que se observa que las zonas emergidas (continente) se disponían hacia el oeste, mientras que el mar abierto lo hacía hacia el este. La evolución que se registra muestra subidas y bajadas del nivel del mar, responsables de la distribución de facies dentro de cada unidad y de las rupturas que las separan. Así, la Unidad 1 muestra un descenso del nivel del mar que tiene como consecuencia la implantación de facies continentales, probablemente próximas al litoral, a techo del sector occidental. Este descenso debió culminar con una caída acelerada de este nivel que provocó el desarrollo de la costra que constituye el límite de la unidad.

Un ascenso del nivel del mar provocó el desarrollo de los niveles marinos de la base de la Unidad 2. Un nuevo descenso relativo del nivel del mar, que pudo ser motivada tanto por una caída eustática, como por causas tectónicas, propició el desplazamiento de la línea de costa hacia el este y la implantación de sistemas continentales en el oeste cada vez con mayor capacidad de transporte. El máximo descenso del nivel del mar, probablemente motivado por la elevación tectónica de esta área, quedó registrado en la costra que se identifica tanto en los dos sondeos como en la cartografía geológica regional.

Finalmente, en el Pleistoceno, un nuevo ascenso eustático, que no llegó a alcanzar los niveles anteriores, provocó que el mar volviera a ocupar esta área, si bien con una extensión menor.

Geometría del acuífero de Torrevieja

A partir de la testificación de los sondeos se han identificado una serie de tramos que, ya sea por sus características texturales, por la presencia de agua o por el porcentaje de recuperación del testigo, potencialmente son favorables para permitir la migración del agua.

Estos niveles siempre se sitúan en los materiales de la Unidad 2 y/o techo de la Unidad 1 (techo de la subunidad superior) y forman un "acuífero" de geometría compleja que, dependiendo de la localización y facies, puede estar compuesto por uno o 2 niveles de espesor muy variable.

El control ejercido por las facies en la distribución de este "acuífero" es importante. Así, dentro de las facies continentales, se desarrolla a favor de las facies de gravas (sondeo de La Mata-2) o niveles de arenas gruesas (sondeo de Montesinos-1). Sin embargo, los materiales lutíticos, las arenas ricas en matriz o los carbonatos lacustres en estos mismos sistemas actúan como barreras o sellos para la migración del agua (sondeos de La Mata-2, Montesinos-1 y Montesinos-2). Con respecto a los depósitos marinos o de transición, son las facies correspondientes a los ambientes de plataforma más somera (calcarenitas con una excelente porosidad móldica o arenas limpias correspondientes a barras y playas) los más propicios, hecho que se observa en todos los sondeos, mientras que los correspondientes a facies de plataforma más distales o profundos (arenas de grano más fino y con mayor contenido en matriz) o de lagunas costeras/lagoon (ricos en arcillas) constituyen barreras laterales o verticales para el "acuífero". Así, los materiales de grano más fino de la Unidad 1 constituyen su base mientras que los materiales lutíticos ricos en yeso de esta misma unidad son una barrera lateral para la migración del agua.

Una vez establecido el papel de la distribución de facies en las características espaciales del acuífero, se han de mencionar algunos hechos ajenos a la estratigrafía/sedimentología que también determinan las características del acuífero. Uno de estos factores es la topografía, determinada por la configuración tectónica de la zona, que hace que los niveles favorables de la Unidad 2 en los sondeos de Montesinos-1 y Torrevieja-1 se encuentren sobreelevados y/o erosionados. Otro es la proximidad de las aguas marinas que provoca que en el sondeo de Guardamar (de facies de grano grueso y, por lo tanto, favorables) haya habido una importante disolución y pérdida de sedimento (lo que se manifiesta por el bajo porcentaje de recuperación del sondeo en sus metros superiores) que hace que el acuífero en ese sondeo sea muy

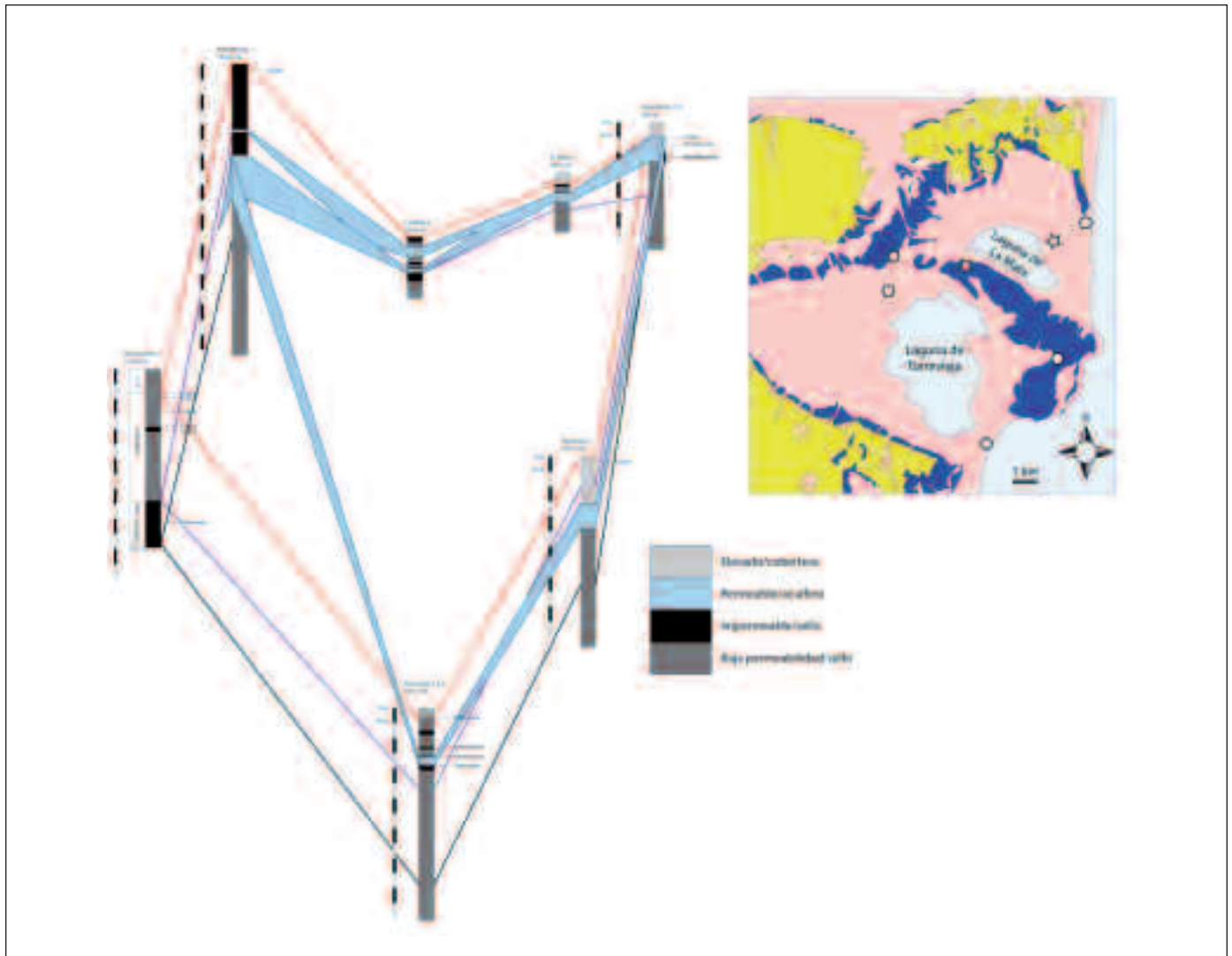


Figura 5.- Distribución de materiales de acuerdo con su permeabilidad y características tridimensionales del acuífero
 Figure 5.- Distribution of materials according to their permeability and the tridimensional characteristics of the aquifer

potente (y al mismo tiempo una zona de gran vulnerabilidad a la intrusión de aguas marinas).

Uno de los hechos estratigráficos que determina la posición del acuífero es la tendencia regresiva que se da a techo de la Unidad 1 (subunidad superior). Esta regresión hace que sobre materiales de plataforma relativamente profunda (por lo tanto de grano más fino y menos permeables) se dispongan materiales más someros (de grano más grueso y con menos matriz) que constituyen la porción basal del acuífero. La gran homogeneidad lateral (en sentido paralelo a la costa) de estas facies es la responsable de la baja variabilidad del acuífero en ese tramo basal. Así mismo, la programación de las facies de transición

hacia el mar hace también que los depósitos de lagunas salinas costeras (sebkhas) se implanten en el área y constituyan el sello lateral de este horizonte. Es de destacar que este cinturón de facies porosas se distribuye en una posición que abarca la línea de costa actual y en una dirección casi paralela a ella, por lo que parece que no hay un sello efectivo en este nivel frente a la intrusión salina marina (Figura 5).

El notable incremento de la tectónica a lo largo del Plioceno (Unidad 2) es el responsable de la continentalización del área y la implantación de sistemas aluviales. La gran variabilidad de estos sistemas (registrada en los rápidos cambios de facies laterales) introduce una importante heterogeneidad al acuífero

(variaciones de espesor y discontinuidad lateral) en el área N-NO mientras que hacia el E, donde continúan las facies marinas, mantiene su homogeneidad.

El hecho de que ambos niveles se encuentren conectados está causado por la coincidencia vertical de las facies marinas someras del techo de la Unidad 1 con las facies aluviales de la Unidad 2 en el N mientras que en el S la tectónica, que actúa de forma manifiesta durante el Plioceno, introdujo variaciones adicionales al provocar el levantamiento parcial del área septentrional de Torre Vieja (Torre Vieja 1) lo que facilitó la conexión lateral de ambos niveles estratigráficos.

Es de destacar la coincidencia adicional de las facies impermeables de sebkha (Unidad 1) y aluviales (Unidad 2) en el sondeo de Montesinos-2, lo que ha propiciado el desarrollo de una barrera vertical para la migración del agua.

Conclusiones

El acuífero de Torre Vieja es un nivel heterogéneo de geometría compleja desarrollado a favor de materiales siliciclásticos y siliciclástico-carbonatados.

Se dispone a favor de los materiales marinos someros del techo del Messiniense (Unidad 1) y continentales y marinos someros de la base del Plioceno (Unidad 2), estando limitado a muro por materiales siliciclásticos correspondientes a depósitos de plataforma profunda (Unidad 1) y hacia el E por materiales lutíticos correspondientes a ambientes de transición (Unidad 1) y a facies continentales ricas en matriz arcillosa (Unidades 1 y 2).

La distribución de materiales, con un tránsito marino-continental en la vertical, hace que este acuífero presente una heterogeneidad que se incrementa hacia el techo. Así mismo, la distribución de facies en franjas de dirección aproximada N-S y la coincidencia de las facies de plataforma somera con la posición actual de la línea de costa hace que este acuífero tenga una buena conexión con el mar y por lo tanto sea muy vulnerable a la intrusión salina marina.

Agradecimientos

Los autores del presente artículo quieren agradecer a Luís Rodríguez Hernández, Jefe del Departamento del Ciclo Hídrico de la Diputación de Alicante, y a José Antonio Hernández, Técnico de la misma, los esfuerzos realizados, para obtener los permisos necesarios, para que se pudieran realizar los sondeos programados en las ubicaciones que se creían más adecuadas.

Referencias

- Almela, A., Quintero, I., Gómez, E., Mansilla, H., Cabañas, I., Uralde, M.A., Martínez, C., Martínez del Olmo, W. 1978. *Mapa Geológico de España E. 1:50.000. Hoja 914 (Guardamar del Segura)*. Ministerio de Industria, Madrid. 18 pp.
- Anderson, M.P. y Woessener, W.W. 1992. *Applied groundwater modeling. Simulation of flow and advective transport*. Academic Press. 381 pp.
- CSN 2000. *Proyecto HIDROBAP. Hidrogeología de medios de baja permeabilidad*. Colección Otros Documentos 20.2000. Consejo de Seguridad Nuclear-Empresa Nacional de Residuos Radioactivos, S.A. 238 pp.
- Custodio Gimena, E. 1972. Recopilación y presentación de los datos de base para la construcción, ajuste y utilización de un modelo de simulación en un sistema acuífero. Número dedicado al seminario sobre modelos analógicos y digitales para la explotación y administración de recursos hidráulicos subterráneos. *Informaciones y Estudios*. Servicio Geológico. Ministerio de Obras Públicas. (37). 102-125.
- Delgado Moya, S. y López García, L. 1983. Modelos matemáticos y modelistas: Ciencia y ficción. *III Simposio de Hidrogeología*. Madrid (9). 3-11.
- DPA-IGME 1982. *Las aguas subterráneas en la provincia de Alicante*. Diputación de Alicante. Informe inédito. 758 pp.
- Durán, J.J., García de Domingo, A., López Geta, J.A., Robledo, P.A. y Soria, J.M. 2005. *Humedales del Mediterráneo español: modelos geológicos e hidrogeológicos*. Instituto Geológico y Minero de España. Serie Hidrogeología y Aguas Subterráneas Nº 3.160 pp.
- Estrela, T. 1992. *Modelos matemáticos para la evaluación de recursos hídricos*. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas. CEDEX. 55 pp.
- García Aróstegui J.L., Aragón Rueda R., Hornero Díaz J. 2003. *Situación de los acuíferos costeros de Cabo Roig y Torre Vieja (Alicante) en relación con la explotación intensiva de sus recursos hídricos*. In: *Coastal aquifers intrusion technology: Mediterranean countries*. Proceedings of the 2003 TIAC Congress. IGME, Madrid.
- García, E. 1986. Planteamiento y ajuste de modelos matemáticos. *XIX Curso de Hidrogeología Aplicada. Área VIII*. Ministerio de Industria y Energía-Ministerio de Educación y Ciencia. 18 pp.
- Hornero, J., Ramos, G., Viñuales, R., Rodes, J.J., Rodríguez, L. 2003. Procedimientos de control para evaluar el impacto de las extracciones de recursos subterráneos salobres en acuíferos salinizados de la zona sur de la provincia de Alicante. In: *Coastal aquifers intrusion technology: Mediterranean countries*. Proceedings of the 2003 TIAC Congress. IGME, Madrid.
- Lucena Bony, C. 1986. Modelos Matemáticos de Simulación Directa. *XIX Curso de Hidrogeología Aplicada. Área VIII*. Ministerio de Industria y Energía. Ministerio de Educación y Ciencia. 1-41.
- Martí Vallbona, B. 1986. El modelo matemático de la cuenca del Duero. *XIX Curso de Hidrogeología Aplicada. Área VIII*. Ministerio de Industria y Energía – Ministerio de Educación y Ciencia. 33 pp.

- Martínez, W., Núñez, A. y Colodrón, I. 1977. *Mapa Geológico de España E. 1:50.000. Hoja 935 (Torrevieja)*. Ministerio de Industria, Madrid. 19 pp.
- Martínez-Santos, P., Martínez Alfaro, P.E., Santisteban, J.I., Mediavilla, R., Murillo, J.M., Hornero, J., Aragón, R. 2004. Assessment of seawater intrusion by means of a variable density model (Torrevieja aquifer, Spain). *18th Saltwater Intrusion Meeting*, Cartagena (España), 31 Mayo – 3 Junio, 2004.
- Montenat, Ch., Ott D'Estevou, P. y Pierson D'Autrey, L. 1996. Miocene basins of the eastern Prebetic Zone: some tectonosedimentary aspects. In: Friend, P.F. y Dabrio, C.J. (Eds.), *Tertiary Basins of Spain. The stratigraphic record of crustal kinematics*. World and Regional Geology, 6: 346-352. Cambridge University Press.
- Montenat, Ch. y Ott D'Estevou, P. 1996. Late Neogene basins evolving in the Eastern Betic transcurrent fault zone: an illustrated review. In: Friend, P.F. y Dabrio, C.J. (Eds.), *Tertiary Basins of Spain. The stratigraphic record of crustal kinematics*. World and Regional Geology, 6: 372-386. Cambridge University Press.
- Sahuquillo Herraiz, A. (1972). Sistemas y Modelos. Número dedicado al seminario sobre modelos analógicos y digitales para la explotación y administración de recursos hidráulicos subterráneos. *Informaciones y Estudios*. Servicio Geológico. Ministerio de Obras Públicas. (37). 11-20.
- Samper, J; Soriano, G; García-Vera, M.A.; Vives, L 1995. Modelación Hidrogeológica de acuíferos aluviales a escala local:1- Modelo Conceptual. *VI Simposio de Hidrogeología*. Sevilla. (19). 613-625.
- Santisteban, J.I., Mediavilla, R., Martínez Santos, P., Castaño, S., Martínez Alfaro, P.E., Murillo, J.M., López Geta, J.A. y Rodríguez, L. 2004. Nuevos datos sobre la estratigrafía de subsuelo del acuífero de Torrevieja (Alicante): implicaciones en el modelo conceptual de funcionamiento. *Hidrogeología y Recursos Hidráulicos*, 27, 215-223.
- Soria, J.M., Alfaro, P., Fernández, J. y Viseras, C. 2001. Quantitative subsidence-uplift analysis of the Bajo Segura Basin (eastern Betic Cordillera, Spain): tectonic control on the stratigraphic architecture. *Sedim. Geol.*, 140, 271-289.

Recibido: marzo 2007

Aceptado: agosto 2007