

Características litoestratigráficas de los depósitos plio-cuaternarios del bajo Guadalquivir en el área de Doñana: implicaciones hidrogeológicas

J. M. SALVANY y E. CUSTODIO

Dept. Enginyeria del Terreny i Cartogràfica, Universitat Politècnica de Catalunya, 08034 Barcelona.

Resumen: Los datos litológicos procedentes de 20 sondeos hidrogeológicos realizados en el área de Doñana (Bajo Guadalquivir) durante la década de 1970 han permitido distinguir, por encima de las margas azules del Tortoniense-Plioceno inferior, cuatro unidades detríticas plio-cuaternarias diferentes: 1) *Unidad Deltaica*, 2) *Unidad Aluvial*, 3) *Unidad Eólica*, y 4) *Unidad de Las Marismas*. Su equivalencia con las formaciones descritas en el margen noroccidental del Bajo Guadalquivir permite atribuir la primera de estas unidades al Plioceno medio/superior-Pleistoceno inferior, la segunda al Pleistoceno superior, y las dos últimas al Pleistoceno final-Holoceno. Se distinguen también dos dominios litológicos: un dominio occidental, donde están representadas las unidades *Deltaica* y *Eólica*; y un dominio oriental, donde lo están las unidades *Deltaica*, *Aluvial* y de *Las Marismas*, así como los niveles más modernos de la *Unidad Eólica*. La distribución de facies y espesores permite interpretar el contacto entre ambos dominios como una falla profunda de dirección NNE-SSO. Esta falla fue principalmente activa durante el Pleistoceno superior, produciendo el hundimiento del dominio oriental simultáneamente con la sedimentación de la *Unidad Aluvial*. Posteriormente fué fosilizada por los sedimentos holocenos de las unidades *Eólica* y de *Las Marismas*. El esquema litoestratigráfico propuesto permite dar una mejor explicación a las variaciones piezométricas espaciales y temporales que el modelo conceptual de acuífero libre monocapa. La realidad puede ser representada más fielmente mediante un sistema que comprende un nivel profundo de elevada difusividad hidráulica, situado en la *Unidad Deltaica*, y un acuitardo anisótropo que contiene el nivel freático, situado en la *Unidad Eólica*. La nueva red de observación se está adecuando a este modelo conceptual, separando diversos planos de medida en la vertical.

Palabras clave: Geología aplicada, litoestratigrafía, hidrogeología, Bajo Guadalquivir, Doñana, Pliocuatrnario.

Abstract: From the study of lithological data from 20 hydrogeological boreholes in the area of Doñana (Bajo Guadalquivir) obtained during the 1970's, four Pliocene and Quaternary lithostratigraphic detrital units, lying above Tortonian-lower Pliocene blue marls, have been identified: 1) *Deltaic Unit*, 2) *Alluvial Unit*, 3) *Eolian Unit*, and 4) *Marsh Unit*. Their equivalence with formations already described from the northwestern margin allows the first of these units to be allocated an age of middle-upper Pliocene/lower Pleistocene, the second an age upper Pleistocene, and the last two units a final Pleistocene-Holocene age. Two sedimentary domains can be also differentiated: a western domain, which contain the *Deltaic* and *Eolian* units, and an eastern domain, where the *Deltaic*, *Alluvial* and *Marsh* units are found. Also, the most recent sands of the *Eolian Unit* are found in the coastal margin of the eastern domain. The facies distribution and the thickness of these units permit to interpret the contact between the two domains as the result of a deep, NNE-SSW-oriented fault. This fault was active principally during the upper Pleistocene, producing the downfaulting of the eastern domain synsedimentarily to the *Alluvial Unit*. It was later covered by the Holocene sediments of the *Marsh* and *Eolian* units. This lithostratigraphic model provides an improved explanation for the spacial and temporary groundwater head changes with respect the unconfined one-layer conceptual model. The real situation can be better reproduced by means of a system with a deep, high hydraulic diffusivity layer corresponding to the *Deltaic Unit*, and an anisotropic aquitard which contains the water table and corresponds to the *Eolian Unit*. The new groundwater monitoring network is being adapted to this conceptual model, in which several measuring depths are considered.

Key words: Applied geology, lithostratigraphy, hydrogeology, Bajo Guadalquivir, Doñana, Pliocene-Quaternary.

Salvany, J. M. y Custodio, E. (1995): Características litoestratigráficas de los depósitos plio-cuaternarios del Bajo Guadalquivir en el área de Doñana: implicaciones hidrogeológicas. *Rev. Soc. Geol. España*, 8: (1-2): 21-31.

El Parque Nacional de Doñana y el Parque Natural del Entorno de Doñana (Bajo Guadalquivir, Fig. 1) constituyen, en conjunto, una de las reservas biológicas más

importantes de Europa. Su riqueza se basa principalmente en la presencia de extensos humedales, en forma de lagunas y marismas, que acogen una amplia comunidad de

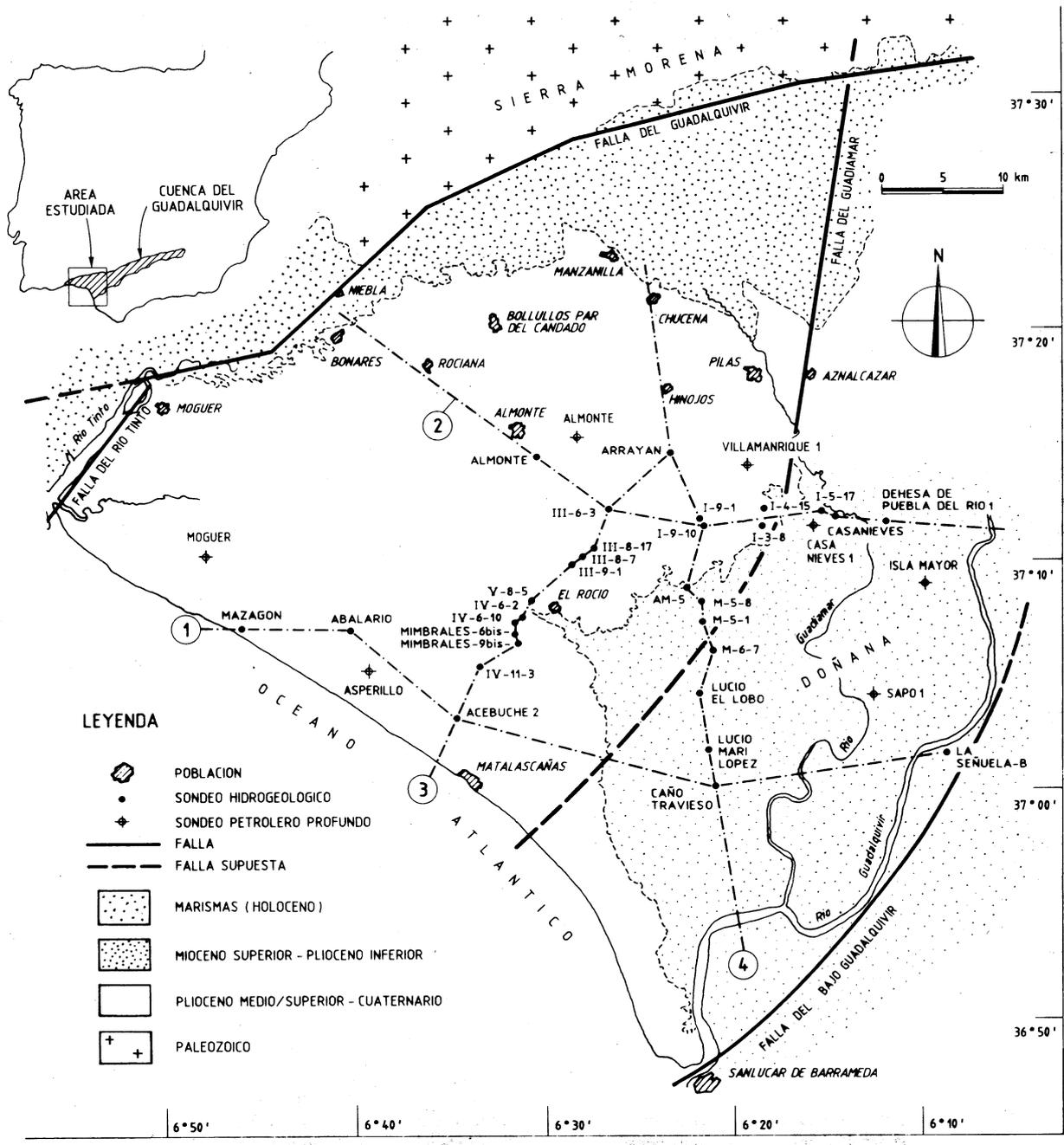


Figura 1.- Mapa del Bajo Guadalquivir con situación de los sondeos y cortes geológicos representados en las figuras 3, 4, 5 y 6. Se indican también las principales fallas reconocidas por Viguier (1977).

animales y plantas. La hidrodinámica y biología de estos humedales están estrechamente relacionadas con la descarga de las aguas subterráneas del acuífero Almonte-Marismas (IGME, 1983), situado en los depósitos detríticos plio-cuaternarios que forman el subsuelo de la región. Las extracciones de agua de este acuífero realizadas en las zonas de regadío periféricas a los parques, principalmente desde los inicios de la década de 1980, han sido la causa de cambios hidrodinámicos en el sistema, con consecuencias ecológicas negativas para los parques (Custodio, 1992 y 1994; Castells *et al.*, 1992). El impacto de estas extracciones ha sido tratado en diversos estudios hidrogeológicos (ver más adelante), de resultados siempre limitados debido al escaso conocimiento existente sobre los depósi-

tos plio-cuaternarios que constituyen el acuífero. Con el propósito de apoyar los estudios hidrogeológicos en curso de realización y futuros, el presente artículo tiene por objeto describir las características litoestratigráfica de los depósitos plio-cuaternarios de la zona central del Bajo Guadalquivir. Se basa principalmente en los datos litológicos de una selección de 20 sondeos hidrogeológicos correspondientes al "Plan de Regadío Almonte-Marismas" (FAO, 1970 y 1975; IRYDA, 1976), así como en los datos estratigráficos, sedimentológicos y tectónicos aportados por otros autores, referentes al litoral y margen noroccidental del Bajo Guadalquivir. Se comentan también las principales implicaciones hidrogeológicas que resultan del modelo litoestratigráfico propuesto.

Marco estratigráfico y tectónico regional

Los depósitos neógenos y cuaternarios del Bajo Guadalquivir han sido estudiados principalmente en los afloramientos de su margen noroccidental (Mayoral, 1989). En este sector, es posible distinguir cuatro unidades litológicas principales, con un espesor de conjunto del orden del centenar de metros (Fig. 2): 1) "unidad basal carbonatada" de origen marino somero, conocida como *nivel detrítico basal* (Viguiet, 1974) o *Fm. Calcarenita de Niebla* (Civis et al., 1987); 2) "unidad margosa intermedia" de origen marino profundo, conocida como *margas azules* (Pérez Mateos y Riba, 1961) o *Fm. Arcillas de Gibraleón* (Civis et al., 1987); 3) "unidad detrítica superior" formada por arenas y limos de origen fluvio-deltaico, que comprende la *Fm. Arenas de Huelva* (Civis et al., 1987) y la *Fm. Arenas de Bonares* (Mayoral y Pendón, 1986-87); y 4) "unidad aluvial de gravas y arenas", discordante sobre los depósitos anteriores, conocida como *capas rojas* (Viguiet y Thibault, 1973) o *Alto Nivel Aluvial* (Pendón y Rodríguez Vidal, 1986-87). Sobre este conjunto se apoyan, también discordantes, depósitos cuaternarios recientes de origen aluvial y eólico.

Existen numerosos estudios bioestratigráficos sobre estos depósitos. Sin embargo, las edades atribuidas por los diferentes autores no son siempre coincidentes (Fig. 2). En líneas generales se acepta una edad Tortoniense-Plioceno inferior para las formaciones de *Niebla*, *margas azules* y *Huelva*, situándose el límite Mioceno-Plioceno en la parte superior de las margas (Viguiet, 1974; Sierro, 1985; Civis et al., 1987). Las *Arenas de Bonares* se atribuyen al Plioceno medio-superior y Pleistoceno inferior, situándose el límite Plioceno-Pleistoceno en los niveles altos de esta formación (Mayoral y Pendón, 1986-87; Torcal et al., 1990). El *Alto Nivel Aluvial* es según Pendón y Rodríguez Vidal (1986-87) y Rodríguez Vidal (1989) de edad Plioceno final-Pleistoceno, mientras que Mayoral y Pendón (1986-87) y Torcal et al. (1990) lo consideran exclusivamente Pleistoceno. Las terrazas y depósitos eólicos recientes son de edad holocena, aunque localmente pueden corresponder también al Pleistoceno superior (Borja y Díaz del Olmo, 1992).

En el sector central del Bajo Guadalquivir, los sondeos profundos de prospección de hidrocarburos (Perconig, 1960-62; Viguiet, 1974; Perconig y Martínez Díaz, 1977) permiten reconocer en líneas generales la misma sucesión

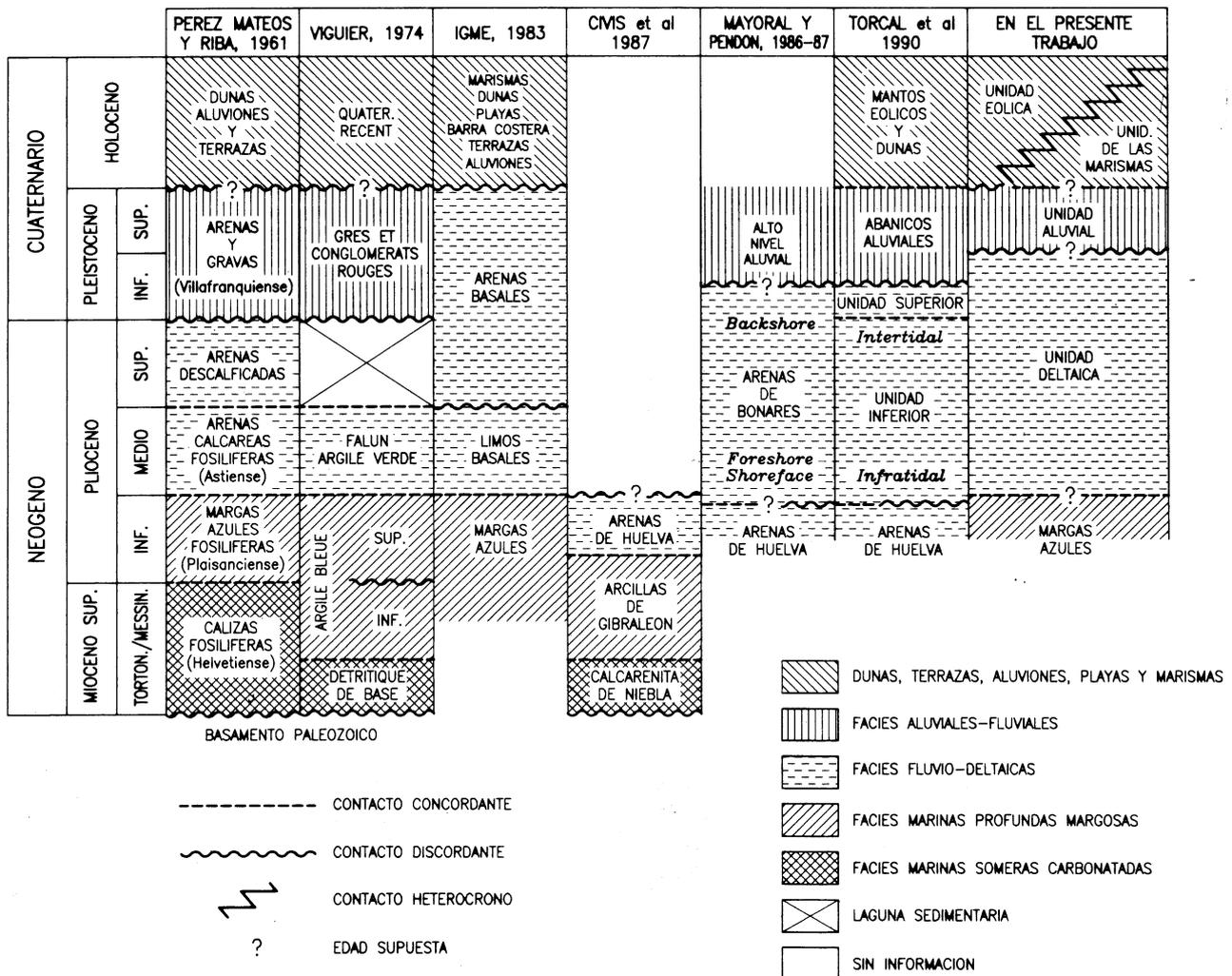


Figura 2.- Intento de correlación de los niveles estratigráficos definidos por diferentes autores en el sector central y noroccidental del Bajo Guadalquivir.

estratigráfica, pero con mucho mayor espesor: 700 m en el sondeo de Almonte, 1196 m en el sondeo de Villamanrique-1, y 1623 m en el sondeo de Casa Nieves-1 (Fig. 1). Este espectacular aumento de potencia afecta principalmente a las *margas azules*, cuyo espesor, del orden de 60 m en el sector de Huelva, supera en esta zona central los 2000 m. Entre las margas se intercalan importantes niveles de olistostromas, constituidos por materiales mesozoicos y terciarios, procedentes de la Cordillera Bética (Perconig, 1960-62; Martínez Del Olmo *et al.*, 1984). Los depósitos detríticos plio-cuaternarios superiores muestran también un notable aumento de potencia, aunque de forma menos acentuada que las margas subyacentes. En este caso, los valores máximos observados son del orden de 300 m (Viguiet, 1974).

Mediante el estudio paleontológico de muestras de esos sondeos, Viguiet (1974) sitúa el tránsito Mioceno-Plioceno dentro de la serie margosa, por encima de los olistostromas. Se desconoce el límite entre el Plioceno y el Cuaternario.

Desde un punto de vista tectónico, los diferentes estudios realizados (Benkhelil, 1976; Viguiet, 1977; Rodríguez Vidal, 1989a y Zazo, 1980) coinciden en considerar el Bajo Guadalquivir como una cuenca compartimentada en bloques, con subsidencia diferencial, limitados por fallas sinsedimentarias de salto variable, activas durante el Neógeno y Cuaternario. Los dos accidentes más relevan-

tes son (Fig. 1): 1) la *falla del Guadalquivir*, de dirección OSO-ENE, que determina el límite de la cuenca neógena con el Macizo Ibérico (Sierra Morena), y 2) la *falla del Bajo Guadalquivir*, que atraviesa la cuenca con una dirección aproximadamente NNE-SSO, siguiendo aproximadamente el curso bajo del río Guadalquivir. Otras fallas de menor envergadura se distinguen también en el sector de Huelva (fallas del río Odiel), sobre el río Guadiamar y en el sector de Cádiz.

La falla del Guadalquivir se manifiesta como una flexión al Este de Sevilla y como falla con salto progresivamente más acentuado al Oeste de esta localidad, produciendo el basculamiento y hundimiento del bloque del Bajo Guadalquivir durante el Mioceno final (Viguiet, 1977). Por el contrario, la falla del Bajo Guadalquivir tuvo su principal actividad durante el Cuaternario antiguo, produciendo el hundimiento relativo del bloque del Bajo Guadalquivir con respecto al margen suroriental de la cuenca (Zazo *et al.*, 1985). Según estos autores, la actividad de esta falla fué la responsable del cambio de sentido del curso bajo del río Guadalquivir.

Descripción de las unidades

Los sondeos realizados durante el "Plan de Regadío Almonte-Marismas" alcanzaron profundidades desde

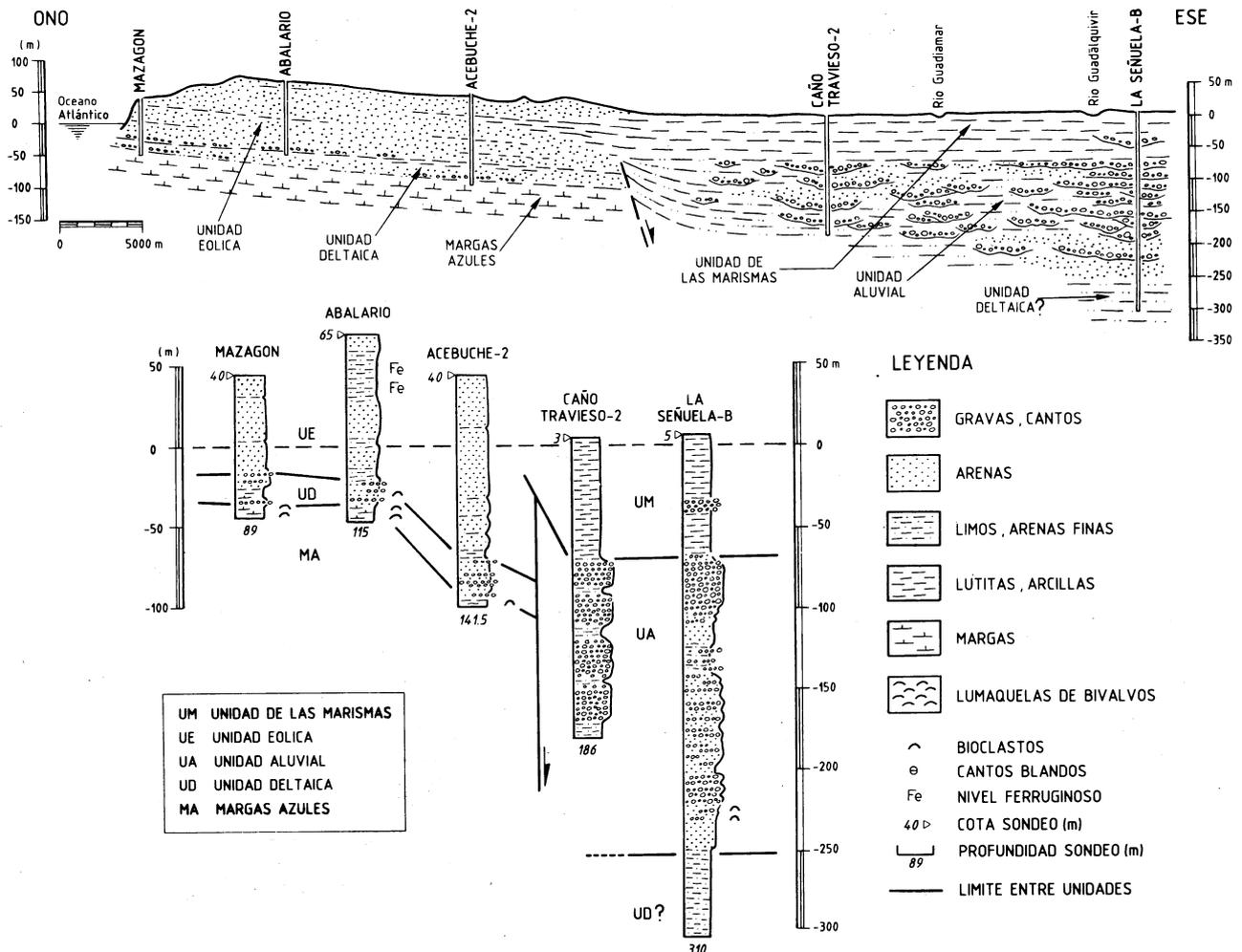


Figura 3.- Corte 1 y columnas litológicas en los depósitos plio-cuaternarios del Bajo Guadalquivir.

unas pocas decenas de metros hasta más de 300 m. Todos ellos atravesaron los depósitos detríticos plio-cuaternarios de la zona central del Bajo Guadalquivir sin llegar a alcanzar, en la mayoría de los casos, las *margas azules* subyacentes. El estudio y correlación de 20 de estos sondeos (Figs. 3, 4, 5 y 6) ha permitido identificar cuatro unidades litológicas distintas, a las que hemos denominado *Unidad Deltaica*, *Unidad Aluvial*, *Unidad de Las Marismas* y *Unidad Eólica*.

Unidad Deltaica

Constituye un cuerpo sedimentario compuesto principalmente por arenas, limos y gravas, situado en el sector centro-occidental del Bajo Guadalquivir, limitado a base y techo respectivamente por las *margas azules* del Tortonense-Plioceno inferior y la *Unidad Eólica*. El tránsito con las *margas azules* es gradual y siempre difícil de establecer, pues los sondeos que terminan en niveles lutíticos plantean con frecuencia dudas sobre si éstos corresponden propiamente al techo de las margas del Tortonense-Plioceno inferior o bien se trata de intercalaciones entre las arenas de la unidad que nos ocupa. Por el contrario, el tránsito con la *Unidad Eólica* suprayacente constituye un contacto litológico neto, que se reconoce bien en la mayor parte de los sondeos estudiados. Por el Este la *Unidad Deltaica* se pone lateralmente en contacto con la *Unidad Aluvial* mediante un tránsito rápido, situado aproximadamente bajo el borde occidental de las Marismas de Doñana (ecotono de La Vera).

El espesor máximo de la *Unidad Deltaica* es de 60-70 m en el sector de El Rocío. Este espesor decrece hacia la línea de costa, donde queda reducida a unas pocas decenas de metros, y hacia el Norte, donde también disminuye debido al efecto de bisel producido por la erosión.

Las arenas, limos y gravas son de composición silicea, con matriz arcillosa, y de colores marrones, grises, rojizos o amarillentos. De forma subordinada, se intercalan también niveles discontinuos de bioclastos (lumaquelas de bivalvos) que localmente pueden presentar hasta varios metros de espesor. Estos diferentes materiales alternan de forma cíclica y forman, en conjunto, una serie granocreciente, con dominio de las arenas finas, limos e intercalaciones arcillosas en la parte inferior de la serie, y de arenas gruesas con niveles de gravas en la parte superior de la misma. En algunos sondeos, sobre todo en los más próximos a la línea de costa, a techo de la unidad las gravas llegan a formar un potente tramo de varios metros de espesor. Este tramo se reconoce también en los sondeos de prospección de lignitos de El Asperillo realizados por ENADIMSA (1980).

Por sus características atribuimos a estos depósitos un origen deltaico, en relación con la desembocadura de los antiguos ríos Tinto, Odiel, Guadimar y Guadalquivir en el golfo de Cádiz. Las arenas y limos que dominan en la parte inferior de la serie representan depósitos de frente deltaico (sub-intermareales), mientras que las facies de arenas con gravas y bioclastos constituyen depósitos de llanura deltaica, de canal y de bahía intercanal (inter-supramareal). Las gravas que se individualizan a techo de la unidad representan un depósito aluvial que señala ya un ambiente sedimentario plenamente continental.

Creemos que las arenas, limos y gravas, de composición silicea, con intercalaciones de bioclastos, que forman la mayor parte de la unidad, son equivalentes a las *Arenas de Bonares*, a las que Mayoral y Pendón (1986-87) y Torcal *et al.* (1990) atribuyen también un origen mareal similar. Los niveles de gravas del techo de la unidad podrían equivaler al *Alto Nivel Aluvial*. Esta

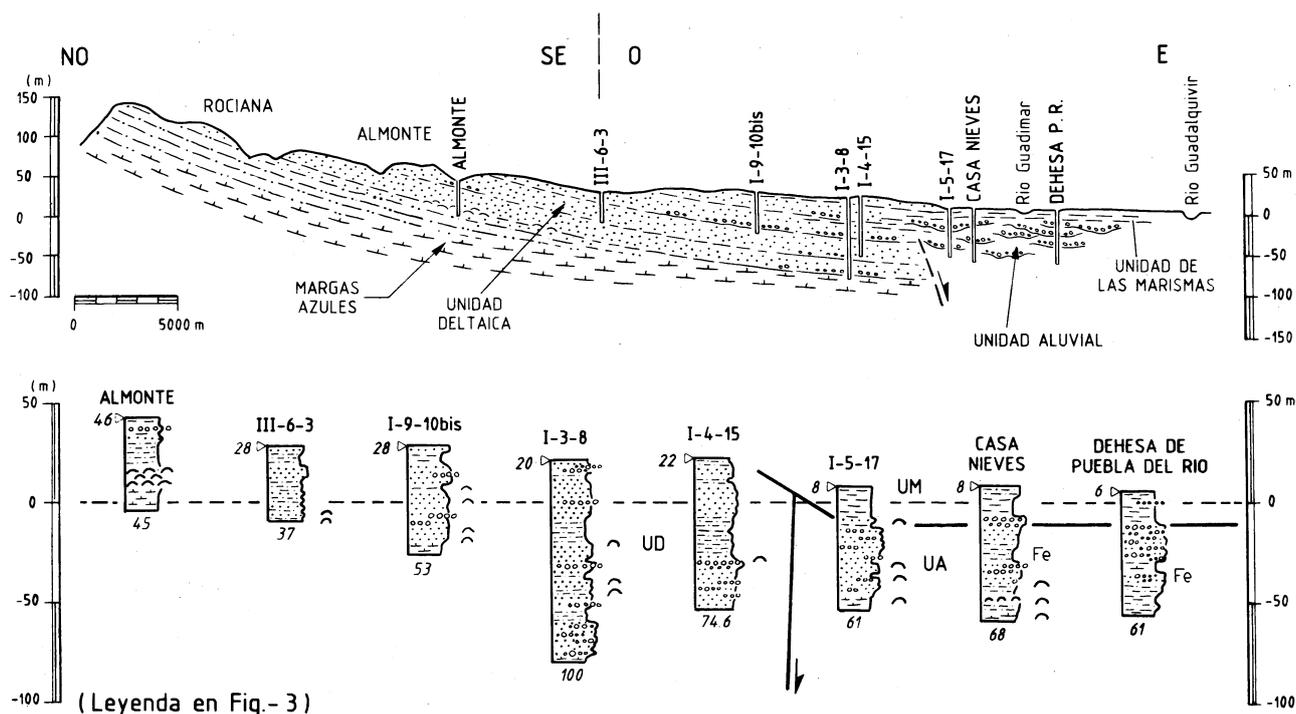


Figura 4.- Corte 2 y columnas litológicas en los depósitos plio-cuaternarios del Bajo Guadalquivir.

equivalencia se basa en las consideraciones realizadas por Caratini y Viguier (1973), Rodríguez Vidal (1989b) y Rodríguez Vidal *et al.* (1985) sobre el desarrollo, durante el Cuaternario antiguo, de un extenso manto aluvial, procedente de Sierra Morena, que cubrió las arenas deltaicas hasta más allá de la actual línea de costa. El *Alto Nivel Aluvial* constituiría las facies proximales de este manto, mientras que las gravas del techo de la *Unidad Deltaica* serían sus facies distales, cubiertas actualmente bajo las arenas de la *Unidad Eólica*.

Si se aceptan estas equivalencias, puede establecerse una edad mínima Plioceno medio-superior y Pleistoceno inferior para la *Unidad Deltaica*.

Unidad Eólica

Constituye una unidad arenosa muy homogénea, localizada principalmente sobre la franja litoral. Al Oeste de Matalascañas tiene por base las arenas y gravas de la *Unidad Deltaica* y al Este los limos arenosos de la *Unidad de Las Marismas*. En el primer caso, el tránsito puede establecerse con notable precisión en los sondeos en los que se reconocen los niveles de gravas del techo de la *Unidad Deltaica*. Cuando las gravas no están presentes, este tránsito es más difícil de establecer y se muestra aparentemente gradual.

El espesor de la *Unidad Eólica* es del orden de 150 m en la franja costera entre el Asperillo y Matalascañas. Hacia el interior, este espesor disminuye rápidamente hasta llegar a formar un manto discontinuo de pocos metros de espesor. Hacia el Sureste las arenas eólicas recubren también con espesor decreciente las marismas de Doñana y se extienden sobre la flecha litoral hasta la misma desembocadura del Guadalquivir.

Las arenas son de composición silíceica y color blanco, amarillo o anaranjado, con frecuente pátina ferruginosa. Forman tramos continuos de hasta varias decenas de metros de espesor, separados por niveles de arenas finas y limos arcillosos, así como capas de turba en la franja litoral. Con frecuencia también se reconocen costras ferruginosas de origen edáfico. Las gravas y niveles de bioclastos, característicos de la unidad anterior, son prácticamente inexistentes.

Los niveles arenosos más superficiales, de origen eólico más reciente, contienen cierta fracción carbonática organógena, que en ningún caso se manifiesta en el resto de la unidad, como atestiguan la acidez de las aguas subterráneas y el muy pequeño contenido en carbono inorgánico disuelto (Manzano *et al.*, 1991). Estos restos organógenos pudieron haber estado presentes en toda la *Unidad Eólica*, pero en tal caso han sido disueltos por el flujo de la agua subterránea.

Tal como ya describen Caratini y Viguier (1973), Flor (1990) y Borja y Díaz del Olmo (1992), la *Unidad Eólica* constituye un sistema litoral de dunas que se ha ido extendiendo progresivamente de NO a SE, primero sobre la *Unidad Deltaica* y posteriormente sobre la *Unidad de las Marismas* y la barra de la desembocadura del Guadalquivir. La edad de este sistema dunar abarca, según Vanney y Menanteau (1985) y Borja y Díaz del Olmo (1992), desde el tránsito Pleistoceno-Holoceno hasta la actualidad.

La abrasión y retrabajamiento de estas arenas eólicas por las corrientes marinas ha dado lugar a los acantilados y playas actuales, que ponen de manifiesto un importante retroceso de la línea de costa en tiempos geológicos recientes entre Mazagón y Matalascañas. El acantilado de El Asperillo constituye un excelente ejemplo de la continua remodelación que sufre la línea de costa.

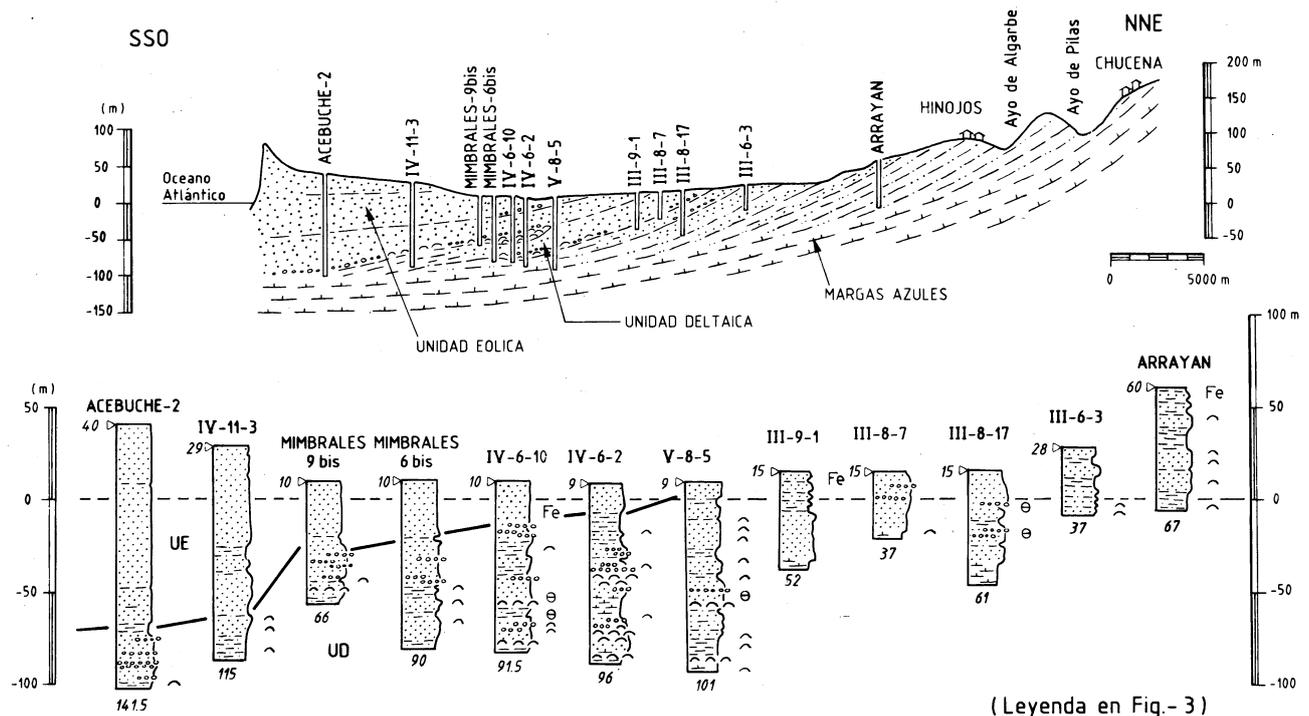


Figura 5.- Corte 3 y columnas litológicas en los depósitos plio-cuaternarios del Bajo Guadalquivir.

Unidad Aluvial

Constituye un potente tramo de gravas, arcillas, limos y arenas, desarrollado bajo las marismas de Doñana. Las gravas son el componente litológico más característico. Tienen composición silíceo, están bien redondeadas, y forman capas discontinuas de 5 a 20 m de espesor (paleocanales), con máximo desarrollo bajo el actual cauce del río Guadalquivir.

El límite inferior de esta unidad resulta difícil de establecer pues sólo uno de los sondeos estudiados la atravesó totalmente. Se trata del sondeo de La Señuela (Fig. 3), que después de perforar 180 m de arenas y gravas correspondientes a la *Unidad Aluvial*, atravesó 60 m de limos y arenas que, como se discute más adelante, podrían corresponder a la *Unidad Deltaica*.

Por sus características litológicas atribuimos a esta unidad de gravas un origen aluvial, en relación con antiguos cauces del Guadalquivir. La composición silíceo de los cantos sugiere que el área fuente fue esencialmente la

Sierra Morena. Puede estimarse que su edad está comprendida dentro del Pleistoceno superior, dado su origen posterior a la *Unidad Deltaica* y anterior a las unidades *Eólica* y de *Las Marismas*.

Unidad de Las Marismas

Forma un monótono tramo de arcillas y limos, con ocasionales niveles de gravas, arenas, turbas y bioclastos, que constituye el subsuelo inmediato de Doñana. Inferiormente estos depósitos quedan limitados mediante un contacto neto por la *Unidad Aluvial*. Hacia el Oeste limitan lateralmente con la *Unidad Eólica*, mediante un tránsito gradual. Su espesor es máximo en la franja litoral, donde alcanza valores de 70-75 m, y decrece hacia el Norte, con valores de 10-20 m en la parte alta de las marismas (Figs. 3 y 4).

La *Unidad de Las Marismas* constituye la colmatación de la cuenca del Bajo Guadalquivir en ambiente de

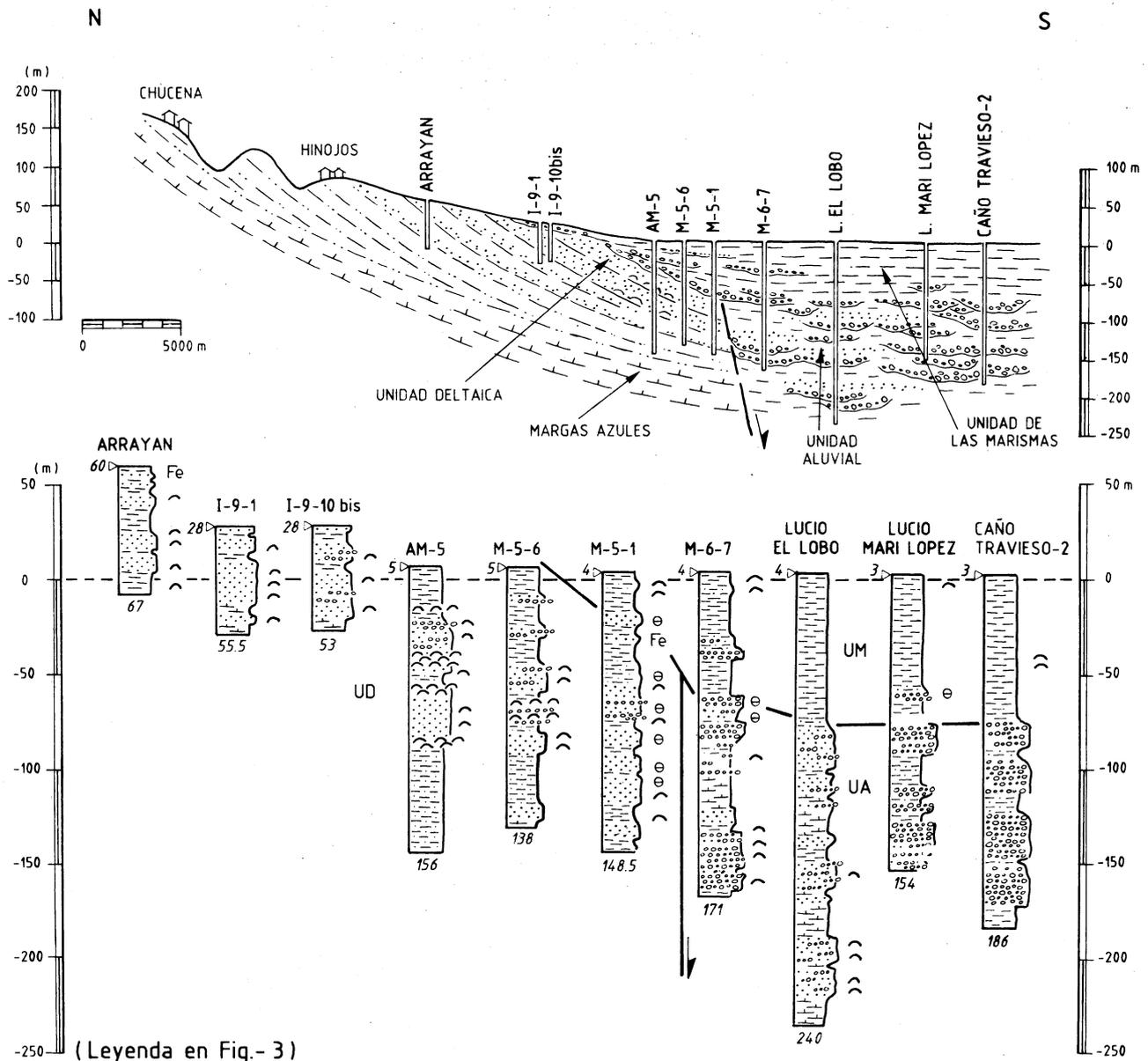


Figura 6.- Corte 4 y columnas litológicas en los depósitos plio-cuaternarios del Bajo Guadalquivir.

llanura supramareal, abierta inicialmente al mar por el Sur y progresivamente restringida por la flecha litoral. Su edad, por comparación con las marismas del litoral de Huelva, es holocena (Clemente *et al.*, 1985).

Dominios litológicos y falla de Guadamar-Matalascañas

La distribución de las unidades que hemos descrito permite diferenciar claramente dos dominios litológicos plio-cuaternarios en la zona central del Bajo Guadalquivir: un dominio occidental, formado por la *Unidad Deltaica* y parte de la *Unidad Eólica*; y un dominio oriental, formado por las unidades *Aluvial* y de *Las Marismas*, así como por los niveles más modernos de la *Unidad Eólica*. El límite entre ambos dominios se sitúa aproximadamente sobre la línea que une las poblaciones de Pilas, El Rocío y Matalascañas. Constituye un cambio litológico relativamente rápido, que creemos está en relación con la existencia de una falla cuaternaria antigua, fosilizada por los depósitos recientes de las marismas de Doñana (Fig. 1). La existencia de esta falla puede justificarse por dos diferentes motivos:

Por un lado, permite explicar el desarrollo de las unidades *Aluvial* y de *Las Marismas*, limitado al dominio oriental, así como la aparente ausencia en este mismo dominio de la *Unidad Deltaica*. El movimiento de la falla habría sido el responsable de una mayor subsidencia del dominio oriental durante el Cuaternario antiguo, que permitió el potente acúmulo de los depósitos detríticos que representan las unidades *Aluvial* y de *Las Marismas*. A la vez, habría sido la causa de que en este dominio las facies deltaicas estén (como sugiere el sondeo de La Señuela) a una mayor profundidad que en el dominio occidental, no alcanzada por los sondeos hidrogeológicos.

Por otro lado, la posición de esta falla coincide con la prolongación de la falla del Guadamar, descrita por Viquier (1977) en el margen septentrional del Bajo Guadalquivir, así como con la posición de la falla que Zazo *et al.* (1992) citan al Oeste de Matalascañas y que afecta al cordón litoral de dunas. A nuestro juicio estas dos fallas y la por nosotros interpretada, pueden constituir un mismo accidente tectónico, aflorante en sus extremos y fosilizado en su zona central por los depósitos de las marismas de Doñana. Este accidente sería además de similar edad, extensión y orientación que la vecina falla del Bajo

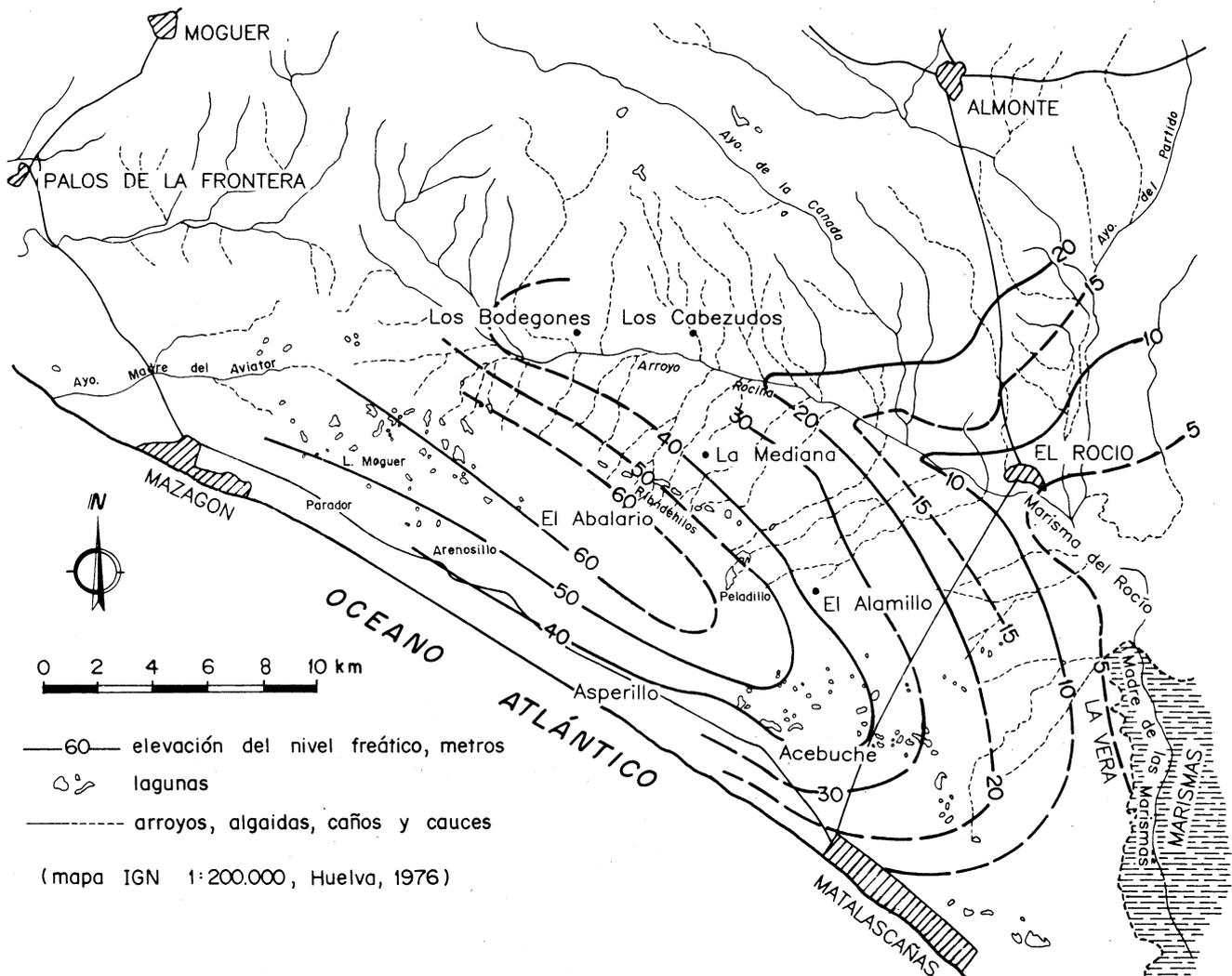


Figura 7.- Domo freático entre el Arroyo de La Rocina y el mar, y terminación periclinal hacia el ecotono de La Vera. Corresponde a la situación natural, no perturbada por las extracciones de agua subterránea para regadío y abastecimiento en el entorno de El Rocío, El Acebuche y Matalascañas (elaborado con datos procedentes del ITGE, IARA, CHG y UPC).

Guadalquivir (Zazo *et al.*, 1985), que delimita el dominio oriental por el SE. En este contexto, el dominio oriental formaría una típica estructura de graben.

Implicaciones hidrogeológicas

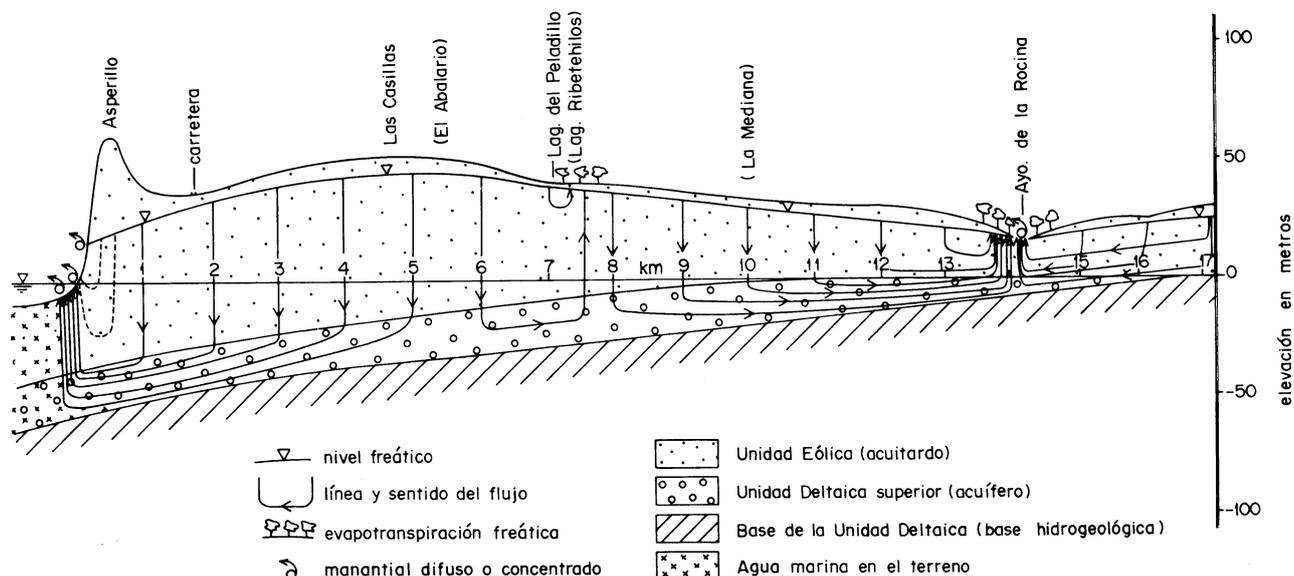
Los estudios sobre la hidrogeología del Parque Nacional de Doñana y su entorno son diversos: Baonza *et al.* (1982), Plata *et al.* (1983), IGME (1983), Llamas (1990), Suso y Llamas (1990 y 1993), ITGE (1992), entre otros, además de los informes hidrogeológicos inéditos ya citados de FAO (1970 y 1975) y del IRYDA (1976), referentes al proyecto de regadío con aguas subterráneas del acuífero Almonte-Marismas. Estos estudios utilizan un modelo conceptual simplificado de acuífero libre fuera de la marisma y confinado bajo la marisma, conectados a lo largo de una zona que se corresponde a grandes rasgos con el ecotono de La Vera (Fig. 7). Este mismo modelo conceptual es el utilizado para la interpretación de los ensayos de bombeo que se han realizado en parte de los pozos construidos por el IRYDA, así como en los informes inéditos de modelación numérica del flujo del agua subterránea del IGME e IRYDA (cf. Sahuquillo *et al.*, 1991), que han sido la base de los intentos de planificación de las extracciones de agua subterránea en el área.

Los trabajos posteriores de investigación hidrogeológica (Custodio *et al.*, 1992 y 1994; Custodio, 1994), financiados por la CICYT y por organismos con responsabilidad en la gestión hídrica local, han puesto de relieve que aquel modelo hidrogeológico era excesivamente simplificado. Con esta idea, la Comisión Internacional de Expertos sobre el entorno de Doñana, durante su periodo de trabajo, encargó el estudio geológico que dió origen al presente artículo (Salvany, 1991) y un análisis de detalle sobre los modelos existentes de simulación numérica del flujo del agua subterránea (Sahuquillo *et al.* 1991). Se llegó a similar conclusión: que el modelo hi-

drogeológico era demasiado simple. De hecho no era capaz de explicar la existencia de sondeos en la *Unidad Eólica* con rápidos cambios de nivel piezométrico (incluso con surgencia), ni la existencia de notables flujos verticales en sondeos con varios tramos de rejilla, ni la permanencia de manantiales y niveles freáticos altos en áreas con niveles de agua en los pozos de explotación notablemente deprimidos. Posteriormente, la perforación de enjambres piezométricos (conjunto de tubos piezométricos de rejilla corta aislada del resto de las formaciones) ha puesto de manifiesto la existencia de gradientes piezométricos verticales que están incrementados a causa de los cambios litoestratigráficos en profundidad.

La figura 7 muestra la existencia de un domo freático en la *Unidad Eólica*. Este domo se describe ya en los trabajos de FAO (1970 y 1975) e IRYDA (1976) y se publica en IGME (1983), aunque el que aquí se presenta es el resultado de una síntesis de datos para obtener el estado natural (Custodio *et al.*, 1994). La recarga se produce por la lluvia local. La descarga se realiza al mar a lo largo de la costa en forma de manantiales difusos submareales y algunos manantiales en el acantilado costero, así como a lo largo del Arroyo de La Rocina y del ecotono de La Vera. También descarga de forma distribuida en las áreas donde la vegetación arbórea alcanza a la franja capilar, principalmente en la porción intermedia entre el centro del domo y el Arroyo de La Rocina, en el bosque en galería de La Rocina y en el ecotono de La Vera. En áreas deprimidas de estas últimas zonas se forman varias lagunas freáticas, funcionales sólo en épocas húmedas. Otras lagunas temporales hacia el lado occidental no son freáticas sino colgadas, y dependen de la pluviometría.

A título ilustrativo, la figura 8 muestra una sección hidrogeológica esquemática perpendicular a la costa por El Abalarío, donde se indican las líneas de flujo del agua subterránea condicionadas por la existencia de un nivel profundo (*Unidad Deltaica*) más transmisor y con notable mayor difusividad hidráulica respecto a las arenas



que lo recubren (*Unidad Eólica*) y que actúan a modo de acuitado. De acuerdo con consideraciones hidrodinámicas (Custodio *et al.*, 1994), la descarga del agua dulce subterránea al mar se debe realizar por una estrecha faja que explica los manantiales del acantilado costero.

La síntesis litoestratigráfica realizada, junto con las aportaciones de los sondeos en curso de realización por el Servicio Geológico del MOPTMA para la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir, y los que dicho organismo ha construido, apoyan la existencia de un sistema acuífero en el dominio occidental formado por un nivel inferior más permeable y un grueso nivel superior de arenas menos permeables que explica que la permeabilidad vertical media sea menor que la horizontal (Custodio, 1994). Ello se confirma por modelación de un perfil vertical capaz de reproducir la superficie freática inicial y las variaciones piezométricas verticales (Poncela, 1993).

En la franja próxima al ecotono de La Vera (contacto entre las arenas eólicas y la marisma) son más frecuentes las interdigitaciones arenas-arcillas-limos, lo que produce localmente que el acuífero sea marcadamente multicapa, o sea, muy anisótropo a efectos de comportamiento hidrodinámico generalizado. Este hecho es de importancia para interpretar las fluctuaciones piezométricas y los ensayos de bombeo, así como para explicar la existencia de sondeos surgentes y la permanencia de descargas de agua subterránea a la marisma cuando los niveles potenciométricos profundos están deprimidos a causa de las extracciones (Custodio, 1992 y 1994). La existencia de flujos verticales a lo largo de los sondeos con rejilla larga o múltiples rejillas produce observaciones incorrectas y que las muestras químicas e isotópicas ambientales deban interpretarse en función de la existencia de esos flujos verticales (Custodio, 1992, 1994, y Custodio *et al.*, 1994).

Las redes piezométricas en proyecto dentro del dominio oriental deben prever profundidades de hasta 300 m para asegurar que se observa el conjunto de los niveles acuíferos, en especial la posible extensión en este dominio de la *Unidad Deltaica* por debajo de la *Unidad Aluvial*.

Conclusiones

1) Los depósitos detríticos plio-cuaternarios de la zona central del Bajo Guadalquivir pueden agruparse en cuatro unidades litoestratigráficas diferentes: *Unidad Deltaica*, que forma una heterogénea sucesión de arenas, limos, gravas y niveles bioclásticos; *Unidad Eólica*, compuesta por arenas muy puras; *Unidad Aluvial*, compuesta por potentes capas de gravas entre arenas y limos; y *Unidad de Las Marismas*, formada por limos y arenas finas. Este conjunto de unidades se disponen en tránsito gradual sobre las margas azules del Mioceno superior-Plioceno inferior.

2) El espesor y distribución de facies de estas unidades es muy variable según los sectores. Sin embargo, permite diferenciar dos dominios litológicos principales: un dominio occidental, situado al Oeste de la línea que une las poblaciones de Matalascañas, El Rocio y Pilas, y un dominio oriental al Este de esta línea. El primer do-

minio es esencialmente arenoso, con un espesor máximo de 150 m. Presenta dos tramos bien definidos: uno inferior, correspondiente a la *Unidad Deltaica* y otro superior correspondiente a la *Eólica*. Ambas unidades están limitadas mediante un contacto neto. El segundo dominio muestra en conjunto un mayor espesor de sedimentos (más de 300 m) y permite distinguir tres tramos litológicos correspondientes, de base a techo, a las unidades *Aluvial*, de *Las Marismas* y *Eólica* (flecha litoral).

Estos dominios se encuentran separados por una falla cuaternaria antigua de características similares a la falla del Bajo Guadalquivir. Esta falla, fosilizada por los depósitos recientes de las marismas, podría corresponderse con la falla del Guadiamar, descrita por Viguier (1977) en el margen septentrional del Bajo Guadalquivir.

3) El esquema litoestratigráfico propuesto se adapta notablemente a las características hidrogeológicas de las aguas subterráneas contenidas en estos depósitos plio-cuaternarios. En particular, apoya la existencia en el dominio occidental de un sistema acuífero formado por un nivel profundo más permeable, que se correspondería con la *Unidad Deltaica*, y un nivel superior de menor permeabilidad (acuitado), correspondiente a la *Unidad Eólica*. También permite explicar la existencia de manantiales y niveles freáticos altos en áreas con niveles deprimidos de las aguas subterráneas, así como otros aspectos hidrogeológicos hasta ahora difícilmente explicados por el modelo conceptual de acuífero libre monocapa que se había venido considerando.

Los autores agradecen la ayuda prestada por el Instituto de Reforma y Desarrollo Agrario (IRYDA), el Instituto Andaluz para la Reforma Agraria (IARA) y la oficina en Sevilla del Instituto Tecnológico y Geominero de España (ITGE) para la obtención de los documentos en los que se ha fundamentado el presente estudio. También agradecen a la Dra. Caridad Zazo, del Museo Nacional de Ciencias Naturales de Madrid, la revisión crítica del artículo. En la redacción del presente artículo se ha tenido en cuenta parte de la información obtenida en los proyectos CAYCIT PB 87-0842 y CICYT AMB 92-636 sobre el área de Doñana, realizados en el Departament d'Enginyeria del Terreny (Universitat Politècnica de Catalunya), con la colaboración de la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir y la Agencia del Medio Ambiente de Andalucía.

Bibliografía

- Baonza, E., Plata, A. y Silgado, A. (1982): *Hidrología isotópica de las aguas subterráneas del Parque Nacional de Doñana y zona de influencia*. Cuadernos de Investigaciones, C7, CEDEX, Madrid: 1-139.
- Benkheilil, J. (1976): *Etude néotectonique de la terminaison occidentale des Cordillères Bétiques*. Thèse, Université de Nice: 1-180.
- Borja, F. y Díaz del Olmo, F. (1992): Eastern sector of the cliffs at El Asperillo (Huelva coast, S.W. Spain): formation and chronology. *MBSS Newsletter*, 14: 87-93.
- Caratini, C. y Viguier, C. (1973): Etude palynologique et sédimentologique des sables holo-genes de la falaise littorale d'El Asperillo (province de Huelva). *Estudios Geológicos*, 29: 325-328.
- Castells, M., Cruz, J., Custodio, E., García Novo, F., de Gaudemar, J. P., González Vallvé, J. L., Granados, V., Magraner, A., Román, C., Smart, M. y van der Maarel, E. (1992): *Dictamen sobre estra-*

- tegas para el desarrollo socioeconómico sostenible del Entorno de Doñana. Comisión Internacional de Expertos sobre el entorno de Doñana, Junta de Andalucía. Sevilla: 1-131 (informe inédito).
- Civis, J., Sierro, F. J., González Delgado, J. A., Flores, J. A., Andrés, I., Porta, J. y Valle, M. F. (1987): El Neógeno marino de la provincia de Huelva: antecedentes y definición de las unidades litoestratigráficas. In *Paleontología del Neógeno de Huelva*, Stud. Geol. Salmant., vol.especial: 9-21.
- Clemente, L., Menanteau, L. y Rodríguez Vidal, J. (1985): Los depósitos holocenos en el estuario de los ríos Tinto y Odiel (Huelva, España). *Actas I Reunión del Cuaternario Ibérico*, Lisboa, Vol. 1: 339-353.
- Custodio, E. (1992): Preliminary outlook of saltwater intrusion conditions in the Doñana National Park (Southern Spain). In *Study and modelling of saltwater intrusion into aquifers*. Publ. CIMNE, Barcelona: 295-315.
- Custodio, E. (1994): Posibles procesos de contaminación agrícola de aguas subterráneas en el área de Doñana (Huelva). In *Análisis y evaluación de la contaminación de las aguas subterráneas en España*. Asoc. Intern. Hidrogeólogos - Grupo Español, II: 283-308.
- Custodio, E., Dolz, J., Guimerà, J., Manzano, M., Poncela, R., Samper, J., Sánchez, M. y Velasco, E. (1992): Aportaciones al conocimiento hidrogeológico de los acuíferos del Parque Nacional de Doñana y su entorno. *Hidrogeología y Recursos Hidráulicos*, Madrid, XVI: 425-439.
- Custodio, E., Iglesias, M., Manzano, M. y Trick, T. (1994): *Saltwater intrusion risk along the western Doñana area coast (Southwestern Spain)*. 13th Salt Water Intrusion Meeting. University of Cagliari, Sardinia (en prensa).
- ENADIMSA (1980): *Prospección general de lignitos en el área de Mazagón (Huelva)*. Plan Nacional de Minería, IGME: 1-25 (informe inédito).
- FAO (1970): *Estudio hidrogeológico de la cuenca del Guadalquivir: informe técnico*. 1 AGL: SF/SPA 9, Roma: 1-115 (informe inédito).
- FAO (1975): *Proyecto piloto de utilización de aguas subterráneas para el desarrollo de la cuenca del Guadalquivir. Proyecto de transformación de la zona regable Almonte-Marismas: informe técnico*. 7 AGL: SF/SPA 16, Roma: 1-157 (informe inédito).
- Flor, G. (1990): Tipología de dunas eólicas. Procesos de erosión-sedimentación costera y evolución litoral de la provincia de Huelva (golfo de Cádiz occidental, Sur de España). *Estudios Geológicos*, 46: 99-109.
- IGME (1983): *Hidrogeología del Parque Nacional de Doñana y su entorno*. Serv. Publ. Min. Industria y Energía: 1-120, 1 mapa.
- IRYDA (1976): *Informe final de los sondeos de la zona regable de Almonte-Marismas (Huelva-Sevilla)*. Memoria, anejo y planos, Sevilla: 1-100 (informe inédito).
- ITGE (1992): *Hidrogeología del Parque Nacional de Doñana y su entorno*. Serv. Publ. Min. Industria y Energía: 1-64, 2 mapas.
- Llamas, M. R. (1990): Geohydrology of the eolian sands of the Doñana National Park (Spain). *Catena Supplement*, 18: 145-154.
- Manzano, M., Custodio, E. y Poncela, R. (1991): Contribución de la hidrogeoquímica al conocimiento de la hidrodinámica de los acuíferos en el área de Doñana. *III Simposio del Agua en Andalucía*, Córdoba, ITGE, I: 457-486.
- Martínez Del Olmo, W., García Mallo, J., Leret Verdú, G., Serrano Oñate, A. y Suárez Alba, J. (1984): Modelo tectosedimentario del Bajo Guadalquivir. *I Congreso Español de Geología*, tomo I: 199-213.
- Mayoral, E. (1989): Geología de la depresión inferior del Guadalquivir. *El Cuaternario en Andalucía Occidental*. AEQUA Monografías, 1: 7-20.
- Mayoral, E. y Pendón, J. G. (1986-87): Ictiofacies y sedimentación en zonas costeras. Plioceno superior (?), litoral de Huelva. *Acta Geológica Hispánica*, 21-22: 507-513.
- Pendón, J. G. y Rodríguez Vidal, J. (1986-87): Caracteres sedimentológicos y geomorfológicos del Alto Nivel Aluvial cuaternario en el litoral de Huelva. *Acta Geológica Hispánica*, 21-22: 107-111.
- Perconig, E. (1960-62): Sur la constitution géologique de l'Andalousie Occidentale, en particulier du Basin du Guadalquivir (Espagne méridionale). *Bull. Soc. Géol. de France*, Livre Mém. Prof. Paul Faillot, 1: 229-256.
- Perconig, E. y Martínez Díaz, C. (1977): Perspectivas petrolíferas de Andalucía Occidental. *Boletín Geológico y Minero*, 88-5: 417-433.
- Pérez Mateos, J. y Riba, O. (1961): Estudio de los sedimentos pliocenos y cuaternarios de Huelva. *II Reunión de Sedimentología*, Sevilla, CSIC: 87-94.
- Plata, A., Baonza, E. y Silgado, A. (1983): Hidrología isotópica de las aguas subterráneas del Parque Nacional de Doñana y zona de influencia. *Isotopes in Hydrology*, IAEA-Viena: 321-340.
- Poncela, R. (1993): *Análisis del funcionamiento hidrogeológico del Parque Nacional de Doñana en el entorno del Arroyo de La Rocina*. DITC, Universidad Politécnica de Cataluña. Tesis de Maestría en Hidrología Subterránea: 1-173.
- Rodríguez Vidal, J. (1989a): La evolución neotectónica del Sector Occidental de la Depresión del Guadalquivir. *El Cuaternario en Andalucía Occidental*, AEQUA, Monografías 1: 21-26.
- Rodríguez Vidal, J. (1989b): El inicio de la red fluvial cuaternaria en el sector occidental de la depresión del Guadalquivir. *El Cuaternario en Andalucía Occidental*, AEQUA, Monografías 1: 27-31.
- Rodríguez Vidal, J., Mayoral, E. y Pendón, J. G. (1985): Aportaciones paleoambientales al tránsito Plio-Pleistoceno en el litoral de Huelva. *Actas I Reunión Cuaternario Ibérico*, Lisboa, 1: 447-459.
- Salvany, J. M. (1991): *Análisis de la estratigrafía y sedimentología de muestras de sondeos representativos en relación con el Parque Nacional de Doñana, con vistas a la evaluación crítica de los modelos de flujo subterráneo en el acuífero*. Asociación Curso Internacional de Hidrología Subterránea, Barcelona (informe inédito de la Comisión Internacional de Expertos sobre el entorno de Doñana de la Junta de Andalucía).
- Sahuquillo, A., Carrera, J. y Samper, J. (1991): *Revisión crítica de los trabajos existentes de modelación del flujo subterráneo en el acuífero circundante al Parque Nacional de Doñana*. Asociación Curso Internacional de Hidrología Subterránea, Barcelona (informe inédito de la Comisión Internacional de Expertos sobre el entorno de Doñana de la Junta de Andalucía).
- Sierro, F. J. (1985): Estudio de los foraminíferos planctónicos, bioestratigrafía y cronoestratigrafía del Mio-Plioceno del borde occidental de la Cuenca del Guadalquivir (S.O. España), *Stud. Geol. Salmant.*, 21: 7-85.
- Suso, J. y Llamas, M. (1990): El impacto de la extracción de aguas subterráneas en el Parque Nacional de Doñana. *Estudios Geológicos*, 46: 317-345.
- Suso, J. y Llamas, M.R. (1993): Influence of groundwater development on the Doñana National Park ecosystems (Spain). *Journal of Hydrology*, 141: 239-269.
- Torcal, L., Zazo, C. y Marfil, R. (1990): Características y cronología de los depósitos arenosos neógenos y cuaternarios del litoral de Huelva, España (área: río Tinto-río Guadalquivir). *Estudios Geológicos*, Madrid, 46: 153-164.
- Vanney, J. R. y Menanteau, L. (1985): Mapa fisiográfico del litoral atlántico de Andalucía. Publ. Junta de Andalucía.
- Viguié, C. (1974): *Le Néogène de l'Andalousie Nord-Occidentale (Espagne): histoire géologique du Bassin du bas-Guadalquivir*. Thèse Univ. Bordeaux: 1-450.
- Viguié, C. (1977): Les grands traits de la tectonique du Basin néogène du Bas-Guadalquivir. *Boletín Geológico y Minero*, 88-1: 39-44.
- Viguié, C. y Thibault, C. (1973): Nouveaux éléments de datation des formations de piémont de la Sierra Morena a l'ouest de Séville. *Estudios Geológicos*, 29: 351-354.
- Zazo, C. (1979): El problema del límite Plio-Pleistoceno en el litoral S y SE de España. *Trab. Neógeno-Cuaternario*, 9: 65-72.
- Zazo, C. (1980): *El Cuaternario marino-continental y el límite Plio-Pleistoceno en el litoral de Cádiz*. Tesis Doctoral, Universidad Complutense de Madrid.
- Zazo, C., Goy, J. L., Dabrio, C. J., Civis, J. y Baena, J. (1985): Paleogeografía de la desembocadura del Guadalquivir al comienzo del Cuaternario (provincia de Cádiz, España), *Actas I Reunión del Cuaternario Ibérico*, Lisboa, I: 461-472.
- Zazo, C., Dabrio, C. J., Goy, J. L. y Meco, J. (1992): Evolution of the littoral lowlands of Huelva and Cadix (gulf of Cadix, SW Spain) from the Flandrian until present. In Suárez de Vivero, J.L. ed. *The ocean change: management patterns and the environment*, Serv. Publ. Universidad de Sevilla: 27-38.

Manuscrito recibido el 25 de Enero de 1994

Aceptado el manuscrito revisado el 19 de Octubre de 1994