

## Geología Aplicada en el entorno de Arcos de la Frontera

Moreno Pérez, Juan<sup>1y5</sup>; Pérez Barrancos, Luis Manuel<sup>2</sup>; García López, Santiago<sup>3y5</sup>; Moral Cardona, José Pedro<sup>3y5</sup>; Paniagua Muñoz, Daniel<sup>1y5</sup>; Higuera Martínez, María del Mar<sup>4</sup>; Martínez López, Javier<sup>3y5</sup>; Sánchez Bellón, Ángel<sup>3y5</sup>

1 Arcotierra S.L.

2 IES Alminares, Arcos de la Frontera

3 Departamento de Ciencias de la Tierra de la Universidad de Cádiz.

4 IES Guadalpeña, Arcos de la Frontera

5 ICOGA, Ilustre Colegio Oficial de Geólogos

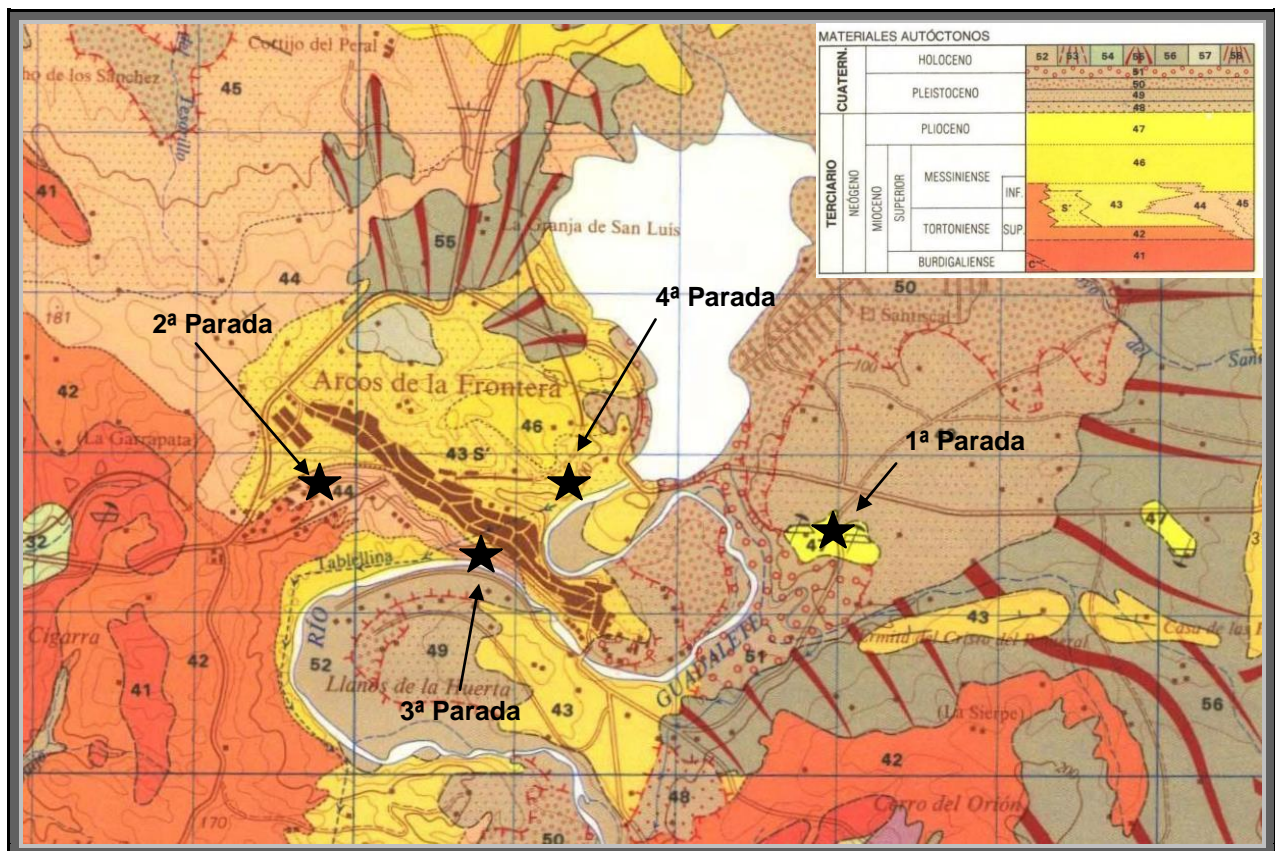


Fig. 1. Mapa geológico a escala 1:50.000 de Arcos de la Frontera (ITGME, 1990) y localización de las paradas

## Introducción.

De todos es conocido que la disciplina que hoy nos reúne, la **Geología**, es la ciencia que se encarga de estudiar la estructura, composición, origen y evolución de la Tierra. Dentro de la Geología hay varias especialidades que se encargan de profundizar en los diversos aspectos de la constitución físico-química de la materia mineral y las rocas, y del desarrollo de los procesos internos y externos que controlan el devenir de nuestro planeta.

La Tierra es singular sin duda por haber permitido el desarrollo de la vida y a través de la evolución haber llegado a albergar una especie inteligente que es capaz de estudiarla y de actuar profundamente sobre su superficie. De esta interacción entre el planeta y la especie humana surge la necesidad de utilizar los conocimientos y métodos geológicos en la resolución de problemas causados por las actividades antrópicas o que afectan al desarrollo de éstas. De ello se encarga la **Geología Aplicada**.

La sociedad necesita que las investigaciones geológicas contribuyan a llevar a cabo un gran número de actividades y, al mismo tiempo, a prevenir o mitigar la degradación provocada por ellas y a recuperar la funcionalidad de las áreas deterioradas. El campo de actuación de la Geología Aplicada es amplio y abarca, entre otros, los siguientes ámbitos:

La Geotecnia, e Ingeniería Geológica utilizan las ciencias geológicas para predecir el comportamiento del terreno cuando se construye sobre él, y para solucionar los problemas geológicos implicados en el proyecto, construcción y explotación de obras públicas, instalaciones industriales, viviendas y otras edificaciones.

La Hidrogeología estudia las aguas subterráneas del planeta en aspectos diversos como su origen y distribución; su almacenamiento y circulación en las formaciones geológicas; sus propiedades físico-químicas; sus interacciones con el medio físico y biológico; y sus reacciones a la acción del hombre. Las aguas subterráneas presentan un especial interés desde el punto de vista socio-económico, por constituir una fuente muy importante para el abastecimiento humano, para el riego y para el uso industrial.

La Geología de Minas, aplica los conocimientos de la Geofísica, Petrología, Estratigrafía, Sedimentología, y Tectónica, a la detección, delimitación y explotación de los yacimientos minerales o depósitos de interés económico. De igual modo la Geología del Petróleo se centra en la localización y caracterización de los yacimientos de hidrocarburos líquidos o gaseosos.

La Geología Ambiental utiliza el conocimiento geológico para la detección, minoración o restauración de problemas ambientales. Su campo de actuación incluye la predicción y mitigación de los riesgos naturales; la resolución de problemas derivados de la explotación de recursos geológicos; el emplazamiento de determinados residuos; las tareas de recuperación y restauración de espacios naturales y la elaboración de estudios de impacto ambiental.

En esta edición del Geolodía en la provincia de Cádiz, queremos mostrar algunos ejemplos de cómo la Geología Aplicada puede prestar servicio a la sociedad en diferentes campos, y de forma que las actividades humanas sean lo más sostenibles posible.

## Encuadre geológico

Gran parte de la provincia de Cádiz se sitúa dentro del conjunto de la Cordillera Bética, la cual se relaciona a través del conocido como arco de Gibraltar con la cordillera del Rif del norte de África. Estas cordilleras son jóvenes, se formaron hace pocos millones de años durante la orogenia Alpina en la que también se formaron los Pirineos, Alpes, etc.

La estructura de la cordillera Bética es la consecuencia de las deformaciones tectónicas de grandes mantos de corrimiento que han desplazado, plegado y fracturado los materiales. A grandes rasgos, en las Cordilleras Béticas, se distinguen dos grandes conjuntos yuxtapuestos de Norte a Sur: las Zonas Externas, compuestas por materiales casi exclusivamente mesozoicos pertenecientes a un margen continental de la placa Ibérica, y las Zonas Internas, que se corresponden en su mayor parte, con dominios paleogeográficos extraños a dicha placa, más próximos al ámbito de la placa africana, y compuestos fundamentalmente por materiales paleozoicos. Un tercer conjunto de materiales, que aparece muy bien representado en la provincia de Cádiz, son las Unidades del Campo de Gibraltar, de "facies flysch" del Cretácico y Mioceno inferior.

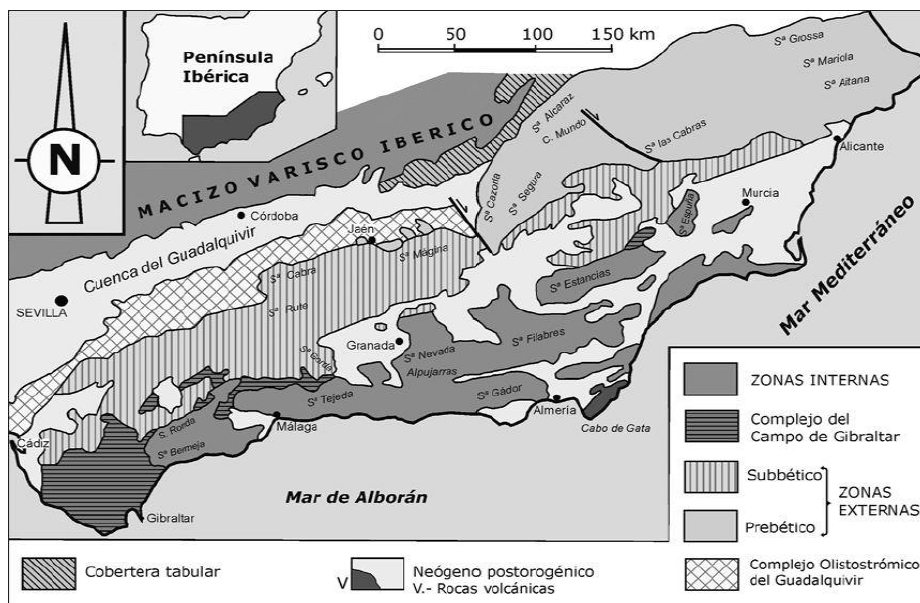


Fig. 2. Mapa esquemático de las Cordilleras Béticas (Estévez et al., 2.004)

Los materiales presentes en la cuenca de Arcos son por lo general neógenos y pertenecen a una cuenca que se individualizó en el Mioceno. La génesis de las cuencas neógenas béticas ha estado muy controlada por las diferentes condiciones geodinámicas reinantes en la cordillera a lo largo del Neógeno. Los movimientos eustáticos en algunos intervalos de tiempo fueron importantes, aunque no resulta fácil distinguir, para cada caso concreto, su influencia a causa de la mayor impronta tectónica. Dado que las condiciones geodinámicas cambiaron notablemente a partir del inicio del Tortonense, distinguimos dos grupos principales de cuencas: anteriores y posteriores a este momento, en el que se puede decir que acabó la deriva hacia el oeste de las Zonas Internas Béticas.

Dentro del primer grupo de cuencas, las formadas en el Mioceno inferior y medio, la cuenca más importante fue la cuenca de antepaís (o cuenca externa) que durante este tiempo formaba el Estrecho Nordbético, y en la que destacaba el surco frontal adyacente a los nuevos relieves y migrante hacia el NNW a medida que lo hacían los propios relieves deformados. Los sectores central y occidental de esta cuenca de antepaís, incluido el surco frontal, constituyeron pronto la subcuenca Proto-Guadalquivir, precursora (como su nombre indica) de la Cuenca o Depresión del Guadalquivir.

Por su parte, en el sector oriental de la cuenca de antepaís se superpusieron numerosas y pequeñas cuencas, algunas de las cuales fueron controladas por plegamientos y diapirismo. En algunas de estas cuencas el control de las fallas de desgarre N60-90 fue muy importante. Las cuencas formadas en esta época sobre las Zonas Internas fueron casi completamente destruidas; por esta razón no es posible describirlas adecuadamente, y las hemos clasificado con el nombre general de cuencas intracadena. Alguna podría atribuirse a una cuenca de tipo *tras-arco*.

El segundo grupo de cuencas está integrado por las formadas a partir del Tortonense y se clasifican como intramontañosas (depresiones de Vera, Granada, Ronda, Arcos, etc.). La Depresión del Guadalquivir constituye, no obstante, una excepción puesto que su evolución se extiende hasta el Messiniense (incluso hasta época más reciente en su extremo SW) y sin embargo se clasifica como cuenca antepaís. Las cuencas intramontañosas estuvieron controladas por los movimientos de diferentes juegos de fallas, que según su dirección y desplazamientos determinaron la formación de varios tipos, siempre dentro de una compresión NNW-SSE, a la vez que se producía una tensión perpendicular y un progresivo levantamiento de la cordillera.

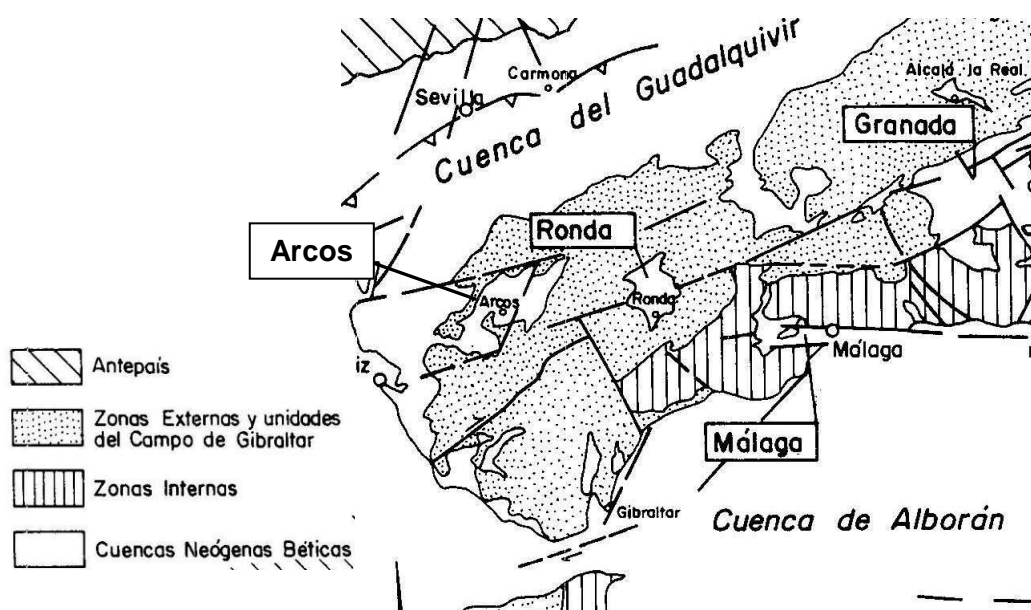


Fig. 3. Distribución de Cuencas Neógenas Intramontañosas en el Sector Occidental de las Cordilleras Béticas (Sanz de Galdeano y Vera 1991)

En la comarca de Arcos, los materiales que afloran se han agrupado en tres conjuntos de características litoestratigráficas y edades diferentes:

- Materiales subbéticos: Comprenden las arcillas abigarradas con yesos del triás, las calizas y dolomías del Jurásico y las margas y margocalizas del Cretácico-Terciario (Mioceno Inferior).
- Materiales para-autóctonos: Representados por las margas silíceas blancas (albarizas/moronitas) que constituyen la formación de la base de la cuenca miocena autóctona.
- Materiales autóctonos: Comprenden el resto de depósitos que, sobre las albarizas, rellenan la cuenca de Arcos, con predominio de facies de margas y areniscas, hasta culminar con un importante desarrollo de terrazas fluviales del río Guadalete.

Desde el punto de vista de la Geología Aplicada, la diferente naturaleza de los materiales presentes en la cuenca ha condicionado su aprovechamiento como materia prima, su repercusión o afección a las construcciones realizadas por el hombre o su comportamiento frente al agua subterránea.

En cuanto a su aprovechamiento, en esta zona son diversos los recursos geológicos que se utilizan como materia prima:

- ✓ Arcillas y margas para la fabricación de ladrillos
- ✓ Arenas silíceas para la elaboración de vidrio transparente, encimeras, etc.
- ✓ Arenas y gravas del Guadalete como áridos.
- ✓ Calcarenitas y areniscas como subbase o áridos.
- ✓ Calizas para áridos, en la fabricación de hormigón, aglomerado, zahorra, escollera, grava, etc.

Desde el punto de vista de su afección a las infraestructuras o las construcciones cabe destacar:

- ✓ Deslizamientos de ladera que afecten a carreteras o edificaciones.
- ✓ Desprendimientos de bloques de roca calcarenítica, como los ocurridos en el Tajo de Arcos.
- ✓ Problemas en edificaciones por expansividad de arcillas, asientos en suelos blandos, etc.
- ✓ Fenómenos relacionados con la dinámica del agua tanto subterránea como superficial.

Por último, en cuanto a las aguas subterráneas se pueden mencionar diversos aspectos tales como son:

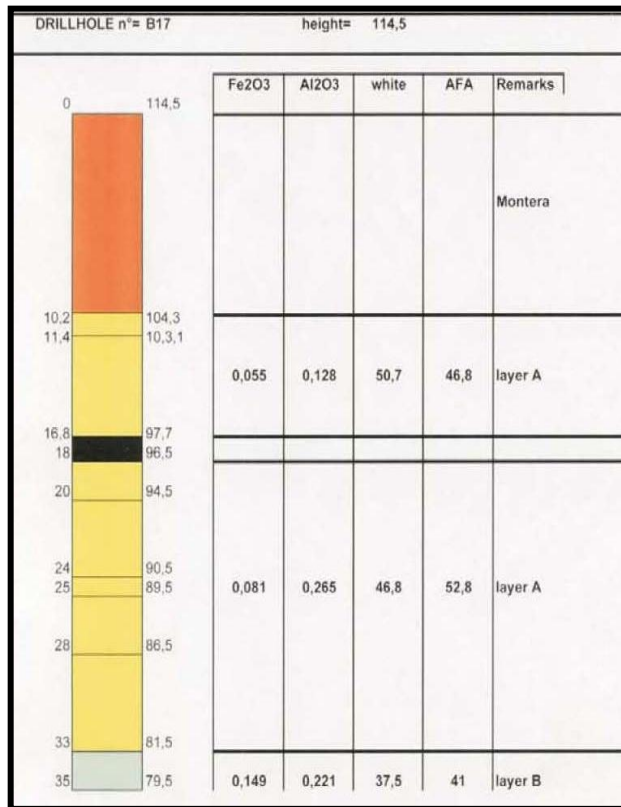
- ✓ Captaciones mediante sondeos para abastecimiento humano
- ✓ Captaciones para riego
- ✓ Vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos
- ✓ Incidencia de obras y extracciones de recursos naturales que afecta al nivel freático de los acuíferos

Serán estos aspectos relacionados con la geología aplicada de los materiales que afloran en la Cuenca de Arcos los que abordaremos en las diferentes paradas previstas.

# 1ª Parada. Geología de Minas: Arenas Silíceas de Arcos.

## Empresa SIBELCO HISPANIA

Esta mina de arenas silíceas se localiza al Este de la localidad de Arcos de la Frontera. El yacimiento consiste en una capa de arenas silíceas blanquecinas muy ricas en cuarzo con un espesor medio de unos 20 metros.



La investigación geológica ha constatado la presencia de 5 niveles de arenas, verificándose un empeoramiento en la calidad hacia el muro de la capa mineral, es decir, cuanto más se profundiza mayor es el contenido en hierro y aluminio, y por lo tanto peor es la arena desde el punto de vista comercial. Estas arenas silíceas presentan una cobertera de arcillas y tierra vegetal, denominada en minería “cobertera estéril”.

De los 5 niveles de arenas identificados solo son explotables a nivel comercial los dos superiores, ya que su composición química y granulométrica, y sus valores bajos en hierro, titanio, aluminio y potasio, los hacen muy adecuados para la fabricación de vidrio transparente y otros usos comerciales.

Fig. 4. Columna tipo arenas silíceas (nota interna del Dpto. Técnico Sibelco Hispania)



Fig. 5. Panorámica de la explotación en la que se identifican los materiales descritos anteriormente.

Desde el punto de vista estratigráfico y sedimentológico (Claus, 1995), estos afloramientos están constituidos por arenas silíceas de tamaño de grano medio y coloración blanquecina-

marrón-amarillenta; localmente presenta tonalidades rojizas. Los granos de cuarzo son redondos, detectándose la existencia de ilmenita. Hacia la base se observan niveles más cementados de arenisca, mientras que hacia la parte superior se distinguen niveles de margas grises de espesor centimétrico a métrico.

Presentan estructuras de ordenamiento interno que comprenden sets de laminación cruzada de base curva de pequeña y media escala, laminación cruzada sigmoidal de media escala y estratificación cruzada de gran escala. Las superficies limitantes de las unidades con laminación cruzada son tanto planas como curvas. Son muy numerosas las superficies de reactivación de láminas de pequeña y media escala. Todas estas características han permitido caracterizar estas arenas como correspondientes a un medio eólico.

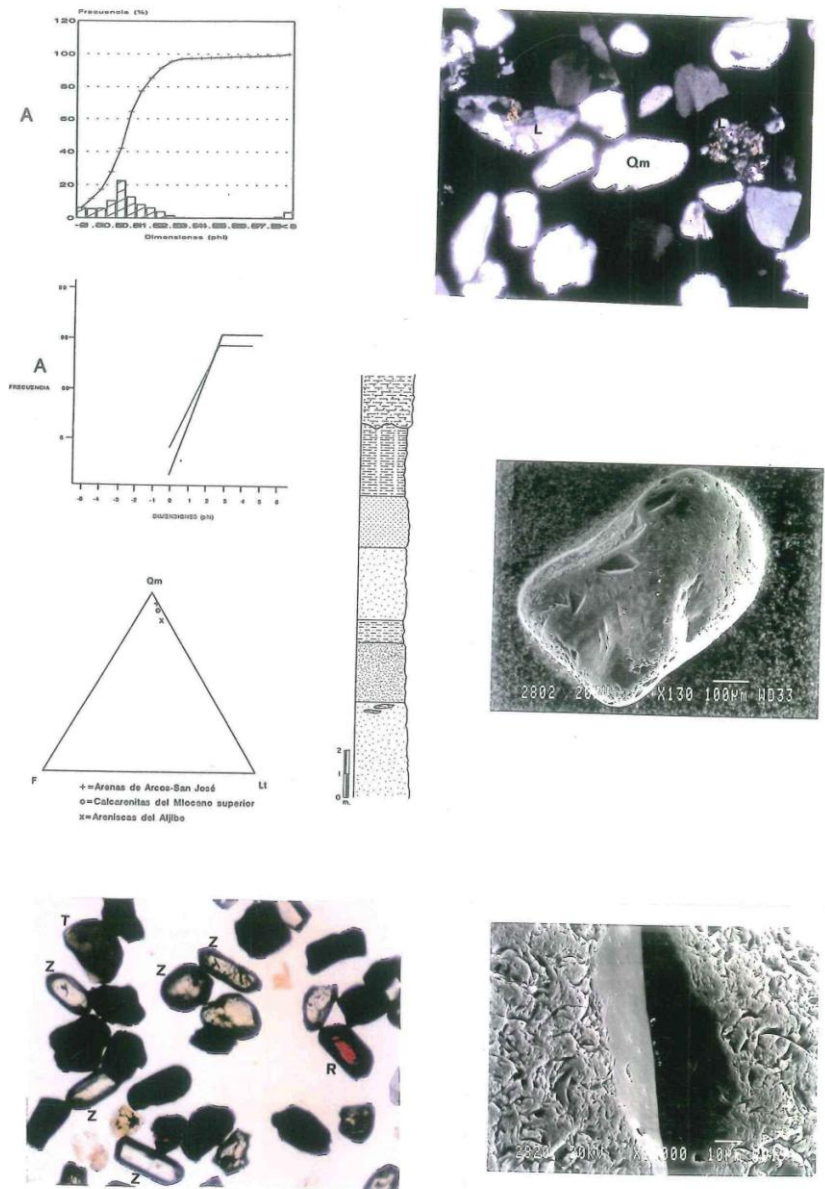


Fig. 6. Características más destacables de las arenas de arcos. Curvas granulométricas y análisis de poblaciones. Micrografía que muestra un predominio de Qm. Diagrama triangular de procedencia. Imágenes de exoscopia de granos de cuarzo de las arenas. Asociación de minerales pesados (ZTR) presentes. (Moral Cardona, 1994).

En cuanto a la riqueza de cuarzo de estos depósitos (Moral Cardona, et al., 1997), se han realizado análisis mineralógicos de los granos de cuarzo estableciendo una composición muy homogénea, básicamente cuarzo monocristalino. Tal madurez debe reflejar los procesos deposicionales que actuaron sobre estas arenas. Algunos autores citan como posible origen de este tipo de depósitos, sucesivos ciclos fluviales-costeros, los cuales pueden producir arenas de gran madurez mineralógica.

Otra cuestión es el origen o el área fuente de ese cuarzo. La zona en la que se sitúa este afloramiento está muy próxima al orógeno alpino bético. En este entorno podrían plantearse dos posibles fuentes. Por un lado los materiales areniscos pertenecientes a las unidades Flysch del Campo de Gibraltar, del tipo de Areniscas del Aljibe; y por otro las calcarenitas Miocenas de la Cuenca del Guadalquivir, las cuales contienen granos de cuarzo monocristalino.

La siguiente figura, modificada de (Moral Cardona, et al., 1997) muestra su relación con las calcarenitas del Mioceno Superior y con las areniscas del Aljibe del Mioceno Inferior.

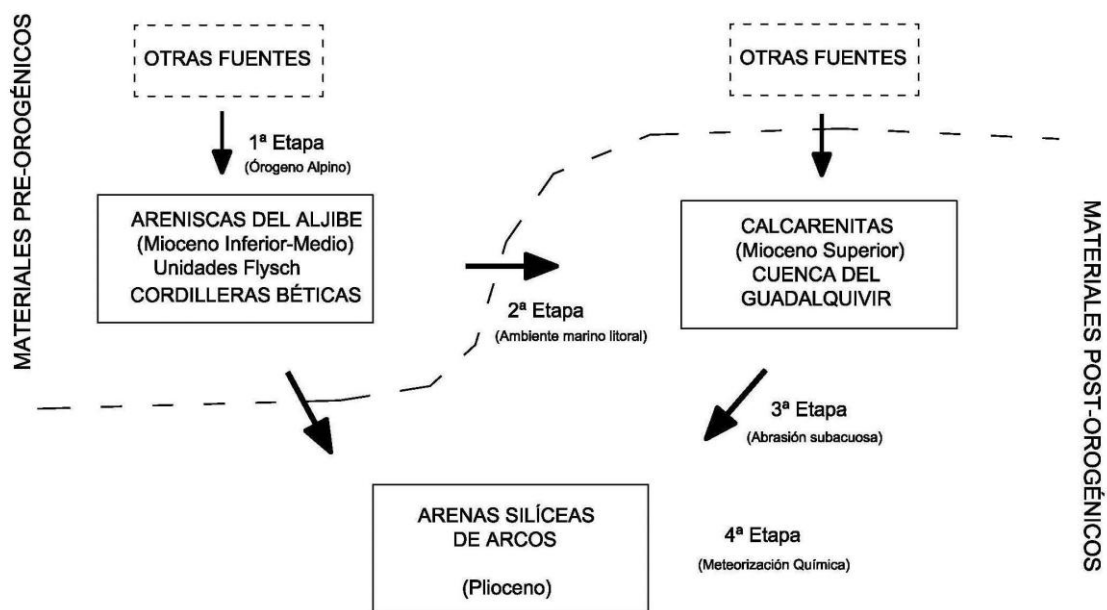


Fig. 7. Diagrama de fases en el que se pretende establecer las posibles áreas fuentes del cuarzo así como su evolución. (Moral Cardona et al., 1997)

En resumen, la evolución sedimentaria de las arenas silíceas de Arcos está claramente determinada por la naturaleza de las rocas del área fuente y por el carácter multicíclico y alto grado de re-trabajo/madurez de los depósitos, siendo un claro ejemplo de arenas multiciclo. Su extraordinario riqueza en cuarzo es debida fundamentalmente a una madurez sedimentaria de varias fases de materiales procedentes de formaciones sedimentarias cada vez más ricas en cuarzo.



## 2ª Parada. Geotecnia: Deslizamiento de ladera en la barriada "La Verbena" y desprendimientos rocosos en el Tajo.

La zona de La Verbena se sitúa al Oeste-Suroeste de la localidad de Arcos de la Frontera. Esta zona se caracteriza por situarse en la zona media de una ladera que desciende hacia el Sureste, más concretamente hacia el río Guadalete. La zona alta de dicha ladera está coronada por unos escarpes de materiales areniscos-calcareos que forman unas zonas verticalizadas (pendientes del orden del 60%). A medida que descendemos en la ladera la pendiente se vuelve menos acusada, pasando a pendientes del orden del 20-25%. El cambio de pendiente se corresponde en un cambio en la litología, pasando ladera abajo a materiales arcillo-margosos.



*Fig. 8. Vistas de la zona alta de la ladera*



*Fig. 9. Vista de la zona media de la ladera*

A medida que descendemos en la ladera, la pendiente es menos acusada aún, como se observa en una ladera similar, pero algo más al Oeste. En este caso las pendientes en la zona media-baja de la ladera pasan a valores del orden del 15%, buscando su perfil de equilibrio:



*Fig. 10. Vista de ladera tendente a perfil de equilibrio (Fotos. J. Moreno 2.012)*

Con esta disposición de calcarenitas/areniscas en la zona alta de la ladera y arcillas-margas en la zona media e inferior, se suelen producir fenómenos de inestabilidad, siguiendo el siguiente esquema, muy frecuente en localidades como Arcos, Medina Sidonia, Villamartín, Carmona, etc.

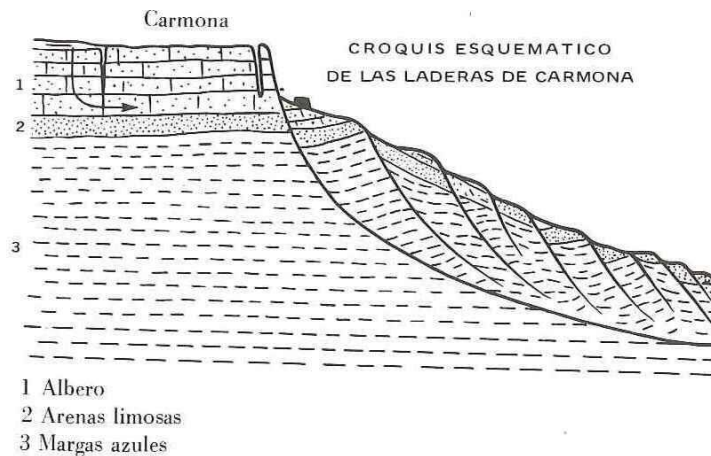


Fig. 11. Esquema de deslizamientos en laderas Terciarias de las provincias de Sevilla y Cádiz (Jiménez Salas, et al. 1981)

En la zona donde se asienta la barriada de La Verbena se reconocen patologías que se observan tanto en los edificios como en los elementos de la urbanización y que responden fielmente a un deslizamiento rotacional de ladera. Dicho proceso se encuentra en la actualidad activo, como atestiguan los evidentes daños que se reconocen en edificios e infraestructuras y que evolucionan en el tiempo. La morfología en planta del deslizamiento y la dirección del movimiento se presenta en la siguiente figura:

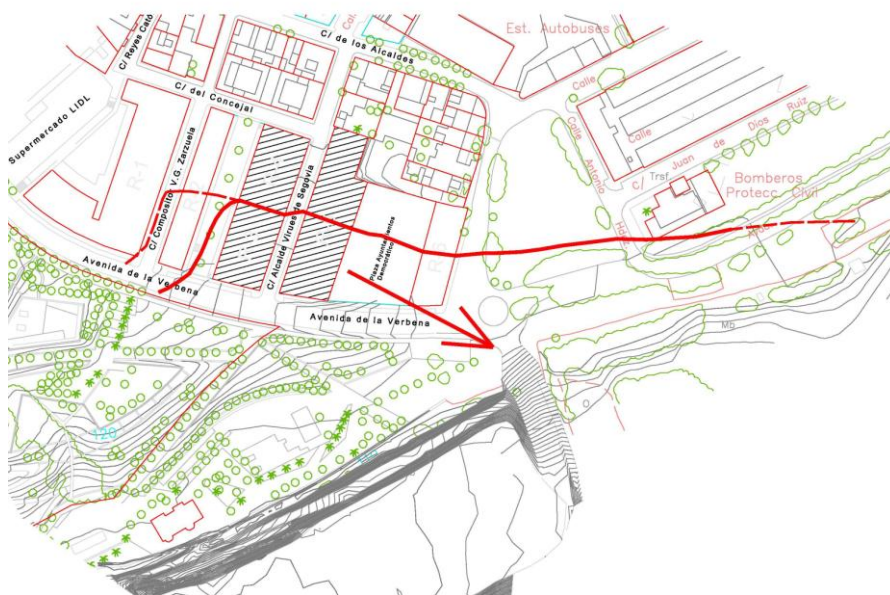


Fig. 12. Cartografía de la masa deslizada (elaborada por J. Moreno para esta guía)

Para poder realizar cualquier tipo de actuación de contención del deslizamiento, lo primero es realizar una investigación geológico-geotécnica que nos sirva para definir la tipología y profundidad de rotura. Esta labor llevada a cabo por los geólogos es fundamental para poder cuantificar las soluciones de estabilización de la ladera.

En la zona de La Verbena se han realizado las siguientes investigaciones geológicas, consistentes en sondeos a rotación para instalación de inclinómetros y ensayos de penetración dinámica.



Fig. 13. Planta de distribución de ensayos geotécnicos (Yanes, 2011)

En el interior de los sondeos se suelen colocar inclinómetros, que nos sirven para detectar la superficie del deslizamiento en profundidad. El funcionamiento de un inclinómetro y la representación gráfica de los resultados que se obtienen de las lecturas, se muestra en las siguientes figuras:

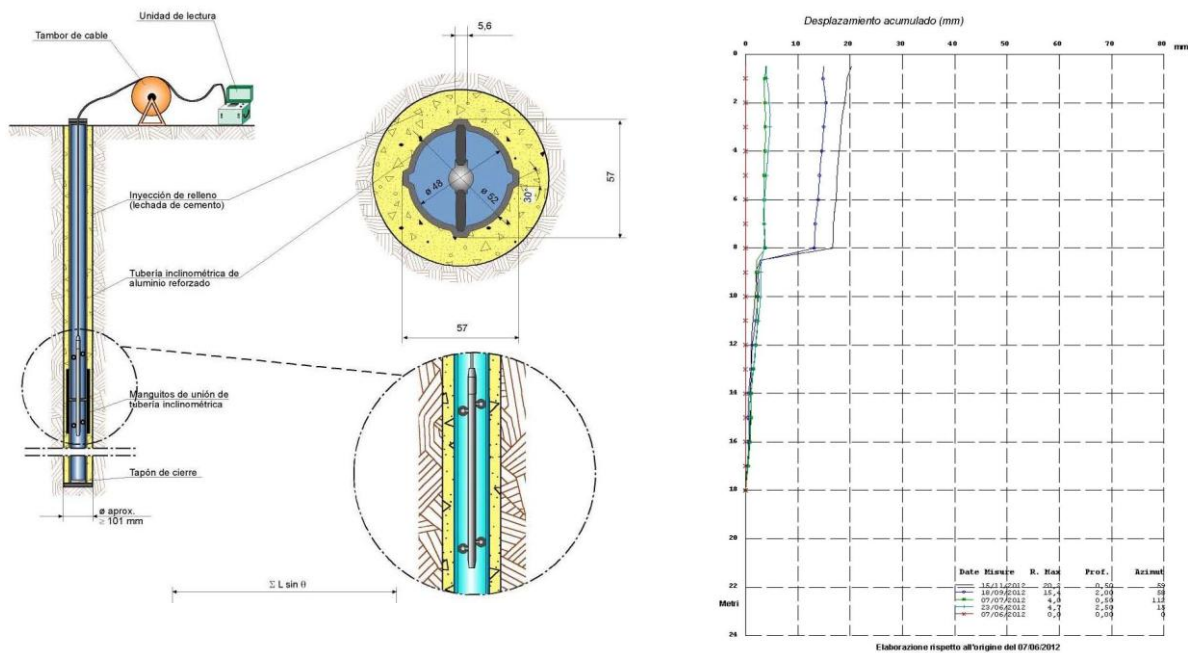


Fig. 14. Esquema de instalación, funcionamiento y salida gráfica de inclinómetro (Ortuño Abad, 2004)

Una vez definidas tanto la morfología en planta como la profundidad del deslizamiento se definen las actuaciones para la contención de la ladera. En esta ocasión se han desarrollado dos actuaciones complementarias:

- Contrafuertes de inyecciones armadas que intersecten la superficie de rotura.
- Drenaje de la ladera mediante drenes subhorizontales.

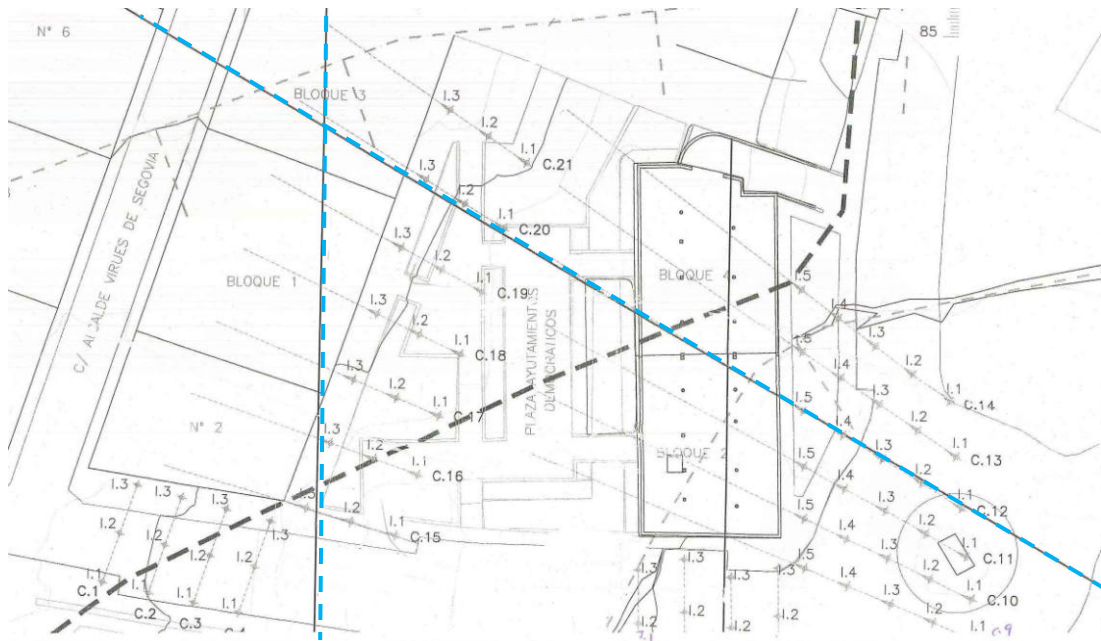


Fig. 15. Planta de distribución de contrafuertes de inyecciones armadas y drenes subhorizontales (trazos discontinuos en azul) (Yanes, 2.011)

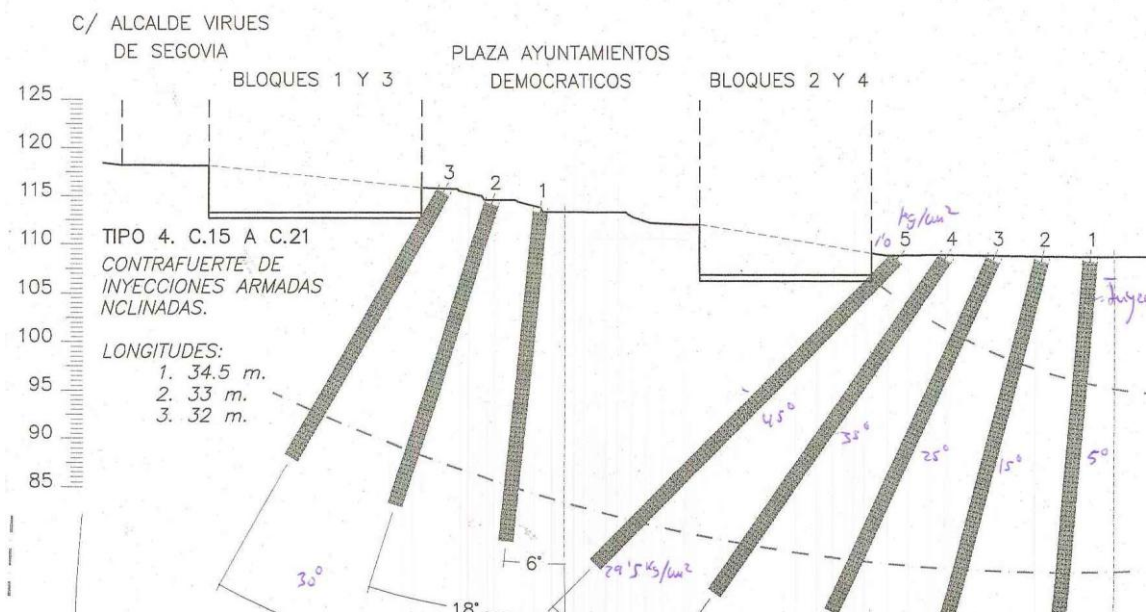


Fig. 16. Sección que ilustra las inclinaciones de las inyecciones armadas y la intersección de la superficie de deslizamiento (E. Yanes, 2.011)

### 3ª Parada. El tajo de Arcos: Estructuras sedimentarias y tectónicas.

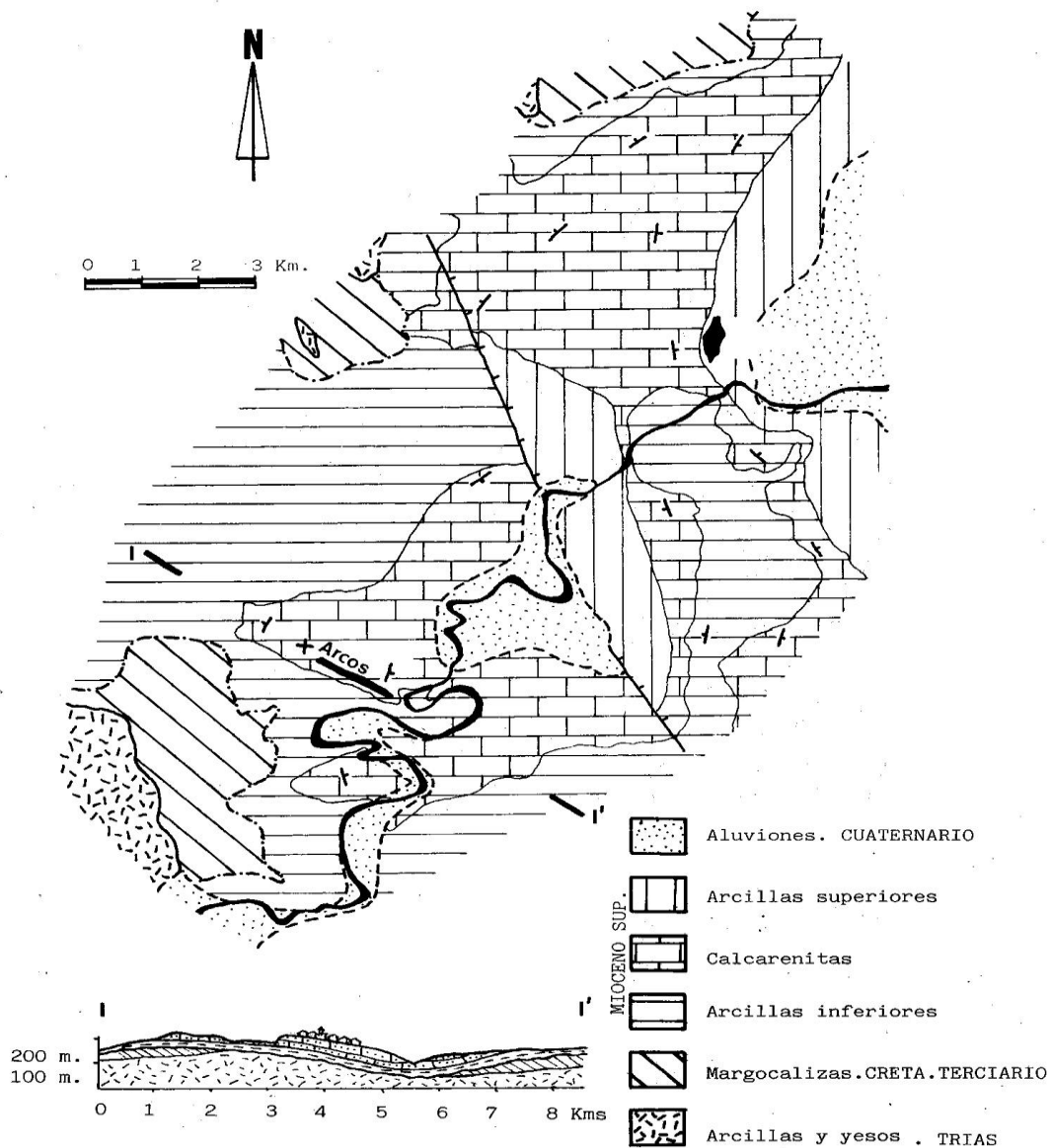


Fig. 17. Cartografía y corte de la región de Arcos-Bornos. Basado en Viguier (1974). Tomado de Gutiérrez Mas et al. (1991).

Los materiales que constituyen la “Peña de Arcos” y el entorno de esta localidad representan los primeros sedimentos postorogénicos que se depositaron en las áreas que quedaron sumergidas tras el levantamiento y formación de la Cordillera Bética. Corresponderían a las denominadas “moladas”, sedimentos producidos por los procesos erosivos tras la fase final de la orogenia. Se situarían en una cuenca marina que recibiría aportes sedimentarios desde la nueva cordillera, zona E y SE, y también desde la Meseta por la zona Norte.

La cuenca de Arcos-Bornos, según Gutiérrez et al. (1991), ocupa una zona alargada de dirección NE-SO, cuyos límites aproximados son las poblaciones actuales de Puerto Serrano, Arcos de la Frontera, San José del Valle y Espera. Los materiales yacen sobre albarizas (moronitas) en la zona sur y sobre el Triás subbético en el norte y en el oeste.

En esta zona tiene instalado su curso medio el río Guadalete que en sus procesos erosivos diferenciales ha generado diferentes formaciones geológicas como el desfiladero de la angostura al sur de la localidad de Bornos (estrechamiento aprovechado para realizar la presa del embalse), el modelado de varios meandros muy significativos o los dos tajos de gran envergadura que limitan y alzan el pueblo de Arcos de la Frontera.

En esta parada nº 3 (el Tajo de Arcos), observamos la denominada “Peña de Arcos”, formación geológica singular que tiene una longitud de algo más de kilómetro y medio y una altura de alrededor de los 100 metros. Catalogada Paraje Sobresaliente en el Plan Especial de Protección del Medio Físico de la Provincia de Cádiz, ha sido incluida en el Inventario Andaluz de Georrecursos (Consejería de Medio Ambiente, 2009). Estos materiales, de más de cien metros de potencia, en los que predominan las facies de calcarenitas bioclásticas ricas en pectínidos, se conocen con el nombre de caliza tosca de Arcos de la Frontera, y están datados en la transición del Tortoniense al Andaluciense (Mioceno superior). Debido a sus proporciones y a la peculiar forma que presenta, la Peña de Arcos de la Frontera constituye un elemento muy relevante dentro del paisaje de la campiña gaditana, en la que predominan los relieves alomados con escasos desniveles. Por último, el conjunto de edificios históricos de gran relevancia que se ubican en su parte más elevada del macizo contribuye a definir uno de los paisajes más singulares de Andalucía. La declaración de la Peña de Arcos como monumento natural, BOJA de 30-12-2011, complementa el conjunto formado por la citada Peña y por los meandros del río Guadalete, que ya gozaban de la categoría de Lugar de Importancia Comunitaria (ES61220021 Río Guadalete) en base a la Directiva Hábitats 92/43.

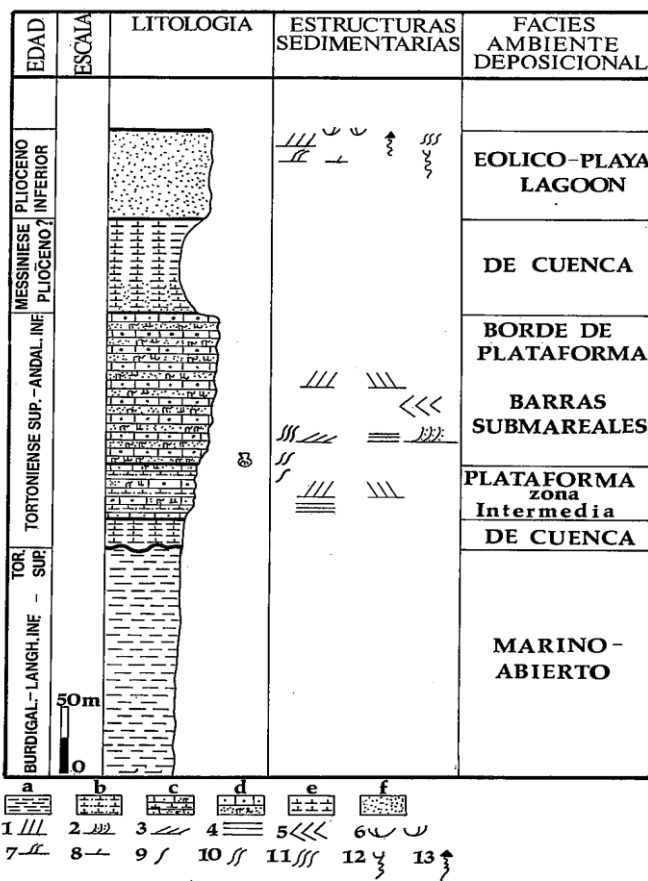


Fig. 18. —a: Margas blancas (Albarizas).—b: Margas grises arenosas.—c: Alternancias de margas con arenas y areniscas bioclásticas.—d: Calcarenitas bioclásticas.—e: Margas grises.—f: Arenas.

1: Estratificación cruzada de escala media.—2: Estratificación cruzada en surco de escala media.—3: Estratificación cruzada tabular.—4: Estratificación paralela.—5: Herring-bone.—6: Laminación cruzada, base curva, pequeña escala.—7: Laminación cruzada sigmoidal, media escala.—8: Laminación cruzada, pequeña escala (sets tabulares).—9: Bioturbación escasa.—10: Bioturbación abundante.—11: Bioturbación muy abundante.—12: Rizoconcreciones.—13: Estructuras de escape de fluidos. (Claus, 1995)

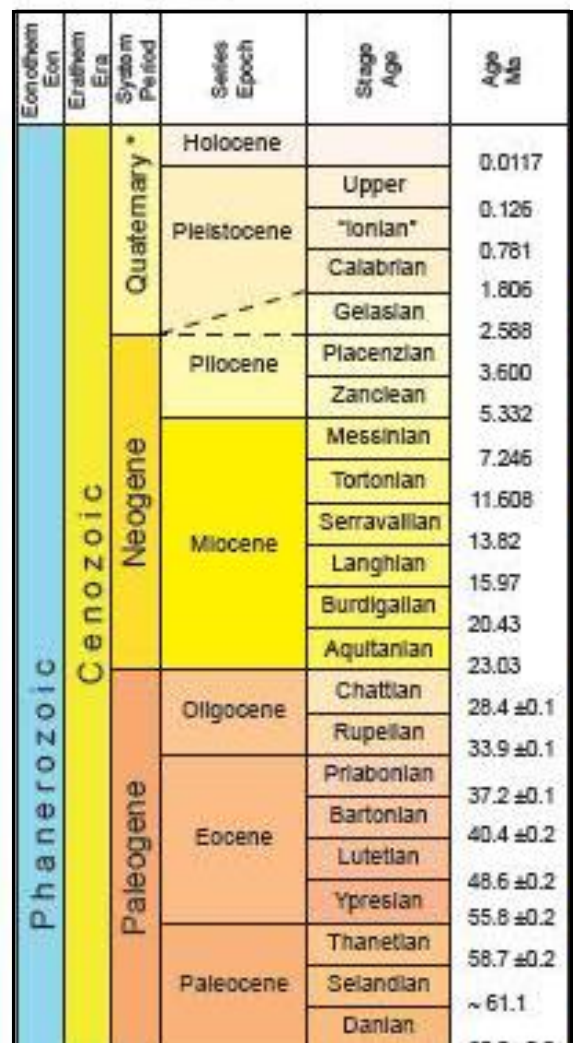


Fig. 19. Escala de tiempos geológicos desde el cenozoico

Según Clauss (1995) (ver Fig. 18), desde un punto de vista litoestratigráfico pueden diferenciarse, de muro a techo, una serie de tramos en la columna estratigráfica de Arcos-Bornos. El primero de los tramos (a. en la Fig.18) está compuesto por margas blancas y amarillentas, denominadas localmente "albarizas" o "moronitas". Su potencia supera los 150 m, sin haberse observado el muro de las mismas. Datadas desde el Burdigaliense al Tortoniense superior, corresponden a materiales de ambientes pelágicos, marinos abiertos y presentan material alóctono del subbético. De forma discordante se sitúa el segundo tramo (b. en la Fig. 18), formado por margas arenosas grises azuladas (Tortoniense superior).

El tercer tramo (c en la Fig. 18) está constituido por una alternancia de margas arenosas grises, arenas y areniscas calcáreas, y calcarenitas bioclásticas. Los bioclastos incluyen algas rojas coralinas, briozoos, equinodermos, gasterópodos, bivalvos, foraminíferos planctónicos y bentónicos (Tortoniense superior – Messiniense inferior). Correspondería a un ambiente marino de plataforma intermedia. Concordantemente se deposita el tramo d, que se halla representado por calcarenitas bioclásticas, con predominio de estratificación cruzada y de bioturbación perteneciente a la lcnofacies de Skolitos (Clauss y Mayoral, 1992), (Tortoniense superior – Messiniense inferior), el tipo de ambiente sedimentario es de plataforma carbonatada-detritica tipo rampa con barras submareales.

El tramo e, concordante con el anterior, lo forman margas grises de edad Messiniense – Plioceno de un ambiente de cuenca relativamente profundo. Por último, el tramo f, está compuesto por arenas silíceas del Plioceno en un ambiente eólico de playa tipo lagoon.

La interpretación de esta serie (Gutiérrez Mas et al. 1991), es de una secuencia regresiva, desde un medio marino pelágico, donde se depositaban las margas blancas, a los depósitos neríticos de plataforma interna de las margas arenosas, y pasando a un medio litoral de alta energía donde se depositaron las calcarenitas, y que, probablemente se tratase de un conjunto de barras progradantes. Posteriormente se produce un proceso transgresivo volviendo a unas condiciones pelágicas determinadas por las margas y finalmente la regresión hacia términos más continentales del Plioceno. Se deduce que durante el Mioceno superior el área estaba ocupada por un mar cuya costa sería la que se representa en la siguiente figura.

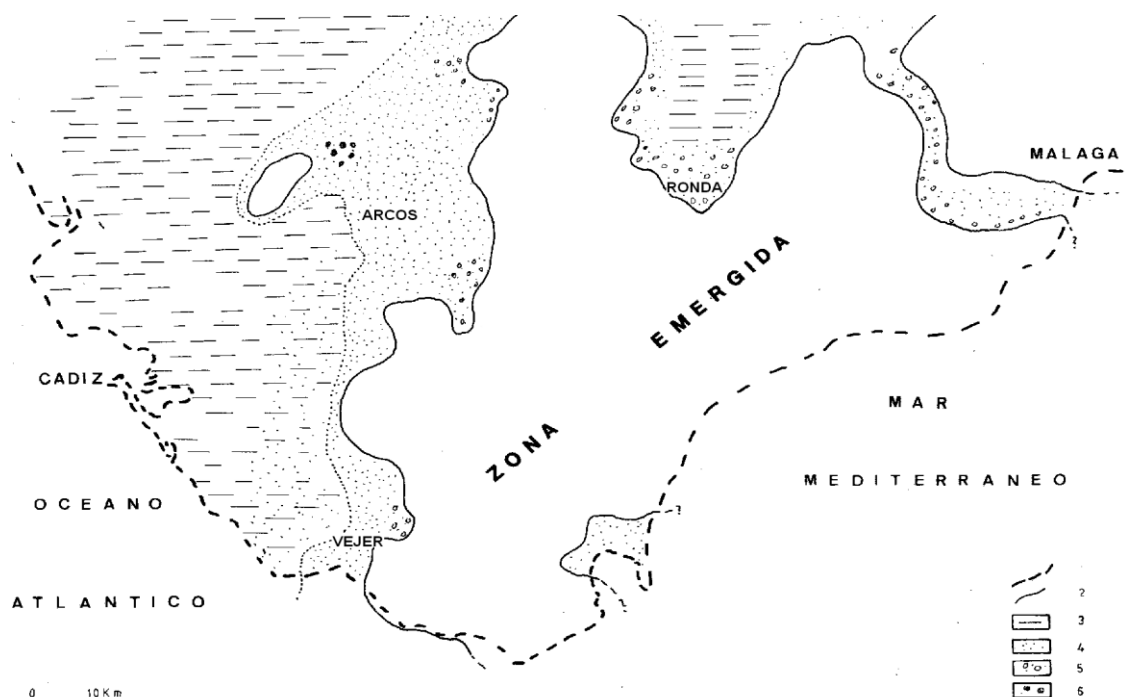


Fig. 20. Paleogeografía y facies del Mioceno superior, modificado de Benkhelil (1976)  
Tomado de Gutiérrez Mas et al. (1991)

La profundidad aumentaría hacia el NO, como indica el hecho de que los conglomerados (Tajo de Ronda) lateralmente pasen a calcarenitas, y éstas a su vez a margas y arcillas. Dicho mar se extendería por toda la depresión del Guadalquivir, hacia el norte de Sierra Morena.



Fig. 21. Estratificación cruzada (Fot. L.M. Pérez 2013)



Fig. 22. Detalle (Fot. L.M. Pérez 2013)

En esta parada nº 3, el Tajo o Peña de Arcos, y en la parada nº 4, mirador de la Peña Vieja, pueden observarse con bastante nitidez y en buenos afloramientos, estructuras de ordenamiento interno que indican el ambiente sedimentario de plataforma submareal donde se generaron estos materiales. Son espectaculares las estratificaciones cruzadas que aparecen, con inclinaciones y direcciones variadas y en sets de diversos espesores, indicando episodios con diferentes niveles de energía y de reactivación. Se observan igualmente con claridad láminas que muestran orientaciones bimodales, estratificación cruzada "herring bone" o en "espina de pez" generadas por los flujos y reflujos de las mareas (ver Fig. 22).

Las figuras inferiores esquematizan el proceso de generación de "ripples" por efecto de una corriente y como el movimiento de los granos de arena por la pendiente menor del ripple y su caída por la pendiente mayor va generando esta estructura interna tan característica.

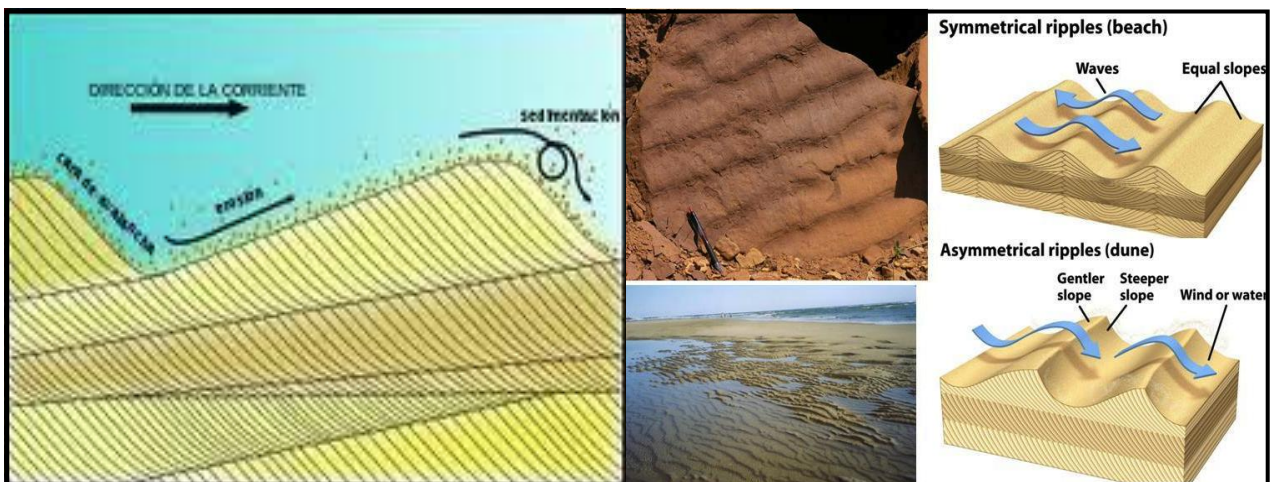


Fig. 23. Formación de ripples y Estratificación cruzada (tomada de IGEO-UCM).



**ACTIVIDAD DE CAMPO: ¡¡¡¡¡¡¡ BUSCA Y ENCONTRARÁS!!!!!!!**  
**LOCALIZA UNA FALLA EN EL TAJO..... ¿DE QUÉ TIPO ES?**





## 4ª Parada. La cuenca del Guadalete. Regulación hidráulica e Hidrogeología.

El río Guadalete es el principal curso fluvial de la provincia de Cádiz. Nace en la Sierra de Grazalema, que como es sabido presenta el máximo de precipitación de la mitad meridional de la Península Ibérica (2000 mm/año). Esto es debido a que la sierra actúa como barrera orográfica que limita el desplazamiento de los frentes cargados con humedad procedentes del Atlántico, favoreciendo así la precipitación. El río, tras recorrer 157 km, desemboca en la Bahía de Cádiz, en la localidad del Puerto de Santa María. Administrativamente, se enclava en la Demarcación Hidrográfica del Guadalete-Barbate.



Fig. 24. Demarcación Hidrográfica Guadalete-Barbate. Sistemas que la componen y presas que la regulan.

La superficie de la cuenca del río Guadalete es de 3.677 km<sup>2</sup>. Actualmente está regulada por 5 presas, agrupadas en 2 sistemas de explotación de aguas superficiales:

- El sistema Zahara-Bornos-Arcos, en la cuenca media-alta del Guadalete, con unos recursos disponibles superficiales de 115 hm<sup>3</sup>/año
- El sistema Hurones-Guadalcaçin que regula el río Majaceite, principal tributario del Guadalete, con unos recursos disponibles superficiales de 152 hm<sup>3</sup>/año.

Las principales características de los embalses de la cuenca del Guadalete se muestran en la siguiente tabla:

Río	Año	Tipo	Altura (m)	Capacidad (hm <sup>3</sup> )	Destino	
Arcos	Guadalete	1965	Gravedad	22	14	Riego
Bornos	Guadalete	1961	Gravedad	52	215	Riego, energía
Zahara de la Sierra	Guadalete	1992	Materiales sueltos	82	223	Riego
Guadalcaçin II	Majaceite	1995	Materiales sueltos	82	800	Abastecimiento y riego
Los Hurones	Majaceite	1964	Gravedad	76	135	Abastecimiento, energía

Tabla 1. Características de los embalses de la cuenca del río Guadalete

Un sistema de explotación consiste en un conjunto de masas de agua superficial y subterránea, obras e infraestructuras hidráulicas, normas de utilización del agua derivadas de las características de las demandas y reglas de explotación para el suministro. Aunque en la actualidad hay un acuerdo unánime en que la gestión adecuada de los recursos hídricos debe de contemplar el uso conjunto e integrado de recursos superficiales y subterráneos, lo cierto es que aún en nuestros días persiste una cierta "hidroesquizofrenia". Con este término, el hidrólogo norteamericano R.L. Nace definió en 1972 la separación en la mente de los

planificadores hidráulicos y, en general, en la población, de las aguas que se ven, que se perciben con los sentidos y sobre las que tradicionalmente se actúa, de las aguas que se encuentran ocultas en el subsuelo, cuya comprensión resulta mucho más difícil.

Además de la producción hidroeléctrica, la regulación de la cuenca permite satisfacer la demanda de abastecimiento de la zona de la Bahía Gaditana que cuenta con una población de unos 750.000 habitantes (850.000 habitantes equivalentes, considerando la población estacional). Esta demanda, evaluada en unos 100 hm<sup>3</sup>/año, se satisface con los embalses de Los Hurones y Guadalcaçín, cuya evolución de volumen embalsado se muestra en la siguiente figura. En ella se puede apreciar el efecto de la metasequía 1992-95.

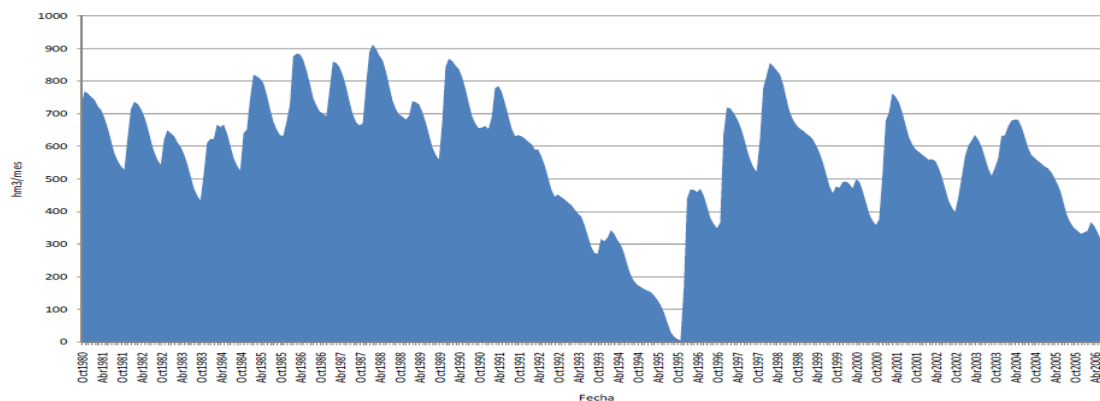


Fig. 25. Evolución de la suma de volumen embalsado en Los Hurones y Guadalcaçín (1980-2005)

Así mismo, los embalses de Arcos y Guadalcaçín suministran agua a la denominada Zona Regable del Guadalcaçín (10.600 ha) y el embalse de Bornos a la zona regable del mismo nombre (2000 ha). Los recursos hídricos disponibles para el conjunto de la cuenca, considerando diferentes escenarios de planificación se presenta en la siguiente tabla. Hay que advertir que en ella se incluyen como recursos superficiales aquellos recursos subterráneos que alimentan los embalses de superficie.

Recursos hídricos disponibles para los Sistemas Guadalete y Barbate			Volumen anual (hm <sup>3</sup> )		
Origen del recurso			Actual	2015	2027
Sistema Guadalete	Superficiales	Conjunto Zahara-Arcos-Bornos	114,6	114,6	105,4
		Conjunto Hurones-Guadalcaçín	152,3	152,3	140,1
	Subterráneos	35,0	35,0	32,2	
	Reutilización	Retornos EDAR Jerez	13,1	13,1	16,0
		Reutilización directa	9,7	16,0	16,0
	Retornos de regadío a embalses	3,9	3,9	3,9	
	Otras Cuencas	Guadiaro	55,9	55,9	51,4
	<b>Total Sistema Guadalete</b>		<b>384,5</b>	<b>390,8</b>	<b>365,0</b>

Tabla 2. Recursos disponibles estimados para la Demarcación Hidrográfica del Guadalete.

Tras la regulación de la cuenca, los procesos sedimentarios, geodinámicos y geomorfológicos han sufrido una notable alteración y continúan con ritmos diferentes. Un fenómeno importante es la evolución fluvial, que en el sector de Arcos se caracteriza por la formación y migración de meandros, los desprendimientos de ladera por socavamiento de la base, los procesos erosivos de profundización del valle y la formación de tajos. En la parada nº 3, junto a “La Peña”, se han producido frecuentes desprendimientos, lo que llevó a realizar obras de prevención de riesgos y al cambio de la carretera al otro lado del río. En esta parada nº 4 y desde el mirador pueden observarse todos estos fenómenos también. En la figura de abajo se muestra la evolución de un curso meandriforme y la formación, en régimen natural, de un “ox bow”.

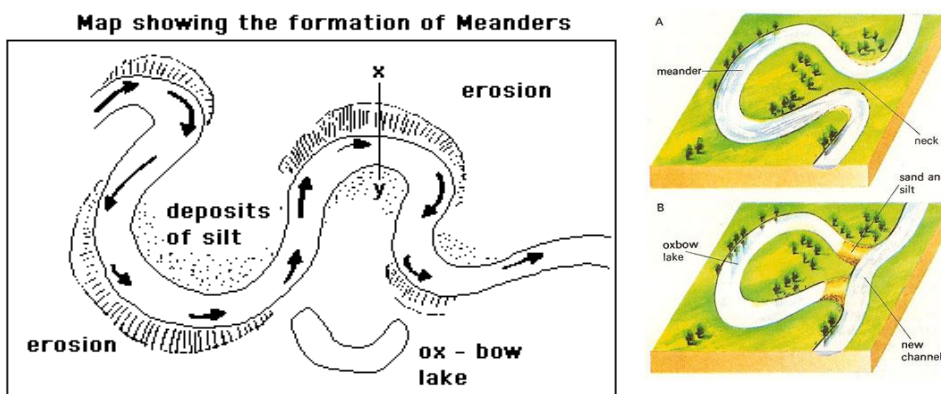


Fig. 26 Ortofotografía (08/2010) del sector de Arcos de la Frontera. Se aprecia la morfología meandriforme del río Guadalete aguas abajo del embalse de Arcos. Abajo: evolución de un meandro.

En cuanto a la Hidrogeología de la comarca, hay que destacar la existencia de uno de los acuíferos más importantes de la provincia de Cádiz, el denominado acuífero Arcos-Bornos-Espera.

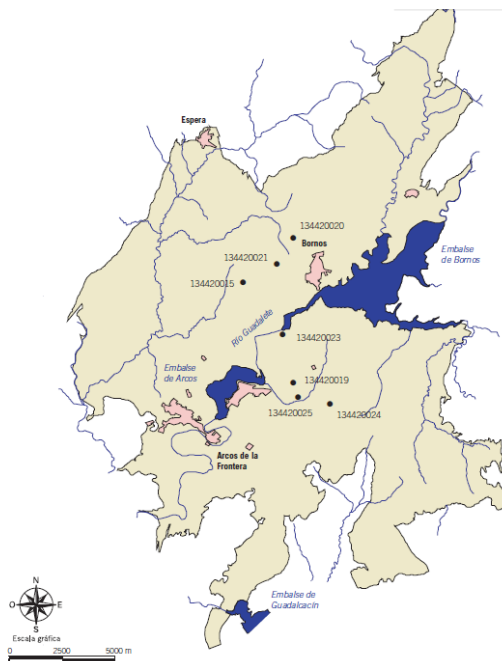


Fig 27. Extensión superficial del acuífero de Arcos-Bornos-Espera y ubicación de las principales obras de regulación superficial del río Guadalete (Fuente: IGME, 2005)

Se trata de un acuífero de 70 km<sup>2</sup> de extensión, que administrativamente queda incluido en la Unidad Hidrogeológica 05.54. Está formado por materiales permeables integrados en dos unidades bien diferenciadas:

- Materiales detríticos postorogénicos: engloban la serie terciaria y cuaternaria, incluyendo conglomerados, areniscas, limos de origen marino y depósitos fluviales actuales y recientes. Se trata de materiales detríticos permeables con porosidad primaria (coetánea a la formación de la roca) de tipo intergranular, que constituyen la mayor parte del acuífero. Los espesores medios se aproximan a 80 m, aunque las calcarenitas pueden alcanzar los 120-140 m.
- Materiales carbonáticos preorogénicos (edad jurásica): localizados al Sur, conforman los relieves de la Sierra Valleja y Sierra de Aznar de muy escasa extensión. Presentan elevada permeabilidad y porosidad de tipo secundario, esto es, producida con posterioridad a la formación de las rocas por procesos de fracturación y disolución (karstificación).

La base impermeable del acuífero está constituida por materiales margoso-yesíferos del Triásico y por las margas blancas para-autóctonas (albarizas).

El funcionamiento del acuífero es en general en régimen libre, excepto para parte de los materiales miocenos de base que pueden presentar confinamiento bajo afloramientos margosos. La alimentación del sistema se produce por infiltración directa del agua de lluvia (unos 7.5 hm<sup>3</sup>/año), por retornos de regadíos y a partir de los embalses ubicados sobre éste (Arcos, Bornos y Guadalcaçín), estas últimas partidas sin cuantificar. El volumen de reservas del sistema ha sido estimado por el IGME en unos 130 hm<sup>3</sup>. En régimen natural, las salidas del acuífero se producirían directamente por descarga al cauce del río Guadalete, pero dada la explotación a la que está sometido el sistema, la principal salida debe de producirse por bombeos, la mayor parte de los cuales se destinan a abastecimiento urbano (3.7 hm<sup>3</sup>/año) y el resto a regadío (2,8 hm<sup>3</sup>/año).

En términos generales las aguas del acuífero presentan una facies bicarbonatada cálcica y una mineralización media-baja que las hacen muy adecuadas para el consumo humano. La mayoría de las captaciones presentan conductividades de 400-500 :S/cm y sólo en sectores localizados se detecta la influencia de materiales margosos que producen un incremento de la mineralización de las aguas. No obstante, la amenaza del aumento del contenido en nitratos procedentes de las actividades agrícolas es evidente. Se detecta un aumento paulatino de este componente en las aguas del acuífero y en algún caso incluso se ha producido un incremento significativo que ha conducido al abandono de alguna captación.

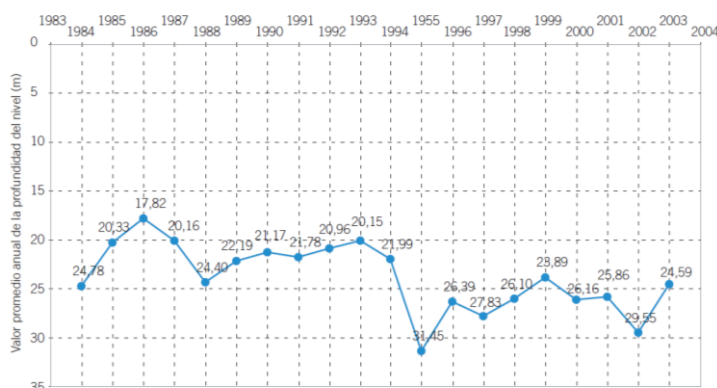


Fig. 28. Evolución piezométrica media del acuífero de Arcos-Bornos-Espera entre 1983 y 2004, obtenido a partir de la red de control del acuífero. Obsérvese el descenso generalizado a raíz del plan de emergencia para el abastecimiento de la Bahía de Cádiz en la sequía de 1992-95 (Fuente: IGME, 2005)

Las favorables características hidrogeológicas de los materiales acuíferos junto con la buena calidad química del agua subterránea han promovido una notable explotación del sistema. Los núcleos de población de Arcos, Bornos y Espera, junto con varias pedanías (unos 40.000 habitantes) se abastecen de

agua subterránea procedentes de 11 sondeos. Así mismo, es de destacar el papel que este acuífero jugó en la gran sequía de 1992-95. A través de las obras de emergencia efectuadas para paliar la sequía se puso en funcionamiento una batería de sondeos (denominados Arcos I, II, III, IV y V) que suministraron un caudal conjunto superior a 500 l/s para el abastecimiento de emergencia de la Bahía de Cádiz. En las figuras adjuntas se presenta un esquema de un sondeo de explotación del acuífero de Arcos y una imagen de una prueba de bombeo.



Fig. 29. Aforo en el acuífero de Arcos-Bornos-Espera. Sondeo de explotación Arcos III realizado en 1995 para el abastecimiento de emergencia de la Bahía de Cádiz

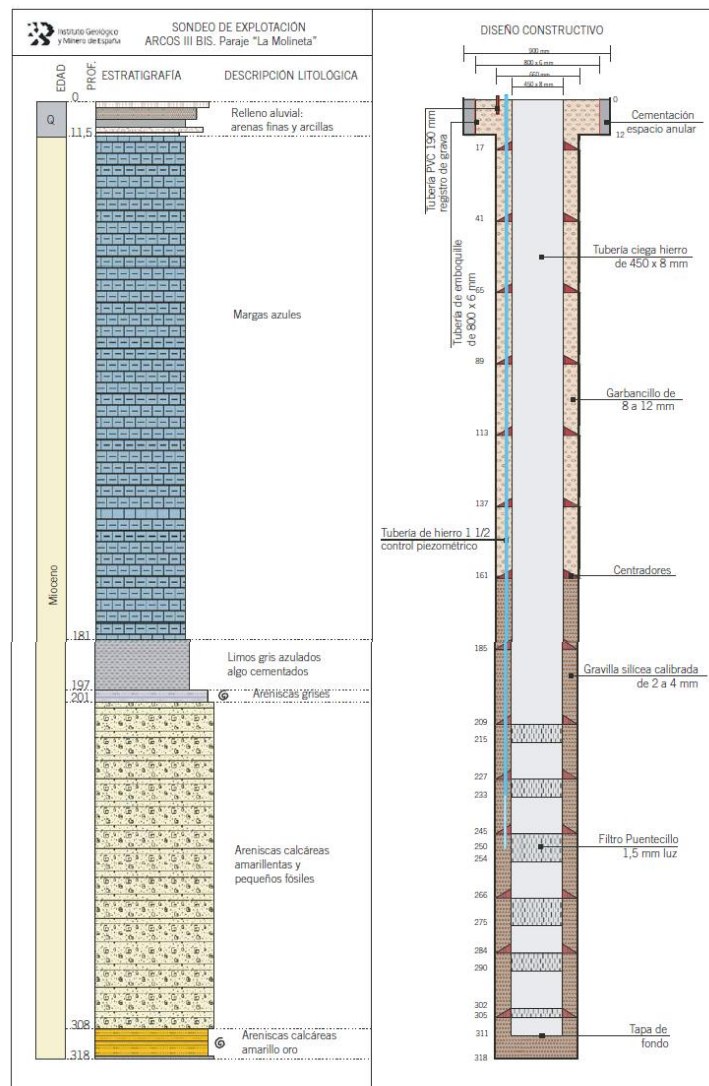


Fig. 30. Columna litológica atravesada y diseño constructivo del sondeo de explotación realizado en 2001 para el abastecimiento de Arcos (Fuente: IGME, 2005)

## Bibliografía

- Clauss Klamp, F.L. y Mayoral, E. Icnofacies de Skolitos en el Mioceno Superior del borde meridional de la Cuenca del Guadalquivir (Arcos de la Frontera, Cádiz). *Geogaceta*, 12, 102-104.
- Clauss, F.L. 1995. Relación entre icnofósiles y sedimentación en materiales neógenos de Arcos de la Frontera (SW de la Depresión del Guadalquivir). Departamento de Geología de la Universidad de Huelva. *Rev. Soc. Geol. España*, 8 (1-2): 33-40.
- Consejería de Medio Ambiente. Informe previo para la revisión y actualización del inventario andaluz de georrecursos 2009. 71pp.
- Estévez, A.; Vera, J.A.; Alfaro, P.; Andreu, J.M.; Tent-Manclús, J.E. y Yébenes, A. 2004. Geología de la Provincia de Alicante. Enseñanza de las Ciencias de la Tierra (12.1) pp. 2-15
- Gutiérrez Más, J.M.; Martín Algarra, A.; Domínguez Bella, S. y Moral Cardona, J.P. 1991. Introducción a la Geología de la Provincia de Cádiz. Servicio de Publicaciones de la UCA. 315 pp.
- IGME-Diputación de Cádiz (2005). Atlas Hidrogeológico de la provincia de Cádiz. Instituto Geológico y Minero de España. 263 pp.
- ITGME. 1990. Mapa Geológico de España E. 1:50.000 Hoja 1049 Arcos de la frontera. 54 pp.
- Jiménez Salas, J. A.; de Justo Alpañes, J. L. y Serrano González, A. A. 1981. Geotecnia y Cimientos II. Mecánica del Suelo y de las Rocas. 2ª Edición. Ed. Rueda.
- Junta de Andalucía (2012). Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica Guadalete-Barbate. <http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/site/portalweb> (último acceso: 8/05/2013)
- Llamas, M.R. (2005). Una causa radical de los conflictos hídricos en España. *Tecnología del Agua*, 259, 72-76
- Moral Cardona, J.P. 1994. Estudio de las arenas de la cuenca del río Guadalete y zonas próximas. Tesis Doctoral, Universidad de Cádiz. 464 pp.
- Moral Cardona, J.P.; Gutiérrez Más, J.M.; Sánchez Bellón, A.; López Aguayo, F. Caballero, M.A. 1997. Provenance of multicycle arenites of Pliocene age at Arcos, southwestern Spain. *Sedimentary Geology* 112. pp 251-261.
- Ortuño Abad, L. 2004. Estabilización de taludes en suelos. Curso de geotecnia para infraestructuras. Sevilla
- Sanz de Galdeano, C. y Vera, J.A. 1991. Una propuesta de clasificación de las Cuencas Neógenas Béticas. *Acta Geológica Hispánica*, V. 26 nº 3-4 pp 205-227.
- Yanes, E. 2011. Proyecto para la consolidación de La Verbena. Excmo. Ayuntamiento de Arcos de la Frontera.