



ESTUDIOS HIDROGEOLÓGICOS EN ZONAS REMOTAS CON SIG: ERG CHEBBI (MARRUECOS)

Manuel GARCÍA-RODRÍGUEZ

Departamento de Ciencias Analíticas (UCM).
Facultad de Ciencias (UNED)
manu.garo@ccia.uned.es

Loreto ANTÓN LÓPEZ

Departamento de Ciencias Analíticas (UCM).
Facultad de Ciencias (UNED)
lanton@ccia.uned.es

Recibido: 9 de septiembre del 2013

Enviado a evaluar: 9 de septiembre del 2013

Aceptado: 11 de noviembre del 2014

RESUMEN

Los estudios hidrogeológicos en áreas desérticas y remotas de difícil acceso resultan logísticamente complicados. Sin embargo, en algunas de estas zonas el aprovechamiento de los recursos hídricos subterráneos resulta esencial para la supervivencia de las comunidades que las habitan. El complejo dunar de erg Chebbi (Marruecos), constituye un acuífero libre que durante decenas de años ha abastecido las poblaciones asentadas en sus proximidades. Con una precipitación media anual inferior a 150 mm, representa un sistema extremadamente delicado, que requiere una explotación muy bien diseñada que permita un desarrollo sostenible. En este artículo se presentan los resultados de una primera aproximación al modelo hidrogeológico local, obtenidos a partir de la aplicación de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y de observaciones de campo. La metodología empleada en este trabajo es de aplicación para el estudio de otros ergs del mundo.

Palabras clave: Sistema dunar, hidrogeología, erg Chebbi, Marruecos, SIG.

GIS IN HYDROGEOLOGICAL STUDIES OF REMOTE AREAS: ERG CHEBBI (MOROCCO)

ABSTRACT

Hydrogeological studies in desert and remote areas are difficult to tackle and often logistically complicated. However, in some of these areas the exploitation of groundwater resources is essential for the survival of the communities that inhabit them. The dunes of Erg Chebbi (Morocco), is a water-table aquifer which supplies drinking and irrigation water for local communities. With an average annual rainfall of less than 150 mm, erg Chebbi represents an extremely delicate hydrological system that requires a very well designed exploitation to enable a sustainable development. This paper addresses the hydrogeological characterization of an erg by applying geography information systems and field visits. The methodology used allowed the characterization the dune system and setting of a hydrogeological model. The results are relevant to the management of groundwater exploitation of the system studied, and for the application of the methodology to other areas with similar characteristics.

Keywords: Dunar system, Hydrogeology, erg Chebbi, Morocco, GIS.

ÉTUDES HYDROGEOLOGIQUES DANS DES ZONES RECULEES SIG: ERG CHEBBI (MAROC)

RÉSUMÉ

Des études hydrogéologiques dans le désert et les régions éloignées d'accès difficile sont logistiquement compliqué. Cependant, dans certains de ces domaines, l'exploitation des ressources en eaux souterraines est essentiel pour la survie des communautés qui les habitent. Le complexe de dunes de l'Erg Chebbi (Maroc), est un aquifère gratuit qui pendant des décennies a fourni les populations dans leur voisinage. Avec une pluviométrie moyenne annuelle inférieure à 150 mm, représente un système extrêmement sensible, qui nécessite une opération bien conçue qui permet le développement durable. Dans cet article, les résultats d'une première approche du modèle hydrogéologique local, obtenu à partir de l'application de systèmes d'information géographique (SIG) et des observations de terrain sont présentés. La méthodologie utilisée dans le présent document est applicable à l'étude des ergs autre monde.

Mots-clés: Dunes, du système de l'hydrogéologie, de l'Erg Chebbi, Maroc, SIG.

1. INTRODUCCIÓN

Los "erg" o "mares de arena" comprenden superficies cubiertas de arena, que recubren áreas de entre unos 125 km² hasta miles de kilómetros cuadrados (Thomas, 1997). Los erg suelen presentar una jerarquía dunar como respuesta a la dinámica eólica de la región, que incluye: ripples eólicos, dunas individuales y dunas complejas (Wilson, 1972; Lancaster, 1994). Estos sistemas eólicos de ambiente desértico se consideran activos o móviles, cuando las precipitaciones medias anuales son bajas, en torno a los 150 mm (Wilson, 1973). Con frecuencia, en las zonas periféricas de los ergs se forman superficies planas de arena o mantos de arena (sand sheets), generalmente originados y controlados por niveles freáticos próximos a la superficie del terreno y por costras superficiales (Loope, 1984; Kocurek & Nielson, 1986).

Los ergs pueden almacenar cierta cantidad de agua subterránea que resulta imprescindible para la supervivencia de la agricultura en los oasis y de la fauna y la flora del entorno (Barczuk & Dluzewski, 2006). Por otra parte, las reservas de agua en las dunas no suelen representar grandes volúmenes, debido a las escasas precipitaciones que reciben y en parte a su permeabilidad media a alta, que favorece un drenaje rápido. Como dato ilustrativo, Davis (1969) basado en múltiples recopilaciones, atribuye a las dunas una permeabilidad media de 20 m/día.

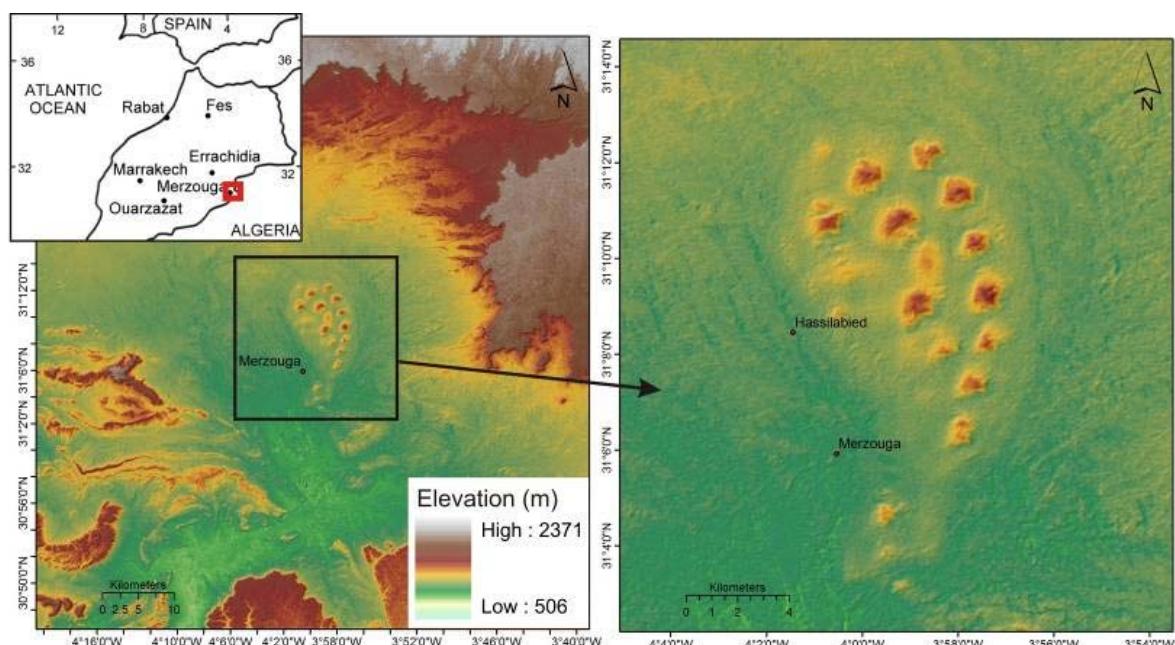
El complejo dunar de erg Chebbi situado en el límite suroccidental de Marruecos, representa un acuífero libre que durante décadas ha abastecido a las poblaciones situadas en su periferia. Las escasas precipitaciones en la región y por tanto la recarga reducida que recibe el acuífero, hacen de él un sistema extremadamente delicado que requiere gestionarse desde el conocimiento científico. Las dimensiones reducidas, una geometría característica de los "mares de arena" y la presencia de un basamento geológico de litología homogénea (Fetah *et al.*, 1986) y topografía suave, hacen de erg Chebbi una zona idónea para estudiar su comportamiento hidrogeológico aplicando Sistemas de Información Geográfica (SIG), y utilizar dicha metodología en otros ergs de mayor tamaño de diversos lugares del mundo.

En el presente trabajo se aborda la caracterización del sistema dunar y su comportamiento hidrogeológico. A partir del análisis del modelo digital del terreno (MDT), imágenes satélite y datos de campo, se ha definido la geometría del complejo dunar, la posición del nivel freático y se ha establecido la implicación de la distribución de las principales dunas gigantes en el funcionamiento hidrogeológico del sistema.

2. CONTEXTO

Erg Chebbi está situado en el sureste de Marruecos, al sur de la provincia de Errachidia. La provincia de Errachidia ocupa una superficie de unos 60.000 km² con fuertes contrastes del paisaje, donde destacan numerosas áreas de especial protección natural (Hosni, 2000; UNEP, 2004) entre las que se encuentra el complejo dunar estudiado (Figura 1). Erg Chebbi constituye un modelo de erg de pequeño tamaño en el que se cumplen e identifican todas las características propias de los erg (Wilson, 1972 y 1973). El interior del erg estudiado se caracteriza por la presencia de grandes dunas piramidales o en estrella, siendo las zonas donde se acumulan las mayores cantidades de arena. Estas dunas gigantes están formadas por vientos multidireccionales de dirección sureste – este (Benallas *et al.*, 2003).

Figura 1. Localización geográfica de la zona de estudio¹.

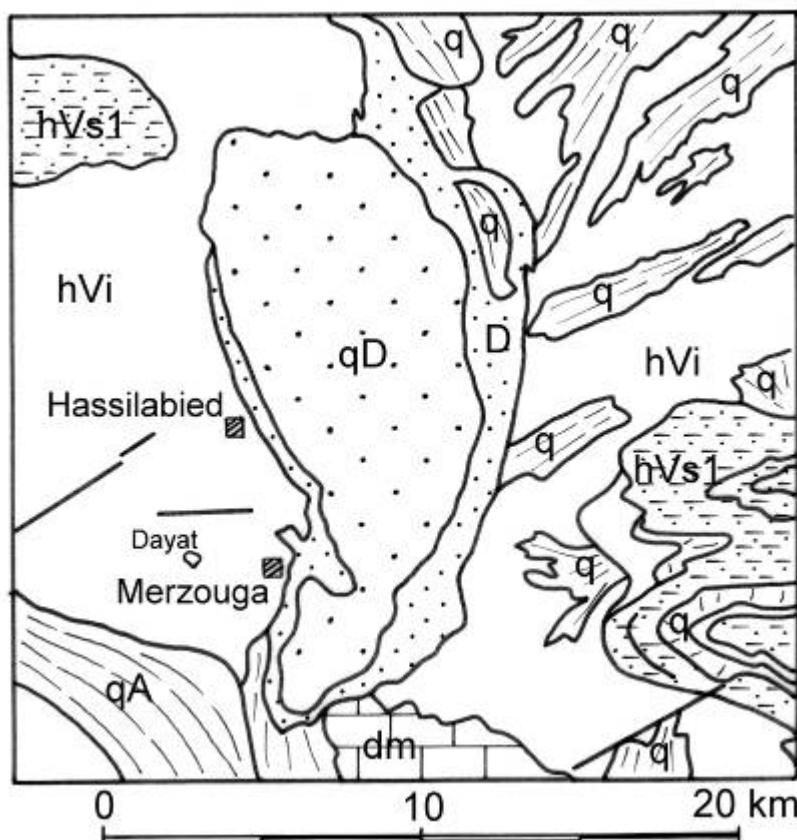


Fuente: Elaboración propia.

Las arenas del erg Chebbi se apoyan sobre esquistos arcillosos de color grisáceo, con intercalaciones de areniscas en capas muy finas y costras ferruginosas (Fm. Merdani) del Devónico medio (Fetah *et al.*, 1986). Estos materiales devónicos que actúan como basamento del complejo dunar se encuentran ligeramente basculados hacia el suroeste (Figura 2).

¹ Mapa de Marruecos; Imagen satélite de la localización del erg Chebbi; Detalle del complejo dunar del Erg Chebbi con representación de las megadunas interiores y de los mantos de arena perimetrales.

Figura 2. Esquema geológico regional de la zona de estudio basado en Servicio Geológico de Marruecos².



Fuente: Elaboración propia, a partir de Fetan *et al.*, (1986) y García Rodríguez *et al.* (2008b).

Erg Chebbi presenta un clima desértico con matices continentales y temperaturas medias anuales en torno a los 20° C, si bien los contrastes de temperatura entre el día y la noche son elevados. Las temperaturas máximas rondan los 50°C grados en los meses de julio y agosto, con mínimas 5°C grados en el mes de diciembre. Las precipitaciones anuales están comprendidas entre 28 mm y 129 mm dependiendo del año hidrológico considerado (Hosni, 2000). Las escasas precipitaciones suelen producirse entre los meses de marzo y mayo, aunque hay que destacar las alteraciones pluviométricas puntuales, tormentas ciclónicas, que provocan avenidas relámpago como las sufridas 2006, 2007 y febrero de 2008 (AMED, 2008). Estas condiciones climáticas están controladas por la presencia de la cordillera del Atlas al norte, que actúa como límite geográfico noroeste de la región.

El acuífero de erg Chebbi ha sido durante muchos años la principal fuente de abastecimiento de las poblaciones de Hassilabied y Merzouga, ambas situadas en el borde occidental del erg (Figura 1). Dichas poblaciones tradicionalmente se abastecen con agua subterránea procedente del complejo dunar, extraída y distribuida por medio de khettaras, y en menor medida de pozos excavados. La khattara es un sistema tradicional y ancestral para la captación y conducción de las

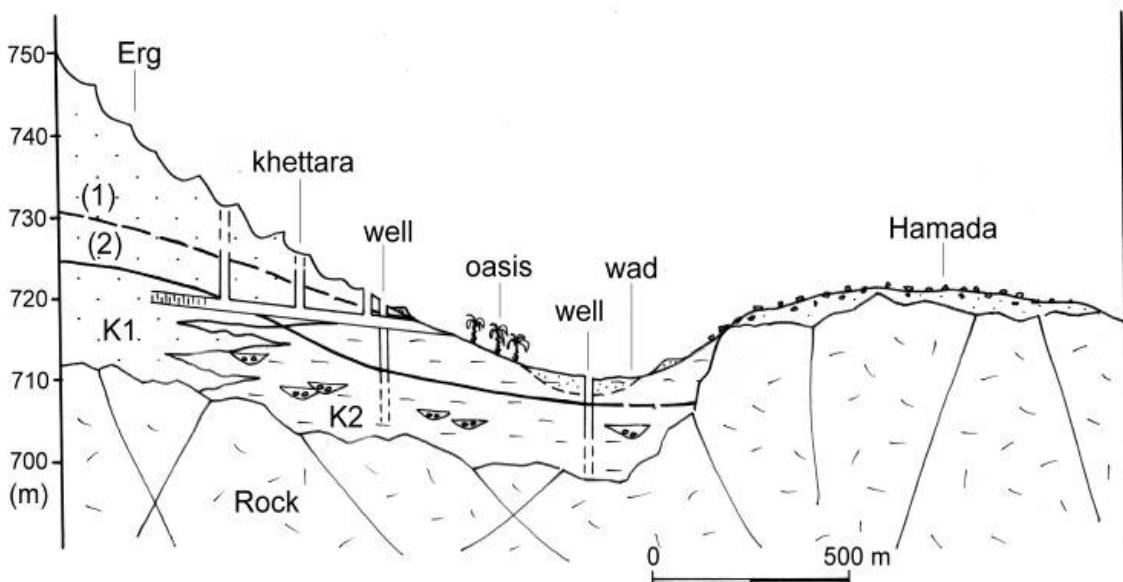
² La leyenda de la figura mantiene la terminología original (Fetah *et al.*, 1986): *dm*.- Mármol y niveles calcáreos nodulares o estratificados del Devónico medio; *hVi*.- Esquistos arcillosos de color grisáceo con intercalaciones areniscas en capas muy finas y costras ferruginosas (Fm. Merdani); *hVs1*.- Arenisca con intercalaciones pelíticas, arcillosas y fundamentalmente calcáreas (Fm. Mougui Ayoun). En la base niveles nodulares y pudingas con restos de goniatites; *qD*.- Arenas doradas antiguas (erg Chebbi); *D*.- Arenas actuales con morfología de barján y arenas subactuales especialmente móviles; *q*.- diferentes materiales de edad cuaternaria identificados como depósitos de glacis, niveles de aterrazamiento, y distintos depósitos de acarreo fluvial (en García Rodríguez *et al.*, 2008b).

aguas subterráneas, consistente en una galería subterránea que al cortar el nivel freático permite que el agua salga por gravedad. La galería está conectada con la superficie del terreno por unos "pozos" o conductos verticales cada pocos metros. La afluencia de turismo durante los últimos 15 años atraído por la belleza del paisaje, ha llevado a la construcción de numerosos complejos hoteleros y al incremento de las necesidades de agua.

El balance hídrico de los acuíferos en sistemas dunares de ambientes desérticos (Jacobson & Jankowski, 1989) se caracteriza por entradas de agua debidas a la infiltración directa del agua de lluvia, y por conexión hidráulica con los depósitos aluviales de las zonas de borde. El efecto la recarga debido a la precipitación media anual suele ser inferior al 1% de la precipitación total anual (Custodio & Llamas, 1983), pudiendo ser más significativa tras episodios tormentosos en los que la infiltración compensa la evaporación. La descarga se realiza por manantiales, extracciones desde pozos y khettaras, por evaporación directa y por infiltración en las fracturas del basamento rocoso.

El trabajo de campo realizado en estudios previos (García Rodríguez, *et al.*, 2008a y 2008b) ha permitido comprobar cómo ha descendido el nivel freático de los pozos situados en la zona de borde del sistema dunar, llegando a secarse muchos de ellos (Figura 3). Igualmente se ha constatado que casi la totalidad de las khettaras antiguas han dejado de funcionar como galerías de drenaje, y ha sido necesario abrir nuevas galerías excavadas hacia el interior del complejo dunar para volver a cortar el nivel freático, que cada año retrocede hacia el interior del erg (AMED, 2008 y 2009; Pilia *et al.*, 2009). Algunos trabajos de índole general sobre el desarrollo sostenible del erg Chebbi ponen de manifiesto los problemas derivados de una explotación intensiva de las aguas subterráneas del complejo dunar (Hosni, 2000, Moya-Palomares *et. al.*, 2008a Moya-Palomares *et al.*, 2008b, UNEP, 2004 y Vicente *et al.*, 2008).

Figura 3. Perfil hidrogeológico (NE-SW) esquemático en el entorno de Hassilabied³.



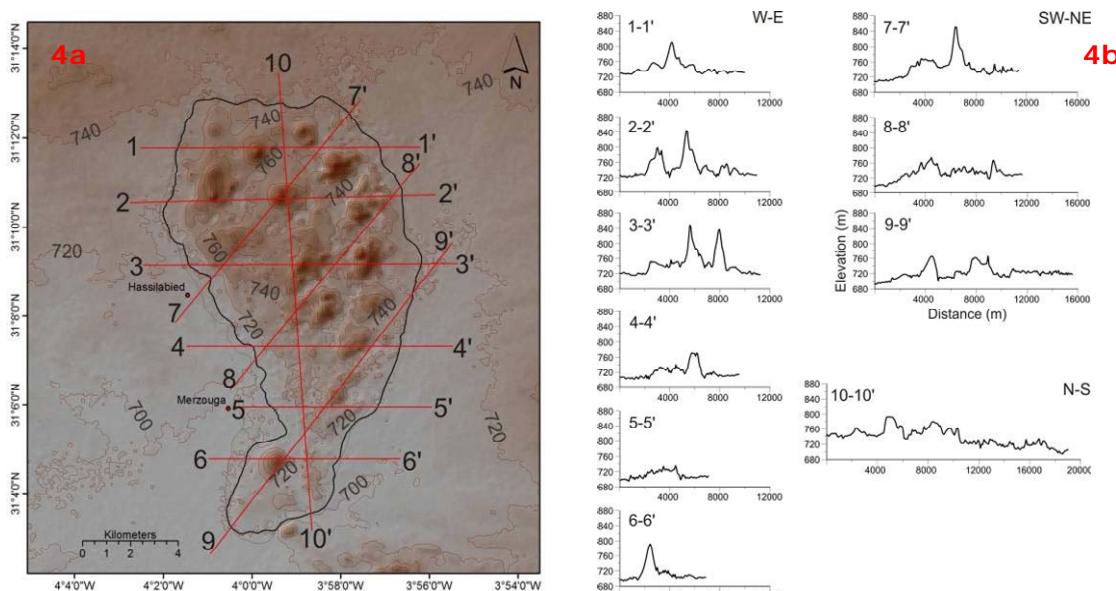
Fuente: García Rodríguez *et al.* (2008a)

³ (1) Posición del nivel freático en régimen natural, sin intervención antrópica, y (2) Posición del nivel freático en 2008. Su localización coincide con los 3000 m iniciales del perfil 7-7' de la figura 6b.

3. MÉTODO

Son numerosas la publicaciones en la que se han utilizado los sistemas de información geográfica y la teledetección para caracterizar, cartografiar y obtener información sobre ergs, dunas y mantos de arena (e.g., Walker & Olsen, 1987; Warren & Allison, 1998; Janke, 2002; Levin *et al.* 2004, Saqqa & Atallah, 2004; Maman *et al.*, 2011). En este trabajo, el análisis mediante SIG (ArcGis 9.3 y Global Mapper v.12) del modelo digital del terreno (Jarvis *et al.*, 2008), imágenes de satélite y de la cartografía geológica (Fetah *et al.*, 1986) ha permitido describir en detalle la geometría del complejo dunar estudiado (Figura 4). Se ha definido el perímetro de las arenas eólicas del erg Chebbi e identificado la posición y distribución de las principales dunas gigantes presentes en el interior del complejo dunar. La topografía del complejo dunar se ha descrito a partir de la realización de perfiles topográficos a lo largo de la superficie del erg (Figura 4b).

Figura 4. Modelo digital del terreno y perfiles topográficos de erg Chebbi⁴.



Fuente: Elaboración propia.

Para explicar la hidrogeología se han seleccionado cinco perfiles tipo de los anteriores, ampliando la escala vertical lo suficiente para poder representar los espesores saturados de agua y calcular gradientes hidráulicos. La posición del basamento geológico (esquistos arcillosos de la Fm. Merdani) se ha determinado por interpolación entre puntos de afloramiento localizados en los límites perimetrales del complejo dunar, a partir de los cuales se ha calculado la pendiente del basamento.

Los datos para la representación piezométrica han sido, en las zonas de borde, el inventario de puntos de agua publicado en García Rodríguez, *et al.*, (2008a) (Tabla 1). En las zonas centrales del erg Chebbi, las referencias utilizadas como indicios de una piezometría próxima a la superficie del terreno han sido la localización de campamentos nómadas con pozos, la presencia de vegetación,

⁴ (a) Modelo digital del terreno del complejo dunar de erg Chebbi con equidistancia entre curvas de nivel 20 m. En tonos claros se representan las alturas mínimas y en tonos oscuros las máximas. La línea perimetral delimita la superficie de las arenas eólicas antiguas (materiales *qD* de la figura 2). En trazo grueso se indica la localización de los perfiles de las figuras 5 y 7. (b) Perfiles topográficos de erg Chebbi con escala vertical muy exagerada.

oasis y las manifestaciones salinas encontradas en zonas con el nivel freático próximo a la superficie (Figura 5).

Tabla 1. Resumen del inventario de puntos de agua.

Inventario de puntos de agua del sector occidental de erg Chebbi*				
Nº de orden	Latitud (N)	Longitud (O)	Cota del suelo (m.s.n.m)	Nivel freático (m.s.n.m)
1	31°07'27"	4°00'94"	718	711,2
2	31°07'35"	4°00'38"	719	717,3
3	31°07'57"	4°00'49"	720	719,3
4	31°08'39"	4°01'12"	720	712,6
5	31°08'35"	4°01'25"	709	706
6	31°09'30"	4°01'35"	726	725,7
Referencia piezométricas del interior del erg**				
Nº de orden	Latitud (N)	Longitud (O)	Cota del suelo (m.s.n.m)	Nivel freático (m.s.n.m)
7	31°10'36"	4°00'22"	732	728-731
8	31°11'47"	3°58'51"	734	730-733
9	31°11'21"	3°58'18"	734	730-733
10	31°11'12"	3°57'65"	730	726-729
11	31°10'29"	3°58'42"	735	731-734
12	31°08'97"	3°58'38"	727	722-726
13	31°09'59"	3°57'00"	728	724-727
14	31°08'02"	3°57'53"	721	717-720
15	31°07'19"	3°57'20"	716	712-715
16	31°06'09"	3°57'39"	708	704-707
17	31°08'42"	3°58'38"	728	724-727

Fuente: García Rodríguez, *et al.* (2008 a)* y ArcGis, Google Herat**.

Figura 5. Vista general de una zona interdunar de erg Chebbi y detalle del pozo de la figura 6a⁵.



Fuente: Elaboración propia.

⁵ (a) Vista general de una zona interdunar de erg Chebbi con una manifestación del nivel freático. La proximidad del agua subterránea en la superficie se reconoce por presentar una tonalidad más oscura y por la presencia de vegetación. (b) Detalle del pozo de la figura 6a que tiene el agua a una profundidad de 0,30 m.

A partir del trabajo de campo se ha reconocido que la profundidad del nivel freático en los pozos de las zonas interiores, por regla general se sitúa entre 1 y 4 m de profundidad. En trabajos ya clásicos sobre zonas desérticas (Mann, 1958), se apunta que la presencia de hierbas indica un nivel freático situado a menos de 3 m de profundidad, y a menos de 10 m si se trata de arbustos. La localización precisa de los datos del interior del erg Chebbi utilizados como referencias piezométricas se han obtenido mediante las aplicaciones de ArcGis y Google Earth (Tabla 1).

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. GEOMETRÍA DEL COMPLEJO DUNAR

Las arenas eólicas de erg Chebbi forman un acuífero que se extiende por una superficie de 105 km². De norte a sur el eje mayor tiene una longitud de 18 km. De oeste a este, la anchura máxima es de 8,6 km en la mitad norte, y mínima de 2 km en el sur. La cota topográfica del límite norte del erg se sitúa entre 730 y 740 metros. El basamento del conjunto dunar está formado por esquistos arcillosos y presenta cierta pendiente hacia el S – SW, que concuerda con las pendientes y topografía del basamento en las zonas de afloramiento. El borde meridional está a una altura de entre 690 y 700 metros. La pendiente entre el extremo Norte y Sur del erg es del orden del 6,6 por mil. Las pendientes obtenidas del basamento son acordes con las pendientes regionales de los mismos materiales.

A partir del modelo digital del terreno se han identificado variaciones importantes de cota topográfica entre las zonas de borde e interiores, de hasta unos 180 m. Todo el sistema está salpicado de dunas gigantes que pueden llegar a alcanzar más de 100 m de altitud sobre la superficie media de las arenas. En número, se han contabilizado 14 dunas o conjunto de dunas gigantes. Las cotas de las dunas gigantes oscilan entre 813 m y 875 m que mide la más alta. El espaciado medio entre las dunas gigantes varía entre unos 1500 a 2000 m. La relación entre altura de las dunas y el espaciado entre ellas está dentro de los valores recopilados por Lancaster (1995) para la descripción y definición de los ergs (Gutiérrez, 2001).

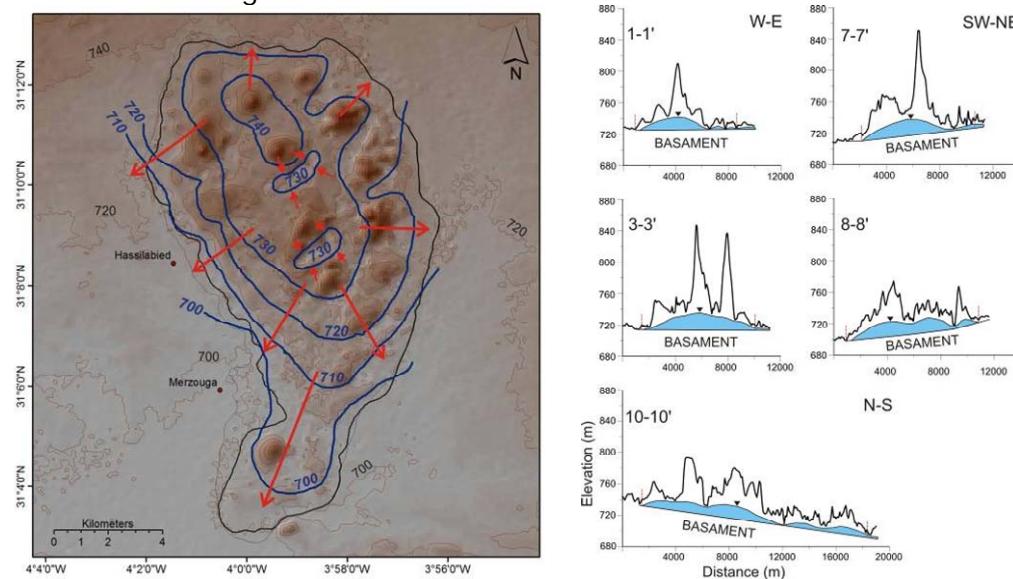
La altitud media del interior de sistema dunar de la mitad norte, desechando las megadunas, se sitúa en torno a los 750 metros, con un espesor medio de arena de unos 30 m, acorde con la potencia media de los erg saharianos, definida entre 21-43 m por Wilson (1973). En la mitad sur del erg Chebbi la altitud media del sistema dunar es de 720 m.

Toda la zona perimetral forma mantos de arena relacionados con la presencia del nivel freático próximo a la superficie del terreno, sobre la que se deslizan dunas de tipo barján.

4.2. HIDROGEOLOGÍA

A partir del inventario de puntos de agua y de la aplicación de un SIG se ha determinado la posición del nivel freático para toda la superficie del erg y se ha generado un mapa de isopiezas (Figura 6). El nivel freático en el interior del erg se sitúa, en la mitad norte, entre los 730 y 740 m; mientras que en la mitad sur del erg el límite superior de la zona saturada se encuentra entre 700 y 720 m.

Figura 6. Mapa de isopiezas y selección de perfiles hidrogeológicos representativos del acuífero de erg Chebbi⁶.



Fuente: Elaboración propia.

El sistema de flujo es radial desde las zonas interiores del conjunto dunar, que son las que tienen mayores espesores de arena, hacia las zonas de borde, con una componente de flujo profundo hacia el SW a favor de la pendiente del basamento (Figura 6a). No obstante, la presencia y distribución de megadunas aisladas en el interior del complejo dunar favorece la formación de flujos locales radiales, desde las mayores acumulaciones de arena hacia zonas deprimidas donde la descarga se realiza por evaporación (Figura 6b). El modelo confirma que la recarga se produce por infiltración directa del agua de lluvia en los períodos tormentosos y por conexión hidráulica con los depósitos aluviales distribuidos en todo el borde oriental. Actualmente la descarga se realiza de forma artificial desde las khettaras situadas en el borde occidental y por evaporación directa en aquellas zonas donde el nivel freático se sitúa próximo a la superficie.

El espesor máximo saturado de agua del sistema dunar se ha estimado en unos 20 m, suponiendo las condiciones más favorables de recarga del acuífero. Este espesor se ha determinado con la premisa de profundidad del substrato geológico definida previamente. No obstante es posible la presencia de agua subterránea en las fracturas del basamento geológico por debajo de las arenas, aunque el espesor saturado al que se hace referencia en este trabajo es exclusivamente el de las arenas del complejo dunar.

En las proximidades de Hassilabied el mapa de isopiezas muestra una inflexión hacia el interior del complejo dunar (Figura 6a) que se debe a la explotación intensiva de aguas subterráneas que desde años se viene realizando en el borde occidental del erg. Este retroceso de las isopiezas se ha visto favorecido por la construcción de nuevos ramales de khettaras hacia el interior del erg. Los resultados obtenidos sobre piezometría y flujo son coherentes con el aprovechamiento del agua en la zona, constatado durante el trabajo de campo.

⁶ (a) Mapa de isopiezas de erg Chebbi con una equidistancia entre isopiezas de 10 m. Se representan las isopiezas del complejo de dunas comprendidas en el interior del perímetro definido. No se representan las isopiezas de los depósitos de ouadis de en los bordes oriental y occidental del erg. (b) Selección de perfiles hidrogeológicos representativos del acuífero de erg Chebbi con una escala vertical muy exagerada con respecto a la escala horizontal. En azul se representa la posición del nivel freático y el espesor saturado de acuífero. La base de la zona saturada representa la posición del basamento geológico.

El gradiente hidráulico calculado (perfil 7-7' de la figura 6b) entre la zona central del erg y el borde oeste tiene un valor muy pequeño (del orden del 7 por mil), coherente los valores de las aguas subterráneas en este tipo de acuíferos (Custodio & Llamas, 1983). En la zona sur del erg donde el espesor de arenas es más reducido, el gradiente máximo obtenido es del 1,5 por mil. Estos valores son coherentes con las dimensiones del erg y con los espesores de arena calculados en este trabajo.

5. CONCLUSIONES

Erg Chebbi representa un ejemplo de erg de dimensiones reducidas (105 km^2) y con una geometría bien definida. Con un espesor medio de arena de 30 m, el espesor máximo saturado de agua del sistema dunar se ha estimado en unos 20 m. El sistema de flujo es radial desde las zonas interiores del conjunto dunar hacia las zonas de borde, con un gradiente hidráulico entre la zona central del erg y el borde oeste del 7 por mil, mientras que en la zona sur del erg, donde el espesor de arenas es más reducido, el gradiente máximo obtenido es del 1,5 por mil.

El mapa de isopiezas (Figura 6a) y los perfiles hidrogeológicos (Figura 6b) elaborados han contribuido a conocer mejor la geometría del acuífero del erg Chebbi, suministrando información sobre la distribución del espesor saturado en distintas zonas. El empleo de los SIG ha permitido elaborar un modelo de flujo subterráneo que ha resultado coherente con el aprovechamiento que se hace del agua subterránea en las poblaciones periféricas. El modelo presentado puede utilizarse como herramienta básica para la gestión de los recursos hídricos subterráneos de la zona. Los resultados obtenidos y la metodología empleada pueden resultar de utilidad para realizar una primera aproximación al estudio hidrogeológico de otras zonas remotas con características similares.

6. BIBLIOGRAFÍA

- ASSOCIATION MERZOUGA POUR L'ENVIRONNEMENT ET LE DEVELOPPMENT (AMED) (2008). Khettaras: Talabbast, Tamzzanat et Tamarirt. Poumons de Merzouga. Avant déntamer le rapport association/agriculture. 36 pp.
- ASSOCIATION MERZOUGA POUR L'ENVIRONNEMENT ET LE DEVELOPPMENT (AMED) (2009). Project Réhabilitation Khettara Talabbast a Merzouga. <http://www.merzouga.eb2a.com/>
- BARCZUK, A. & DLUZEWSKI, M. (2006). Influence of human activity on dunes fields. In: International Symposium on Drylands Ecology and Human security Perspectives, Policy Responses and Sustainable Development in the Arab Region Challenges and Opportunities. Abstract, 141.
- BENALLAS, M.; ALEN, E. M.; ROGNON, P.; DESJARDINS, R.; HILARI, A. & KHARDI, A. (2003). Eolian dynamic and palm grove encroachment in the sand dunes of Tafilet. Sciences et Changement Planétaires. Sécheresse, 14 (2): 77-83.
- CUSTODIO E. & LAMAS M.R. (ED.) (1983). Hidrología subterránea. Editorial Omega. Tomos I y II. 2350 p.
- DAVIS, S.N. (1969). Porosity and permeability of Natural Material (in Flow through Porous Media; De Wiest editor). Academic Press, 53-89 págs.
- FETAH, S.E.; BENSAÏD, M. & DAHMAI, M. (1986). Carte Géologique du Maroc. Tafilet – Taouz, Echelle 1/200.000. Service Géologique du Maroc, 244.
- FRYBERGER, S.G; SCHENK, C.J. & KRYSTINIK, L.F. (1988). Stoke surfaces and the effects of nearsurface groundwater – table on aeolian deposition. Sedimentology, 35: 21-41.
- GARCÍA RODRÍGUEZ, M.; MOYA-PALOMARES, M.E.; DE PABLO, M.A., VICENTE R. & ACASO, E. (2008a). Funcionamiento hidrogeológico del borde occidental del

- sistema dunar "erg Chebbi" entre Hassilabied y Merzouga (Marruecos). *Tecnologí@ y Desarrollo*, Vol.VI.
- GARCÍA RODRÍGUEZ, M.; MOYA-PALOMARES, M.E.; DE PABLO, M.A., VICENTE R. & ACASO, E. (2008b). Nuevas aportaciones sobre el funcionamiento hidrogeológico del acuífero de erg Chebbi en el entorno de Hassilabied (Marruecos). *m + a Revista Electrónic@ de Medioambiente UCM*. 2008, 5: 26-40.
- GUTIÉRREZ ELORZA, M. (2001). Geomorfología climática. Editorial Omega. 642 pp.
- HOSNI, E. (2000). Strategy for sustainable tourism development in the Sahara. UNESCO. CLT-2000/WS/1. 71 pp.
- JACOBSON, G. & JANKOWSKI, J. (1989). Groundwater discharge processes at a central Australian playa. *Journal of Hydrology*, 105: 275 – 295.
- JANKE, J.R., (2002). An analysis of the current stability of the Dune Field at Great Sand Dunes National Monument using temporal TM imagery (1984–1998). *Remote Sensing of Environment* 83 (3): 488–497.
- JARVIS, A., REUTER, H.I., NELSON, A. & GUEVARA, E., (2008). Hole-filled seamless SRTM data V4. (International Centre for Tropical Agriculture (CIAT), available from <http://srtm.csi.cgiar.org/>).
- KOCUREK, G. & NIELSON, J. (1986). Conditions favorables for the formation of warm-climate aeolian sands sheets. *Sedimentology*, 33: 795-816.
- LANCASTER, N. (1994). Dune morphology and dynamics. En: Abrahams, A.D. y Parson, A.J. (eds.). *Geomorphology of Desert Environments*. Chapman and Hall, Londres (474-505).
- LEVIN, N., BEN-DOR, E. & KARNIELI, A., (2004). Topographic information of sand dunes as extracted from shading effects using Landsat images. *Remote Sensing of Environment* 90 (2): 190–209.
- LOOPE, D.B. (1984). Origin of extensive bedding, planes in aeolian sandstones: a deference of Stokes hypothesis. *Sedimentology*, 31: 123-125.
- MAMAN, S., BLUMBERG, D.G., TSOAR, H., MAMEDOV, B. & PORAT, N., (2011). The Central Asian ergs: A study by remote sensing and geographic information systems. *Aeolian Research*, 3(3): 353-366.
- MANN, J.F. (1958). Estimating Quality and Quantity of Ground water in dry regions using airphotographs. Intern. Assoc. Scienc. Hydrol. General Assembly of Toronto, Vol. 2: 125-134.
- MINISTERÉ DE L'AGRICULTURE ET DE LA MISE EN VALEUR AGRICOLE (1992). Carte du Maroc, 1:50.000. Feuille NH-30-XX-2b (Marzouga). Ministeré de L'agriculture et de la Mise en Valeur Agricole. Direction du Cadastre et de la Cartographie. Rabat (Maroc).
- MINISTERÉ DE L'ECONOMIE, DE FINANCES, DE LA PRIVATISACION ET DU TURISME (2006). Monographie Regionale de L'Environnement, Region Meknés-Tafilet. Rapport de Synthèses. Maroc.
- MINISTRY OF TERRITORIAL PLANING, WATER AND ENVIRONMENT (2001). National Study on Biodiversity Synthesis Report. Department of Environment Kingdom of Morocco. United Nations Program of Environment. 161 pp.
- MOYA-PALOMARES, M.E.; GARCÍA, M.; DE PABLO, M.A.; VICENTE, R.; ACASO, E.; RUBIAL, M.J.; ABERKAN, M. & ZANNIBY, F (2008a). Sustainable development or unlimited turistical growth? The case of erg Chebbi region, Morocco. *Women and Year of the Planet Earth 2008, AAWGA*. 4th Conference of the Association of African Women Geoscientists. (Cairo, Egypt). 101-103.
- MOYA-PALOMARES, M.E.; DE PABLO, M.A.; ACASO, E.; VICENTE, R.; GARCÍA, M. & RUBIAL, M.J. (2008b). The educative interest of the virtual geologic itineraries: the examples of geomorphologic itineraries on mars and central south Morocco. *Women and Year of the Planet Earth 2008, AAWGA*. 4th Conference of the Association of African Women Geoscientists. (Cairo, Egypt). 60-62.

- PILIA, A.; SPANU, V.; CONCOLLATO, C.; CALZOLAI, E. & VALENILLA A.M. (2009). Rehabilitation and extension of a khettara for a sustainable use of underground water resources. *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 11: EGU2009-9840.
- SAQQA, W. & ATALLAH, M., (2004). Characterization of the aeolian terrain facies in Wadi Araba Desert, southwestern Jordan. *Geomorphology* 62: 63–87.
- THOMAS, D.S.G. (ED.) (1997). *Arid Zone Geomorphology: Process, Forms and Change in Drylands*. John Wiley, Chichester. 713 pp.
- UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME, UNEP (2004). *Estratégie nationale pour la conservation et l'utilisation durable de la diversité biologique. L'Aménagement du territoire, d'eau et de l'Environnement du Maroc*. 181 pp.
- VICENTE, R.; MOYA-PALOMARES, M.E.; DE PABLO, M.A.; ACASO, E.; GARCÍA, M.; ABERKAN, M. & ZANNIBY, F. (2008). Study of the groundwater quality in the erg Chebbi area, central - South Morocco. *Women and Year of the Planet Earth 2008, AAWGA. 4th Conference of the Association of African Women Geoscientists*. (Cairo, Egypt). 62-65.
- WALKER, A.S. & OLSEN, J.W., (1987). The Badain Jaran desert: remote sensing investigations. *The Geographical Journal* 153 (2): 205–210.
- WARREN, A. & ALLISON, D., (1998). The paleoenvironmental significance of dune size hierarchies. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 137: 289– 303.
- WILSON, I.G. (1972). Aeolian bedforms – their development and origins. *Sedimentology*, 19: 173-210.
- WILSON, I.G. (1973). Ergs. *Sedimentary Geology*, 10: 77-106.