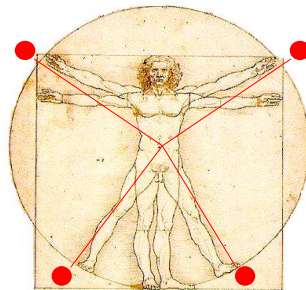


TECNOLOGÍ@ y DESARROLLO

Revista de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente

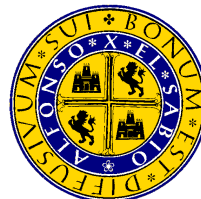
VOLUMEN VI. AÑO 2008

SEPARATA



FUNCIONAMIENTO HIDROGEOLÓGICO DEL BORDE OCCIDENTAL DEL
COMPLEJO DUNAR "ERG CHEBBI" ENTRE HASSILABIED Y MERZOUGA
(MARRUECOS)

Manuel García Rodríguez, M^a Eugenia Moya-Palomares, Miguel Ángel de
Pablo, Rosa Vicente y Eduardo Acaso.



UNIVERSIDAD ALFONSO X EL SABIO
Escuela Politécnica Superior
Villanueva de la Cañada (Madrid)

© Del texto: Manuel García Rodríguez, M^a Eugenia Moya-Palomares, Miguel Ángel de Pablo, Rosa Vicente y Eduardo Acaso.
Julio, 2008.

http://www.uax.es/publicaciones/archivos/TECMAD08_003.pdf

© De la edición: *Revista Tecnol@y desarrollo*
Escuela Politécnica Superior.
Universidad Alfonso X el Sabio.
28691, Villanueva de la Cañada (Madrid).
ISSN: 1696-8085

No está permitida la reproducción total o parcial de este artículo, ni su almacenamiento o transmisión ya sea electrónico, químico, mecánico, por fotocopia u otros métodos, sin permiso previo por escrito de la revista.

Tecnol@y desarrollo. ISSN 1696-8085. Vol.VI. 2008.

FUNCIONAMIENTO HIDROGEOLÓGICO DEL BORDE OCCIDENTAL DEL SISTEMA DUNAR “ERG CHEBBI” ENTRE HASSILABIED Y MERZOUGA (MARRUECOS)

Manuel García Rodríguez⁽¹⁾, M^a Eugenia Moya –Palomares⁽²⁾, Miguel Ángel de Pablo⁽³⁾, Rosa Vicente⁽⁴⁾, Eduardo Acaso⁽⁵⁾

(1) Profesor Ayudante Doctor, Departamento de Geología. Facultad de Ciencias. Universidad de Alcalá. C.P.28871 Madrid. E-mail: manuel.garciaro@uah.es.

(2). Profesor Contratado Doctor, Departamento de Geología. Facultad de Ciencias. Universidad de Alcalá. C.P.28871 Madrid. E-mail: eugenia.moya@uah.es.

(3). Profesor Ayudante. Departamento de Geología. Facultad de Ciencias. Universidad de Alcalá. C.P.28871 Madrid. E-mail: miguelangel.depablo@uah.es.

(4). Profesor Titular de Universidad. Departamento de Geología. Facultad de Ciencias. Universidad de Alcalá. C.P.28871 Madrid. E-mail: rosa.vicente@uah.es.

(5). Profesor Titular de Universidad. Departamento de Geología. Facultad de Ciencias. Universidad de Alcalá. C.P.28871 Madrid. E-mail: eduardo.acaso@uah.es.

RESUMEN:

El sistema dunar erg Chebbi consiste en una franja arenosa de 156 km² de superficie, situada en el borde suroriental de Marruecos, en el límite con la frontera de Argelia. El sistema constituye un acuífero libre. La entrada de agua al sistema se limita a la infiltración directa del agua de lluvia. La descarga del acuífero se produce por evaporación, drenaje natural por manantiales y por extracciones desde pozos y khetaras. Desde hace ya más de diez años la zona ha experimentado un fuerte incremento turístico, que ha propiciado la creación de muchos albergues y hoteles en la zona de borde del sistema dunar, originado un incremento de la demanda de los recursos hídricos subterráneos. En este trabajo se estudia la hidrogeología del entorno de Hassilabied en la zona occidental de erg Chebbi, donde se concentra la mayor oferta hotelera de la zona.

PALABRAS CLAVE: Erg Chebbi, Sahara, hidrogeología en dunas, Hassilabied, Merzouga.

ABSTRACT:

The erg Chebbi dune system consists of a N-S oriented sand deposit, about 156 km², located on the southeastern edge of Morocco, on the border with Algeria. The system is a free aquifer. The entry of the water system is limited to direct infiltration of rainwater meanwhile the discharge of the aquifer is produced by evaporation natural drainage in the springs and wells extractions from khetaras. For over ten years the area has experienced an important increase in the tourism, which has led to the creation of hostels and many hotels in the area, near the edge of the dune system, what led to an increased demand for groundwater resources. This study focuses in the hydrogeology in the Hassilabied area, western erg Chebbi, which concentrates most of the hotels in the area.

KEY-WORDS: Chebbi, Sahara, dunes, hydrogeology, Hassilabied, Merzouga.

SUMARIO: 1. Introducción 2. Localización 3. Características regionales generales 4. Modelo conceptual del flujo regional 5. Hidrogeología en el entorno de Hassilabied 6. Resumen y conclusiones 7. Bibliografía.

1. Introducción

El erg Chebbi representa una reserva de agua subterránea que durante décadas ha abastecido a las poblaciones asentadas a lo largo de su perímetro. Desde hace algo más de diez años, el incremento del turismo en la zona, motivado por la belleza del paisaje de dunas, ha originado un notable incremento en la demanda de agua, que está produciendo un descenso progresivo del nivel freático debido a que las extracciones de agua subterránea son superiores a las recarga natural por infiltración de agua de lluvia. En el actual contexto de presión humana sobre áreas de especial valor natural, los estudios referidos al estudio del medio natural y la utilización de éste juegan un importante papel a la hora de proponer medidas que contribuyan a su conservación (Moya-Palomares, 2007). Con este sentido, presentamos los primeros resultados sobre el modelo de flujo de agua subterránea en el borde Oeste del erg Chebbi, en particular en el entorno de la localidad de Hassilabied.

2. Localización

Regionalmente, el área de trabajo se localiza en el Sureste de Marruecos, al Sur de la provincia de Errachidia, en el límite de la frontera con Argelia (Figura 1A).

El estudio hidrogeológico detallado que se trata en el apartado 6, comprende una superficie relativamente pequeña de unos 15 km², en el borde occidental del erg Chebbi, en el entorno de la localidad de Hassilabied y al norte de Merzouga (Figura 1B y 1C).

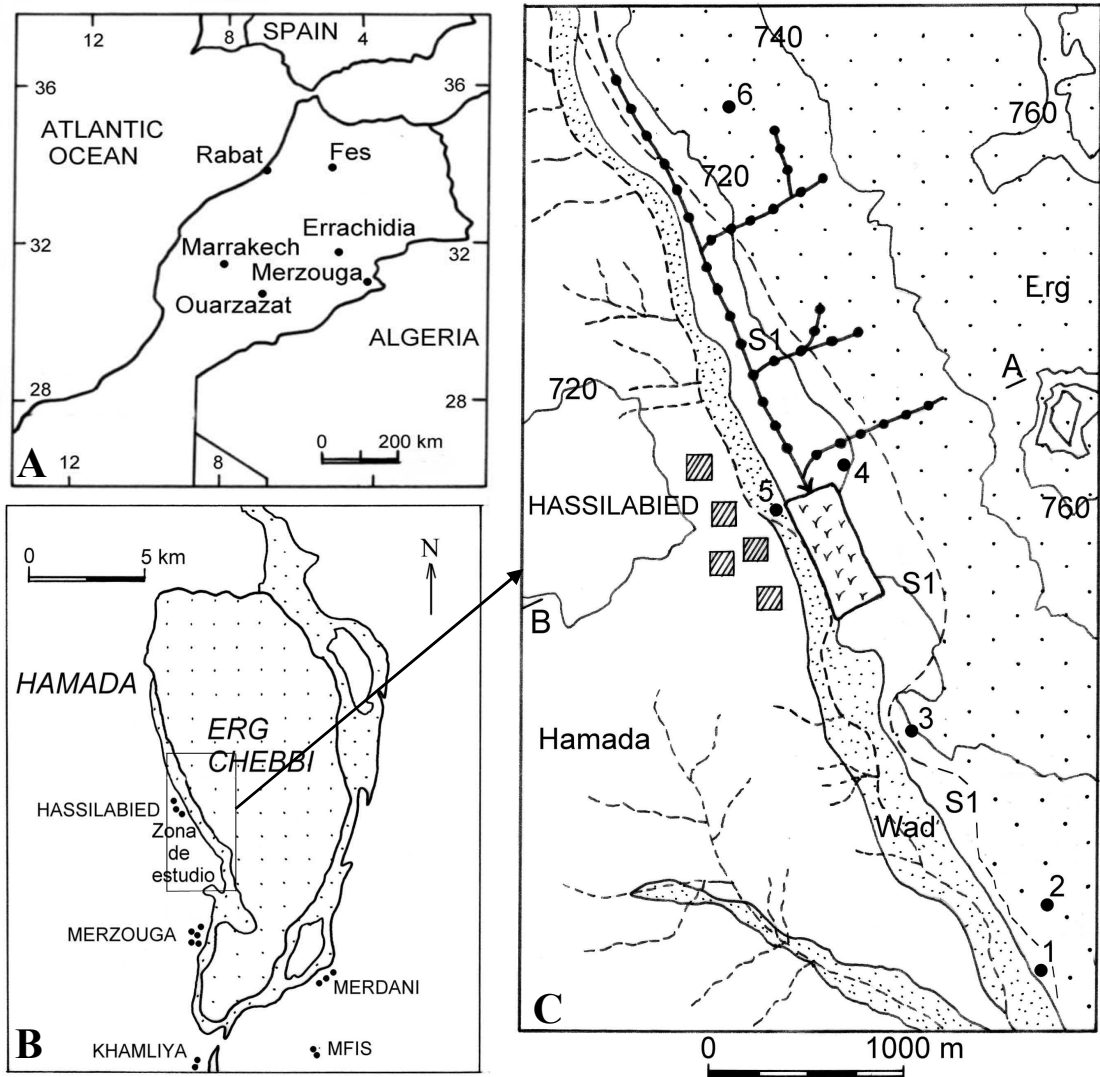


Figura 1. Localización geográfica. A.- Mapa de Marruecos. B.- Encuadre regional. C.- Esquema de la zona detallada de estudio con indicación de los elementos siguientes: zonas de erg, ouadis (wad) y hamada, curvas de nivel con equidistancia de 20 metros, localización de los pozos del inventario de puntos de agua (nº del 1 al 6) , ubicación de khetaras (líneas con puntos), oasis y red de drenaje superficial. Se incluye la traza (A-B) del perfil hidrogeológico de la figura 7.

3. Características regionales generales

3.1. Clima

La provincia de Errachidia presenta un clima desértico con matices continentales y temperaturas medias anuales en torno a los 20° C, si bien los contrastes de temperatura día-noche son elevados. Con relación a las precipitaciones anuales, éstas están comprendidas entre 129 mm y 28 mm según la latitud y año hidrológico considerado. Las variaciones apuntadas se comprenden si se tiene en cuenta la proximidad de la cordillera del Atlas que actúa como límite geográfico al noroeste de la provincia.

En el área de Chebbi, se alcanzan temperaturas máximas que rondan los 50 grados en los meses de julio y agosto con mínimas entorno a los 5 grados en el mes de diciembre. Las escasas precipitaciones que se producen se dan de manera esporádica fundamentalmente entre los meses de marzo a mayo. De ahí que se entienda que la precipitación media anual en el erg Chebbi no supere los 68 mm, si bien hay que destacar las alteraciones pluviométricas puntuales, tormentas ciclónicas, que provocan avenidas relámpago como la sufrida recientemente en febrero de 2008.

3.2. Geología

Según la cartografía geológica disponible del Servicio Geológico de Marruecos (S.G.M., 1986), las arenas del erg Chebbi se apoyan sobre un substrato geológico representado principalmente por materiales del Carbonífero, y en menor medida del Devónico. La mayor parte del área estudiada está ocupada por esquistos argilíticos con intercalaciones de areniscas, y areniscas con intercalaciones pelíticas y argilíticas algo calcáreas, con niveles nodulares y pudingas en la base. En el límite suroriental del sistema dunar aparecen materiales carbonatados del Devónico superior.

Cubriendo estos materiales del substrato, y sin considerar la superficie ocupada por las arenas del erg Chebbi, en la zona de estudio se pueden distinguir morfologías fluviales típicas de climas áridos asociadas a sus correspondientes depósitos. Son muy frecuentes los arroyos de funcionamiento puntual y esporádico, denominados ouadis o wadis, que en algunas zonas han dado lugar a terrazas más o menos desarrolladas (Gutiérrez Elorza, 2001).

3.3. El desierto

3.3.1. La hamada

El desierto pedregoso constituye la primera gran unidad fisiográfica, también denominada hamada o reg. Esta unidad está constituida por un pedregal suelto donde se localizan las poblaciones de Hassilabied y Merzouga. La hamada se constituye, en líneas generales, como un relieve llano que no presenta desniveles apreciables salvo en aquellas zonas, muy puntuales, en las que el basamento aflora dando lugar a pequeños resaltes y/o cuando es cortado por los arroyos de carácter efímero, denominados ouadis (Figura 2).

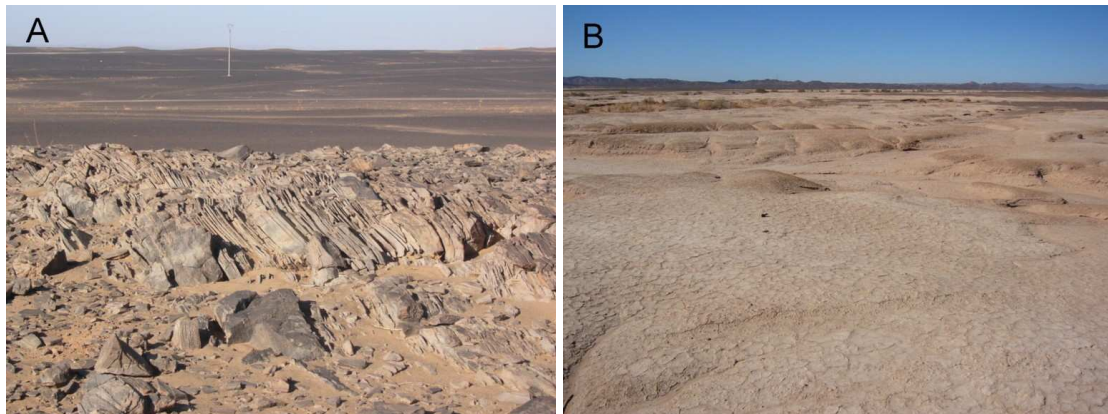


Figura 2. A.- Afloramiento rocoso (areniscas) en la zona de hamada. B.-Ouais (limos y arcillas).

3.3.2. El erg

El erg Chebbi constituye un sistema caracterizado por una franja arenosa formada por dunas multidireccionales (Benallas *et al*, 2003), de unos 20 km de longitud en la dirección Norte – Sur, y unos 10 km en dirección Este - Oeste, en su parte más ancha. El erg ocupa una superficie de 156 km² sobre el desierto de piedra o hamada (Figura 3), que presenta una superficie de topografía bastante plana, con presenta cierta pendiente hacia el Sur - Suroeste.

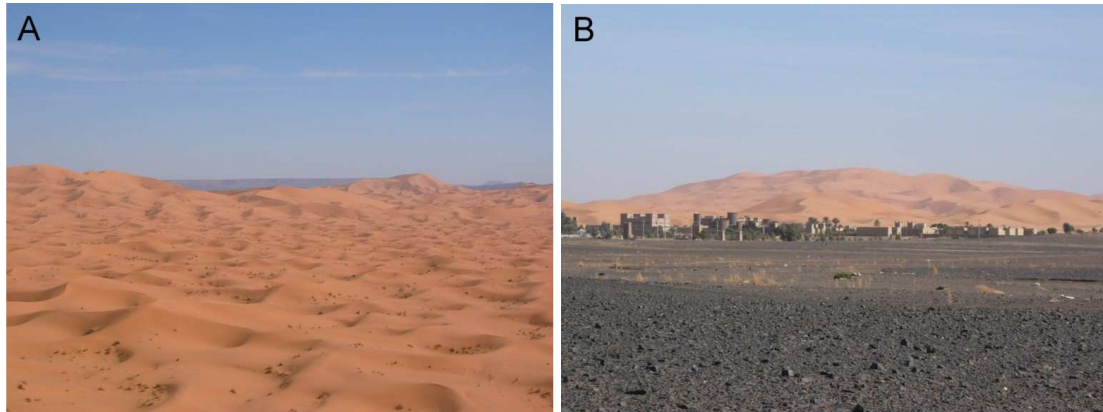


Figura 3. A.- Vista interior del sistema dunar erg Chebbi. B.- Hamada y erg con la localización de los principales complejos hoteleros localizados en el borde del sistema dunar.

Las cotas topográficas del sistema dunar varía mucho de unos puntos a otros, oscilando entre unos 700 metros en las zonas de borde, hasta los 900 metros en las dunas más altas. Según se deduce del mapa topográfico de la zona (Ministère de L'Agriculture et de la Mise en Valeur Agricole, 1992), la altitud media en el interior de sistema se sitúa en torno a los 750 metros.

4. Modelo conceptual del flujo regional

4.1. Hidrogeología de erg Chebbi

El complejo dunar de erg Chebbi, constituye un acuífero libre formado por arenas eólicas, con un modelo conceptual de flujo que responde al esquema clásico en este tipo de acuíferos (Jacobson and Jankowski, 1989). Las entradas al sistema se producen por infiltración directa del agua de lluvia, y salidas por: manantiales, extracciones desde pozos y khetaras, por evaporación directa, y por infiltración a favor de fracturas en el basamento rocoso que actúa como límite del acuífero.

El flujo subterráneo en las arenas, es radial desde las zonas interiores del conjunto dunar, hacia las zonas de borde. En las campañas de campo realizadas durante febrero de 2006, noviembre de 2007 y enero de 2008 a lo largo de todo el perímetro del sistema de dunas, se han localizado pozos con el nivel freático próximo a la superficie del terreno. De las observaciones realizadas en el trabajo de campo se ha comprobado que en el límites erg – hamada, el gradiente hidráulico es muy diferente en los bordes Oeste

y Este del erg Chebbi. Así, en el borde Oeste, el más poblado, es del orden del uno por ciento, mientras que en el borde Este viene a ser del cinco por mil.

4.2. El agua subterránea en la hamada

Desde el punto de vista estrictamente hidrogeológico, la zona de plataforma no tiene mucho interés. Según se comentó al tratar la geología, consiste en gran zócalo rocoso formado por principalmente por materiales metamórficos, como pizarras, cuarcitas, esquistos y areniscas, todos ellos materiales impermeables. No se conocen datos de sondeos profundos en la zona que nos suministre información hidrogeológica. Su mayor o menor importancia como acuífero va a depender de la densidad e interconexión de la fracturación y esquistosidad que presenten los materiales, cuyo estudio no ha sido objeto del presente trabajo.

5. Hidrogeología en el entorno de Hassilabied

5.1. La zona de estudio

La superficie estudiada ocupa unos 12 km² en el entorno de la localidad de Hassilabied, al norte de Merzouga. Ha de indicarse que el reconocimiento de campo efectuado ha cubierto una zona más amplia de la aquí presentada y que ha facilitado el encuadre regional. En este sentido, indicar que las características hidrogeológicas que se presentan a continuación se refieren exclusivamente a la zona del entorno de Hassilabied, para una franja de unos cinco kilómetros de longitud, que incluye la zona de borde entre el sistema dunar y la hamada (Figura 1C).

Las razones particulares por las que se ha seleccionado esta zona de estudio, han sido: (1) la proximidad a dos poblaciones importantes (Hassilabied y Merzouga), (2) la abundancia de puntos de agua, (3) la presencia de un oasis muy bien conservado, y (3) la existencia de un sistema de khetaras en buen estado de mantenimiento, que han permitido una buena caracterización hidrogeológica de la zona. Además, el interés que puede llevar asociado el creciente desarrollo turístico, y por tanto, la creciente demanda de agua (Moya-Palomares, 2007).

Para entender la caracterización hidrogeológica en la zona tratada ha de indicarse que de Este a Oeste la cota más alta de la zona se sitúa en la cresta de la duna al Este de

Hassilabied (unos 812 metros de altura), mientras que el límite de las arena del erg se localiza a una cota en torno a los 720 metros de altitud.

El tránsito entre las arenas del erg y la hamada se produce a través de la zona intermedia representada por el ouadis con cotas comprendidas ente 705 y 710 m (Figura 4). Al Oeste de Hassilabied, la hamada llega ha superar los 720 metros de altitud, indicando la proximidad del substrato rocoso.

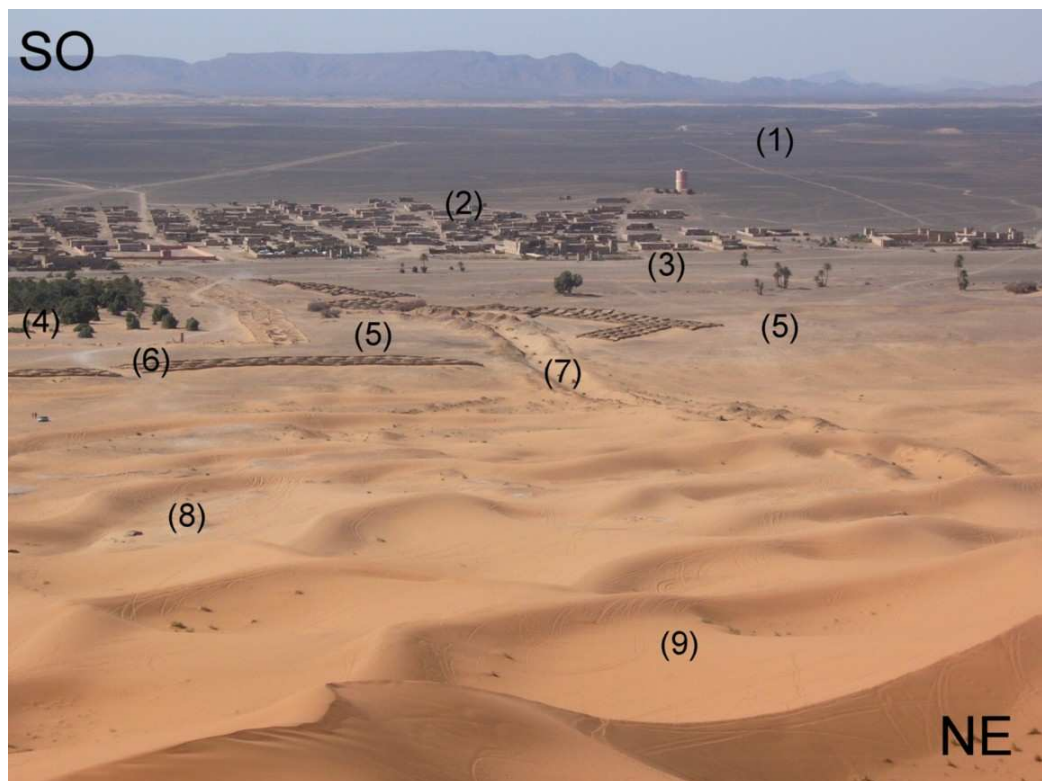


Figura 4. Panorámica general de la zona tomada desde la dunas más elevada (a cota 812 metros), en la dirección de la traza A-B (Noreste - Suroeste) de la figura 1C. Desde el fondo hacia el punto de foto, se distinguen los siguientes elementos: (1) hamada o desierto pedregoso, (2) Hassilabied, (3) ouadis al Bayda, (4) oasis (zona vegetada a la izquierda de la foto), (5) superficie libre de dunas, (6) barreras contra el avance de las dunas, (7) khettara, (8) restos de niveles endurecidos entre las dunas, y (9) zona de dunas del erg.

5.2. Inventario de puntos de agua

El objetivo concreto en relación con este apartado, ha sido recopilar la información suficiente de tipo geológica e hidrogeológica, que nos permitiera conocer el funcionamiento hidrogeológico de la zona elegida, y poder definir otros objetivos para profundizar en el conocimiento hidrogeológico en trabajos futuros. En la zona de estudio, los puntos de agua que se han identificado en la realización del inventario pueden incluirse en alguna de las dos categorías siguientes: pozos excavados o khetaras.

5.2.1. Pozos

Se trata de pozos excavados manualmente, con características constructivas y de diseño, que en términos generales pueden incluirse entre las siguientes:

- Profundidades que oscilan entre 1 y unos 10 metros.
- Diámetros de excavación entre 0,5 y unos 2 metros.
- Los revestimientos interiores suelen ser de mampostería de piedra cementada o no, o de tubería de hormigón perforada.

En el área indicada se han localizado numerosos pozos con las características señaladas anteriormente. Algunos parecen estar abandonados o en desuso, bien por haberse secado o por encontrarse en unas condiciones muy degradadas. Para la interpretación del flujo subterráneo nos hemos basado en las observaciones particulares realizadas en 6 pozos representativos de la zona elegida. La localización de los pozos medidos puede verse en la figura 1C. Las medidas de la profundidad del nivel del agua se realizaron durante el mes de enero de 2008.

En la tabla 1 se presenta un resumen con las características más importantes de cada pozo que han facilitado la interpretación del flujo subterráneo en la zona.

Nº pozo (1)	Prof. pozo (2)	Prof. agua (3)	Cota suelo (4)	Observaciones
1	7	6,79	717 -718	Los dos metros superiores el pozo está recubierto de mampostería de piedra. A más profundidad carece de revestimiento. Se observan materiales arcillosos, con arenas y algún canto. Posibles depósitos de ouadis.
2	-	1,73	718 - 719	Entubado con anillos de hormigón. El agua que se extrae se emplea para el riego de palmeras en el intento de detener el avance de las dunas hacia la zona poblada. La extracción del agua se hace de forma manual (ver figura 5A).
3	5,30	0,65	719 - 720	Se localiza sobre arenas y limos arcillosos. Está revestido de mampostería de piedra. Se emplea para el riego de palmeras con objeto de detener el avance de las dunas
4	8,20	7,37	719 - 720	Se localiza en el entorno del oasis de Hassilabied. Interior revestido de mampostería de piedra. Atraviesa arenas, limos y arcillas, según se ha desprendido de las observaciones realizadas en zanjas próximas abiertas para la construcción de khattaras. La mayor profundidad del nivel freático respecto a los otros pozos se debe a la proximidad de un ramal de la khattara de Hassilabied que está drenando el acuífero.
5	-	2,98	708 -710	Se localiza en el ouadis al Bady, en el borde Oeste del oasis de Hassilabied. Geológicamente se sitúa sobre arcillas, limos y arenas eólicas en superficie.
6	0,80	0,30	725 -728	Se localiza en el interior de las dunas en el extremo norte de la zona de estudio. La captación consiste en un bidón de plástico abierto en su base. La superficie topográfica del entorno próximo al pozo presenta bastante humedad, debido a la evaporación directa que se produce desde el nivel freático (ver figura 5B). La cota del nivel freático en este punto coincide con la del extremo de la khattara del brazo Noreste, ver en figura 1C).

Tabla 1. Resumen del inventario de puntos de agua. (1) Número de pozo asignado en el inventario de puntos de agua. Ver localización en la figura 1C. (2) Profundidad del pozo (en metros) en los casos que se ha podido medir. (3) Profundidad del agua (en metros) medida desde la superficie topográfica. (4) Cota topográfica del suelo (en metros sobre el nivel del mar) determinada a partir del mapa topográfico a escala 1/50.000 de la zona. Se dan valores aproximados del intervalo.

Según información verbal de los habitantes de la zona, la recuperación de algunos de estos pozos responde con mucha rapidez a las precipitaciones, dando idea de la alta permeabilidad del substrato, cuando atraviesa niveles de arenas y gravas, relacionados con antiguos canales fluviales.

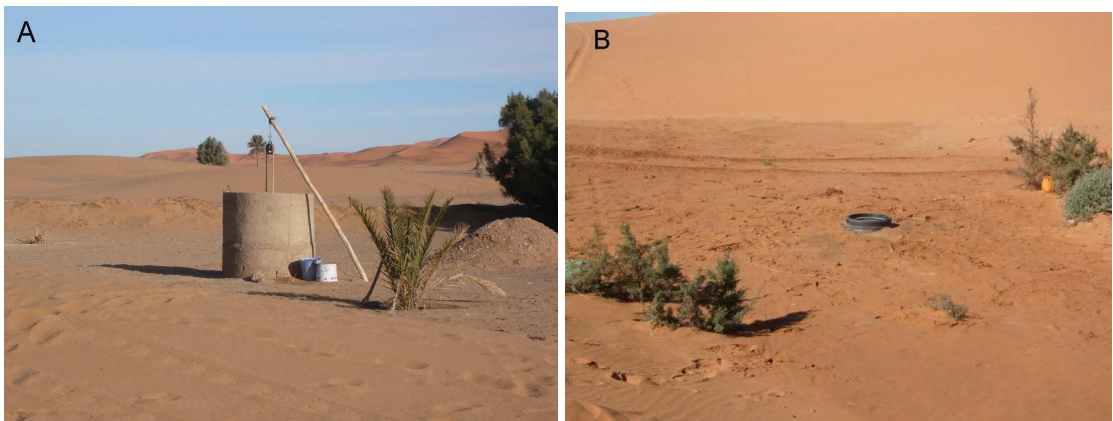


Figura 5. A.- Detalle del pozo nº 2 del inventario. B.- Localización del pozo nº6 en el espacio intradunar en las arenas del erg. Nótese toda la zona húmeda del entorno del pozo, indicando la proximidad del nivel freático, que asciende por capilaridad y se evapora.

5.2.2. *Khettaras*

La khattara es un sistema tradicional y ancestral para la captación y conducción de las aguas subterráneas. Dada su importancia y originalidad se explican algunas particularidades de este tipo de sistema. Consiste 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.

Las longitudes de una khattara puede variar desde centenas de metros a varios kilómetros, según sea el gradiente hidráulico, la posición del nivel freático y la cota alumbramiento.

Para dar una idea de la importancia que tiene este sistema de suministro de agua en áreas desérticas y en particular en la región, actualmente se han contabilizado más de 300 khattaras en funcionamiento, con una longitud de 1200 km, que riegan 155 zonas y una superficie total de 12.750 ha (A.M.P.L.E.D., 2008). En contraste con estas cifras, desde

1967 hasta la actualidad han sido abandonadas 262 khattaras, con una longitud total de unos 1700 km, como consecuencia de un importante descenso del nivel freático en diferentes zonas.

Las khattaras de Hassilabied abastecen el oasis de la localidad del mismo nombre. Consiste en un ramal principal de dirección Sur – Norte (hacia aguas arriba), que se extiende paralelo al contacto entre el sistema dunar y la hamada (ver localización en Figura 1C). La longitud aproximada de este ramal viene a ser de algo más de 2 km. Desde el ramal principal y perpendicularmente a él, parten otros tres brazos hacia el interior de las dunas, penetrando cada uno de ellos más de 500 m (Figura 9). A su vez, dos de ellos se ramifican de nuevo. El caudal aforado en enero de 2008 a la salida de la galería principal y a la entrada del oasis era de unos 7 l/s (Figura 6.)

Según las características geológicas observadas, el ramal principal discurre principalmente por materiales arcillosos y limosos, y cumple una función de canalización de agua más que de drenaje del acuífero. La extracción de agua subterránea se realiza desde los tres ramales que penetran en las dunas.



Figura 6. Khettara en Hassilabied. A.- Ramal principal de dirección Sur – Norte B.- Boca de la khettara de Hasillabied en el punto de alumbramiento del oasis de dicha localidad.

5.3. Interpretación del flujo subterráneo en la zona de borde

A partir del modelo conceptual de flujo del erg, y sobre todo de los datos recopilados durante el inventario de puntos de agua, se ha elaborado un perfil hidrogeológico en el

que se sintetiza el esquema de flujo en la zona (Figura 7). Representa una sección en la zona de borde del acuífero de las arenas del erg, donde el flujo es perpendicular al límite entre el erg y el ouadis. La localización de la traza del perfil puede verse en la figura 1C.

La posición del nivel freático en la situación actual, se ha determinado a partir de la información de los pozos nº 4 y nº 5, y del ramal sur de la khattara.

La información geológica que se presenta en el perfil, se ha dibujado a partir de las observaciones realizadas en las zanjas abiertas para la construcción de las khattaras, canteras de extracción de arcilla en las proximidades del oasis, y de los perfiles descritos en los propios pozos. La información geológica más profunda es interpretada.

Se han reconocido los siguientes materiales:

- Arenas eólicas del erg. Constituyen el acuífero principal. Se caracterizan por presentar una alta porosidad y permeabilidad. Las medidas de porosidad total realizadas en campo han dado valores del orden de un 28%, coherente con el rango (40% y 30%) que Davis (1969) da para arenas eólicas.
- Materiales arcillosos, limosos y niveles de arenas y gravas, de origen fluvial en la zona de ouadis. Posiblemente corresponden a depósitos de un antiguo ouadis de mayor anchura que el que encontramos actualmente en la zona de borde, cuya superficie topográfica tendría una cota superior a la actual. Estos materiales presentan una permeabilidad variable (K2) por cambios litológicos internos, pero que en su conjunto es bastante inferior a la de las arenas del erg. En particular, el oasis se sitúa sobre arcillas, con una potencia mínima observada de 1,5 metros.
- Limos, arcillas y arenas eólicas, cubiertos por cantos de pavimento desértico de color oscuro en la hamada.
- Substrato rocoso formado por esquistos y areniscas.

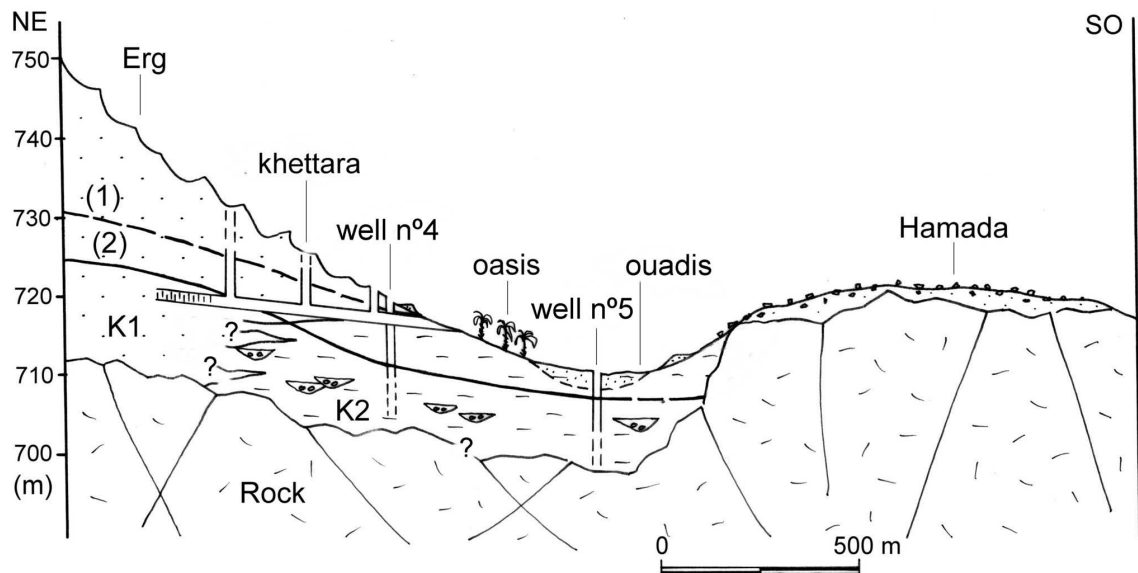


Figura 7. Perfil hidrogeológico esquemático según la traza A-B de la figura 1C. (1) Posición del nivel freático en régimen natural, sin intervención antrópica, y (2) posición actual del nivel freático. *Nota.* La escala vertical está muy exagerada respecto a la escala horizontal para que el perfil resulte más ilustrativo.

La posición del nivel freático en régimen natural se ha dibujado a partir de información facilitada por habitantes de la zona, así como de observaciones geológicas que nos indican que el nivel freático estuvo próximo a la superficie topográfica en otra época. El nivel freático actual se ha dibujado a partir de las medidas realizadas en los pozos durante el mes de enero de 2008. En particular, el perfil recoge la profundidad del agua medida en los pozos n° 4 y n° 5 del inventario.

6. Resumen y conclusiones

El complejo dunar de erg Chebbi constituye un acuífero libre que ocupa una superficie de 156 km². El flujo subterráneo en el erg tiene una componente radial desde la zona interior más elevada hacia los bordes. Las entradas al sistema se producen por infiltración del agua de lluvia, y las salidas por evaporación, manantiales, pozos y khattaras.

La zona de la hamada tiene menor interés hidrogeológico que el erg, por localizarse sobre un basamento rocoso (esquistos, cuarcitas, pizarras y areniscas) que en su conjunto se comporta como impermeable. La posibilidad de encontrar agua en esta zona tiene relación con la densidad, tipología y orientación de la fracturación y esquistosidad.

Los principales asentamientos de población y complejos turísticos se localizan en el límite erg-hamada, precisamente donde el agua subterránea se localiza más próxima a la superficie topográfica, y donde los sistemas de captación de agua subterránea que proporcionan mayores caudales.

En el entorno de Hassilabied el sentido de flujo subterráneo mantiene el esquema general, con dirección y sentido perpendicular al límite erg-hamada. Las captaciones de agua subterránea presentes en la zona son pozos y kettaras.

Las escasas precipitaciones naturales que recibe erg Chebbi, así como el aumento de la demanda de agua de las poblaciones de Hassilabied y Merzouga, ha producido un déficit hídrico en el que las salidas de agua subterránea superan las entradas. Este déficit ha causado que se produzca un progresivo descenso del nivel freático, que ha dejado secos varios pozos y obligado a construir nuevos ramales de kettaras hacia el interior del complejo dunar.

7. Bibliografía

- ASSOCIATION MERZOUGA POUR L'ENVIRONNEMENT ET LE DEVELOPPMENT (2008). Khetaras: Talabbast, Tamzzanat et TamaRirt. Poumons de Merzouga. Avant d'entamer le rapport association/agriculture. 36 pp.
- BENALLAS, M., ALEM., EM., ROGNON,P., DESJARDINS, R.,HILARIA., KHARDIA (2003). Eolian dynamic and palm grove encroachment in the sand dunes of Tafilatet. Sciences et Changement Planétaires. Sécheresse, 14(2). 77-83.
- DAVIS, S.N. (1969). Porosity and permeability of Natural Material (in Flow through Porous Media; editor De Wiest). Academic Press. 53-89 pp.
- FRYBERGER, S.G., SCHENK, C.J. AND KRYSTINIK, L.F. (1988). Stoke surfaces and the effects of nearsurface groundwater-table on aeolian deposition. Sedimentology, 35. 21-41.
- GUTIERREZ ELORZA, M. (2001). Geomorfología climática. Editorial Omega. 642 pp.

- JACOBSON, G. AND JANKOWSKI, J. (1989). Groundwater discharge processes at a central Australian playa. *Journal of Hydrology*, 105: 275 – 295.
- LOOPE, D.B. (1984). Origin of extensive bedding, planes in aeolian sandstones: a deference of Stokes hypothesis. *Sedimentology*, 31. 123-125.
- MINISTÈRE DE L'ÁGRICULTURE ET DE LA MISE EN VALEUR AGRICOLE (1992). Carte du Maroc, 1:50.000. Feuille NH-30-XX-2b (Marzouga). Ministeré de L'ágricuture et de la Mise en Valeur Agricole. Direction du Cadastre et de la Cartographie.Rabat (Maroc).
- MINISTÈRE DE L'ECONOMIE, DE FINANCES, DE LA PRIVATISACION ET DU TURISME (2006) Monographie Regionale de L'Énvironnement, Region Meknés-Tafilaltet. Rapport de Synthéses. Maroc.
- MINISTRY OF TERRITORIAL PLANING, WATER AND ENVIRONMENT (2001). *National Study on Biodiversity Synthetisis Report*. Department of Environment Kingdom of Morocco.United Nations Program of Environment. 161 pp.
- MOYA-PALOMARES, M.E (2007) Cartografia geomorfológica del sistema Erg Chebbi (Marruecos): La base de una propuesta de conservación y gestión sostenible. Memoria del proyecto de investigación (inédito). Universidad de Alcalá (España).73 pp.
- SERVICE GÉOLOGIQUE DU MAROC (S.G.M,1975). Carte Géologique du Maroc. Tafilalt – Taouz, Echelle 1/200.000.
- UNEP (2004). Estratégie nationale pour la conservation et lútilisation durable de la diversité biologique. L'Aménagement du territoire, d L'eau et de l'Environnement du Maroc.