

LOS ABASTECIMIENTOS EN LOS CAMPAMENTOS DE REFUGIADOS SAHARAUIS DE TINDOUF (ARGELIA). UN CASO DE EXPLOTACIÓN DE ACUÍFEROS EN UNA SITUACIÓN DE SEQUÍA EXTREMA

Eva Docampo^(1,2) y Jorge Molinero^(1,2)

- (1) Área de Ingeniería del Terreno. Escuela Politécnica Superior. Universidad de Santiago de Compostela. Campus Universitario s/n. 27002 Lugo. (molinero@lugo.usc.es).
- (2) Ingeniería sin Fronteras – Galicia. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Campus de Elviña s/n. 15171 A Coruña. (eva.docampo@isf.es).

RESUMEN

En este artículo se presenta un estudio de los recursos de agua existentes en el subsuelo de las proximidades de la ciudad de Tindouf (Argelia). Estos recursos hídricos se utilizan para el abastecimiento de los cerca de 200.000 refugiados saharauis que desde el año 1976 se encuentran desplazados en esta zona. Pese a lo que pudiera parecer a priori y a pesar de las condiciones de extrema aridez de la zona, la cantidad de agua disponible no supone un problema de cara a los sistemas de abastecimiento. El principal problema radica en la calidad de las aguas. Se piensa que el presente trabajo aporta un ejemplo excepcional de explotación de acuíferos en situaciones de sequía extrema, tanto por la peculiar y dramática situación política y social en la que se encuentra la población refugiada saharauí, como por el hecho de que su supervivencia depende directamente del agua subterránea.

Palabras clave: Sahara, sequía extrema, aguas subterráneas, nitratos, cambio climático.

ABSTRACT

Here we show a study on the groundwater resources assessment in the vicinity of Tindouf city (Algeria). These water resources are currently used for water supply of nearly 200,000 refugees from Western Sahara that are settled in this zone since 1976. Contrary to what it could be expected a priori, the amount of available water does not represent a major problem for the water supply system. The main problem relies on water quality aspects. It is thought that the present work constitutes a unique example of aquifer exploitation under extreme drought conditions both because the dramatic political and social situation of the refugees, and also because their survival depends directly on the availability of groundwater.

Key words: Sahara, extreme drought, groundwater, nitrates, climate change.

1. INTRODUCCIÓN

En 1976, España abandona los territorios que conformaban su antigua colonia del Sahara Occidental. Este territorio había sido considerado hasta ese momento como una provincia española más, donde los saharauis contaban con pasaporte español. El Gobierno de España expresó su compromiso de descolonizar la zona de acuerdo con las propuestas de la ONU, devolviendo el Sahara Occidental a sus habitantes para que decidieran libremente su destino. Sin embargo, contra todo pronóstico se firmaron en Madrid los “Acuerdos tripartitos” con Marruecos y Mauritania, declarándose la retirada del ejército español, lo que permitió la invasión militar del territorio saharauí por el Rey Hassan II, en la conocida Marcha Verde. El 27 de febrero de 1976, coincidiendo con la salida del último soldado español de la ex-colonia, el Frente POLISARIO (movimiento

de liberación nacional saharauí) proclama la República Árabe Saharaui Democrática (R.A.S.D.). La proclamación de la independencia del pueblo saharauí contó con un fuerte apoyo de la comunidad internacional. Tras la ocupación del Sahara Occidental comenzó la guerra entre el Frente POLISARIO, el Reino de Marruecos y Mauritania, retirándose esta última de la contienda en 1979. La guerra con Marruecos culminó con un alto el fuego en 1991, a través de un plan de paz mediado por la ONU y la OUA (Organización para la Unidad Africana). Este plan prevé la celebración de un referéndum de autodeterminación en el que el pueblo saharauí pueda decidir libremente su destino. Desde entonces, la falta de entendimiento entre las partes en lo concerniente al censo electoral ha retrasado el proceso hasta llevarlo a una situación de estancamiento total.

En su huida durante el periodo bélico y para evitar los ataques del ejército de Marruecos, la población civil saharauí llegó hasta las proximidades de Tindouf, en Argelia. Ahí es donde el gobierno argelino permitió el asentamiento de los campamentos de refugiados. Desde entonces, los campamentos están administrados con total autonomía por las autoridades de la R.A.S.D. Los recursos alimentarios para la supervivencia de la población provienen, en su mayoría, de la ayuda internacional a través de organizaciones humanitarias o países amigos con los que la R.A.S.D. mantiene convenios de cooperación, entre los que cabe destacar España, en todas y cada una de sus Comunidades Autónomas. La coordinación de la ayuda recibida corre a cargo de las autoridades políticas del Frente POLISARIO, con la ayuda de la “Media Luna Roja Saharaui”. Son muy destacables los avances que se han producido en materia de suministro de agua, salud y educación durante todo este tiempo. Sin embargo, después de más de 30 años la población refugiada siguen soportando un exilio injustificado, viviendo en condiciones precarias y de extrema dureza en una de las zonas más inhóspitas del desierto, sobreviviendo con dignidad y esperando la celebración del ansiado referéndum que ponga fin al único proceso de descolonización que aun queda pendiente en el continente africano.

Las asociaciones gallega y asturiana de Ingeniería sin Fronteras y la Universidad de Santiago de Compostela trabajan en los campamentos de refugiados saharauíes desde el año 2003. En este tiempo se han estado desarrollando labores de investigación hidrogeológica, así como programas de formación y transferencia tecnológica para el personal técnico local del Departamento de Hidráulica, responsable de los abastecimientos de agua y la gestión de los recursos hídricos en los campamentos. Los trabajos de campo realizados han consistido, a grandes rasgos, en realizar inventarios de puntos de agua e infraestructuras, estudios geológicos y geofísicos, ensayos hidrogeológicos y muestreos para determinaciones químicas y bacteriológicas. Cabe destacar que nunca antes se había realizado ningún tipo de estudio sobre las aguas subterráneas de esta zona del planeta.

El presente trabajo muestra un resumen de los principales resultados obtenidos hasta el momento. Se piensa que el presente trabajo aporta un ejemplo excepcional de explotación de acuíferos en situaciones de sequía extrema, tanto por la peculiar y dramática situación política y social en la que se encuentra la población refugiada saharauí, como por el hecho de que su supervivencia depende directamente del agua subterránea. El artículo comienza con una breve descripción del contexto geográfico, geológico y climático de la zona de estudio. Posteriormente se describen con cierto

detalle los principales resultados de los estudios realizados, analizando los sistemas de explotación y suministro, los acuíferos y sus características, la evolución temporal de las dotaciones hídricas abastecidas a la población, las características químicas de las aguas y las posibles hipótesis acerca del origen de las mismas. Finalmente el artículo termina con un apartado de conclusiones donde se pone de manifiesto la gran cantidad de agua existente en el subsuelo de la zona, así como el hecho de que sus características químicas son el resultado de los fenómenos de cambio climático que han sucedido durante el pasado geológico más reciente.

2. SITUACIÓN GEOGRÁFICA, GEOLÓGICA Y CLIMÁTICA

2.1. Situación geográfica

Los campamentos de refugiados saharauis se sitúan geográficamente en la parte centro-occidental del desierto argelino, próximos a la ciudad de Tindouf y cercanos a la frontera entre Marruecos, Argelia y la ex provincia española del Sahara Occidental (Figura 1).



Figura 1. Situación geográfica de los campamentos de refugiados saharauis de Tindouf (Argelia). Fuente: Googlearth.

Los campamentos se estructuran en cuatro grandes núcleos poblacionales (denominados “wilayas”) con los nombres de Aaiun, Dajla, Auserd y Smara. Cada wilaya se divide en 6 o 7 “dairas” o distritos, que facilitan la estructura organizativa. También existen algunos núcleos más pequeños, fundamentalmente el “27 de Febrero”, que se fue creando en las cercanías de una escuela secundaria para mujeres y Rabouni, centro neurálgico y administrativo donde se encuentran los ministerios de la de la República Árabe Saharaui Democrática. Todos los campamentos y núcleos se sitúan cerca de la ciudad argelina de Tindouf, excepto Dajla, que se localiza 200 Km más al sur. El resto de campamentos están separados por distancias de entre 9 y 30 Km (Figura 2).

La zona se caracteriza por una topografía muy poco accidentada. Está formada por amplias llanuras de desierto rocoso llamadas Hamadas. Estas están atravesadas por

los lechos de una red de riachuelos efímeros llamados Wadis, que desembocan en lagunas también efímeras llamadas Sebkhas. Los cordones de zonas elevadas que constituyen la divisoria entre Wadis se llaman Krebs. Los campamentos del norte (Auserd, Aaiún y Smara; véase Figura 2) están situados en la Hamada de Tindouf. Estos campamentos se sitúan a una cota entorno a los 350-400 m de altitud, mientras que el campamento de Dajla se encuentra en un oasis fuera de la Hamada, a unos 310 m de altitud.

Las zonas de explotación de los recursos hídricos subterráneos para abastecer a la población refugiada se sitúan en los alrededores de los campamentos de El Aaiún, Rabouni y Dajla.

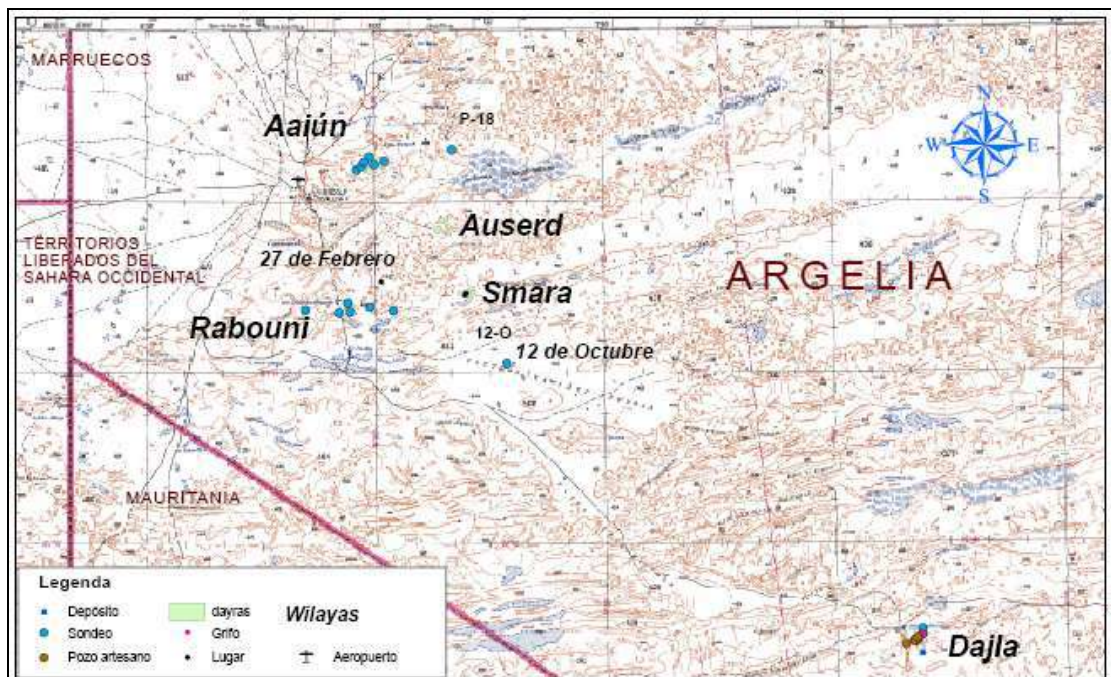


Figura 2. Situación y topografía de la zona donde se asientan los campamentos.

2.2. Situación geológica

Geológicamente, la zona de los campamentos se encuentra en la Cuenca Paleozoica de Tindouf, que se desarrolló como una cuenca marginal cratónica en el Precámbrico terminal – Devónico, acumulando un espesor máximo de sedimentos, predominantemente detríticos, de unos 7 Km (Traut *et al.*, 1991). La disposición estructural de la cuenca a gran escala viene dada por una estructura sinclinal asimétrica, cuyo flanco sur se encuentra prácticamente horizontal (Figura 3). Los episodios de sedimentación paleozoica terminaron al final del Carbonífero (Traut *et al.*, 1991). Desde entonces, la Cuenca de Tindouf se encuentra en un estado principalmente erosivo, aunque existen pequeños registros de episodios sedimentarios post-paleozoicos. Estos sedimentos mesozoicos y terciarios están restringidos a la parte central de la cuenca, donde se sitúan los sondeos de explotación de agua de El Aaiún y de Rabouni. El campamento de Dajla se sitúa sobre las rocas paleozoicas del flanco sur del sinclinal de Tindouf (Figura 3).

Según los datos que se han podido recopilar, los espesores de la cobertera post paleozoica pueden alcanzar los 300 m (Ratschillar, 1970-71), pero en general son menores a los 170 m (Traut *et al.*, 1991). Según el Mapa Geológico de Marruecos a escala 1:1.000.000, los sedimentos mesozoicos son de edad Cretácico Medio, y consisten en una sucesión de conglomerados y areniscas intercalados con arcillas rojizas. Estos materiales cretácicos están cubiertos por sedimentos neógenos (continentales – lacustres) formados por conglomerados y areniscas con intercalaciones de calizas arenosas.

La Figura 3 muestra un corte geológico N-S del sinclinal asimétrico de la Cuenca de Tindouf, donde se localiza la zona de estudio. En la Figura 3 se ha seleccionado la leyenda geológica que compete a la zona de estudio.

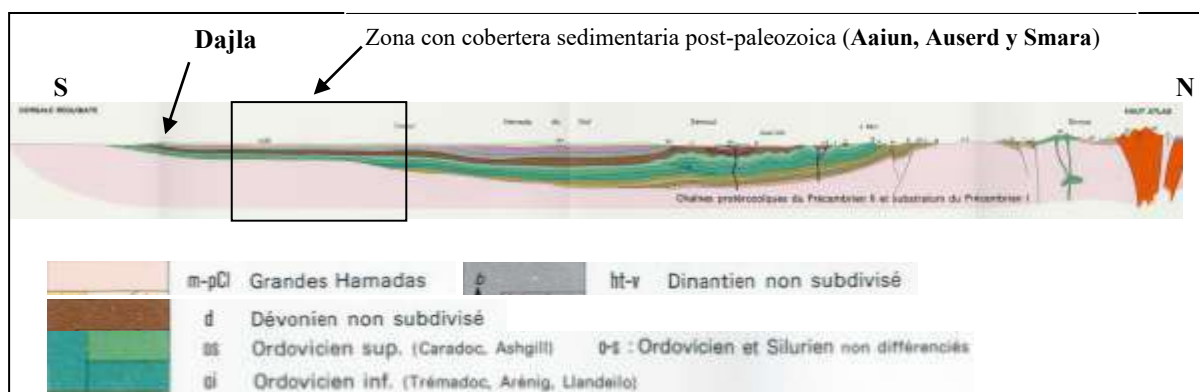


Figura 3. Corte geológico N-S, a escala regional, del sinclinal asimétrico de la Cuenca Paleozoica de Tindouf. Fuente: Mapa Geológico de Marruecos a Escala 1:1000.000

2.3. Situación climática

Las clasificaciones climáticas mundiales de Martonne (1964) y Viers (1968), incluyen la zona de estudio entre el clima de tipo sirio y de tipo sahariano, mientras Strahler y Strahler (1989) lo clasifican como desértico. Todos ellos coinciden en que este tipo de clima se caracteriza por temperaturas cálidas y alta irregularidad de las precipitaciones. El clima sahariano pertenece al verdadero desierto, con precipitaciones muy escasas e irregulares. En la zona norte del desierto del Sahara, las lluvias, cuando existen, se concentran en los meses de invierno. El clima sirio afecta a los bordes templados de los desiertos subtropicales. Es la degeneración desértica de los climas mediterráneos con lluvias invernales y estepas de herbáceas o semileñosas (Viers, 1976). La casi inexistente vegetación en la zona y las escasísimas lluvias denotan que el clima de la zona se aproxima más al tipo sahariano.

Para definir con más detalle las características climáticas de la zona se han utilizado los datos del Centro Meteorológico Nacional Argelino, correspondientes a la estación meteorológica de Tindouf. Se han evaluado los datos mensuales de una serie de 15 años (del año 1990 al año 2004). Los datos principales se resumen en la Tabla 1, donde se representan los valores medios mensuales de los siguientes parámetros:

- T= Temperaturas medias mensuales y media anual en °C
- P = Precipitación total mensual y anual en mm
- v = Velocidad media mensual del viento en m/s

- i = Insolación media mensual en horas
- K = Factor de corrección de la evapotranspiración potencial en función de la latitud (Viers y Vigueau, 1990)
- ETP = Evapotranspiración potencial en mm

La evapotranspiración potencial se ha calculado utilizando el método de Thornthwaite, basado en la temperatura media mensual corregida con factores para cada mes del año según la latitud y la duración del día (Thornthwaite, 1948), con la fórmula propuesta por Thornthwaite y Matter (1957).

Tabla 1. Valores climáticos medios mensuales y anuales de la serie 1994-2004 en Tindouf (Argelia) y ETP calculada según Thornthwaite (1948).

	Ene.	Febr.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.	Anual
T (°C)	13.20	15.9	19.5	22.2	25.2	30.1	34.7	34.4	29.8	24	18.1	14.3	23.45
P (mm)	1.02	5.78	2.94	0.15	0.50	0.27	0.21	3.86	1.65	20.62	0.75	4.59	42.35
v (m/s)	4.3	5	5.4	6.5	6.8	6.5	5.5	5.2	5.6	4.9	4.1	4.3	5.34
l (h)	8.7	9.3	9.4	10.9	11.7	10.9	10	9.7	8.9	8.8	8.8	8.2	9.39
K	0.87	0.93	1	1.07	1.14	1.17	1.16	1.11	1.03	0.96	0.89	0.85	
ETP (mm)	14.13	17.13	21.16	24.72	28.71	33.23	36.29	34.52	29.06	23.39	17.90	14.57	294.81

Tal y como se observa en el diagrama de Gausen (Figura 4), las escasas precipitaciones de la zona se concentran en el otoño y el invierno, principalmente en los meses de octubre y febrero.

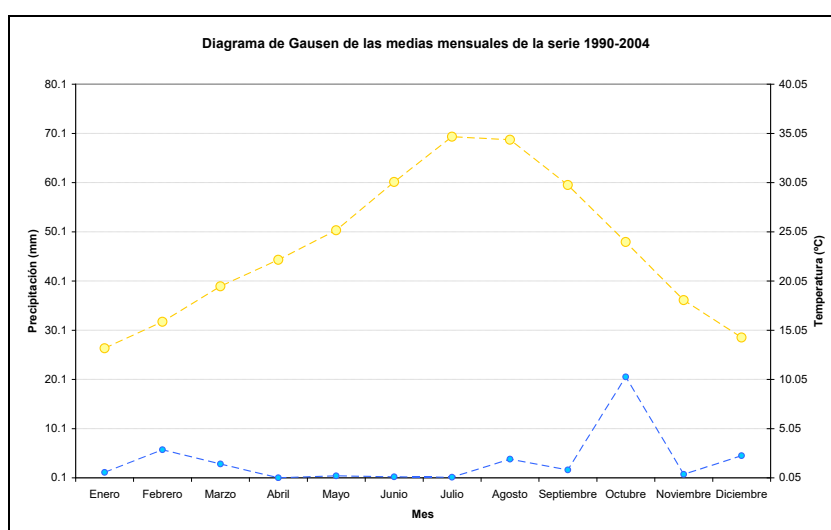


Figura 4. Diagrama de Gausen para los datos medios de temperatura (amarillo) y precipitación (azul) de la serie 1990-2004 en Tindouf.

Se consideran meses secos a aquellos en los que la precipitación en mm es menor que el doble del valor de temperatura media en °C (Gausen, 1954). Por lo tanto todos los meses del año son secos en Tindouf (Figura 4).

Cabe destacar que en un clima desértico los datos medios mensuales tanto de temperaturas como de precipitaciones dan una idea vaga de la situación climática real. Las temperaturas máximas diarias en verano superan los 50 °C, descendiendo

rápidamente después del mediodía y las precipitaciones se suceden en episodios torrenciales que duran unas horas en unos pocos días del mes, cada cierto número de años. En la Figura 5 se representa la precipitación media mensual de la serie 1994-2004, donde se puede observar la gran irregularidad existente entre los distintos años.

Los episodios de precipitación más fuertes de la serie estudiada se dieron en los meses de Octubre de los años 1994 (173,5 mm) y 2004 (74 mm). A estos se suman las fuertes lluvias caídas entre los días 9 y 11 de Febrero del presente año 2006, con cantidades similares a las registradas en Octubre de 1994. Estas lluvias torrenciales provocaron cuantiosos daños materiales en los campamentos de refugiados saharauis.

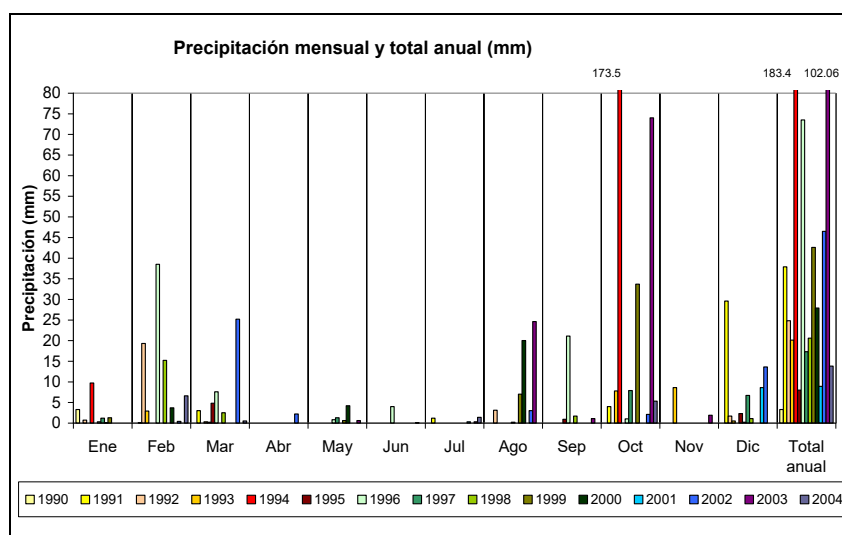


Figura 5. Precipitación media mensual en mm de la serie 1990-2004 registrada en la estación climatológica de Tindouf.

3. RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS

3.1. Sistema de explotación y suministro de agua

El agua que consume la población refugiada es agua subterránea que se obtiene del bombeo en sondeos ubicados a las afueras de los campamentos. Dadas las condiciones climáticas extremas de la zona, la supervivencia de la población depende directamente de este suministro de agua subterránea. Esta labor corre a cargo del Departamento de Hidráulica de la República Árabe Saharaui Democrática (RASD). Este organismo, en cooperación con las diferentes organizaciones no gubernamentales e instituciones que trabajan en la zona, hace un esfuerzo inmenso por mantener y mejorar el suministro.

El agua subterránea de la zona se ha extraído desde la llegada de la población refugiada en 1976, llegándose a constatar la existencia de 15 sondeos de explotación (Docampo, 2006), de los cuales se utilizan 11 en la actualidad. En el campamento de Dajla (véase Figura 2), que se localiza sobre un antiguo oasis, existen numerosos pozos artesanales que captan las aguas someras existentes en dicho oasis. Sin embargo, en la década de los años 90 comenzaron a proliferar brotes de cólera en este campamento, aparentemente debido a que la inexistencia de sistemas de saneamiento había provocado

la contaminación del agua por lixiviación de residuos fecales. La contaminación microbiana del agua subterránea somera de Dajla ha sido constatada recientemente (Docampo, 2006) y será tratada más adelante.

Hasta el año 2001, momento en el que se pone en marcha el Proyecto Internacional para el Abastecimiento a los Refugiados Saharauis de Tindouf*, el agua explotada en los sondeos de la Hamada (Figura 6), se distribuía a los distintos núcleos poblados mediante camiones cisterna que atravesaban el desierto, llevando el agua directamente desde los pozos de explotación hasta los depósitos familiares existentes en los barrios de cada uno de los campamentos. Con el paso de los años y a la vista del estancamiento político en la resolución del conflicto, este sistema se ha ido sustituyendo paulatinamente por métodos más eficientes, mediante el almacenamiento del agua en depósitos desmontables de mayor capacidad comunicados con los pozos de extracción mediante tuberías enterradas.



Figura 6. Localización de los pozos y sondeos explotados para el abastecimiento a la población refugiada en los campamentos. Soporte GIS sobre mapa topográfico de Argelia 1:250.000.

De los 11 sondeos explotados actualmente en los campamentos, 6 se utilizan para consumo humano y los 5 restantes para el riego de huertos o la higiene en colegios y hospitales. En la actualidad existen tres centros principales de bombeo y suministro para el abastecimiento de consumo humano en los campamentos y núcleos poblados (Figura 6) (Docampo, 2006):

- 1) El centro de explotación para suministrar agua a Auserd y El Aaiún (Figura 7). Estos campamentos se abastecen conjuntamente de los pozos LF-3, LF-4, HT-13 y HT-12-Bis situados en El Aaiún.

* El Proyecto de Cooperación Internacional para los Abastecimientos de la Población refugiada Saharaui constituye el Plan Director del sector de abastecimiento en dicha zona, y ha sido impulsado por Solidaridad Internacional Andalucía y los consorcios de Aguas del Huesna y Provincial de Aguas de Sevilla.

2) El centro de explotación para suministrar agua a Smara, 27 de Febrero y Rabouni. Se abastecen del pozo SA-10, ubicado en las proximidades de Rabouni (Figura 8).

3) El centro de explotación para suministrar agua a Dajla. Se abastece actualmente del sondeo OBL-2 (Figura 9) que capta aguas profundas en las afueras del campamento.

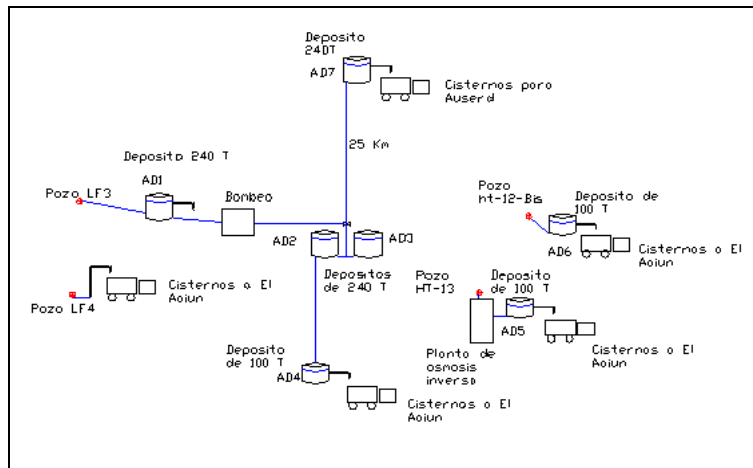


Figura 7. Esquema del sistema de explotación y suministro para abastecer a las wilayas de El Aaiún y Auserd

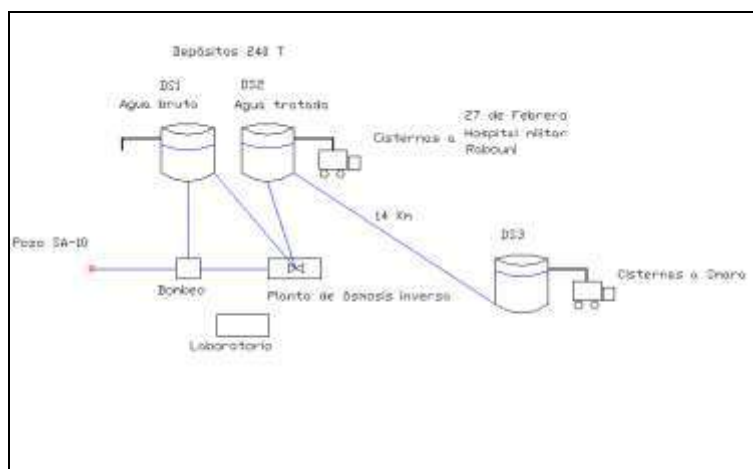


Figura 8. Esquema del sistema de explotación y suministro para abastecer a las wilayas de Smara, 27 de Febrero y Rabouni.

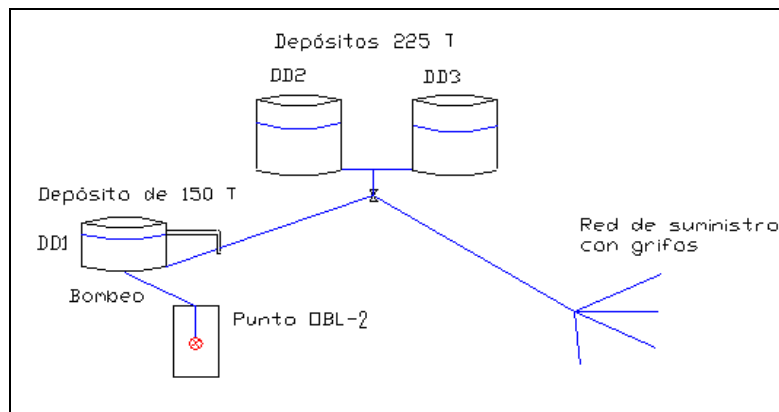


Figura 9. Esquema del sistema de explotación y suministro para abastecer a la wilaya de Dajla

3.2. *Acuíferos existentes y sus principales características hidrogeológicas*

A partir de estudios hidrogeológicos realizados en las zonas donde se encuentran los sondeos se ha constatado la existencia de, al menos, cuatro unidades acuíferas diferentes (Docampo, 2006):

1) Un acuífero somero en la wilaya de Dajla, que se sitúa sobre un antiguo oasis en el fondo de un valle. Este acuífero somero corresponde a materiales cuaternarios y terciarios de carácter fundamentalmente arenoso. En la wilaya de Dajla existen multitud de pozos artesanales excavados que cortan el nivel freático a profundidades muy cercanas a la superficie del terreno.

2) Un acuífero profundo en Dajla, probablemente ubicado en las rocas devónicas del flanco sur del sinclinal de la Cuenca de Tindouf, previsiblemente cuarzoarenitas, aunque no se han podido recuperar los partes de sondeo de las perforaciones.

3) Un acuífero calcáreo (calizas y dolomías) del carbonífero en la Sebkhah Abdallah de Rabouni, con una transmisividad entre 15 y 17 m²/día y un coeficiente de almacenamiento de 0,1. A partir de los registros de sondeos de esta zona y de la ubicación de las rejillas de captación, se estima un espesor medio del acuífero de 20 m. (Docampo, 2006)

4) Un acuífero detrítico de areniscas terciarias en la Hammada de Tindouf, en las proximidades de El Aaiún, con una transmisividad de 4 m²/día y un coeficiente de almacenamiento de 0,06. En este caso el espesor medio estimado en base a los partes de sondeo es de 30 m. (Docampo, 2006).

3.3. *Evolución de las dotaciones hídricas en los campamentos y estimación de la explotación de los recursos hídricos subterráneos*

Se ha evaluado la evolución del sistema de abastecimiento de aguas durante los últimos años, tomando como indicador principal la dotación de agua por habitante y día, realizando así un seguimiento cuantitativo de los resultados obtenidos por el avance del Proyecto de Cooperación Internacional para los abastecimientos, en marcha desde el año 2001. En ese mismo año, el Alto Comisionado de las Naciones Unidas para los Refugiados (ACNUR) estimó que la dotación media para la población rondaba los 5 – 7

litros por habitante y día[†].

Se han realizado trabajos de campo periódicos para evaluar las dotaciones en los campamentos de refugiados en los años 2003, 2004 y 2005 (Docampo, 2006). Este trabajo consistió en la realización de encuestas al personal técnico del Departamento de Hidráulica Saharaui y la recogida de datos en todos y cada uno de los pozos explotados en la actualidad. En estos estudios han participado voluntarios de la ONG Ingeniería sin Fronteras, que también colabora en el Proyecto de Cooperación Internacional para los abastecimientos junto al Área de Ingeniería del Terreno de la Universidad de Santiago de Compostela.

El Proyecto de Cooperación Internacional para los abastecimientos tiene como objetivo dotar a la población refugiada con una media de 30 litros por habitante y día. Los datos recogidos indican una progresión sostenida en el aumento de dotaciones hídricas (Figura 10), desde los 5 litros por habitante y día en el año 2003, hasta los 13 litros por habitante y día en el año 2005. En el momento de redacción del presente trabajo se están realizando los trabajos de campo necesarios para obtener las dotaciones del año 2006.

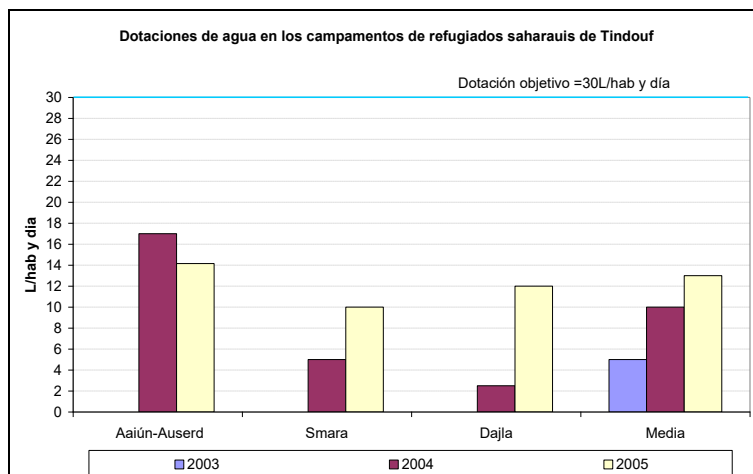


Figura 10. Evolución de las dotaciones hídricas en los campamentos de refugiados saharauis de Tindouf desde el comienzo del Proyecto de Cooperación Internacional para los abastecimientos.

Los datos de dotaciones hídricas se han calculado suponiendo una población total refugiada en los campamentos de 200.000 personas, distribuidas a partes iguales entre los cuatro campamentos principales (50.000 por campamento). Estos datos no son exactos. El censo de población saharauí es un tema de gran controversia por las implicaciones políticas que supone de cara a la celebración del referéndum de autodeterminación promovido por la ONU. El Ministerio Español de Asuntos Exteriores y de Cooperación, en su Documento de Estrategia País para el periodo 2005-2008, trabaja con el censo de ACNUR del año 2002, contando con que 157.821 refugiados tienen derecho a recibir ayudas.

[†] Según consta en el documento de Formulación del Proyecto de Cooperación Internacional para los Abastecimientos, proporcionado por D. Jaime Morell Sastre, Gerente del Consorcio Provincial de Aguas de Sevilla y Director Técnico del Proyecto de Cooperación Internacional.

Tomando 160.000 refugiados como dato de población y 5 litros por habitante y día como dotación media en el periodo 1976 - 2003, la población refugiada saharauí habría utilizado 7,88 Hm³ de agua extraída en los acuíferos de la zona para su abastecimiento. Suponiendo el mismo dato de población y según los datos expuestos anteriormente, la dotación hídrica media en los campamentos en el año 2005 sería de 15,7 litros por habitante y día, lo que supone 0,92 Hm³/año. Suponiendo que se logre el objetivo de 30 litros por habitante y día, se explotarían 1,75 Hm³/año. A este dato le podemos añadir el gasto anual de agua subterránea en el riego de los dos huertos principales (0,21 Hm³/año).

Se desconoce la extensión de los acuíferos que están siendo explotados en Hammada Tindouf y Sebhja Abdallah. Sin embargo, a la escala de los campamentos de refugiados del norte (Aaiun, Auserd y Smara), los pozos de explotación se encuentran contenidos en un círculo de unos 30 Km de radio. Tomando los espesores conocidos de los acuíferos y suponiendo las porosidades eficaces de los mismos como el valor de su coeficiente de almacenamiento, se obtienen unas reservas locales de agua de 5655 Hm³ en la Sebkha Abdallah y 5089 Hm³ en la Hamada de Tindouf. Por lo tanto, la explotación del agua subterránea de la zona al máximo ritmo previsto de 1,96 Hm³/año (dotaciones máximas mas riego), podría mantenerse teóricamente durante 5.000 años hasta agotar estas reservas locales. Cabe resaltar que se ha tomado el área del círculo que engloba a los campamentos a escala local, si bien la extensión real de los acuíferos bien podría ser cientos o miles de veces superior. Sin embargo, a pesar de la gran cantidad de agua existente, los acuíferos se explotan desde un número muy reducido de sondeos, con caudales que pueden llegar hasta 10 litros por segundo mantenidos durante 16 horas al día, lo que provoca síntomas de sobreexplotación puntual como el descenso acusado de los niveles en los pozos y la salinización progresiva de las aguas extraídas. Esto se podría paliar perforando nuevos sondeos más alejados entre si y disminuyendo los caudales de extracción, si bien se incrementarían los costes de explotación y transporte del sistema de abastecimiento.

3.4. Características físico-químicas del agua subterránea de la zona

Las aguas de la zona tienen una temperatura media de 26°C, un pH entre 7 y 8, y están en condiciones oxidantes (Docampo, 2006).

Los estudios hidroquímicos realizados en la zona se han centrado en aspectos relacionados con la potabilidad del agua (Docampo, 2006). A este respecto, los principales problemas detectados son:

A) Salinidad: La mayoría de las aguas subterráneas de la zona tienen elevada salinidad. Los pozos de agua de Dajla son, en general, los menos salinos de todos los campamentos. El agua de los pozos situados en la Sebkha Abdallah (acuífero carbonatado del carbonífero), presentan los mayores valores de conductividad eléctrica de la zona (valores habituales entorno a 4 mS/cm, que pueden llegar hasta 8 mS/cm en algunos pozos).

B) Microbiología: Se ha constatado que las aguas del acuífero somero del oasis de Dajla se encuentran actualmente contaminados por residuos fecales. Este hecho deriva de la inexistencia de una red adecuada de saneamiento en los campamentos de

refugiados durante los últimos tres decenios. La mayor parte de los pozos privados que captan el acuífero somero han sido o bien clausurados o bien se utilizan exclusivamente para labores como construcción de ladrillos de adobe. Actualmente el abastecimiento de Dajla es de tipo colectivo y el agua proviene del acuífero profundo, donde no se han encontrado indicadores de contaminación microbiológica (Figura 11).

C) Flúor: Existen varios puntos de agua que abastecen a la población y que tienen concentraciones de fluoruro de hasta 2,5 mg/L, lo cual supera el límite establecido por la OMS y la CEE para el consumo humano (1,5 mg/L). El Aaiún sería el campamento más afectado por este exceso de fluoruro en el agua de suministro.

D) Nitratos: Existen elevadas concentraciones de nitratos en el agua de todos los sondeos del norte, con valores que superan ampliamente el máximo de 50 mg/L recomendado por la OMS, la EPA y la CEE para el consumo humano (Figura 12). Esto afecta a todos los campamentos excepto a Dajla. El sondeo SA-10 de la Sebkha Abdallah tiene la concentración de nitratos más alta de los que se utilizan para consumo humano (más de 150 mg/L). Los sondeos de esta zona son además los más salinos, por lo que ha sido necesario instalar una Planta de Ósmosis Inversa que trata el agua de este sondeo antes de distribuirla (véase Figura 8).

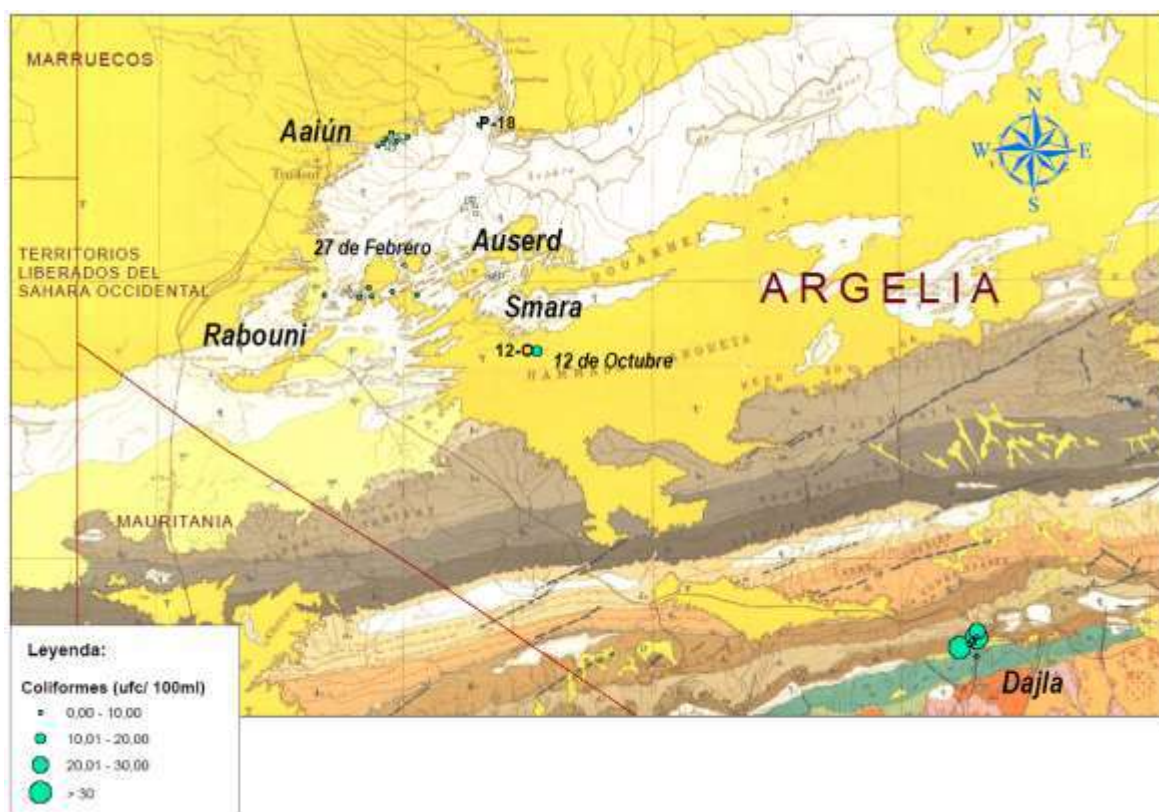


Figura 11. Mapa de las concentraciones de de coliformes (ufc/100mL) encontrados en el agua de cada uno de los pozos de la zona. Soporte GIS sobre mapa geológico de Argelia 1:500.000

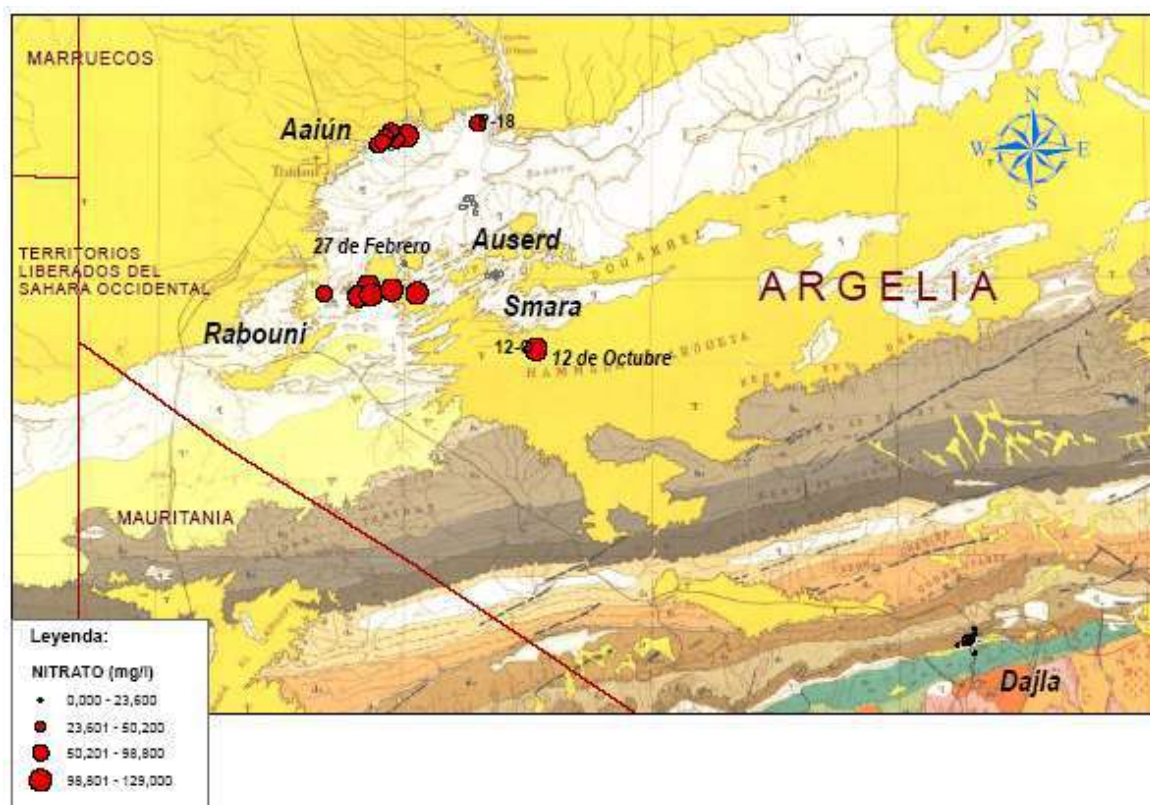


Figura 12. Mapa de la concentración de nitratos (mg/L) encontrados en el agua de los distintos pozos de la zona. Soporte GIS sobre mapa geológico de Argelia 1:500.000

3.5. Origen de las aguas subterráneas de los diferentes acuíferos

Es bien conocido que existen diversas relaciones isotópicas que constituyen herramientas geoquímicas muy potentes a la hora de establecer hipótesis sobre el origen de las aguas subterráneas. Entre estas relaciones isotópicas cabe destacar las del oxígeno ($O-18 / O-16$) y las del hidrógeno ($H-2 / H-1$). Las relaciones isotópicas de hidrógeno y oxígeno permiten detectar la existencia de fenómenos de evaporación, así como establecer hipótesis acerca de las condiciones ambientales en las que se produjo la recarga de las aguas subterráneas en el pasado. La Figura 13 muestra el gráfico con las relaciones isotópicas de diferentes aguas subterráneas y de lluvia de la zona de estudio.

Los datos isotópicos de las aguas de lluvia corresponden a las dos estaciones más cercanas existentes en la red ISOHIS de la Agencia Internacional de la Energía Atómica (ver referencia web IAEA). Estas estaciones son las de Beni Abbes y Ouargla (Argelia). A pesar de la escasez de datos disponibles en estas dos estaciones (solamente 6 determinaciones isotópicas) es posible apreciar aproximadamente la línea meteórica local en la zona de estudio (véase Figura 13). Una de las muestras de agua recogida en el acuífero somero del Oasis de Dajla cae sobre la línea meteórica local y dentro del rango de los datos de lluvia, aunque con un valor inferior a la media. El resto de las aguas del acuífero somero del Oasis caen por debajo de la línea meteórica, y se alinean claramente a lo largo de la evolución teórica de evaporación (Clark y Fritz, 1997). Por el contrario, los datos de las aguas subterráneas de los acuíferos profundos caen todos de ellos sobre la línea meteórica y con desviaciones isotópicas muy inferiores a los valores de las aguas de lluvia y de las aguas subterráneas someras. Es bien conocido que los valores de estas

relaciones isotópicas dependen de la temperatura a la que se produce la condensación atmosférica del agua de lluvia (Clark y Fritz, 1997). Los valores de las relaciones isotópicas son tanto más bajos cuanto menor es la temperatura ambiente. Por tanto, las aguas subterráneas de los acuíferos profundos muestran signos evidentes de corresponder a episodios de recarga de los acuíferos en condiciones climáticas sensiblemente más templadas que las actuales. El hecho de que todas las aguas subterráneas profundas se localicen sobre la línea meteórica indica que no han sufrido procesos de evaporación importantes durante la recarga, lo cual es coherente con condiciones climáticas de menor temperatura que la actual.

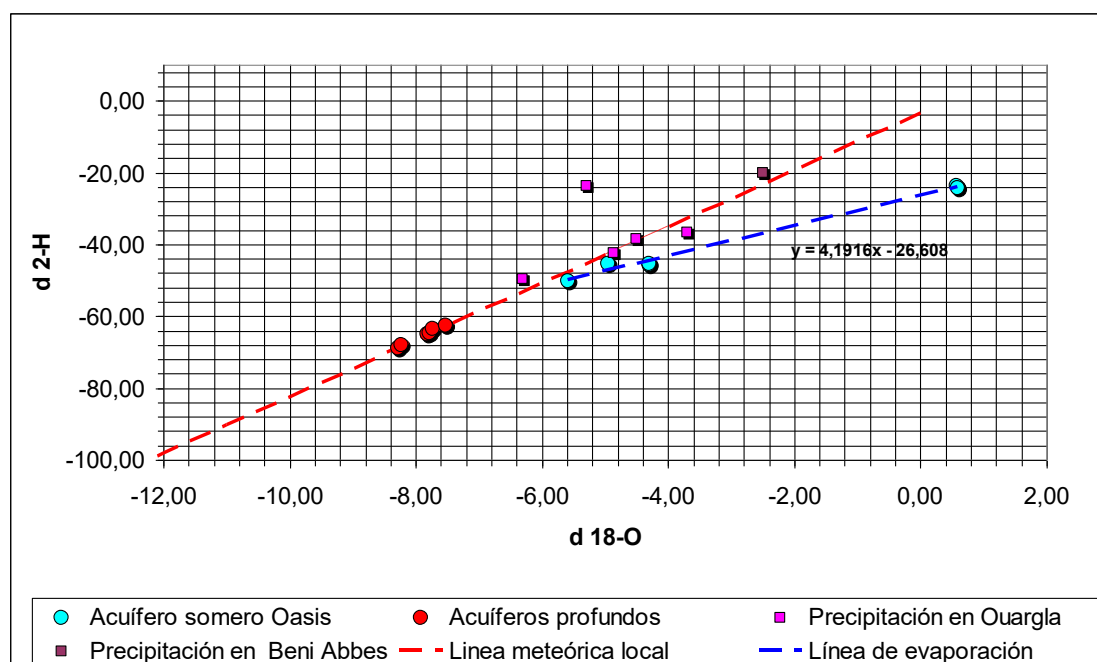


Figura 13. Desviaciones isotópicas de oxígeno e hidrógeno (‰ SMOW) de diferentes aguas subterráneas y de lluvia en la zona de estudio.

3.6. Origen de los nitratos de las aguas subterráneas

En general, la presencia de nitratos en las aguas subterráneas se considera un buen indicador de la existencia de episodios de contaminación. Esto es así porque en aguas subterráneas no contaminadas es muy raro superar concentraciones naturales de nitratos de unos pocos mg/l (Custodio, 1983). El ion nitrato puede proceder de la descomposición de materia orgánica, de la contaminación urbana por pérdidas en las redes de saneamiento, de algunas actividades industriales y, sobre todo, de aplicaciones de fertilizantes (naturales o químicos) en actividades agrícolas. Algunas veces los nitratos pueden provenir de procesos de nitrificación naturales, como por ejemplo los que se producen en las raíces de plantas leguminosas y, en muy pequeña proporción, del agua de lluvia (Custodio, 1983).

En el caso de las aguas subterráneas de los campamentos de refugiados de Tindouf, los acuíferos del norte (Sebha Abdallah y Hamada Tindouf) presentan altas concentraciones de nitratos en todos los pozos muestreados, que pueden oscilar entre 50 y 150 mg/L (Figura 14). En términos globales, el acuífero carbonatado del Carbonífero de Sebja Abdallah presenta valores medios superiores al acuífero detrítico Terciario de Hamada Tindouf (véase Figura 14). Por el contrario, los acuíferos del sur (oasis de Dajla y acuífero

profundo de Dajla) presentan valores mucho más bajos. El acuífero profundo de Dajla apenas presenta cantidades apreciables de nitratos, mientras que el acuífero somero del oasis puede llegar a valores máximos de 50 mg/L, con un valor medio entorno a 20 mg/L (Figura 14). Los nitratos medidos en las aguas del acuífero somero del oasis de Dajla correlacionan perfectamente con la concentración de coliformes (Docampo, 2006), lo cual indica que dichos nitratos proceden de la contaminación por lixiviados fecales que han alcanzado las aguas freáticas someras, tras 30 años de permanencia de población sin sistemas de saneamiento adecuados. Sin embargo, ninguna de las muestras de agua recogidas en los pozos de los acuíferos del norte (Hamada Tindouf y Sebha Abdallah) mostró indicadores de contaminación microbiológica (véase Figura 11). Este hecho no es de extrañar, puesto que los acuíferos del norte son relativamente profundos (entre 60 y 80 m desde la superficie del terreno), ambos tienen niveles arcillosos - limosos confinantes y, además, todos los pozos muestreados se encuentran suficientemente alejados de los campamentos como para poder ser afectados por lixiviados fecales. Por otra parte, la actividad industrial es inexistente y la actividad agrícola anecdótica pues apenas hay unas 40 hectáreas cultivadas en total, que aportan menos del 1% de los alimentos que componen la dieta de la población (AECI, 2005). Por lo tanto, cabe suponer que los altos contenidos de nitratos observados en los acuíferos del norte deben tener un origen natural.

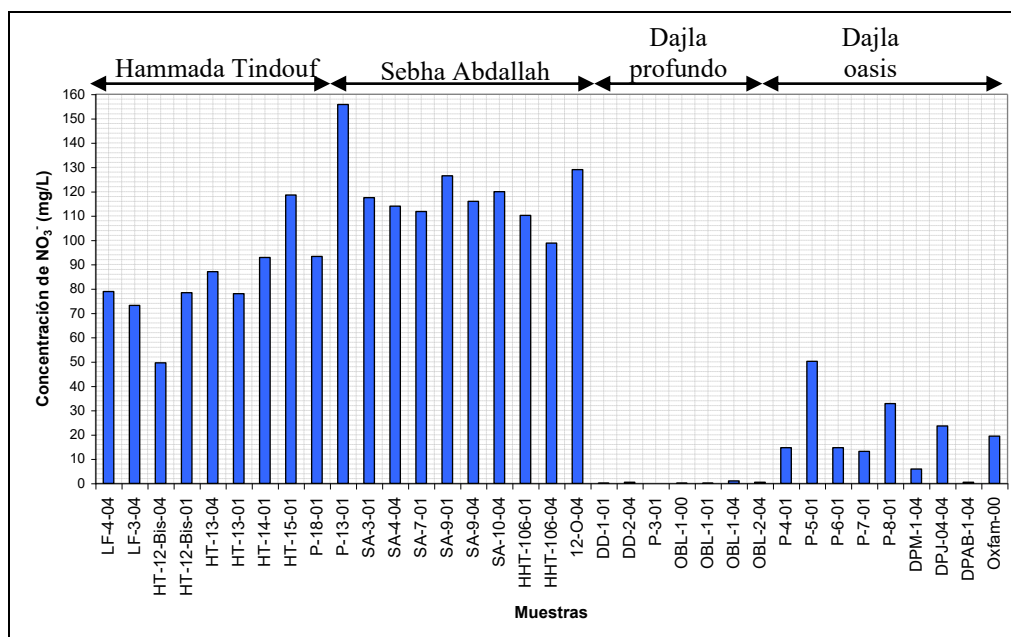


Figura 14. Concentraciones de nitratos (mg/L) encontrados en las aguas de los distintos pozos de los campamentos de refugiados saharauis de Tindouf.

Parece ser que la existencia de altas cantidades de nitratos naturales en las aguas subterráneas es relativamente habitual en zonas con características climáticas hiper-áridas. Guendouz et al. (1997), Edmunds et al. (2003) y Zuppi y Sacchi (2004) citan la existencia de aguas con alta salinidad y altos contenidos en nitratos en los acuíferos de areniscas cretácicas existentes en Argelia, Libia y Egipto. Igualmente, Böhlke et al. (1997) citan la presencia de nitratos en suelos y aguas subterráneas del desierto de Atacama en Chile. Estos autores realizaron estudios de las relaciones isotópicas N-15 / N-14 que indican un origen atmosférico para dichos nitratos. En este sentido, resulta especialmente interesante el trabajo publicado por Walvoord et al. (2003), que muestra los resultados de sales disueltas en perfiles de suelos de diversos desiertos del sur de los EE.UU. Estos autores

encuentran dos aspectos realmente llamativos. Por una parte detectan contenidos muy altos de nitratos en la zona no saturada de todos los desiertos analizados, hasta el punto de que calculan que el nitrógeno que podría haber en el subsuelo de todas las zonas áridas del planeta supondría entre un 4 y un 16% del nitrógeno total de la Tierra. Por otra parte, llama la atención que la distribución del nitrato en profundidad es prácticamente idéntica a la distribución del cloruro, sugiriendo por tanto un origen similar.

El origen del cloruro en los suelos desérticos se supone debido a los procesos simultáneos de infiltración (en los eventos episódicos de lluvia) y evaporación, que produce la concentración progresiva del agua de los poros hasta superar el límite de solubilidad de las sales, depositándose entonces los precipitados salinos a una determinada profundidad. Walvoord et al. (2003) postulan el mismo mecanismo para la acumulación de nitratos, basándose en la similitud de los perfiles en profundidad encontrados para ambas sales. Este mecanismo es compatible con el origen atmosférico de los nitratos propuesto por Böhlke et al. (1997) a partir de los estudios isotópicos en el desierto de Atacama.

Si bien este origen atmosférico puede explicar la presencia de nitratos en la zona no saturada, difícilmente podría aplicarse este mecanismo para explicar la llegada de dichos nitratos hasta las aguas subterráneas presentes a más de 50 m de profundidad. La llegada de nitratos hasta los acuíferos profundos requeriría el lavado de las sales precipitadas en la zona no saturada y su acumulación posterior en los acuíferos. Por lo tanto, esta línea argumental para explicar las concentraciones de nitratos en las aguas subterráneas hace necesario invocar la alternancia de periodos hiper-áridos, capaces de acumular nitratos en la zona no saturada, con periodos más húmedos posteriores que pudieran explicar la disolución de dichas sales por las aguas de recarga que finalmente alcanzarían los acuíferos. La información isotópica mostrada en el apartado anterior permite deducir que las aguas subterráneas de los acuíferos profundos corresponden a aguas fósiles, recargadas en condiciones climáticas mucho más templadas y húmedas que las actuales. Diversos autores postulan la existencia de periodos geológicamente recientes en los que existieron condiciones climáticas húmedas en el desierto sahariano actual (Gasse, 2002; Zuppi y Sacchi, 2004). Según estos autores, los dos últimos periodos húmedos en el Sahara occidental corresponden al pleistoceno superior (hace unos 25000 años) y holoceno inferior (hace unos 12000 años). Por otra parte existen pinturas rupestres, muy cercanas a la zona de los actuales campamentos de refugiados, con dibujos de fauna y flora típica de las actuales sabanas sub-saharianas que no dejan lugar a dudas acerca de la existencia de dichos periodos húmedos (Soler et al., 1999). Toda esta información, junto con las determinaciones isotópicas realizadas, apuntan a que la sucesión de periodos áridos y húmedos podría ser la causa de la existencia de altas cantidades de nitratos naturales en los acuíferos de los campamentos de Tindouf.

4. CONCLUSIONES

La supervivencia de la población refugiada de los campamentos saharauis de Tindouf es posible gracias a las aguas subterráneas. Los estudios realizados han constatado la existencia de cuatro acuíferos que están siendo explotados en la actualidad. Tres de los cuatro acuíferos contienen, sin duda, aguas de carácter fósil recargadas en épocas pasadas con un clima sensiblemente más templado y húmedo que el actual. Las aguas del acuífero somero del Oasis de Dajla se recargaron a mayores temperaturas y muestran signos claros de haber sufrido evaporación, por lo que podrían corresponder a episodios de recarga

relacionados con las escasas pero torrenciales lluvias existentes en las condiciones climáticas actuales. Precisamente este acuífero somero del Oasis de Dajla es el que presenta la mejor calidad del agua para el consumo humano. Sin embargo, la permanencia de la población refugiada sin sistemas de saneamiento adecuados durante más de 30 años ha terminado por contaminar las aguas freáticas.

A pesar de las condiciones de extrema aridez de la zona, la cantidad de agua disponible para el abastecimiento de la población refugiada no representa un problema. Se calcula que con las dotaciones actuales existirían reservas de agua para varios miles de años, simplemente en la zona ocupada por los campamentos. Teniendo en cuenta la verdadera extensión de los acuíferos las reservas serán sin duda miles de veces superiores. Por tanto, el aumento de dotaciones previsto por el Plan de Cooperación Internacional para los abastecimientos de la población refugiada no debe verse limitado por miedo a agotar las reservas hídricas. Sin embargo, sí que se han detectado problemas puntuales de salinización progresiva y descenso de los niveles en algunos pozos, debido a que la extracción de agua se encuentra muy concentrada en unos pocos puntos. Estos problemas se solucionarían fácilmente perforando más sondeos y distribuyendo espacialmente las extracciones en un mayor número de puntos. Evidentemente, esta solución implicaría un aumento de los costes del abastecimiento en los conceptos de extracción y transporte/distribución del agua.

El principal problema de los abastecimientos con aguas subterráneas está en la calidad de las mismas. Los acuíferos del norte presentan salinidades elevadas y en algunos pozos se superan holgadamente las concentraciones de fluoruro recomendadas por las reglamentaciones sanitarias internacionales. Esto es muy probablemente la causa responsable de la gran incidencia de enfermedades cardiovasculares, así como de casos de fluorosis dental y ósea que se dan entre la población refugiada. Además, las altas concentraciones de nitratos son generalizadas en los dos acuíferos más explotados, donde el agua de todos los pozos supera, incluso por un factor de 3, el valor máximo recomendado por las reglamentaciones. Los estudios realizados apuntan a que dichos nitratos provienen de precipitados salinos acumulados en la zona no saturada bajo condiciones climáticas áridas. Dichas acumulaciones salinas sería disueltas posteriormente por aguas de recarga infiltradas en periodos con condiciones ambientales más húmedas y templadas.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por la Dirección General de Cooperación Exterior de la Xunta de Galicia mediante un proyecto de formación e investigación hidrogeológica promovido por el Área de Ingeniería del Terreno de la Universidad de Santiago de Compostela. Los primeros trabajos de campo se realizaron por Ingeniería sin Fronteras – Galicia, durante la ejecución del proyecto de mejora de las instalaciones de bombeo del pozo HT-12bis, en el acuífero de “Hammada Tindouf”, financiado por el Ayuntamiento de Oleiros (A Coruña) y a la Oficina de Cooperación y Voluntariado de la Universidade da Coruña. Los autores del artículo desean dejar constancia expresa de su agradecimiento al Vicerrectorado de Investigación de la Universidad de A Coruña y al Grupo de Ingeniería Sanitaria y Ambiental de la misma universidad, por haber cedido desinteresadamente sus instalaciones, sus conocimientos y su tiempo en la realización de los análisis químicos, bacteriológicos e isotópicos de las muestras de agua. El trabajo de campo fue posible gracias a la colaboración de Juan Raposo González, estudiante de doctorado y compañero del Área de Ingeniería del Terreno de la Universidad de Santiago de Compostela y a un grupo de

voluntarios/as de Ingeniería sin Fronteras – Galicia (Sabela Lorenzo, José Anta, Sergio Fernández, Luís Díaz, Belén Covelo y Loreto). Muchísimas gracias, por supuesto, a todos los miembros del Departamento de Hidráulica de la República Árabe Saharaui Democrática, con su director, Salem Buchraya, a la cabeza. Por último, nos gustaría mencionar al Consorcio de Aguas del Huesna, al Consorcio Municipal de Aguas de Sevilla y a Solidaridad Internacional – Andalucía, impulsores del Proyecto Internacional para los Abastecimientos en los Campamentos de Refugiados Saharais, y agradecerles la cantidad de información que nos han proporcionado, su apoyo desinteresado y, sobre todo, la magnífica labor que están realizando en los campamentos de refugiados saharais.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Böhlke, J.K.; Ericksen, G.E. y Revesz, K. (1997): Stable isotope evidence for an atmospheric origin of desert nitrate deposits in northern Chile and southern California, U.S.A. *Chemical geology*, 136, 135-152.
- Clark, I. y Fritz, P. (1997): *Environmental isotopes in hydrogeology*. Lewis Publishers. Boca Raton, Florida. 328 pp.
- Custodio, E. (1983): Hidroquímica. En: *Hidrología Subterránea*, Vol. II, Capítulo 11. (Custodio, E. y Llamas, M.R.; Eds.) Ediciones Omega, S.A. Barcelona.
- Docampo, E. (2006): Estudio de las aguas subterráneas y los abastecimientos en los campamentos de refugiados saharais en Tindouf (Argelia). Proyecto Fin de Carrera Universidad de Santiago de Compostela, 169 p.
- Edmunds, W.M.; Guendouz, A.H.; Mamou, A.; Moulla, A.; Shand, P. y Zouari, K. (2003): Groundwater evolution in the Continental Intercalaire aquifer of southern Algeria and Tunisia: trace elements and isotopic indicators. *Applied geochemistry*, 18, 805-822.
- Gasse, F. (2000): Hydrological changes in the African tropics since the Last Glacial Maximum. *Quaternary Science Reviews*, 19, 189-211.
- Gaussen, H. (1954): Teorie et classification des climats et des microclimats du point de vue phytogeographique. VII^o Congr. Inst. Bot: 125-130.
- Guendouz, A.; Moulla, A.S.; Edmunds, W.M.; Shand, P.; Poole, J.; Zouari, K. y Mamou, A., (1997): Palaeoclimatic information contained in groundwaters of the Grand Erg Oriental, N. Africa. En: *Isotope Techniques in the Study of Past and Current Environmental Changes in the Hydrosphere and Atmosphere*. IAEA, Vienna, pp. 555–571.
- Martonne, E. (1964): *Tratado de Geografía física*, Volumen I. Ed. Juventud. Barcelona.
- Ratschillar, L.K. (1970-71): Lithostratigraphy of northern Spanish Sahara. Estratto da *Memorie del Museo Tridentino di Scienze Naturali*. Vol XVIII-Fasc.1. p.1-80.
- Strahler, A.N. y Strahler, A.H. (1989): *Geografía Física*. Ed Omega. Barcelona.

- Soler, N., Serra, C.; Escolà, J. y Ungé, J. (1999): Sáhara Occidental. Pasado y presente de un pueblo. Universitat de Girona, Fundació privada Girona. Universitat i Futur, Girona, 216 pp.
- Thornthwaite, C.W. (1948): An approach toward a racional classification of climate. Geog. Rev. 38: 55-94.
- Thornthwaite, C.W.y Matter, J.R. (1957): Instructions and tables for Computing Potencial Evapotranspiration and the Water Balance. Centerton. New Jersey.
- Traut, M.W., Reed, R.J., Bhattacharyya, D.y Van Houten, F.B. (1991): Geology and Hydrocarbon Potential of the Tindouf Basin, Morocco. Energy & Geoscience Institute at University of Utah (formerly Earth Sciences and Resources Institute at the University of South Carolina), EGI Technical Report I00280, Salt Lake City. Utah.
- Viers, G. (1676): Climatología. Ed. Oikos-Tau, s.a. Barcelona.
- Viers, G. y Vigueau, J. P. (1990): Elements de Climatologie. Volume 2, Second edition. Nathan Université. Paris.
- Walvoord, M.A.; Phillips, F.M.; Stonestrom, D.A.; Evans, R.D.; Hartsough, P.C.; Newman B.D. y Striegl, R.G. (2003): A Reservoir of Nitrate Beneath Desert Soils. Science, Vol. 302, 1021-1024.
- Zuppi, G.M. y Sacchi, E. (2004): Hydrogeology as a climate recorder: Sahara–Sahel (North Africa) and the Po Plain (Northern Italy). Global and Planetary Change, 40, 79-91.

REFERENCIAS DE INTERNET

- AEI, Ministerio de Asuntos Exteriores y de Cooperación (2005): Documento de Estrategia País 2005-2008. Cooperación Española. Población Saharaui. (Disponible en: www.mae.es/es/MenuPpal/Cooperacion+Internacional/Publicaciones+y+documentación/#sec6).
- EPA. Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos. Oficina de Agua. (<http://www.epa.gov/safewater/agua/estandares.html>).
- UE. Directiva 98/83/CE del Consejo de 3 de noviembre de 1998 relativa a la calidad de las aguas destinadas al consumo humano. Diario Oficial de las Comunidades Europeas del 5.12.98 n° L 330/54 ES. (Disponible en: <http://www.msc.es/medioambient/agua/pdfs/directiva.pdf>).
- IAEA. Agencia Internacional de la Energía Atómica. ISOHIS Isotope Hydrology Information System. (Base de datos en: <http://isohis.iaea.org>).
- OMS - W.H.O.(1999): Guidelines for drinking-water quality. (disponible en: www.who.int/water_sanitation_health/dwq/en/index.html).