

Aplicación del método DRASTIC para la cartografía de la vulnerabilidad a la contaminación del acuífero de R'mel (Larache, Marruecos)

[Application of DRASTIC method for mapping vulnerability to contamination of aquifer R'mel (Larache, Morocco)]

Nisserine Ben Driss¹ y Fermín Villarroya²

¹Departamento de Geografía, Facultad de Letras y Ciencias Humanas (Martil), Tetuán (UAE), Marruecos

²Departamento de Geodinámica, Facultad de Ciencias Geológicas (UCM) C/José Antonio Novais, 2. 28040 Madrid, España

Copyright © 2016 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the *Creative Commons Attribution License*, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ABSTRACT: The DRASTIC methodology have been aplicated to determine the vulnerability to contamination of groundwater in the unconfined aquifer of R'mel (Larache, Morocco). The variables considered by this method have been mapped using the ARCGIS 9.3 software by mean the scan tool Spatial Analyst. The results were that 70,5% of the aquifer has a very low level of vulnerability; 17,9% low degree of vulnerability; 6,7% a moderate vulnerability, while the remaining 4,8% have no vulnerability. The application of this method was performed for the first time in this area by mean of this study and the results provide a basis for environmental management, land planning and its suitability for different uses and a starting point for future research aimed at protecting the aquifer contamination.

KEYWORDS: groundwater, R'mel aquifer, contamination, DRASTIC, vulnerability.

RESUMEN: Se ha aplicado el método DRASTIC para conocer la vulnerabilidad a la contaminación de las aguas subterráneas en el acuífero libre de R'mel (Larache, Marruecos). Las variables que contempla este método se han cartografiado aplicando el software ARCGIS 9.3 mediante la herramienta de análisis Spatial Analyst. Los resultados obtenidos han sido que el 70,5% de la superficie del acuífero presenta un grado de vulnerabilidad muy bajo; el 17,9% un grado de vulnerabilidad baja; el 6,7% una vulnerabilidad moderada, mientras que el 4,8% restante no presenta vulnerabilidad. La aplicación de este método se ha efectuado por primera vez en esta zona mediante este estudio y los resultados constituyen una base de gestión ambiental y de ordenación del territorio y su adecuación a diferentes usos y un punto de partida para futuras investigaciones orientadas a la protección del acuífero contra la contaminación.

PALABRAS CLAVE: aguas subterráneas, acuífero R'mel, contaminación, DRASTIC, vulnerabilidad.

ABRIDGED VERSION

INTRODUCTION AND METHODOLOGY

This article includes part of the content of the doctoral thesis of Ben Driss (Ben Driss, 2009) which focused on a contamination vulnerability analysis of the R'mel aquifer. This aquifer (Fig.1, 2 and 4) covers approximately 240 km² in the north-western part of the Bas-Loukkos river basin, south of the city of Larache. The mean annual precipitation and

temperature are 645 mm and 25°C, respectively (Fig.3). Most of this region is covered with six soil types as shown in Fig.4, with a significant presence of sandy and red Mediterranean soils.

The DRASTIC method uses the assignment of indices from 1 – 10, according to the characteristics and behaviour of the seven variables considered which give this method its name: D (depth to water); R (net recharge), A (aquifer media), S (soil media), T (topography), I (impact of vadose zone) and C (hydraulic conductivity) (Aller *et al.*, 1987). These parameters are assigned values and a multiplier (weight according to importance) to obtain the DRASTIC index (DI) :

$DI = D_r D_w + R_r R_w + A_r A_w + S_r S_w + T_r T_w + I_r I_w + C_r C_w$, where the subscripts r and w are the rating and weighting factors respectively. The DI ranges from 23 (minimum vulnerability) to 230 (maximum vulnerability), although in practice the predominant index varies from 50 - 200 (Table 1, 2). Table 3 shows the colour codes used on the maps obtained by applying this method.

RESULTS AND DISCUSSION

Depth to water (D) is an important parameter as it determines the thickness of the materials through which a contaminant must flow before reaching the water level.

From an inventory of 70 wells, the depth to water was determined at between 0.9 and 64 m. Seven different categories were defined by estimating vulnerability in relation to this parameter and classified in three groups depending on the depth to water (Fig.5). In the most vulnerable zones the piezometric surface is found at less than 4.5m (rating 10 and 9). In the moderately vulnerable zones the depth ranges from 4.5 - 15m (rating 7 and 5). The least vulnerable zones are where the depth of the piezometric surface is greater than 15m (rating 3, 2 and 1).

Recharge (R) is one of the most difficult variables to determine. It depends on precipitation, evapotranspiration, runoff, soil type and also on anthropic factors such as the predominantly agricultural activity (and irrigation return flows) in the area. The recharge values in whole area is considered to be homogeneous and assigned a rating of 9.

The hydrodynamic characteristics of the saturated zone (A) have an important influence on the dilution, diffusion and residence time of the contaminants and potentially on the aquifer water quality. Three types were identified (Fig.6).

Soil (S) represents the surface where contaminating activities predominate and the barrier to contaminants during infiltration. Five types were obtained with sandy texture type 9 predominant. The other four types (rating 8, 7, 4 and 3) present a clay and/or clay-silt texture (Fig. 7).

The evaluation of Topography (T) parameter in the study area was determined automatically from a numerical terrain model (NTM) obtained by digitizing the contours of the topographic area maps. These contours were transformed into an elevation map using 3D Analyst, which then enabled the percent slope calculation. Five types were identified from the slope map, with 0 - 6% slope the most significant, indicating low aquifer protection against contamination (Fig. 8).

The most relevant parameters to take into consideration in a study of vadose zone vulnerability are those likely to delay any vertical transit of contaminants: the unsaturated zone parameter (I). This is essentially the thickness of the unsaturated zone down to the phreatic surface. The thickness of the unsaturated zone was deduced from the wells inventory and lithological columns. Three types were identified (Fig. 9).

Given that not enough information was available to evaluate the hydraulic conductivity value (C) of the aquifer (Fig.10), the values obtained from a mathematical model were used. The hydraulic conductivity values range from 0.77- 22.64 m/day. The values for this parameter were classified on a pixel-by-pixel basis using the DRASTIC method rating system. The map obtained presents three types: a less vulnerable zone occupying 36.44% of the surface; a more vulnerable zone representing 12.41% of the total surface; the remaining areas, with hydraulic conductivity ranging from 4-12 m/day, occupy 51.15% of the total surface and present moderate vulnerability.

The vulnerability was mapped by overlaying the seven thematic maps (Fig. 11). Four DRASTIC index intervals can be observed. Each index represents a level of susceptibility to contamination of the R'mel aquifer groundwater. Immediately evident is the predominance of very low vulnerability zones (rating 80-99). The zone with nil vulnerability (rating 23-79) corresponds to the first type established by Aller *et al.*(1987) (Table 1); the low vulnerability zone (rating 100-119) corresponds to the third type; and the rest corresponds to the fourth type with moderate vulnerability (rating 120-139). As a result the total surface vulnerability can be classified as follows: 70.47% - very low; 17.94% - low; 6.75% - moderate; 4.84% - nil (Fig. 12). The most vulnerable zone is found mainly in the north western part of the study area south of the city of

Larache, due to the proximity of the water level to the surface and the permeable nature of the lithological formations present in this area.

It remains to be seen whether by applying other methods such as GOD, EPIK, AVI, SINTACS, PRK, would obtain the same results. DRASTIC is one of the most widely used and reliable methods for groundwater vulnerability mapping because of the related variables integrated. The results obtained in this study can be used as a basis for environmental management and as an important tool for land-use planning, and provide an excellent starting point for carrying out research aimed at the protection of water resources.

INTRODUCCIÓN

Las aguas subterráneas son un recurso valioso que merece especial atención. La experiencia de numerosos países ha venido a demostrar que la gestión integrada y concertada de los recursos hídricos constituye una necesidad imperiosa para un desarrollo socioeconómico sostenible. En las últimas décadas, el incremento de actividades antrópicas en las áreas de recarga de los acuíferos debido especialmente a las prácticas agrícolas, como es el caso que nos ocupa, ha puesto en peligro la calidad de las aguas subterráneas. Por este motivo se ha fomentado extraordinariamente los estudios de calidad de las aguas, si bien en regiones áridas como es la cuenca del R'mel en Marruecos, no hay que descuidar los aspectos de cantidad. Este artículo recoge parte de los trabajos contenidos en la tesis doctoral de Ben Driss que fue defendida en la Universidad Complutense (Ben Driss, 2009) y que se centraba en el análisis de la vulnerabilidad a la contaminación del acuífero de R'mel.

El término vulnerabilidad a la contaminación de un acuífero se aplica para representar las características intrínsecas que determinan su susceptibilidad a ser afectados adversamente por una carga contaminante que produzca cambios químicos, físicos o biológicos que superen los límites máximos establecidos en las normativas que regulan la potabilidad del agua (Foster, 1987).

La cartografía de la vulnerabilidad de acuíferos, es uno de los procesos más adecuados para preservar la calidad de las aguas subterráneas, ya que permite conocer las características naturales del terreno permitiendo de este modo proteger el acuífero de la acción de los diferentes contaminantes que puedan infiltrarse desde la superficie, asociados a fenómenos naturales o a la actividad del hombre. Si bien la metodología DRASTIC (Aller *et al.* 1987) ha sido muy utilizada en numerosos acuíferos (Auge, 2005; Vrba and Zaporec, 1994; Nicoletti and Spandre, 1996; Martínez *et al.* 1998), sin embargo, que sepamos, es la primera vez que se aplica al acuífero del R'mel cuyas características se explican a continuación.

CARACTERÍSTICAS GEOGRÁFICAS, CLIMÁTICAS E HIDROGEOLÓGICAS DEL ÁREA DE ESTUDIO

El acuífero de R'mel, objetivo de este trabajo, pertenece administrativamente a la Provincia de Larache (Fig. 1). Esta provincia ocupa una superficie de 2783 km² en el sector noroccidental de Marruecos. Destaca por su importante potencial hidroagrícola, ya que la actividad económica de esta provincia está basada esencialmente en la agricultura, la pesca y la industria agroalimentaria.

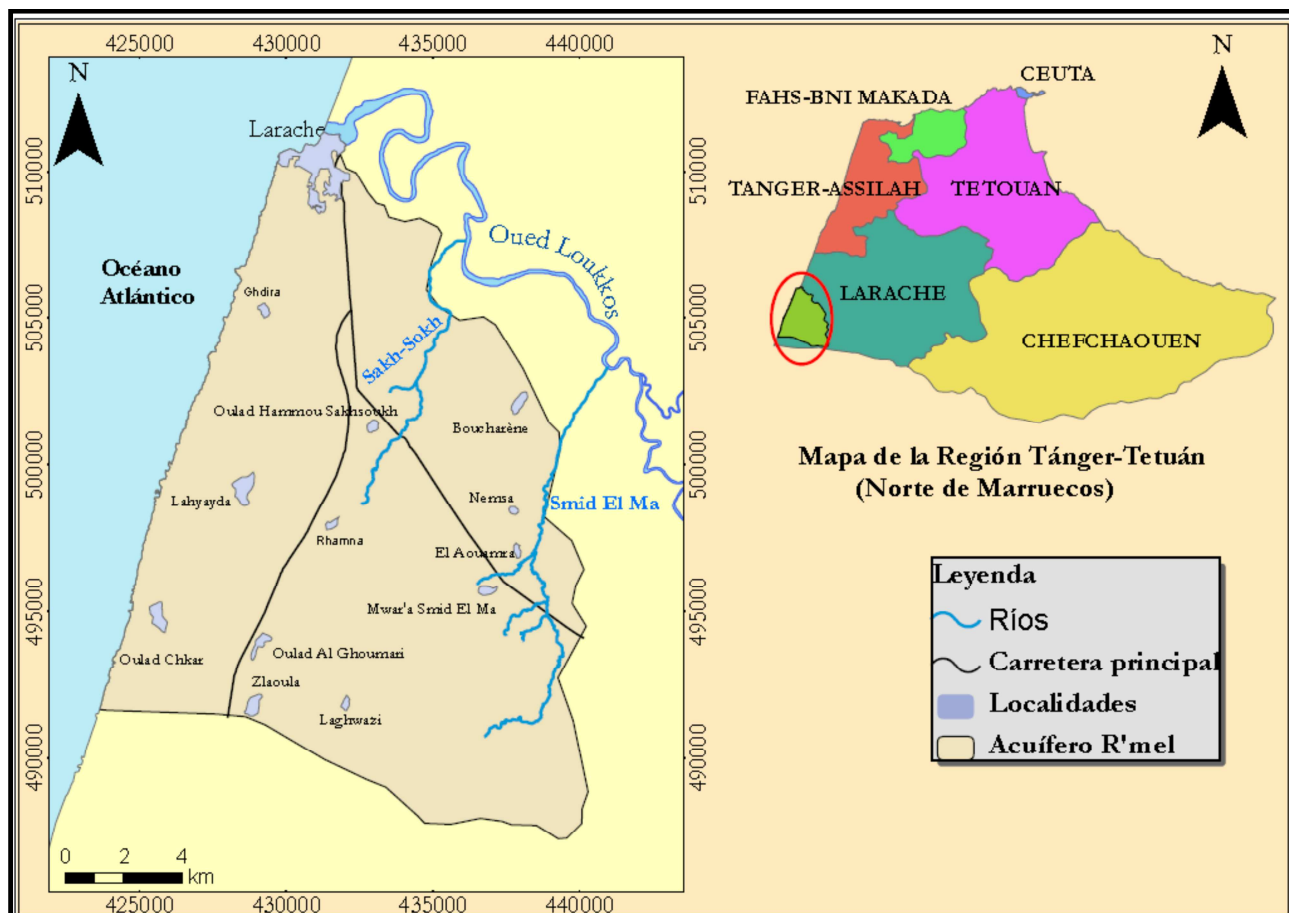


Fig.1. Mapa de localización de la zona de estudio

El acuífero de R'mel (Fig. 2, 4 y 5), se extiende sobre una superficie de unos 240 km² y está situado en la parte noroccidental de la cuenca del Bas-Loukkos, al sur de la ciudad de Larache. Limita con el Océano Atlántico al Oeste, con Oued Loukkos al Este y por los afloramientos Mio-Pliocenos margosos al Sur. Está drenado por los ríos Oued Sakh Sokh, Smid el Ma y el Kihel (ABHL, 2003).

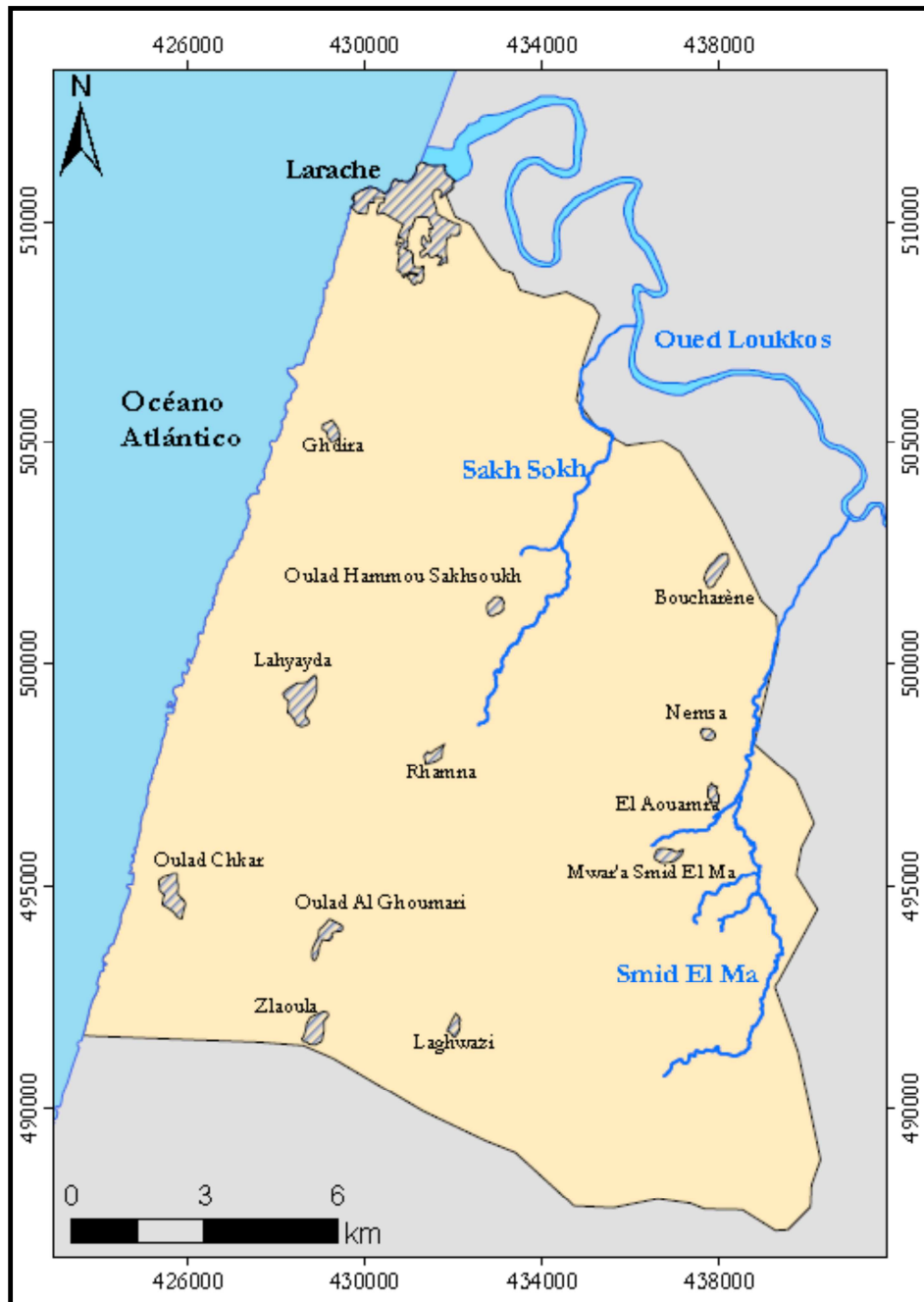
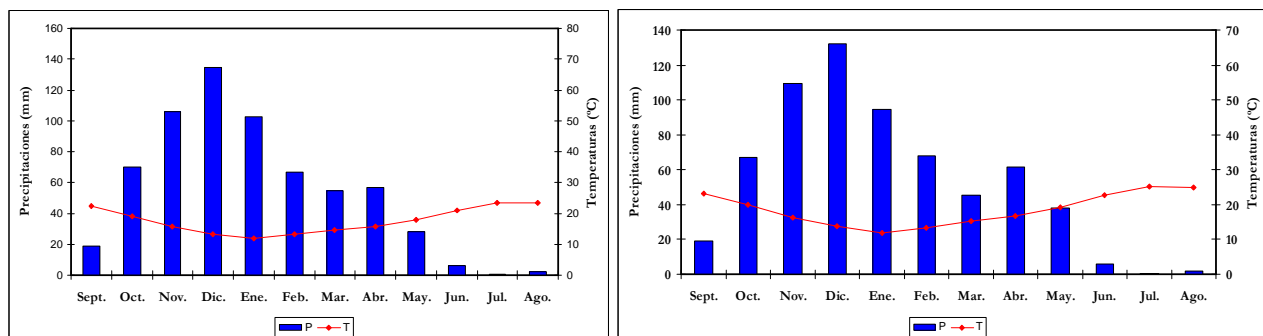


Fig. 2. Ríos de la cuenca Baja de Loukkos

Las lluvias se producen generalmente entre octubre y mayo, registrando una pluviometría media anual de 645mm, durante el periodo de 20 años (1989-2009). La precipitación anual máxima registrada fue de 1238 mm en 1995/96 y la mínima de 296 mm en 1998/99. La precipitación media mensual también registra variaciones muy considerables; el máximo observado en el mes de diciembre son 134.4 mm mientras que el valor mínimo de 0.7 mm se produce en el mes de julio. (Informes internos de la ABHL: 2003, 2005, 2006)

Presenta una temperatura media anual de 25°C con una estación seca que se extiende entre los meses de junio y septiembre. Según el índice de humedad, definido por la UNESCO en 1979, el clima de la zona es de tipo semiárido.



Estación de Larache

Estación de El Aouamra

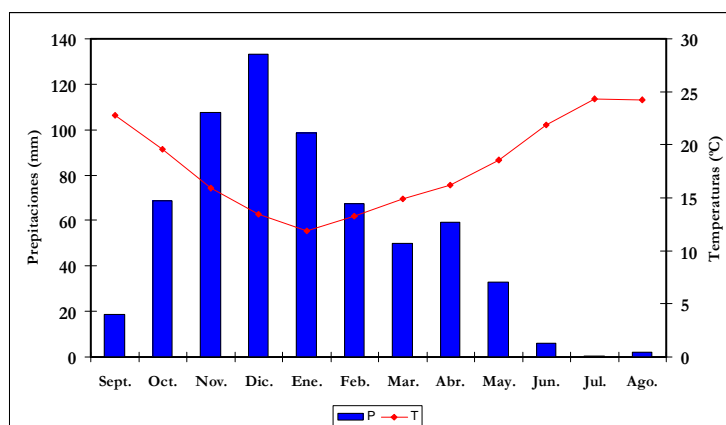


Fig. 3. Diagrama ombrotérmico de las medias de las estaciones de Larache y El Aouamra

(Elaboración propia a partir de los datos obtenidos a partir de las fichas de las dos estaciones climatológicas disponibles en la ABHL 1989-2009).

Para poder delimitar las zonas vulnerables en la cuenca de R'mel es imprescindible conocer los diferentes tipos de suelo existentes en la zona de estudio y su distribución. La mayor parte de la región está tapizada por seis tipos de suelos (ORMVAL, 1998):

- suelos arenosos
- suelos aluviales
- suelos arcillosos (tirs)
- suelos calcimorfes (calcimagnésicos)
- suelos turbosos

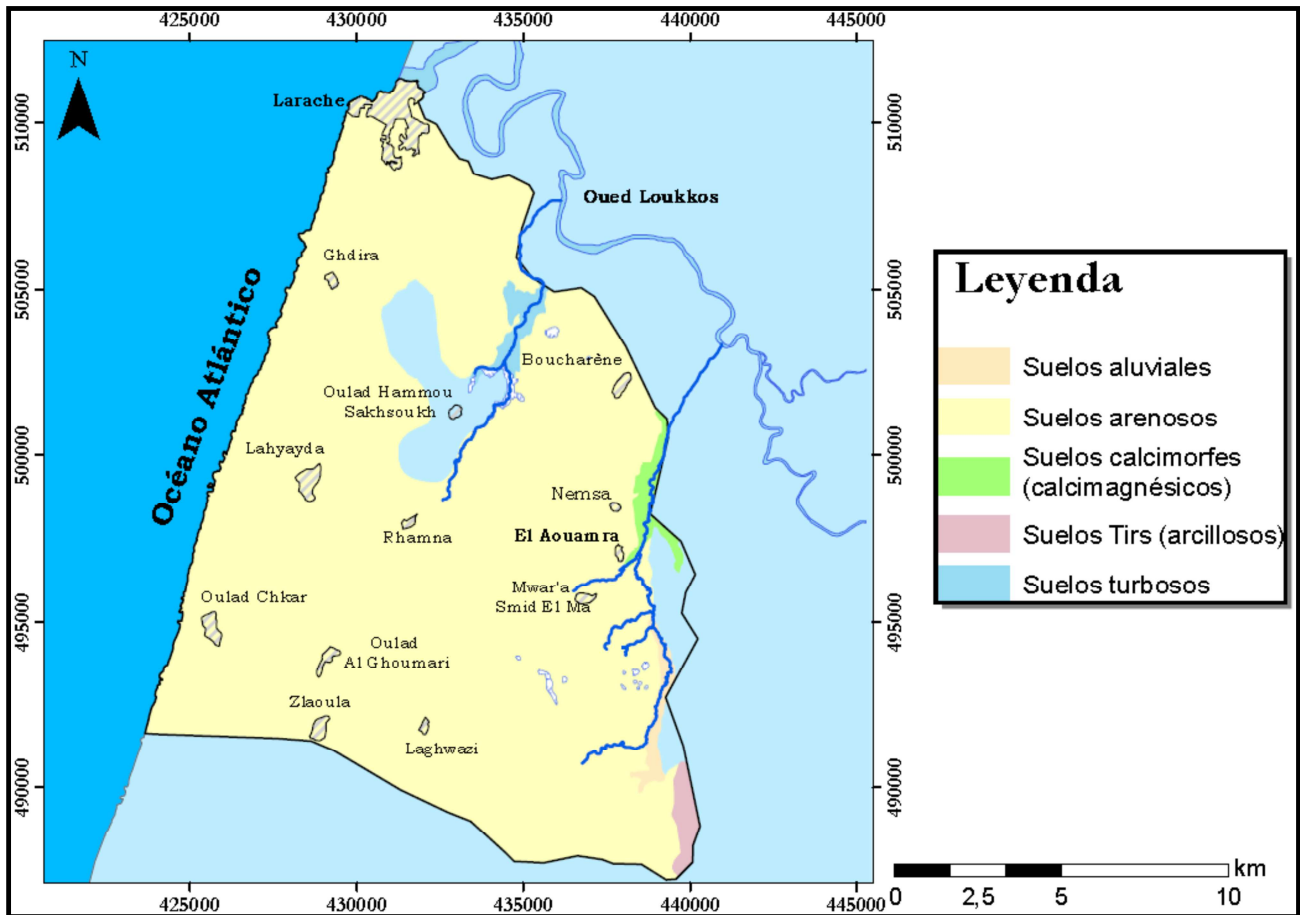


Fig. 4. Mapa pedológico de la planicie de R'mel (realizado a partir del mapa pedológico de la zona, ONI, 1962)

METODOLOGÍA

El movimiento de un contaminante desde la superficie del suelo hasta el agua subterránea puede tardar días o décadas antes de que el impacto de la contaminación resulte evidente en el acuífero. La descontaminación de acuíferos es muy costosa y no siempre se consigue eliminarla en su totalidad. Esta es una de las justificaciones que ha llevado a realizar el presente estudio de vulnerabilidad a la contaminación en el que se determinan las zonas de mayor a menor susceptibilidad que posee el sistema acuífero. La selección del método para evaluar la vulnerabilidad del agua subterránea en una región determinada depende de varios factores, entre los que destacan: el conocimiento y difusión de la metodología, la información disponible, el alcance de la evaluación y finalmente la validación de los resultados y su representación cartográfica (Auge, 2005). Cabe señalar que para la determinación de la vulnerabilidad de acuíferos se han establecido varios métodos: GOD, EPIK, AVI, SINTACS, PRK, DRASTIC... (Vrba y Zaporozec, 1994, Nicoletti y Spandre, 1996, Auge, 2005, Albinet y Margat, 1975). Hemos optado por aplicar el método DRASTIC por contar con todos los parámetros o variables que utiliza y por ser uno de los métodos, más contrastados.

El método DRASTIC es uno de los métodos más difundidos a nivel internacional para determinar la vulnerabilidad de acuíferos, tanto para la calificación (evaluación cualitativa) como para la cartografía. Es un método perteneciente al subgrupo PCSM (Point Count System Model) desarrollado por Aller *et al.* en 1987, muy utilizado por la Agencia de Protección Ambiental de EEUU con el objetivo de evaluar los riesgos de contaminación de las aguas subterráneas (Vrba y Zaporozec, 1994). Utiliza unos índices que van del 1 al 10, de acuerdo con las características y el comportamiento de las variables consideradas en el método. Clasifica y pondera parámetros intrínsecos, reflejo de las condiciones naturales del medio (Aller *et al.* 1987). El método utiliza siete parámetros de interés para el análisis a los que se asignan valores y un multiplicador (peso según su importancia). Los factores de clasificación se establecen del 1 al 10, mientras que los factores de ponderación varían según el factor implicado entre 1 y 5. Los criterios aplicados dan lugar al acrónimo con el que se conoce este método:

- D (depth to water): profundidad del nivel del agua;
- R (net recharge): recarga neta;

- A (aquifer media): formación geológica que constituye el acuífero;
- S (soil media): cubierta edáfica bajo la superficie del terreno;
- T (topography): pendiente del terreno;
- I (impact of vadose zone): tipo de material geológico de la zona no saturada;
- C (hydraulic conductivity): conductividad hidráulica del acuífero.

Así pues, las puntuaciones ponderadas se suman para obtener el índice DRASTIC:

$$ID = D_r D_w + R_r R_w + A_r A_w + S_r S_w + T_r T_w + I_r I_w + C_r C_w$$

donde los subíndices r y w significan factor de clasificación y factor de ponderación respectivamente. La valoración de los parámetros permite determinar los intervalos de vulnerabilidad a la contaminación y delimitar así áreas de mayor riesgo frente a un contaminante potencial. El índice ID oscila entre 23 (vulnerabilidad mínima) y 230 (vulnerabilidad máxima) aunque en la práctica el índice dominante varía entre 50 y 200 (Tabla 1). La tabla 2 hace referencia a los pesos atribuidos a cada parámetro del método, mientras que la Tabla 3 señala los códigos de colores que aparecerán en los mapas que resultan de la aplicación del método.

Tabla 1. Intervalos de los valores del índice DRASTIC y las clases correspondientes (Aller et al. 1987)

VULNERABILIDAD GENERAL	
Grado vulnerabilidad	Valor DRASTIC
Muy bajo	23-64
Bajo	65-105
Moderado	106-146
Alto	147-187
Muy alto	188-230

Para la realización de los siete mapas temáticos correspondientes a los parámetros (D, R, A, S, T, I y C), se ha procedido en primer lugar a la cartografía del acuífero de R'mel, después a la realización de los mapas de repartición de cada parámetro basados en los rangos determinados por el método DRASTIC. Esta labor ha sido realizada gracias al software ArcGis 9.3.

Tabla 2. Tabla recapitulativa de los pesos del método DRASTIC (Aller et al. 1987)

PARÁMETROS	PESO
D- Deep Water (Profundidad del acuífero) (m)	5
R- Recharge Net (Recarga Neta) (mm/año)	4
A- Aquifer Media (Tipo de Acuífero)	3
S- Soil Media (Tipo de Suelo)	2
T- Topography (Topografía, Pendiente) (%)	1
I- Impact of Vadose Zone (Impacto de la Zona No Saturada)	5
C- Conductivity Hydraulic (Conductividad Hidráulica del Acuífero) (m/día)	3

Tabla 3. Tabla recapitulativa de las puntuaciones y pesos DRASTIC (Aller et al. 1987)

Clase de vulnerabilidad	Color
Muy alta	Rojo
Alta	Rosa
Media	Amarillo
Baja	Verde
Muy baja	Azul

Como se ha dicho, a cada parámetro se le atribuye un peso constante que varía entre 1 y 5. Según el valor de los pesos, los parámetros obtenidos han sido agrupados en tres clases:

- Primera clase (peso 5) para la profundidad del agua (D) y la zona no saturada (I);
- Segunda clase (pesos 4 y 3) para la recarga (R) con un peso 4, y zona saturada (A) y la conductividad hidráulica (C) con un peso 3;
- Tercera clase (pesos 2 y 1) atribuidos al tipo de suelo (S) con un peso 2 y a la pendiente (T) con un peso 1.

ANÁLISIS Y RESULTADOS

- **La profundidad del agua (D)** (Fig. 5) es un parámetro importante ya que determina el espesor de los materiales a través de los cuales puede circular un contaminante antes de alcanzar el nivel del agua. Generalmente la capacidad de atenuación aumenta con la profundidad del nivel de agua. La evaluación del parámetro D ha sido realizada a partir de 70 puntos de agua inventariados, repartidos prácticamente por casi la totalidad del área de estudio. La profundidad del agua se reparte entre 0.9 y 64 m.

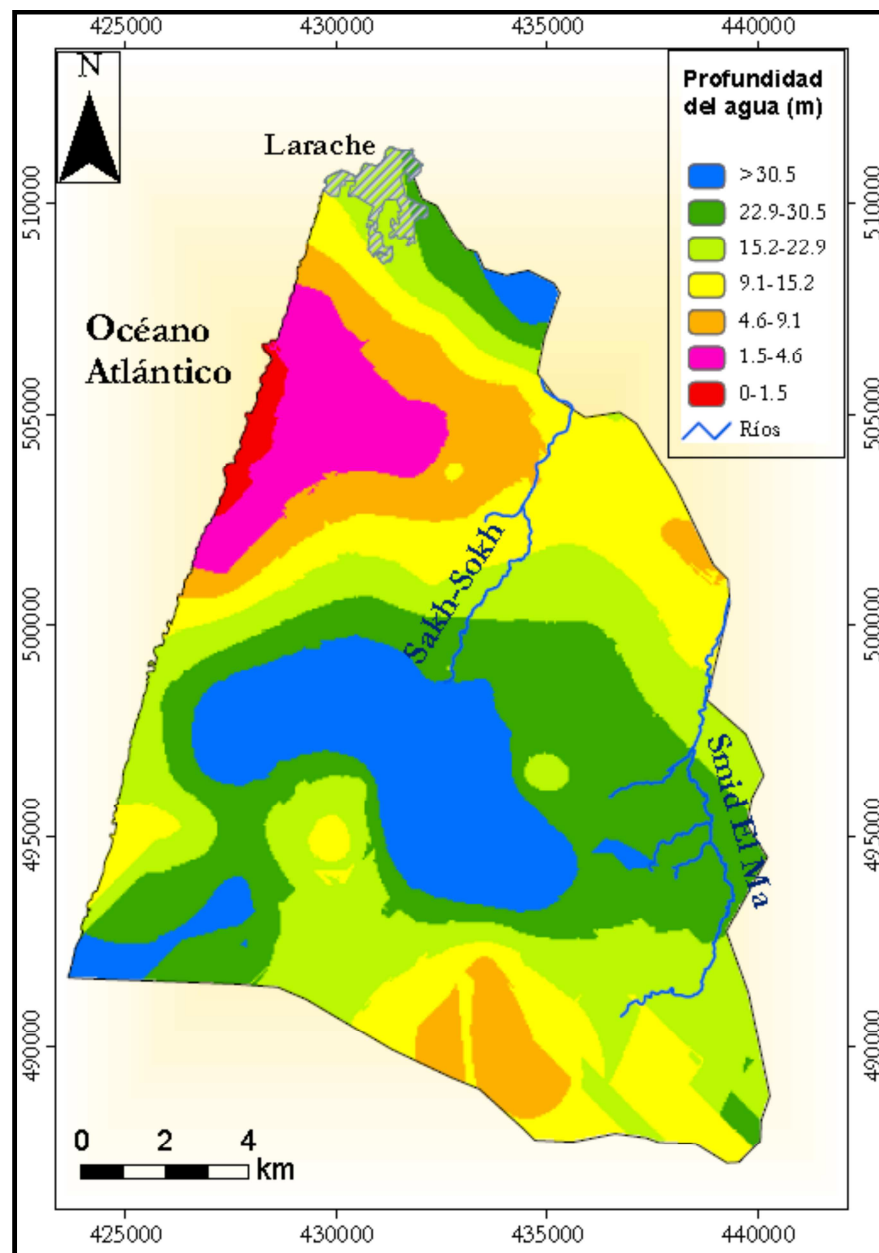


Fig. 5. Mapa temático del parámetro D del método DRASTIC en el acuífero de R'mel

Tabla 4. Valoración de la profundidad agua subterránea

PROFUNDIDAD (m)	CLASIFICACIÓN (D _R)
0 - 1.5	10
1.5 - 4.6	9
4.6 - 9.1	7
9.1 - 15.2	5
15.2 - 22.9	3
22.9 - 30.5	2
> 30.5	1

La estimación de la vulnerabilidad relativa a este parámetro (Tabla 4) nos ha permitido distinguir siete clases que agrupamos en tres grupos según la profundidad del agua. Las zonas más vulnerables son aquellas en las que el nivel piezométrico se encuentra a menos de 4,5m (puntuaciones: 10 y 9) cubriendo el 11,33% de la superficie total. Estas zonas se localizan en el extremo Noroeste de la planicie. Las zonas medianamente vulnerables en las que las profundidades varían entre 4,5 y 15m (puntuaciones: 7 y 5) se reparten sobre el 30,65% de la superficie total de la planicie, localizadas en la parte septentrional y en el extremo meridional del acuífero. Las zonas menos vulnerables son aquellas en las que la profundidad del nivel piezométrico supera los 15m (puntuaciones: 3, 2 y 1) representando así el 58% de la superficie total y se localizan en el centro y en el extremo Noreste de la planicie.

- **La recarga (R)** es una de las variables más difíciles de determinar. Depende de las precipitaciones, de la evapotranspiración, de la escorrentía, del tipo de suelo y de otros factores antrópicos, como es el caso de la actividad agrícola (y los retornos de riego) que predomina en la zona. El valor de la recarga anual que utilizó Larabi (2004) para la aplicación de un modelo matemático en toda la zona fue de 225 mm y se le ha asignado una puntuación de 9. Esta recarga es anómalamente alta y merecería una comprobación rigurosa para su verificación (El Kellouti, 2004, ORMVAL, 2008). No obstante de cara a este estudio, dado que no hay que introducir este valor cuantitativo, se ha asignado una puntuación homogénea para toda la zona.
- Las características hidrodinámicas de la **zona saturada (A)** influyen de manera importante en la dilución, la difusión y el tiempo de estancia de los contaminantes y eventualmente la calidad de las aguas del acuífero. Con el objetivo de evaluar la vulnerabilidad relativa a la zona saturada, el estudio de la superficie piezométrica es fundamental y permite poner en evidencia la variación del gradiente hidráulico, la dirección y sentido del flujo. Se ha distinguido tres tipos de clases (Fig. 6):
 - * clase 1 (puntuación 5, color verde), que representa el 17,61% del total de la superficie y está caracterizada por el predominio de areniscas margosas y/o limosas y pueden en algunos lugares presentarse en forma de intercalaciones de capas de arena y de grava.
 - * clase 2 (puntuaciones 6 y 7, colores amarillo y naranja respectivamente), que representa el 80,94%, caracterizada por el predominio de arenas permeables y arenisca con algunas intercalaciones de grava y gravilla.
 - * clase 3 (puntuación 8, color rosa) que sólo representa el 1,45% que se caracteriza por suelos arenosos.

Las zonas delimitadas en la clase 2 son más vulnerables que las de clase 1. En esta última, la granulometría fina de la litología del acuífero favorece la infiltración de los contaminantes que han escapado al poder de retención del suelo y de la zona no saturada.

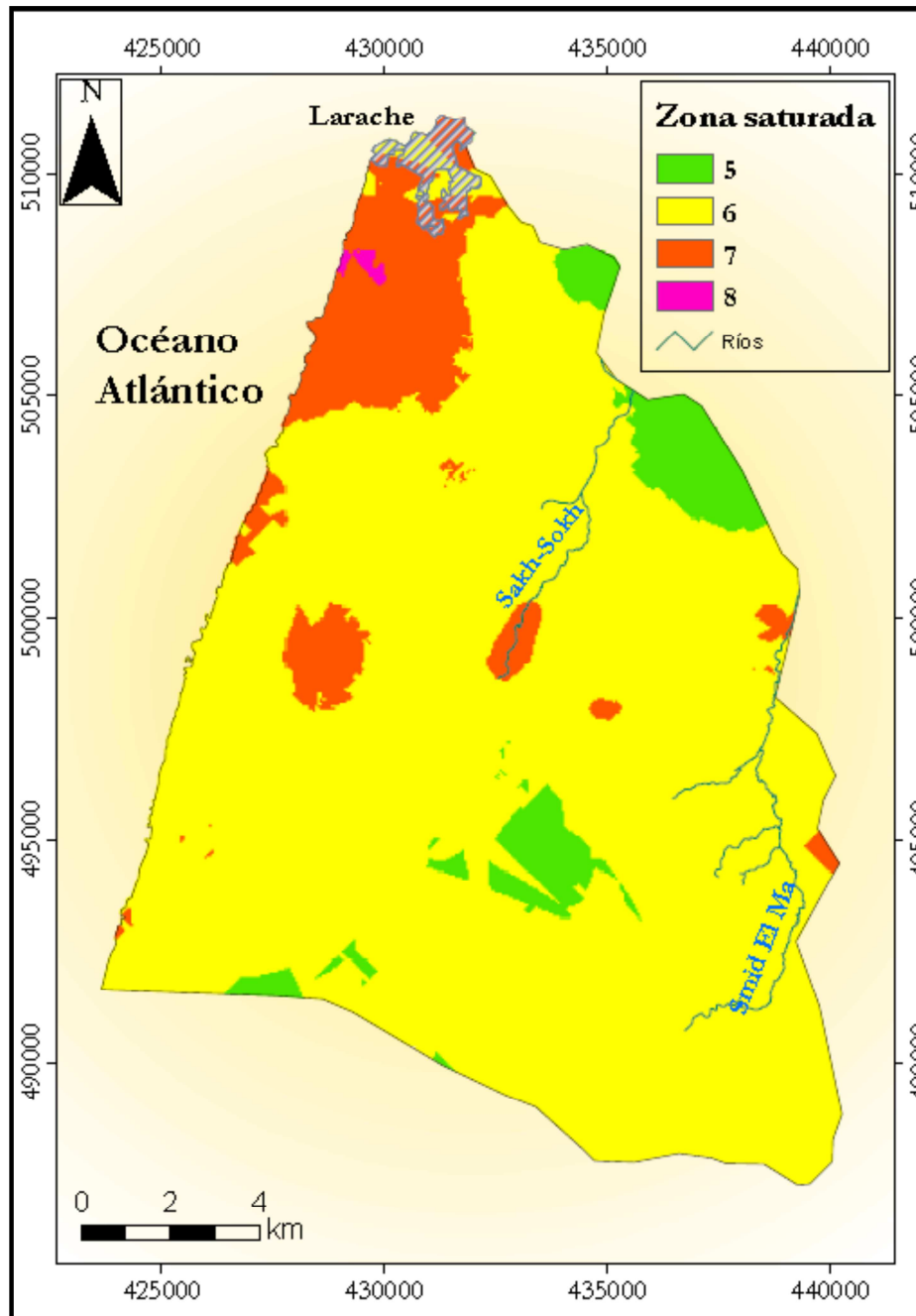


Fig. 6. Mapa temático del parámetro A del método DRASTIC. Verde: areniscas limosas; amarillo: arenas permeables; naranja: areniscas; rosa: suelos arenosos.

- **El suelo (S)** representa la superficie en la que dominan las actividades contaminantes, y por lo tanto la barrera que a la que se enfrentan los contaminantes durante su infiltración hacia el acuífero. La concentración de un contaminante puede disminuir considerablemente en el acuífero gracias al poder auto-depurador del suelo (Fig. 7).

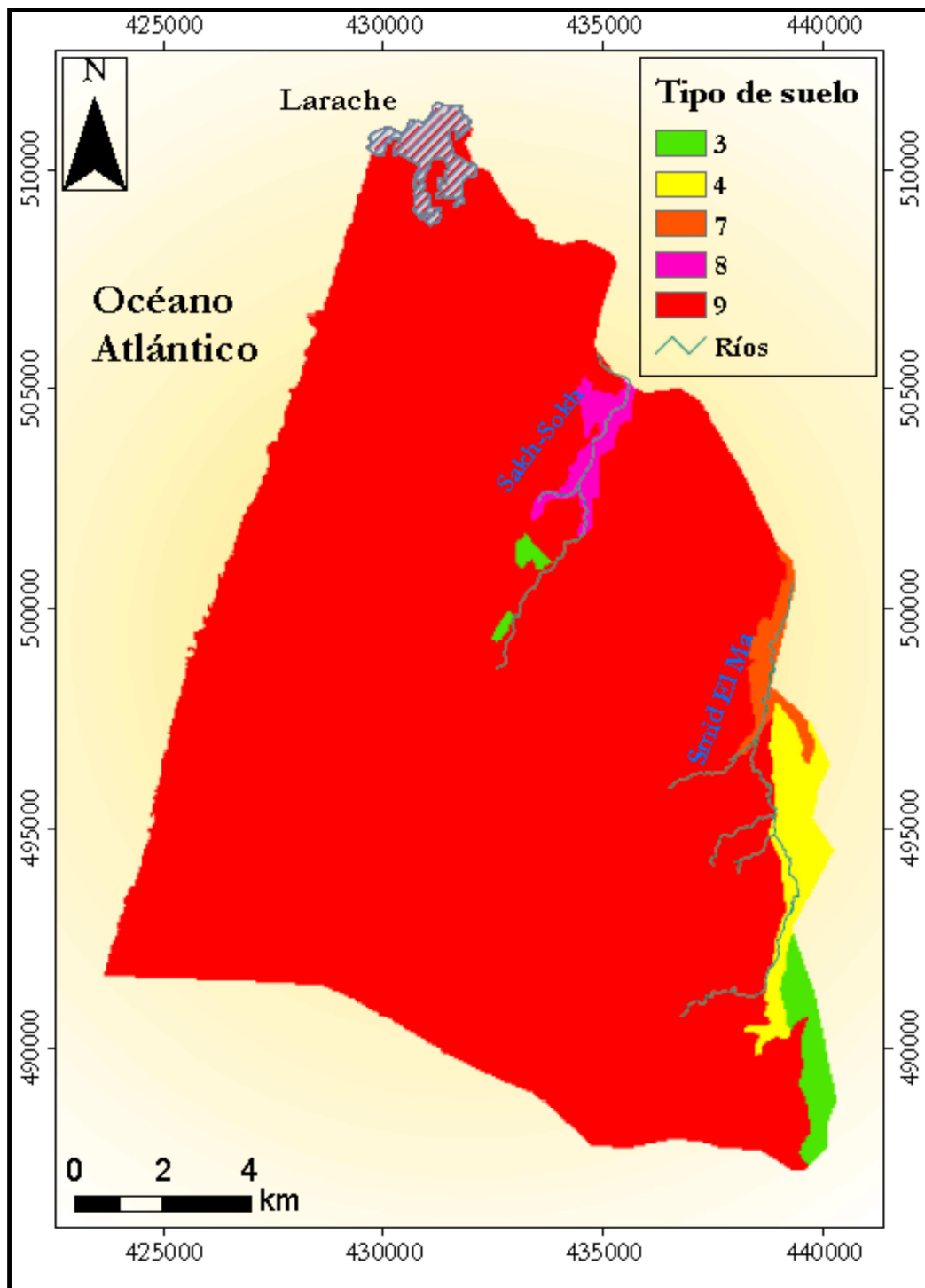


Fig. 7. Mapa temático del parámetro S del método DRASTIC. Los colores 3, 4, 7 y 8 representan suelos con textura arcillosa y/o arcillo-limosa y el color 9, textura arenosa.

Se han obtenido 5 clases con el predominio de la clase 9 (color rojo) que representa el 94,33% de la superficie total, con textura arenosa. Las otras cuatro clases (puntuaciones 8, 7, 4 y 3; colores rosa, naranja, amarillo y verde respectivamente) representan el 5,67%, presentando textura arcillosa y/o arcillo-limosa que se localizan en el extremo borde sureste y una zona estrecha en el noreste de la planicie. La zona de la primera clase es más vulnerable que las demás zonas.

➤ **La topografía (T)** del terreno natural influye sobre la infiltración de las aguas de lluvia cargadas de contaminantes en las formaciones acuíferas. Efectivamente, contrariamente a una pendiente baja, una pendiente mayor favorece la scorrentía

de las aguas lo que disminuye la infiltración de los contaminantes. La evaluación del parámetro (T) en la zona de estudio ha sido determinada automáticamente a partir de un modelo numérico de terreno (MNT) obtenido por la digitalización de las curvas de nivel de los mapas topográficos que cubren el área (Larache y Lalla Mimouna) a escala de 1/50.000. Estas curvas han sido transformadas en mapa de elevación mediante 3D Analyst, que posteriormente nos ha permitido calcular la pendiente en porcentaje (Fig. 8).

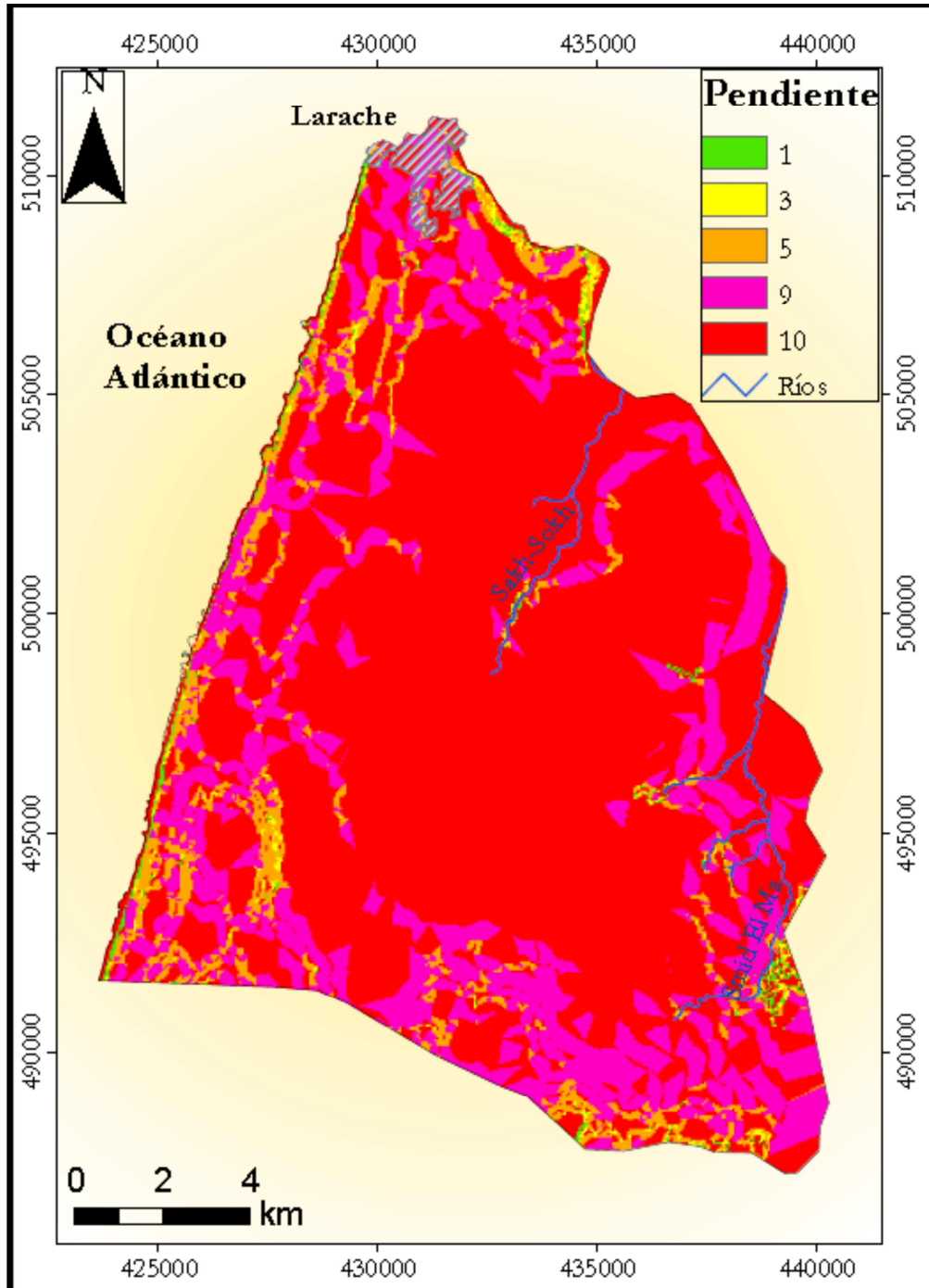


Fig. 8. Mapa temático del parámetro T del método DRASTIC. Pendiente de 0 a 6% corresponde a las clases 9 y 10 señaladas con colores rosa y rojo. Pendiente entre 6% y 18% corresponde a las clases 3 y 5 señaladas con colores amarillo y naranja, respectivamente. El color verde indica zona con pendiente superior al 18%.

A partir del mapa de pendientes, se han distinguido cinco clases: una pendiente de 0 a 6% que cubre 91,39% de la superficie total (clases 10 y 9 representadas con los colores rojo y rosa respectivamente), lo que indica una baja protección del acuífero contra la contaminación, y por consiguiente se consideran zonas más vulnerables. La pendiente se eleva gradualmente hacia los bordes oscilando entre 6 y 18% cubriendo el 6,97% de la superficie total de la planicie (clases 5 y 3 representadas respectivamente en el mapa con los colores naranja y amarillo), mientras que la pendiente sobrepasa los 18% en el resto de la superficie de la planicie (1,64%) y que está representada con el color verde.

- **Zona no saturada (I).** El contaminante, después de atravesar la superficie del suelo, se desplaza según una trayectoria subvertical atravesando la zona no saturada. Ésta se caracteriza por la presencia de materias orgánicas, materiales arcillosos y otros elementos. En ella, el agua adquiere sus características físico-químicas y bacteriológicas. Los parámetros más pertinentes que se deben tomar en consideración para el estudio de vulnerabilidad relacionada con la zona no saturada, son aquellos susceptibles de ejercer una eventual función de retrasar el tránsito vertical de los contaminantes. Se trata esencialmente del espesor de la zona vadosa o no saturada hasta alcanzar la superficie freática. A partir del inventario de puntos de agua y de las columnas litológicas se ha deducido el espesor de la zona no saturada. Se han distinguido tres clases (Fig. 9):

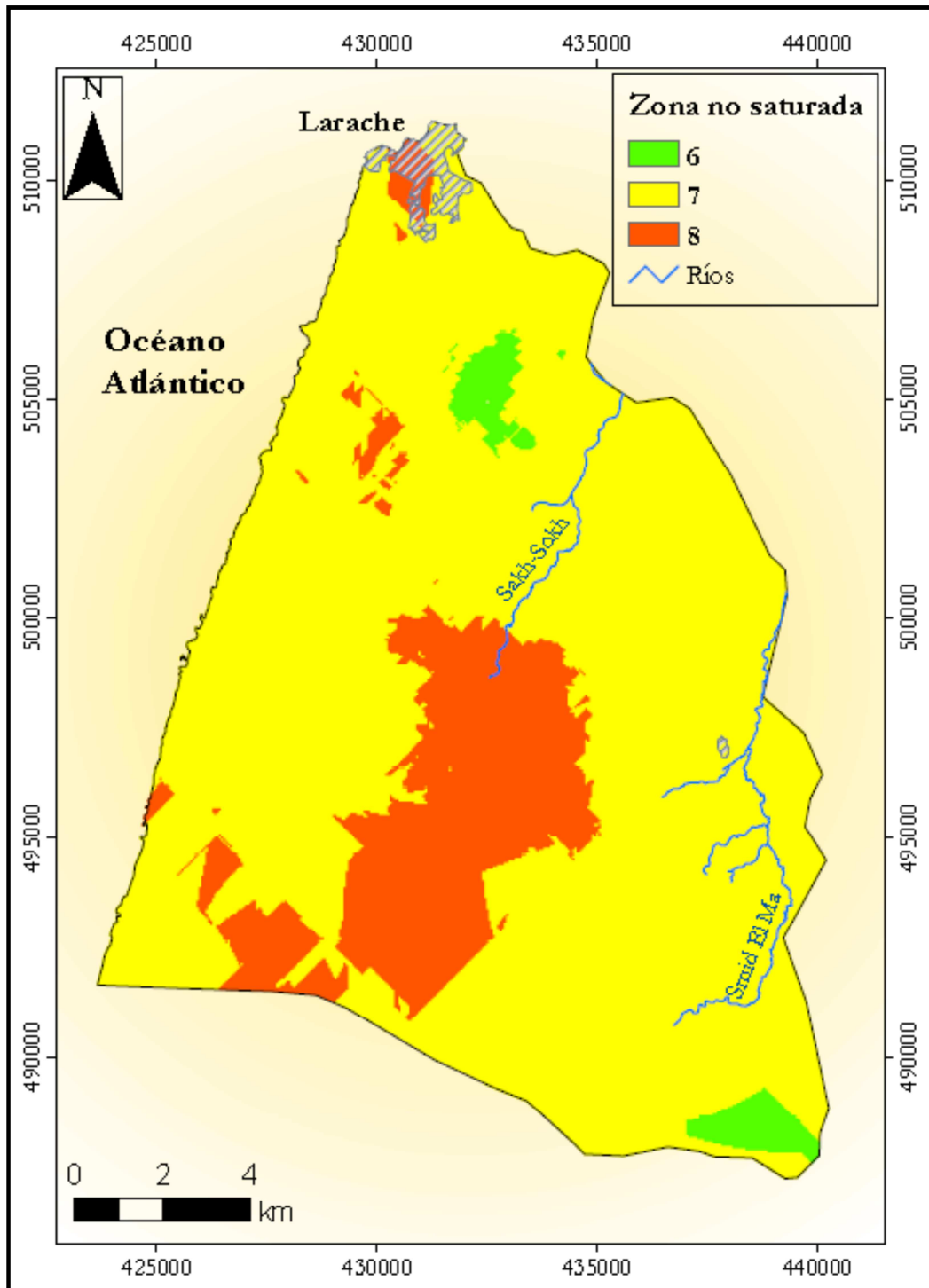


Fig. 9. Mapa temático del parámetro I del método DRASTIC. El color verde indica predominio de areniscas, el color el color amarillo indica la presencia de arenas y areniscas-arenosas y el color naranja la presencia de arenas eólicas.

- la primera clase (puntuación 6) que representa el 3,01% de la superficie total de la planicie, se caracteriza por el predominio de areniscas, localizada esencialmente en el extremo sureste y en la parte superior de la planicie (color verde),
- la segunda clase (puntuación 7) que representa el 85,19% del total de la superficie, cubre la mayoría de la planicie. Esta zona se caracteriza por el predominio de arenas y areniscas arenosas (color amarillo);

- la tercera clase (puntuación 8), se extiende sobre la parte central y suroccidental de la planicie con 11,80% de la superficie total. Se caracteriza por la existencia de arenas dunares y por consiguiente es considerada más vulnerable que las demás (color naranja).
- Para evaluar el valor de la **conductividad hidráulica del acuífero (C)**, se ha utilizado los valores obtenidos en un trabajo de modelización matemática (Larabi, 2004). Los valores de conductividad hidráulica varían entre 0.77 y 22.64 m/día. Los valores del parámetro “conductividad hidráulica” están clasificados para cada píxel en función del sistema de puntuación del método DRASTIC. El mapa obtenido del parámetro de la conductividad hidráulica muestra tres clases (Fig. 10):
- la zona menos vulnerable ocupa 36,44% (puntuación 1, color azul en el mapa) situada en la parte este de la planicie;
- la zona más vulnerable (puntuación 4, color amarillo en el mapa) que representa el 12,41% de la superficie total de la planicie se localiza en la parte noroccidental y en el extremo sur-suroccidental;
- el resto, que representa más de la mitad de la superficie total (51,15%) con una puntuación 2, donde la conductividad hidráulica está entre 4 y 12 m/día, son zonas medianamente vulnerables.

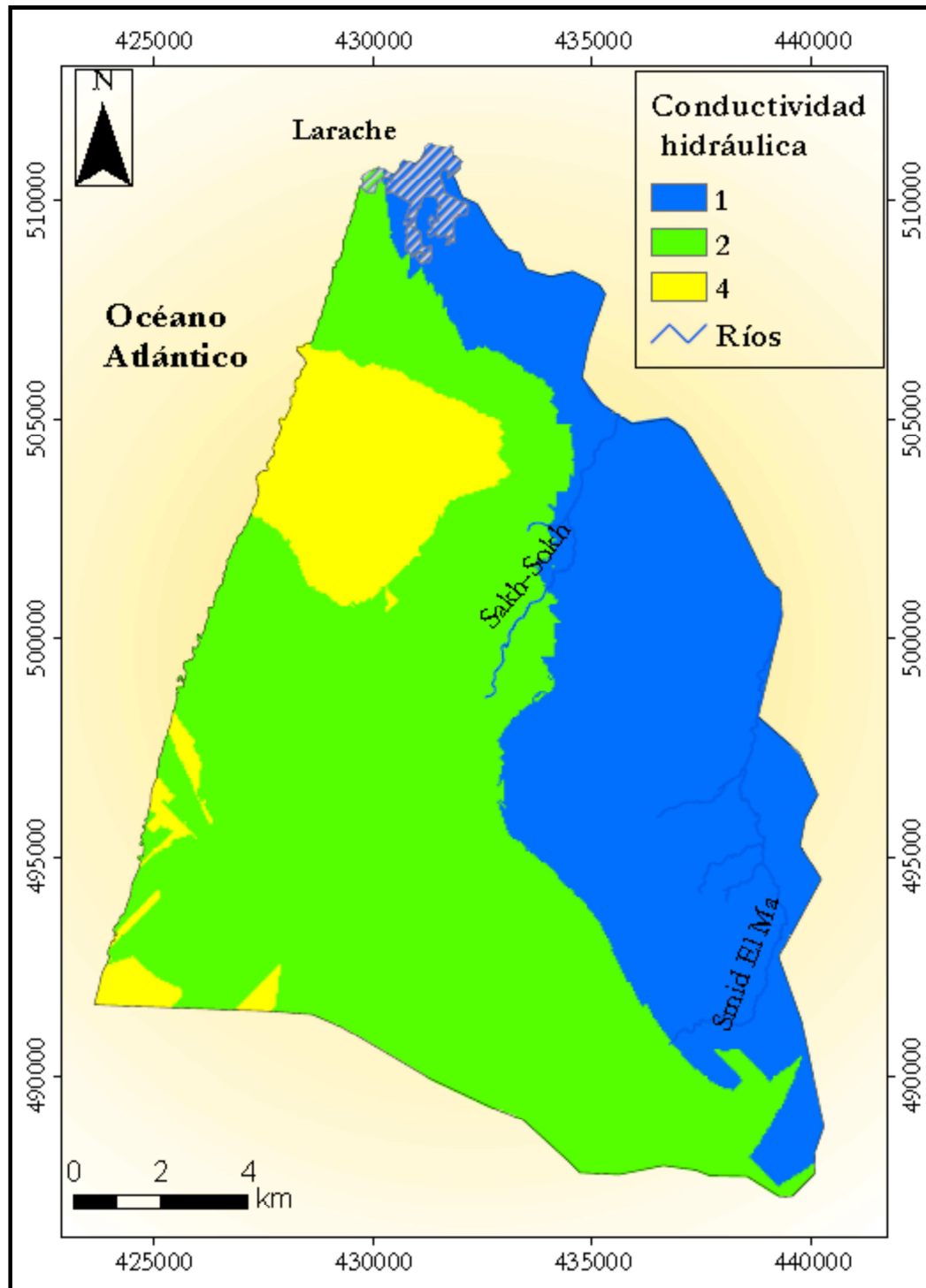


Fig. 10. Mapa temático del parámetro C del método DRASTIC. El color azul significa zona menos vulnerables, amarillo señala la zona más vulnerable y verde zonas intermedias de vulnerabilidad.

MAPA DE VULNERABILIDAD: DISCUSIÓN Y RESULTADOS

La evaluación de la vulnerabilidad mediante el índice DRASTIC se obtiene mediante la suma ponderada de las siete puntuaciones correspondientes a los siete parámetros utilizados por el método. La superposición de los siete mapas temáticos nos ha permitido obtener el mapa de vulnerabilidad (Fig. 11). Se distinguen cuatro intervalos de índice DRASTIC. Cada índice representa un grado de vulnerabilidad de las aguas subterráneas a la contaminación en el acuífero de R'mel. Resalta a primera vista la predominancia de las zonas con vulnerabilidad muy baja (puntuación entre 80-99) (Tabla 2). La

zona con vulnerabilidad nula (puntuación 23-79) está identificada por la primera clase establecida por Aller *et al*, 1987 (Tabla 2), mientras que la vulnerabilidad baja (puntuaciones 100-119) pertenece a la tercera clase, y el resto pertenece a la clase cuarta con vulnerabilidad moderada (120-139 de puntuación). El resultado es que el 70,47% de la superficie total es de vulnerabilidad muy baja, el 17,94% de vulnerabilidad baja, el 6,75% de vulnerabilidad moderada y el 4,84% no presenta vulnerabilidad alguna (Fig. 12).

Los grados de vulnerabilidad más elevados (vulnerabilidad moderada) se localizan esencialmente en la parte noroeste de la zona de estudio al sur de la ciudad de Larache. Ese fenómeno se explica por la escasa profundidad del nivel del agua y por la naturaleza permeable de las formaciones litológicas presentes en esta zona.

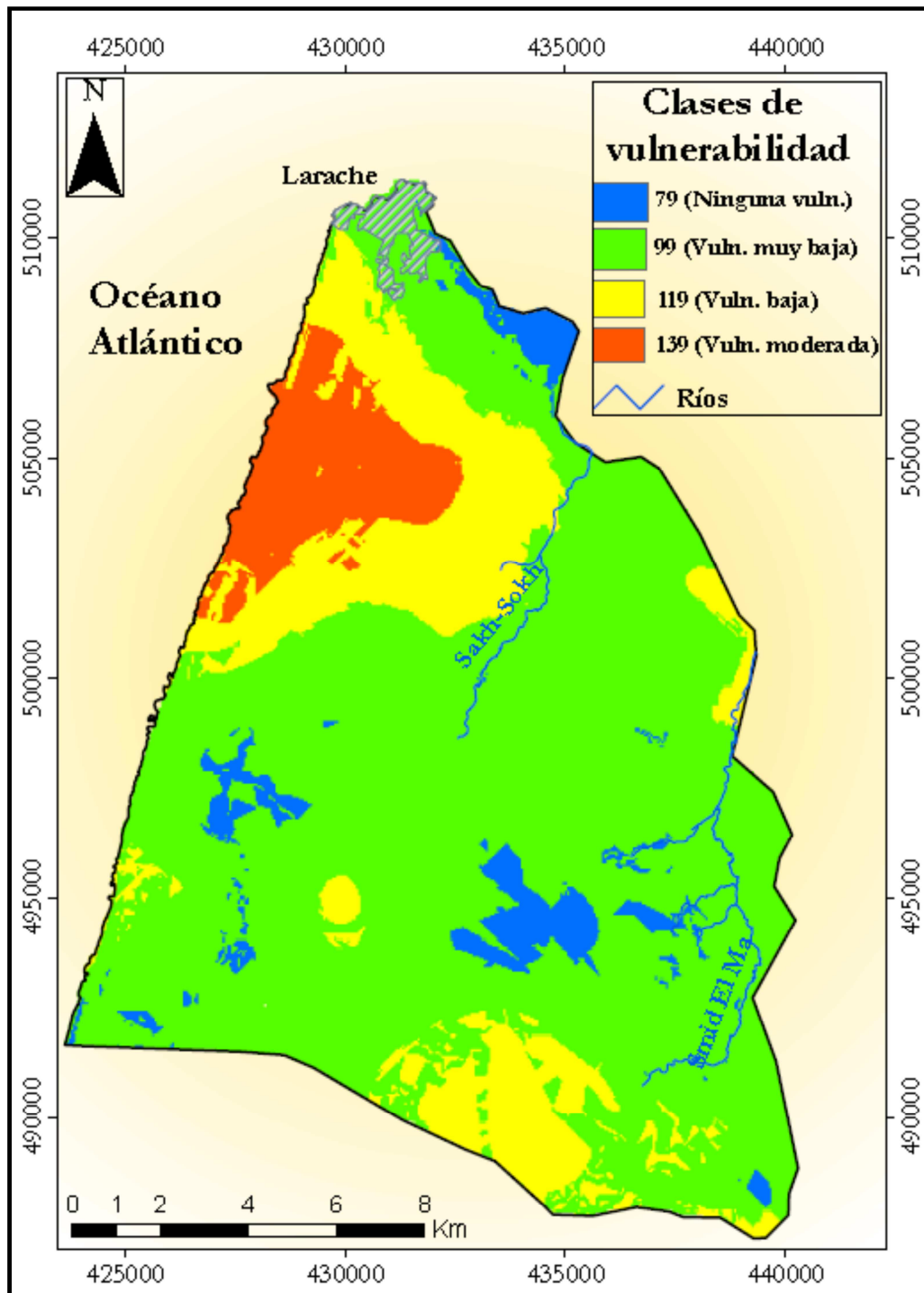


Fig.11. Mapa de vulnerabilidad del método DRASTIC

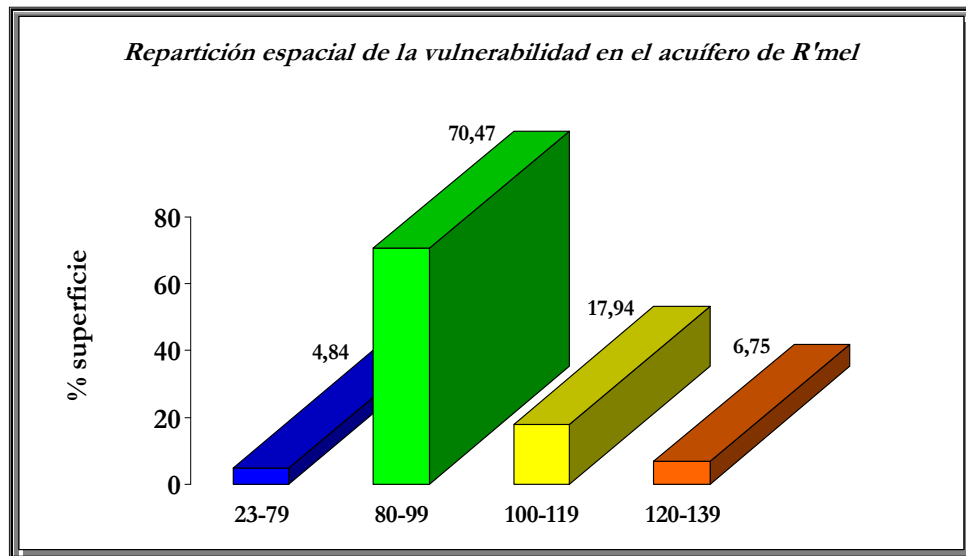


Fig.12. Distribución geográfica de las clases de vulnerabilidad

Las zonas de vulnerabilidad muy baja ocupa casi los tres tercios de la superficie total a excepción de algunas pequeñas zonas encontradas con nula o baja vulnerabilidad. Esto se debe a que la profundidad del agua es muy grande, por lo que retarda el proceso de infiltración del contaminante aunque no lo impide.

Faltaría conocer si con la aplicación de los otros métodos mencionados GOD, EPIK, AVI, SINTACS, PRK, se obtendrían los mismos resultados. En cualquier caso, los resultados obtenidos en este trabajo deben servir a la administración responsable en materia de ordenación del territorio para tenerlos en cuenta a la hora de establecer planes y programas que afecten al territorio.

CONCLUSIÓN

Los SIG son una herramienta muy importante en el estudio del medio ambiente y de la modelización espacial de los fenómenos naturales ya que permite analizar grandes cantidades de datos espaciales. El método DRASTIC es uno de los más utilizados para realizar mapas de vulnerabilidad de aguas subterráneas, y es muy confiable gracias a las variables relacionadas que integra. Los resultados obtenidos mediante este estudio se convierten en una base de gestión ambiental, y en una importante herramienta para estudios de la ordenación territorial. Constituye un buen punto de partida para la realización de trabajos de investigación encaminados a la protección los recursos hídricos.

AGRADECIMIENTOS

La labor de edición de este trabajo ha sido posible merced a los proyectos REPSOL-UCM nº 4154596 y al Proyecto nº P2013/MAE-2739 CARESOIL (Caracterización, remediación, modelización y evaluación del riesgo de suelos contaminados) financiado por la Comunidad de Madrid (Consejería de Educación, Juventud y Deporte).

REFERENCIAS

- [1] ABHL (Agence du Bassin Hydraulique du Loukkos) (2003). Nappe de R'mel: situation des ressources en eau, état de mobilisation et perspectives de développement. Août 2003. Inédito.
- [2] Albinet, M. and Margat, J. (1975). Cartographie de la vulnérabilité à la pollution des nappes d'eaux souterraines. Bull. BRGM, 2^e Série 3(4) Págs.: 13-22. Orléans. France.
- [3] Aller, L., Bennet, T., Lehr, J., Petty, R. and Hackett, G. (1987). DRASTIC: A Standardise System for Evaluating Groundwater Pollution Potential Using Hydrogeologic Setting. National Water Well Association. Dublin Ohio. EPA, Oklahoma. USA, EPA-600/2-87-035.
- [4] Arbai, A. (1999). Etude hydrogéologique et modélisation de la nappe de R'mel. Projet de fin d'études. Ecole Hassania des Travaux Publics- Maroc.

- [5] Auge, M. (2005). Vulnerabilidad de Acuíferos. Conceptos y Métodos. Ebook: <http://tierra.rediris.es/hidrored/ebvulnerabilidad.html>. Entrada abril 2012.
- [6] Ben Driss, N. (2009). Evaluación y cartografía de vulnerabilidad a la contaminación en el acuífero de R'mel (Larache, Marruecos) y contribución a la realización del mapa de riesgo. Tesis doctoral. Facultad de Ciencias Geológicas. UCM. Madrid
- [7] DRHL (Direction Régionale de l'Hydraulique de Loukkos) (1999). Etude hydrogéologique et modélisation de la nappe de R'mel. Note de synthèse. Informe inédito.
- [8] El Katari, A. (2000). Étude hydrogéologique quantitative et qualitative de la nappe de R'mel de Larache du bassin du Bas-Loukkos au Nord Ouest du Maroc. Etude de l'impact des activités humaines sur la qualité de l'encaissant et de l'eau souterraine. Thèse de Doctorat en Sciences de l'Environnement. Fondation Universitaire Luxembourgeoise. Arlon. Belgique.
- [9] El Kellouti, M. (2004). Modernisation de la gestion de l'irrigation dans le périmètre du Loukkos (Maroc). Séminaire sur la modernisation de l'agriculture irriguée, 10 p. IAV Hassan II, Rabat, 2004
- [10] Foster, S. (1987). Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy. In: Van Duijvenbooden W, Van Waegeningh HG (eds), Vulnerability of soil and groundwater to pollutants. Proc Inf TNO Comm. Hydrol Res., The Hague 38: 69–86.
- [11] Larabi, A. (2004). Programme de gestion des ressources en eau: Modélisation de l'Intrusion Marine dans la Nappe de R'mel (région de Larache, Maroc), Rapport FAO (internal report).
- [12] Martínez, M., Delgado, P. y Fabregat, V. (1998). Aplicación del Método DRASTIC para la evaluación del riesgo de afección a las aguas subterráneas por una obra lineal. Jornadas sobre la contaminación de las aguas subterráneas: un problema pendiente. Edit AIH-GE. Madrid.
- [13] Nicoletti, F. and Spandre, R. (1996). Valoración del Riesgo de Contaminación de las aguas subterráneas por nitratos mediante el uso de los modelos paramétricos DRASTIC y SINTACS. Ingeniería del Agua, vol.3, No 4, pp. 7-24.
- [14] ORMVAL (Office Office Régionale de Mise en Valeur Agricole) (1998). Etude d'évaluation environnementale du périmètre du Loukkos. Rapport final- Description de l'environnement, et identification et évaluation des effets sur l'environnement. Groupement CID/nedeco/maroc developpement. Projet financé par Kreditanstalt Fur Wiederaufbau (KfW) de l'Allemagne. Mars 1998.
- [15] ORMVAL (2008). Monographie de la zone d'action de l'Office Régionale de Mise en Valeur Agricole du Loukkos. (Inédito).
- [16] ONI (Office Nationale d'irrigation) (1962). Aménagement du bassin de l'Oued Loukkos, rapport préliminaire. V- Pédologie. SCET-COOPERATION-MAROC.
- [17] VRBA, J. and ZAPOROZEC, A. (1994). Guidebook on mapping groundwater vulnerability. International Association of Hydrogeologists, vol. 16. Ed. Heise.131p.