

Utilización de mapas de resistividad eléctrica de alta resolución en un estudio de vulnerabilidad de una cuenca de captación

Michel Dabas,^{1*} Thomas Jubeau,¹ Dominique Rouiller,² Jean-Marie Larcher,² Severine Charriere³ y Thibault Constant³ ilustran con un caso de estudio francés la contribución de la geofísica de alta resolución con fines agrícolas y, en concreto, de las mediciones de la resistividad eléctrica (RE) aparente a tres profundidades de investigación utilizando un sistema ARP especialmente desarrollado para determinar la vulnerabilidad intrínseca de una zona de captación de aguas al peligro de contaminación.

El Reglamento CE 2000/60/CE establece objetivos ambientales en lo que respecta a la reconquista de la calidad del agua potable. Los gobiernos deben garantizar la protección de las zonas captación de aguas para evitar el deterioro de su calidad y para reducir el grado de tratamiento necesario para la producción de agua potable. Para ello, deben establecer áreas protegidas para esas captaciones de agua.

Con el fin de definir mejor los planes de acción y para dirigir y tratar de forma jerárquica los territorios de acción dentro de las zonas de protección también es necesario definir las zonas más vulnerables a los peligros de contaminación dentro de las zonas de captación. En el marco de los acuerdos de Grenelle para el medio ambiente, en Francia se seleccionaron 507 captaciones de agua y se definió que necesitaban protección.



Figura 1 ARP en acción.

En el caso de la zona de captación de Ambleville (valle del Oise) y su mención como un área prioritaria de captación según Grenelle, fueron necesarios estudios complementarios para perfeccionar la comprensión de su funcionamiento. Las captaciones de agua locales utilizan manantiales de las calizas lutecienses y muestran una elevada tasa de nitratos y pesticidas. El entorno inmediato se caracteriza por tener viviendas y terrenos cultivables. La superficie cultivada se estima en 382 ha. El objetivo es llevar a cabo una cartografía agro-pedológica y crear mapas de vulnerabilidad intrínseca del área de captación de Ambleville (459 ha) con el objetivo de comprender mejor los procesos hidrogeológicos y geológicos vinculados a la pedología de la cuenca. La originalidad de este estudio fue la agrupación entre los tres socios: Geocarta para el establecimiento de la cartografía geofísica utilizando los programas de ARP y WebSIG, Epis Centre/Axereal a cargo del establecimiento de los mapas agro-pedológicos e InVivo AgroSolutions a cargo de las interpretaciones hidrogeológicas y del establecimiento del mapa intrínseco de vulnerabilidad del nivel freático.

Capa geofísica: 3 mapas de RE

La vulnerabilidad intrínseca es la función de un cierto número de parámetros como la presencia y el espesor de las capas superficiales, la pedología global del área de captación (AC), los valores absolutos de las pendientes y sus longitudes y la posición de los ejes principales de fracturación. La obtención de dichos datos de forma rápida y a un precio razonable para construir modelos es una de las cuestiones más difíciles para tratar de obtener mapas de vulnerabilidad precisos. La resolución espacial de esos datos es otro asunto: las variaciones en los parámetros del subsuelo se producen con frecuencia a longitudes de onda muy cortas (unos pocos metros).

¹ Geocarta, 5 rue de la Banque, 75002 Paris.

² Axereal, Service Développement Epis Centre, Domaine du Chaumoy 18570 Le Subdray.

³ In Vivo Agrosolutions, 83 avenue de la Grande Armee 75782 Paris Cedex 16.

* Correo electrónico del autor de contacto: dabas@geocarta.net

Geociencia cercana a la superficie

Como consecuencia, la resolución de los datos de entrada para cualquier modelo de predicción debería ser del mismo orden.

Dichos parámetros se adquirieron de forma indirecta mediante las mediciones geofísicas utilizando un nuevo sistema para la cartografía de alta resolución de grandes áreas (> 100 ha), que en un principio se diseñó para el cultivo de precisión (PF, por sus siglas en inglés), denominado el sistema ARP (siglas en inglés de creación automática de perfiles eléctricos) (Dabas, 2009). Este dispositivo se remolcó sobre todas las superficies agrícolas libres (475 ha) en unos pocos días. Esto hace posible aportar información espacializada (con una resolución por debajo de los 10 m) sobre toda el área de captación gracias a la cartografía de la resistividad eléctrica (RE) aparente, con tres profundidades de investigación, junto con la adquisición del modelo digital de elevaciones (MDE).

Se ha comprobado que la cartografía geoeléctrica es útil para detectar las variaciones espaciales en el suelo que, con frecuencia, se pueden relacionar con propiedades del suelo relevantes para el crecimiento vegetal (Dabas et al., 1989). Por ejemplo, la RE del suelo está vinculada con la salinidad del suelo, la textura del suelo, la capacidad de intercambio de cationes, la mezcla del suelo, el carbono orgánico, el pH, la densidad aparente, el contenido en nitratos y los tipos de suelos (Gebbers et al., 2009). Mientras que la influencia de la salinidad normalmente juega un papel menor en condiciones templadas, el contenido en arcillas y en agua normalmente son los factores más importantes que causan la variación espacial de la RE.

La RE ya se utiliza en contextos específicos como el cultivo de precisión (definición de zonas homogéneas, predicción del rendimiento, gestión de la entrada de N, etc.), la edafología (estudio optimizado del suelo y muestreo guiado) y, por supuesto, en la geofísica “estándar” para encontrar niveles freáticos, cartografiar la estratigrafía, detectar huecos y estructuras enterradas, etc. Su uso para los estudios de las cuencas de captación no está todavía muy desarrollado y el objetivo de este estudio es utilizar los tres mapas de RE (y el MDE) como una variable adicional a las demás variables necesarias en el modelo de vulnerabilidad.

En los métodos eléctricos se inyecta una corriente eléctrica en el suelo mediante un par de electrodos. Esta corriente es una corriente continua o una corriente alterna lenta (varios Hercios) para evitar efectos de polarización y/o corrientes inducidas. El flujo de corriente en el volumen completo del suelo y el subsuelo y su distribución espacial es una función de la distribución espacial de las resistividades eléctricas. Como el suelo rara vez es uniforme, los geofísicos utilizan el término de resistividad eléctrica aparente para denominar la resistividad “promedio” del volumen donde la corriente es capaz de fluir. Esta distribución espacial se mide mediante dos o más electrodos en la superficie del suelo, los cuales miden el voltaje resultante. La relación entre el voltaje y la corriente, multiplicada por una constante

(el factor geométrico que tiene en cuenta la orientación de los cuatro electrodos), es la resistividad eléctrica aparente. Debido a que los materiales del subsuelo generalmente tienen resistividades diferentes las mediciones en la superficie del suelo pueden caracterizar la distribución vertical y horizontal de las estructuras infrayacentes. Las resistividades típicas se encuentran entre los 2 Ohm.m (suelos arcillosos) y varios cientos de Ohm.m o incluso miles de Ohm.m en zonas cristalinas o metamórficas. La resistividad de los materiales del subsuelo es mayor que las resistividades del suelo en casi todos los casos debido, en términos generales, a una menor cantidad de agua.

Estas mediciones son lentas debido a que los operadores deben insertar manualmente los cuatro electrodos en el suelo. Como no es posible medir correctamente la RE dentro de los primeros 2 m mediante sistemas aerotransportados tuvimos que desarrollar una nueva plataforma remolcada, el sistema ARP, para medir la RE de forma continua. Para ello, tenemos que:

- Diseñar un resistímetro que pueda hacer frente a la alta resistencia de contacto, tenga la mejor respuesta de tiempo y sea fácil de operar en el campo,
- Diseñar mecanismos que se puedan utilizar como electrodos rodantes y puedan ser remolcados por un vehículo todoterreno incluso en ambientes muy duros,
- Diseñar hardware y software para manejar los instrumentos, ayudar al operación mientras conduce (auto-orientación) y que también realice el control de calidad a tiempo real de la RE y los parámetros de posicionamiento.

Así, la innovación reside en una medición continua de la RE mediante un dispositivo específico (resistímetro y ruedas claveteadas que actúan como electrodos) remolcado por un vehículo todoterreno (Quad, 4x4, tractor agrícola). El posicionamiento se garantiza mediante GPS (diferencial o RTK). Las mediciones se realizan cada 10 cm a lo largo de los perfi-

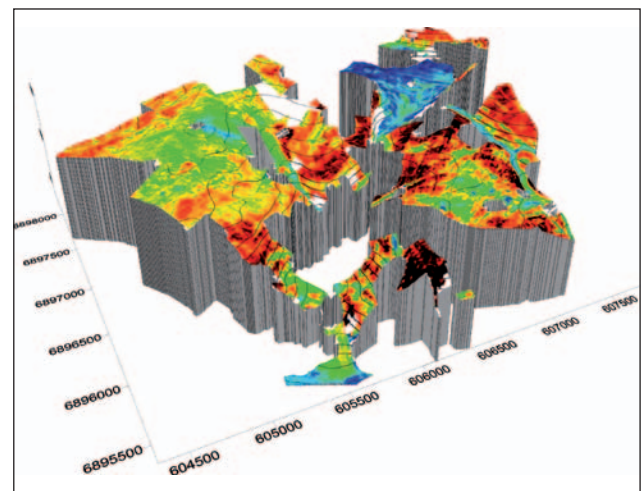


Figura 2 Mapa de RE superpuesto al MDE.

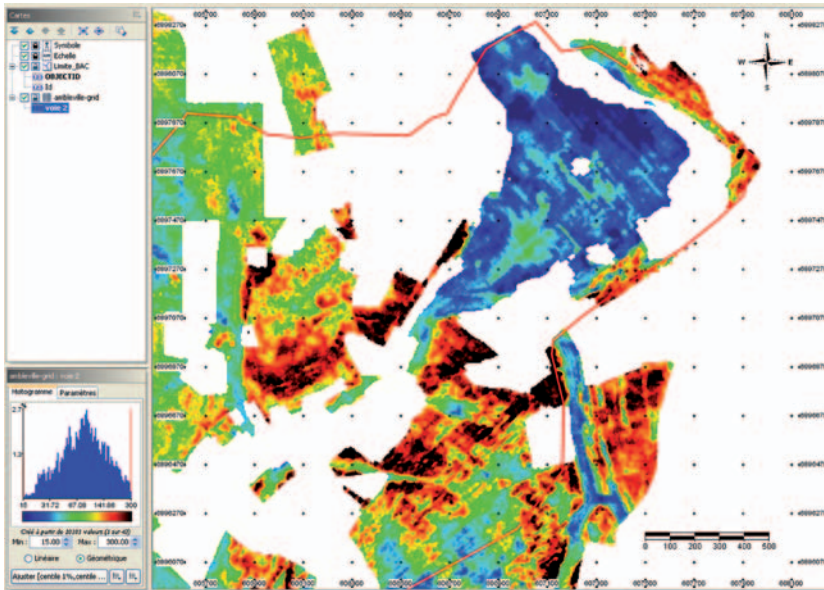


Figura 3 Mapa de RE del canal 2 del ARP.

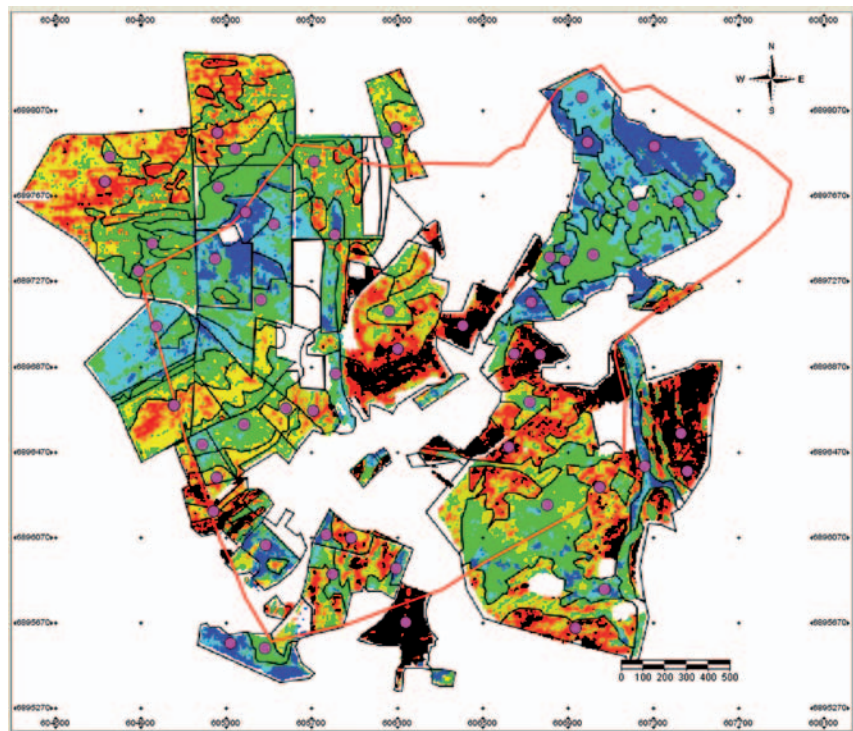


Figura 4 Mapa de resistividad clasificada dividido en zonas (líneas blancas) y ubicación de las observaciones del suelo (puntos rosas).

les con tres profundidades de investigación (0 a 50 cm, 1 m y 2 m). La resolución de la cartografía depende de la distancia entre los dos perfiles.

El ARP (Dabas, 2009) se desarrolló comercialmente para la agricultura por Geocarta, una filial del CNRS, en 2001 tras un trabajo previo en el CNRS (Dabas et al., 1997, 1998). Se añadieron diversas mejoras como el posicionamiento absoluto mediante un dGPS o un GPS RTK y la posibilidad de adquirir tres medida al mismo tiempo correspondientes a

tres profundidades de estudio (0 a 0,5; 0 a 1 y 0 a 1,7 m) a una velocidad de hasta 6 m/s y con una resolución espacial de 10 cm a lo largo de los perfiles (Figura 1).

En zonas de campo abierto, se pueden prospeccionar hasta 80 ha en un día. En condiciones normales el número de mediciones en una hectárea es de alrededor de 30000 (espaciado entre perfiles de 10 m y mediciones a lo largo del perfil cada 10 cm). La velocidad promedio de la adquisición de datos es de alrededor de 4 m/s (1 ha = cinco minutos de prospección).

Geociencia cercana a la superficie

Ahora existen siete generaciones de sistemas ARP trabajando en el campo. La mayoría de ellos están contruidos para aplicaciones específicas. La Figura 2 muestra la imagen eléctrica obtenida para el canal 2 (profundidad de investigación del orden de 1 m) superpuesta al MDE adquirido al mismo tiempo que la resistividad (las altas resistividades,

en rojo, corresponden a afloramientos de caliza y/o a suelos muy superficiales y las zonas de baja resistividad, en azul, corresponden a suelos arcillosos).

La Figura 3 muestra el resultado del mapa de RE (resolución de 5 m de cuadrícula) del GIS con resistividades que abarcan desde los 15 hasta los 380 Ohm.m. Por ejemplo, se

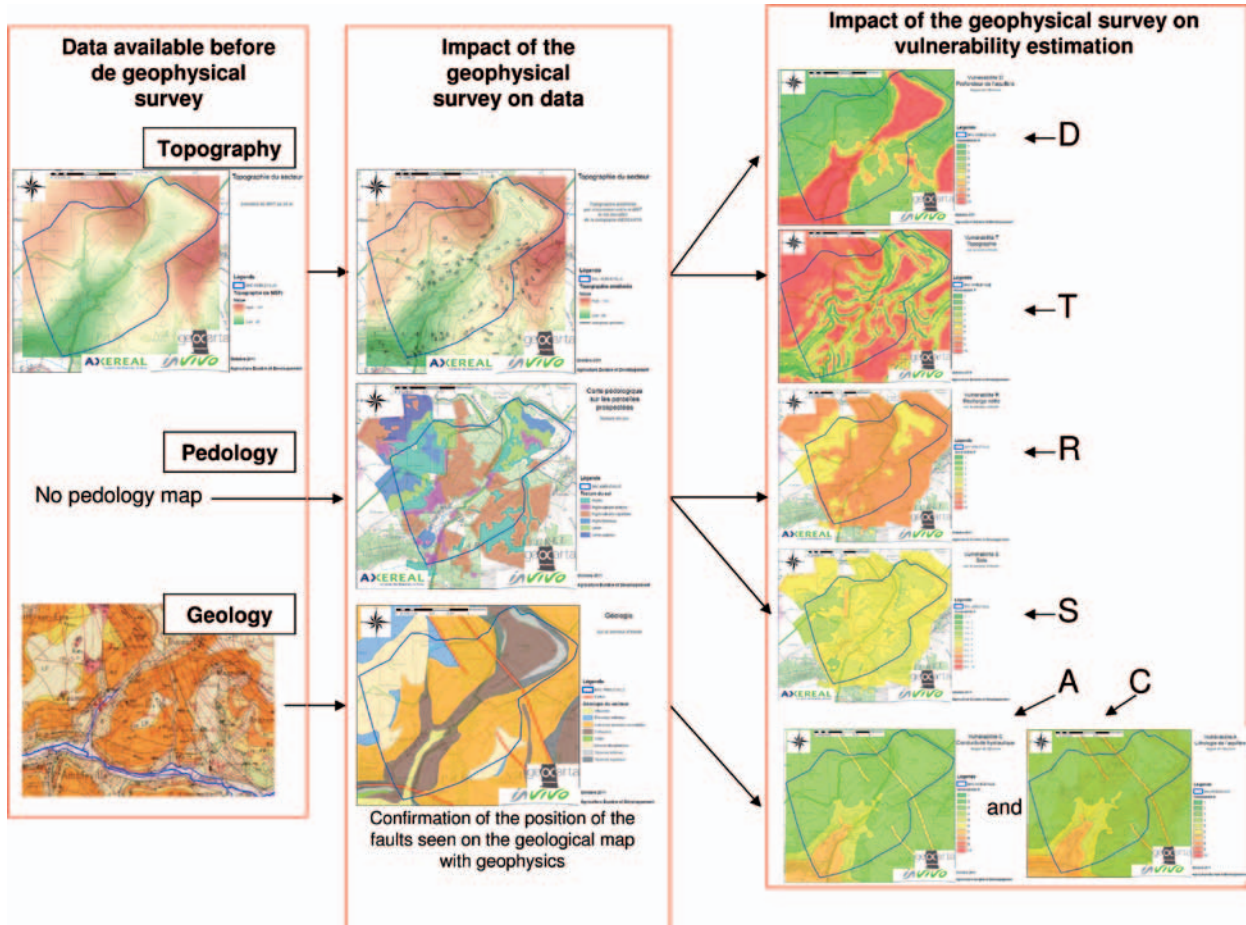


Figura 5 Esquema que muestra la mejora de la calidad de los datos debida a la geofísica para la vulnerabilidad del caso de estudio de Ambleville.

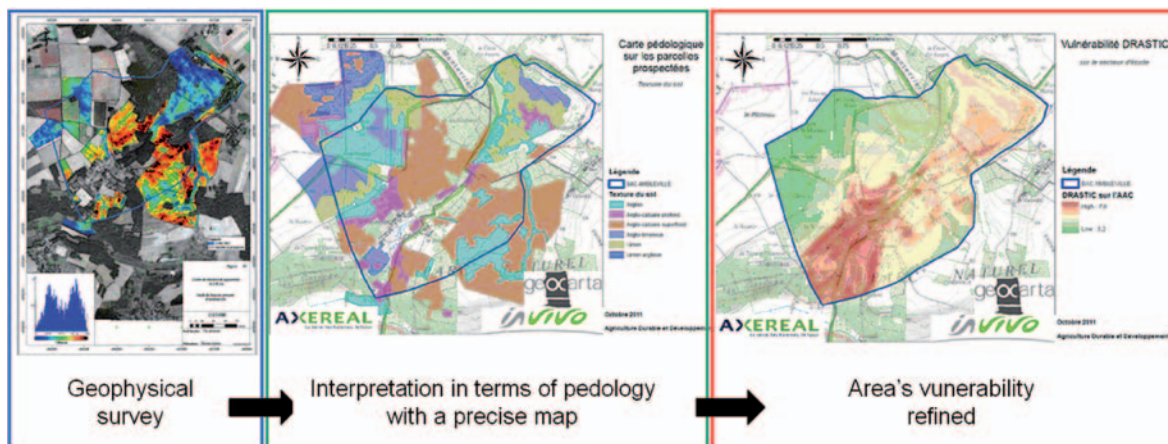


Figura 6 Esquema interpretativo del método utilizado en el AC de Ambleville.

Geociencia cercana a la superficie

Símbolo	Parámetros	Propiedades	Peso
D	Profundidad del nivel freático	Por encima de esta profundidad, cuanto mayor sea, el contaminante tardará mucho más tiempo en alcanzar el nivel freático	5
R	Recarga neta	Vehículo principal para el transporte del contaminante. Cuanto mayor sea la recarga, el riesgo de contaminación será más alto.	4
A	Litología del acuífero	Caracterizada por el tamaño de los suelos saturados o su grado de fracturación. Está involucrada en la captura del contaminante que podría escapar a la capacidad de absorción del suelo.	3
S	Suelo	Cuanto más rico es el suelo en arcilla y material orgánica, más importante es la absorción de metales y cationes y, por tanto, la contaminación del agua subterránea es menor.	2
T	Topografía	Cuanta más pendiente tenga el terreno, mayor será la escorrentía y, por tanto, menor será la contaminación de las aguas subterráneas.	1
I	Zona no saturada	El impacto se determina a partir de la textura de la tierra en ella. La percolación del contaminante hasta el nivel freático será tan grande como favorable sea la textura (grava, arena gruesa...)	5
C	Permeabilidad	Cuanto más grande sea este parámetro, más rápida será la transferencia del contaminante.	3

Tabla 1 Parámetros del método DRASTIC para la estimación de la vulnerabilidad del agua subterránea.

ponen claramente de manifiesto anomalías distintivas como talwegs (elemento lineal en azul), fracturación del suelo rocoso (dirección N44 hacia el oeste y N0 hacia el este del talweg), aforamientos de caliza (en negro-rojo), diferencia en contenido de arcillas, etc.

El siguiente paso es transformar este mapa a un mapa pedológico.

Desde los mapas de RE hasta el mapa compuesto y el mapa de suelos

Después de la prospección eléctrica se debe llevar a cabo un estudio del suelo para caracterizar las unidades del mismo. Primero, los tres datos eléctricos aparentes, que corresponden a las tres profundidades de investigación, se procesan para su síntesis en un único mapa. Lamentablemente, tres puntos no son suficientes para llevar a cabo un proceso completo de inversión para obtener la RE real. Por consiguiente, hemos desarrollado un algoritmo simple para combinar los tres mapas de RE aparente: para cada profundidad de medición eléctrica los datos se clasifican en grupos de igual resistividad. Para el AC de Ambleville, los datos se clasificaron en cuatro clases para cada profundidad de investigación: baja (L, por sus siglas en inglés), media (M), alta (H, por sus siglas en inglés) y muy alta (VH, por sus siglas en inglés). El mapa compuesto resultante tiene potencialmente 64 valores, pero se realizó un agrupamiento entre clases similares de manera que al final sólo permanecen seis clases principales. Mediante la agregación de las tres profundidades de investigación, este mapa compuesto muestra el área caracterizada por perfiles eléctricos verticales equivalentes. El resultado se muestra en la Figura 4.

El código de color es el siguiente:

- Azul: L,L,L
- Azul cielo: M,M,L
- Verde: M,M,M
- Amarillo: M,H,H
- Rojo: H,H,H
- Negro: VH,VH,VH

Ahora, el objetivo del estudio del suelo es convertir esos perfiles eléctricos en perfiles de suelo. Lamentablemente, tenemos que describir los suelos, in situ, con observaciones de taladro. Para las 475 ha fue necesario un estudio de tres días, con la realización de 59 agujeros de taladro. Se comprobó que algunos de los agujeros eran innecesarios, aunque sensatos, para comprobar la validez del mapa compuesto y para estar seguros de que el mismo color (clase) en diferentes zonas correspondía a la misma unidad de suelo. El primer análisis de las observaciones del suelo muestra que 30 agujeros de taladro eran suficientes para describir el AC, reduciendo así la duración del estudio a un día y medio.

Finalmente, se observaron tres unidades principales de suelos: suelos arcillosos profundos (baja resistividad/azul), suelos de marga limosa profundos (resistividad media y baja después de los 40 cm/azul cielo) y suelos calcáreos de profundidad somera (alta resistividad/amarillo, rojo y negro). El color verde también corresponde a suelos margosos limosos, pero la roca madre (lecho calizo), en este caso, nunca está a una profundidad de más de 80 cm.

Por tanto, para cada zona de suelo fuimos capaces de proporcionar el método DRASTIC con todos los datos

Geociencia cercana a la superficie

necesarios para establecer mapas informatizados de vulnerabilidad, como la textura y el espesor de la capa del suelo, el rango de pedregosidad (losas de caliza), la profundidad potencial de implantación y el potencial hídrico del suelo.

Interpretación en términos de vulnerabilidad del agua subterránea a la contaminación

La metodología utilizada en la estimación de la vulnerabilidad del AC de Ambleville es DRASTIC, la cual incorpora siete parámetros de vulnerabilidad (Aller et al., 1987). Ya se han llevado a cabo estudios similares para entornos agrícolas (Barber et al., 1994).

Cada uno de esos siete parámetros (ver Tabla 1) está espacializado y representado en un GIS (siglas en inglés de sistema de información geográfica) y luego ponderado y reunido en un mapa final con una escala de vulnerabilidad desde 1 (baja vulnerabilidad) hasta 10 (alta vulnerabilidad). Aquí sólo mostramos los resultados finales.

La contribución de las prospecciones geofísicas, la interpretación de suelos y la implementación del MDE han proporcionado:

- El aumento de la precisión de los mapas relacionados con la pedología (R, S) y la geología (A, C)
- El aumento de la precisión del mapa topográfico de la zona (T) y, en consecuencia, del mapa de profundidad del acuífero (D), con el mejor MDE

Finalmente, se refinan los mapas de los parámetros D, R, A, S, T y C y hemos calculado que alrededor del 78% del resultado final del mapa de vulnerabilidad fue perfeccionado (con los pesos elegidos).

Conclusión

Hemos demostrado en un ejemplo práctico sobre una zona agrícola de 450 ha que era posible predecir mejor la vulnerabilidad a diferentes peligros de contaminación agrícola. El método utilizado fue el modelo DRASTIC. Los datos de este modelo se perfeccionaron a través de la utilización de una amplia prospección geofísica con una resolución espacial muy elevada de 12 m. Esta prospección eléctrica se llevó a cabo mediante un sistema ARP remolcado durante una semana y un estudio pedológico de dos días. Esos dos estudios han aportado información utilizada por el modelo DRASTIC, principalmente el MDE y las unidades de suelo. La defini-

ción de las zonas de vulnerabilidad ahora se realiza con una resolución espacial del orden de 10 m y se ha estimado un aumento de la precisión del orden del 80%. La gestión de la contaminación en zonas agrícolas puede estar asociada con la dirección dada por la agricultura de precisión (PAG, por sus siglas en inglés) en el manejo de fertilizantes y productos fitosanitarios. Claramente, la adquisición de bajo costo de datos de RE desarrollada para la agricultura en el contexto de la PAG puede beneficiar a los estudios relacionados con los procesos hidrológicos.

Agradecimientos

Este estudio fue realizado para el Conseil General del Val d'Oise y financiado parcialmente por la Agence de l'Eau Seine-Normandie.

Referencias

- Aller, L., Bennet, T., Lehr, J. H. and Petty, R. J. [1987] *DRASTIC: a standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeologic settings*. US EPA Report 600/2-85/018. US Environmental Protection Agency.
- Barber, C, Bates, L. E., Barron, R. and Allison, H. [1994] Comparison of standardized and region-specific methods for assessment of the vulnerability of groundwater to pollution: a case study in an agricultural catchment. *Water Down Under 1994 Conference*, Vol 1, Part 1, 279–283, Public Institute of Engineers, Australia.
- Dabas, M., Hesse, A., Jolivet, A., Tabbagh, A. and Ducomet, G. [1989] Intérêt de la cartographie de la résistivité électrique pour la connaissance du sol à grande échelle. *Science du Sol*, 27, 1, 65–68.
- Dabas, M., Hesse, A., Jolivet, A., Panissod, C., Tabbagh, J. and Tabbagh, A. [1998] Recent developments in shallow-depth electrical and electrostatic prospecting using mobile arrays. *Geophysics*, 63, 5, 1542–1550.
- Dabas, M. [2009] Theory and practice of the new fast electrical imaging system ARP. In Campana and Piro (Eds.) *Seeing the Unseen*. Geophysics and Landscape Archaeology, CRC Press, Taylor and Francis Group, 105–126.
- Gebbers, R., Lück, E., Dabas, M. and Domsch, H. [2009] Comparison of instruments for geoelectrical soil mapping at the field scale. *Near Surface Geophysics*, 7, 179–190.
- Panissod, C., Dabas, M., Jolivet, A. and Tabbagh, A. [1997] A novel mobile multipole system (MUCEP) for shallow (0-3 m) geoelectrical investigation: the 'Vol-de-canards' array. *Geophysical Prospecting*, 45, 983–1002.