

EVALUACIÓN DEL MOVIMIENTO DE EFLUENTE SÉPTICO MEDIANTE EL USO DE TÉCNICAS GEOFÍSICAS¹

Dante Fratta², Dave J. Hart³ y Alex Summitt⁴

Resumen: Este manuscrito presenta resultados del uso de métodos geofísicos para el estudio del movimiento de los efluentes sépticos en suelos superficiales. Los casos de estudio discuten la diferencia en la absorción de aguas servidas en sistemas sépticos de una casa de familia que tiene flujo moderado pero constante y de un baño público en un parque que es usado intensivamente solamente tres fines de semanas durante la temporada de verano. Tomografías de resistividad eléctrica fueron complementadas con mediciones de inducción electromagnéticas en el dominio de frecuencia, mediciones de potenciales espontáneos y perforaciones. El uso de diferentes técnicas de mediciones y los procesos físicos estudiados permiten obtener resoluciones diferentes, profundidad de muestreo, y evaluar procesos hidrogeológicos. Los resultados muestran cómo el efluente de aguas servidas en suelos crean condiciones de heterogéneas de absorción debajo de los drenajes de superficie y potencialmente puede llegar a contaminar la napa freática.

Palabras claves: aguas servidas, efluente séptico, hidrogeología, potencial espontáneo, resistividad eléctrica.

EVALUATION OF SEPTIC FLUID PLUMES USING GEOPHYSICAL TECHNIQUES

Abstract: This manuscript presents results obtained using geophysical methods for the study of the fate of septic fluids. Two case studies are presented. The case studies present the evolution of septic tank fluids in the ground water both from septic mounds in a single-family home and in a public park facility that undergoes intensive use during three weekends in the summer. For all these studies, different geophysical techniques were employed. Electrical resistivity tomography results were complemented with induced electromagnetics and self-potential measurements and boring samples. Complementing different geophysical techniques and sampling procedures allows obtaining different resolutions, measurement depths, and evaluating different hydrogeological processes. Results show that septic fluid release is not homogenous and is concentrated in certain preferential areas. This concentration of septic fluid release could potentially trigger the contamination of the ground water.

Keywords: electrical resistivity, hydrogeology, self-potential, septic water, waste water.

INTRODUCCIÓN

Este manuscrito describe el resultado de dos estudios de campo que evalúan el desplazamiento de efluentes provenientes de sistemas sépticos superficiales. Este problema es de gran importancia en zonas periféricas de las ciudades en Estados Unidos donde debido al rápido desarrollo urbano no pueden ser servidos por sistemas de cloacas públicas. En estas zonas se usan sistemas sépticos para tratar aguas servidas y muchas veces los sistemas sépticos se encuentran muy cerca de perforaciones privadas. Esta situación compromete las condiciones de salud de la población. Por ejemplo, un estudio de cincuenta perforaciones privadas en el Estado de Wisconsin encontró que el 8% de los pozos extraía agua contaminada con bacterias patógenas, muchas de ellas provenientes de desechos humanos (Borchert et al., 2003). Este problema se magnifica si se considera que muchas de las granjas alrededor de las ciudades en Wisconsin usan desechos de ganado bovino para fertilizar los campos.

En el caso de barrios residenciales que no están conectados a la red de cloacas, el tratamiento de las aguas servidas se realiza con sistemas sépticos que separan los sólidos por flotación o por sedimentación y los líquidos se absorben en el suelo (U.S. EPA, 2002). Para que el sistema funcione correctamente se requiere un cierto espesor de suelos no saturado para que se permita la filtración necesaria. En el suelo, los líquidos que salen de la cámara séptica son estabilizados por

¹ Artículo recibido el 1 de octubre de 2011 como parte del 2^{do} Encuentro Latino de Profesores de Geotecnia. Artículo aceptado en versión final el 15 de noviembre de 2011.

² Profesor Asociado, Ingeniería Geológica, University of Wisconsin-Madison, Madison, WI 53711, USA. E-mail: fratta@wisc.edu

³ Wisconsin Geological and Natural History Survey, University of Wisconsin-Extension, Madison, WI 53705, USA.

⁴ Shell Exploration, Houston, TX 77079, USA.

procesos de filtración, sedimentación, absorción química, y reacciones biológicas (Hu et al., 2007). Cuando rocas, suelos impermeables, o la napa freática se encuentran cerca de la superficie, se deben construir campos de filtrado elevados donde el líquido se inyecta a través de tubos perforados a un estrato de arenas y gravas (Converse et al., 1989). Normas ambientales requieren que esos sistemas deben construirse a no menos de 15 m de perforaciones para agua potable, pero ni el número de sistema sépticos ni las condiciones de flujo son considerados (Wisconsin Administrative Code, 2006; Borchardt et al., 2003). El problema radica en que las normativas de diseño no incorporan los mecanismos de atenuación ni si los efluentes se filtran en el suelo correctamente. Estos parámetros son importantes, ya que el agua subterránea puede ser contaminada.

El movimiento del efluente séptico puede ser monitoreado con métodos geofísicos que evalúan contrastes físicos en el fluido y en el suelo. En este trabajo se presentan dos casos de estudios usando geofísica de superficie. El primer caso corresponde al monitoreo de una casa de familia en el sur centro de Wisconsin. El segundo caso corresponde a un parque público en el norte de Wisconsin (Figura 1). La diferencia en los dos casos es que en la casa de familia el flujo séptico es constante, mientras que en el segundo caso la carga de flujo es discontinua ya que la máxima intensidad coincide con fines de semanas largos durante la temporada de verano. Además, el suelo debajo del sistema séptico en la casa de familia es una morrena glacial mientras que en el caso del parque público es una arena con gravas y limo y la napa freática se encuentra cerca de la superficie.

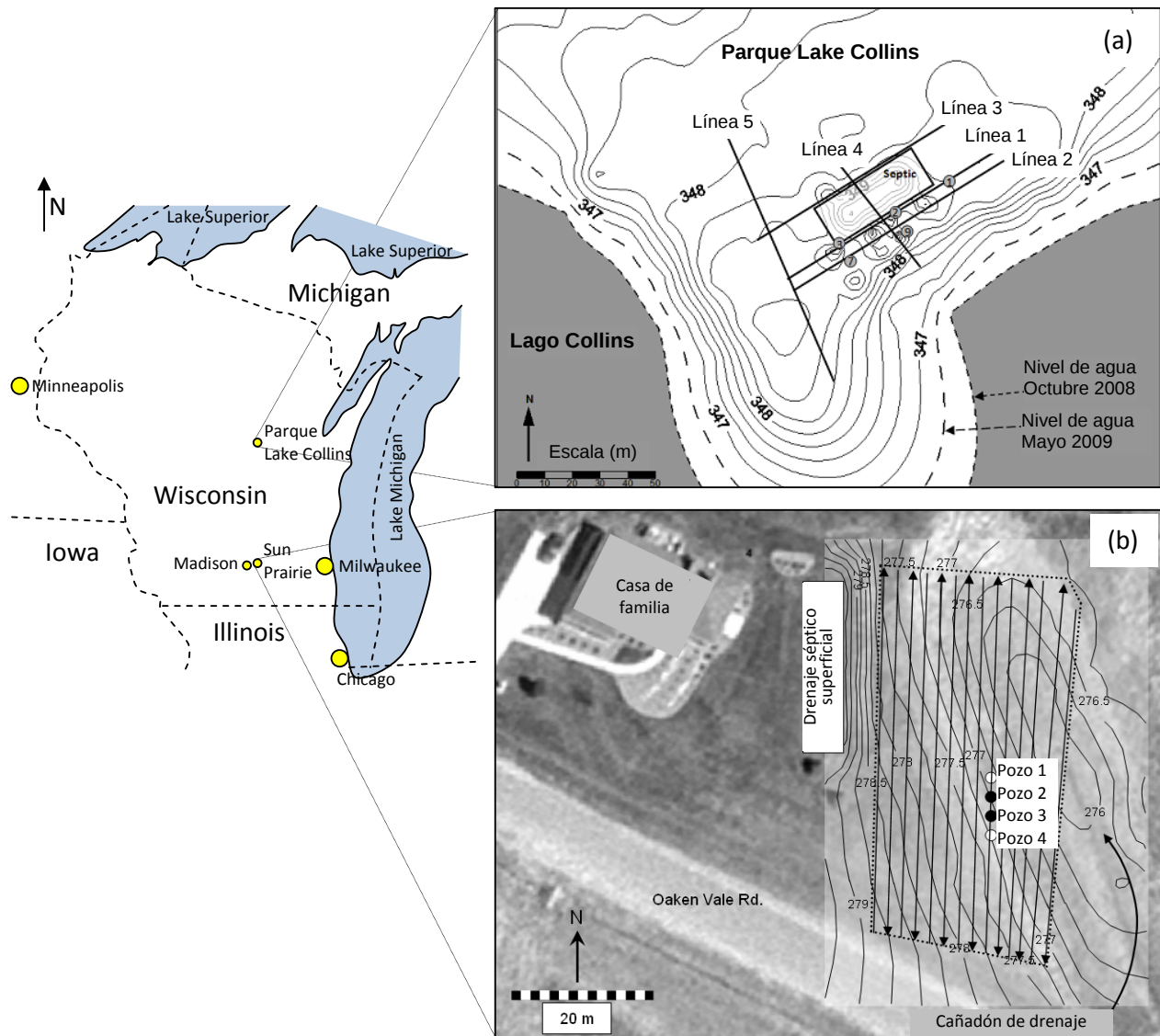


Figura 1: Plano de los casos de estudios en (a) parque Lake Collins, Wisconsin y (b) Sun Prairie, Wisconsin. Las líneas indican las posiciones de los sondeos geofísicos, las cuales no cruzan los drenajes sépticos superficiales salvo en la Línea 4 en el parque Lake Collins. Las líneas de nivel están presentadas en pies.

MÉTODOS Y TÉCNICAS

Los métodos geofísicos permiten evaluar procesos físicos y propiedades de materiales sin necesidad de usar muestras. El desafío de ingenieros e investigadores es identificar los procesos físicos relevantes con las herramientas geofísicas necesarias para obtener datos e imágenes necesarios para interpretar el comportamiento del sistema. Los métodos geofísicos no miden directamente parámetros o fenómenos ingenieriles sino que miden parámetros físicos que se deben correlacionar para identificar los procesos de interés. Por ejemplo, la velocidad de ondas electromagnéticas es una función de la permitividad en los suelos que puede ser relacionada con el contenido volumétrico del agua (Santamarina et al., 2005). Es más, ciertos parámetros geofísicos dependen de varios factores. Por ejemplo, la resistividad eléctrica no solo depende del contenido de sales en el fluido de poros sino que además depende del contenido de humedad, porosidad, y del tipo de suelos (Rhoades et al., 1976; Klein and Santamarina, 2003; Attia et al., 2008). Esto implica que una simple medición no siempre se puede correlacionar a un único parámetro y múltiples mediciones son necesarias para comprender sistemas complejos.

A pesar de estas limitaciones, mediciones geofísicas proveen mediciones volumétricas que no se pueden obtener con otro tipo de mediciones como muestreos, perforaciones o penetraciones con ensayos in-situ. Además el uso de múltiples métodos geofísicos permite capturar la esencia de procesos cuando distintos parámetros son evaluados a través de estudios complementarios. En casos de estudio de procesos hidrogeológicos cerca de la superficie, los estudios geofísicos permiten evaluar el desplazamiento de fluidos contaminantes (Damasceno et al., 2009), monitorear condiciones de bordes y la presencia de interfaces (Lowry et al., 2009), generar mapas de propiedades de materiales (Lin et al., 2009; 2010) y observar procesos de erosión (Fratta et al., 2007).

En los estudios que se presentan en este artículo se utilizaron varias herramientas de geofísica: resistividad eléctrica continua (ABEM Terrameter), resistividad eléctrica acoplada por capacitancia (Geometrics Ohmmapper), inducción electromagnética en el dominio de frecuencia (Geonics EM-31), y potenciales espontáneos (con electrodos no polarizables). El radar de tierra (Sensors & Software pulseEKKO 100) también fue utilizado pero los estudios no son relevantes para este manuscrito o los resultados fueron negativos debido a la alta conductividad de los suelos.

La medición con los métodos de resistividad eléctrica se basa en generar una corriente eléctrica entre dos puntos del terreno mientras se mide la caída de potencial entre otros dos puntos. La inducción electromagnética se basa en generar un campo magnético variable que induce en el suelo una corriente eléctrica que a su vez genera otro campo magnético que se opone al cambio del campo magnético (i.e., ley de Faraday-Lenz). La magnitud y fase del campo magnético generado en el suelo son funciones de la conductividad eléctrica (Reynolds, 1997). Finalmente el método de potenciales espontáneos mide las diferencias en potencial eléctrico entre dos electrodos no polarizables creados por el flujo de agua (potencial electrocinético) y las diferencias químicas de fluidos (potencial electroquímico - Ernstson and Scherer, 1986; Telford et al., 1990).

CASOS DE ESTUDIO

Monitoreo de aguas servidas en suelos: descarga continua

El destino de aguas servidas después de recibir tratamiento en un sistema séptico determina la calidad del efluente. El problema radica en que la descarga final del efluente puede contaminar la napa freática. En lugares donde la profundidad de la roca es poca o donde la napa freática está muy cerca de la superficie, los suelos no tienen suficiente volumen para absorber contaminante. En estos casos las normas ambientales requieren el uso de sistemas de drenajes sépticos superficiales ("septic mounds") en vez de los denominados pozos negros (U.S. EPA, 2002). Estos drenajes superficiales permiten absorber contaminantes en la zona no saturada de los suelos a través de procesos de filtración, sedimentación, absorción química y reacciones biológicas (Lowe y Siegrist, 2008; Hu et al., 2007).

En la casa de familia en la vecindad de Sun Prairie se construyó un montículo de arena y grava que es la zona de descarga del efluente séptico (i.e., drenaje séptico superficial en la Figura 1b). Este sistema es experimental y fue instalado como un estudio piloto para evaluar cómo los contaminantes se atenúan en los suelos y evitar la contaminación de pozos de agua cercanos. En la casa de familia en Sun Prairie, además de los métodos geofísicos descritos, se hicieron cuatro perforaciones aguas abajo del drenaje séptico de superficie para obtener muestras de suelo y para monitorear la profundidad de la napa freática. La Figura 2 presenta la descripción de los estratos de los suelos del lugar. El resultado de los estudios geofísicos se presenta en las Figuras 3, 4, y 5. La Figura 3 muestra imágenes de inversión de resistividad eléctrica (Programa RES2DINV con un mínimo de 5 iteraciones - Loke y Barker, 1996) donde se ve la progresión de la pluma del efluente en función del tiempo. Los resultados indican que el efluente se descarga aproximadamente desde la mitad del área del drenaje séptico. Estos resultados se confirman con los datos de potenciales espontáneos presentados en la Figura 4, y que indican la misma dirección del flujo del efluente. La dirección preponderante de flujo se debe a las heterogeneidades del suelo glacial presente en el lugar, que controlan la conductividad hidráulica del suelo y crean una zona de mayor desplazamiento del efluente.

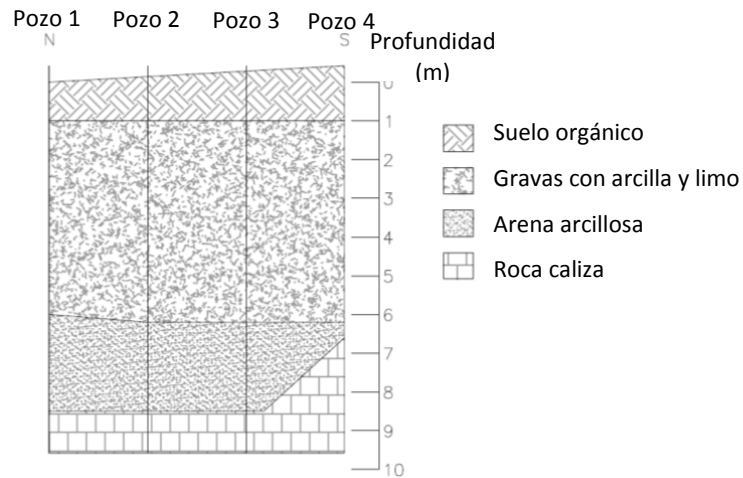


Figura 2: Columna estratigráfica con descripción visual de los suelos en la casa de Sun Prairie, Wisconsin.

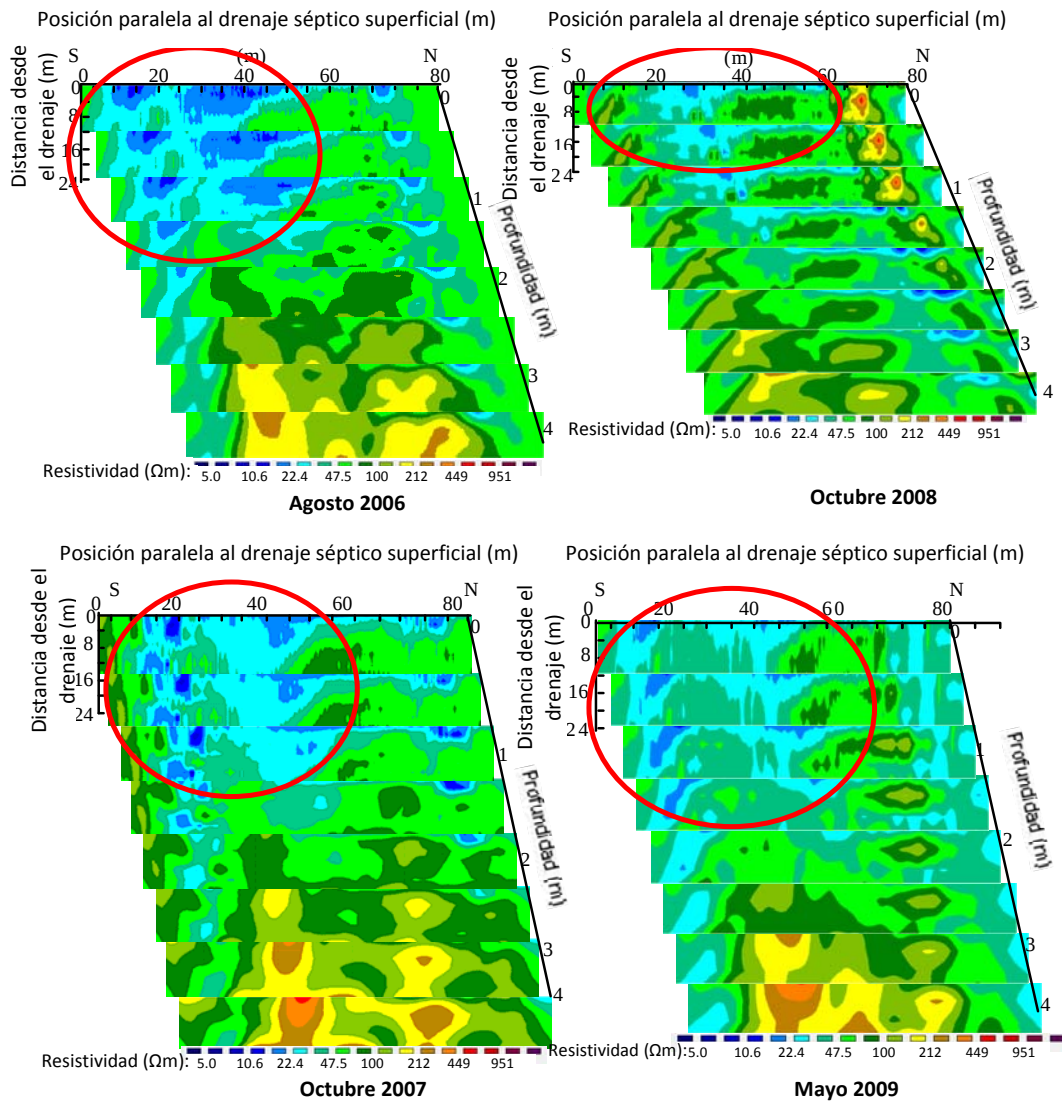


Figura 3: Progresión de imágenes de tomografía tridimensional de resistividad eléctrica en el sitio de Sun Prairie. El drenaje séptico superficial se encuentra entre 20 y 80 m en la abscisa en las imágenes.

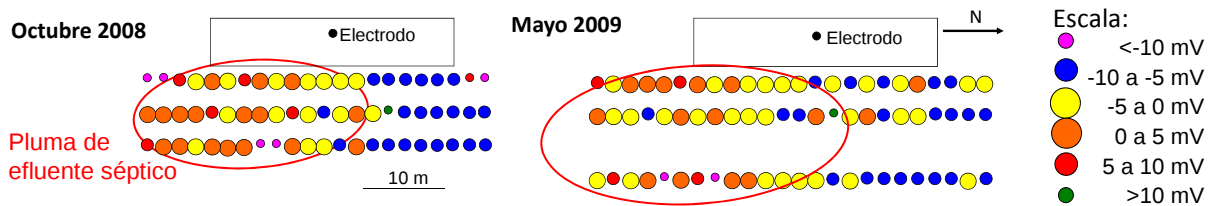


Figura 4: Mediciones de potenciales espontáneos en la casa de familia en Sun Prairie, Wisconsin: (a) Octubre 31, 2008 y (b) Mayo 8, 2009. Los círculos indican la dirección del movimiento de la pluma del efluente.

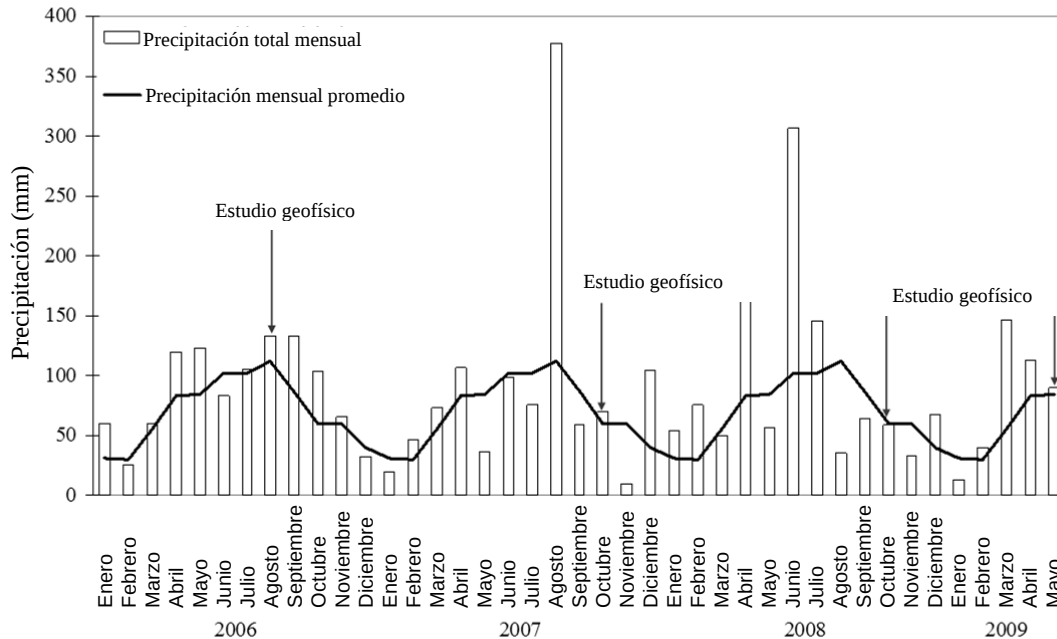


Figura 5: La precipitación mensual en la casa de familia en Sun Prairie, Wisconsin. Los resultados fueron calculados usando valores del Servicio Meteorológico Nacional de los Estados Unidos (U.S. National Weather Service) y evaluando el promedio pesado por las distancias de las cuatro estaciones climáticas más cercanas.

Una de las observaciones más importantes en estos resultados es que la mayor concentración de la pluma en un área puede crear condiciones de contaminación del agua subterránea debido a que el efluente se mueve con gradientes hidráulicos más altos que los de diseño. Además, los resultados muestran que aunque la forma de la pluma se mantiene constante, el volumen de la pluma creció en tamaño hacia el sur y profundidad durante el periodo de estudio (áreas de baja resistividad en la Figura 3). Además, mucho de los cambios observados durante el periodo de estudio también dependen de los ciclos irregulares de precipitaciones. La Figura 5 documenta las precipitaciones en la casa de Sun Prairie y estos resultados con los datos en la Figuras 3 demuestran que el tamaño del volumen de la pluma también depende de las precipitaciones. Por ejemplo, el volumen de la pluma decreció en octubre 2008 cuando las lluvias en agosto y septiembre de 2008 fueron menores que las precipitaciones promedio, pero el volumen de la pluma creció en mayo de 2009 cuando las precipitaciones en marzo y abril de 2009 fueron mayores que las precipitaciones promedio.

Monitoreo de aguas servidas en suelos: descarga discontinua

El parque Lake Collins se encuentra sobre un pequeño lago que tiene 17 Ha y está abierto desde el 15 de mayo al 30 de septiembre todas las temporadas de verano. Los suelos del parque son arenas y gravas arenosas. Las actividades de campamento y movimiento de visitantes se concentran en los tres fines de semanas largos que coinciden con feriados nacionales en Estados Unidos. Durante estos fines de semanas, los baños y el drenaje séptico superficial trabajan al máximo, y luego el efluente es disipado en el suelo. Por estos motivos, el drenaje séptico superficial tiene una carga de efluente discontinua. Es más, el efluente puede disiparse en el suelo durante todos los meses de invierno y en la napa freática, para ser recargada durante la temporada de verano siguiente. Para recibir la carga discontinua de efluente, el sistema fue sobredimensionado en un 150%.

Para evaluar este proceso, se obtuvieron datos de resistividad eléctrica que fueron invertidos para crear imágenes tomográficas de resistividad eléctrica durante la temporada de verano de 2008, y después del invierno 2008-2009 en mayo 2009. Los resultados se presentan en las inversiones de resistividad eléctrica (Figura 6) y en los resultados de inducción electromagnética (Figura 7). Las imágenes de tomografía de resistividad eléctrica que se presentan en la Figura 6 y los datos presentados en la Figura 7b muestran cómo la pluma del efluente crece inmediatamente después de cada fin de semana largo (i.e., el tamaño del volumen con baja resistividad eléctrica) y luego se disipa para volver a crecer en el próximo fin de semana largo. Durante los meses de invierno, la pluma se disipa para volver a empezar el ciclo el año siguiente con niveles similares (Figura 7b).

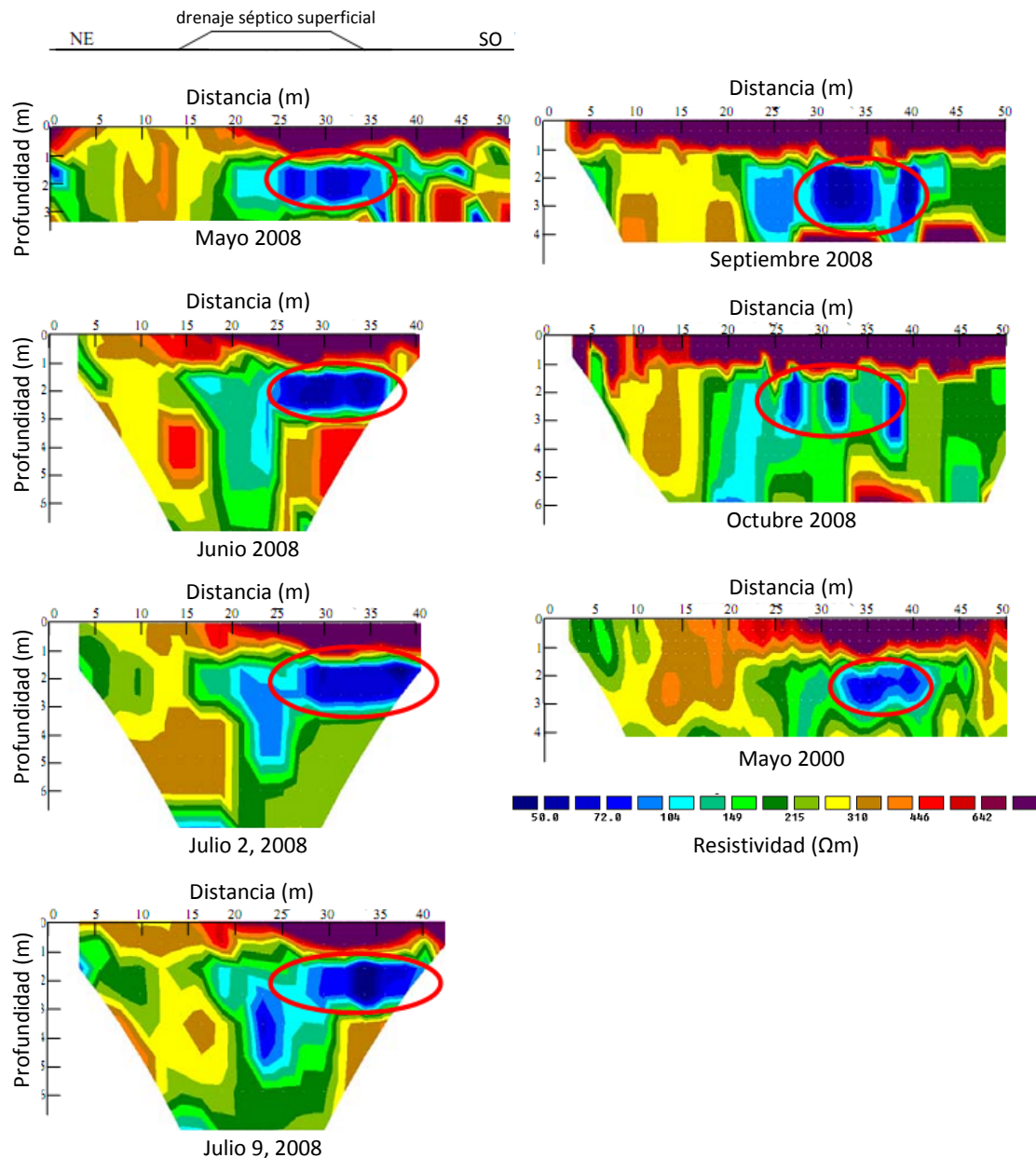


Figura 6: Tomografías de resistividad eléctrica en función del tiempo obtenidas en el parque Lake Collins. Los círculos indican zonas de baja resistividad eléctrica y la ubicación estimada de la pluma del efluente.

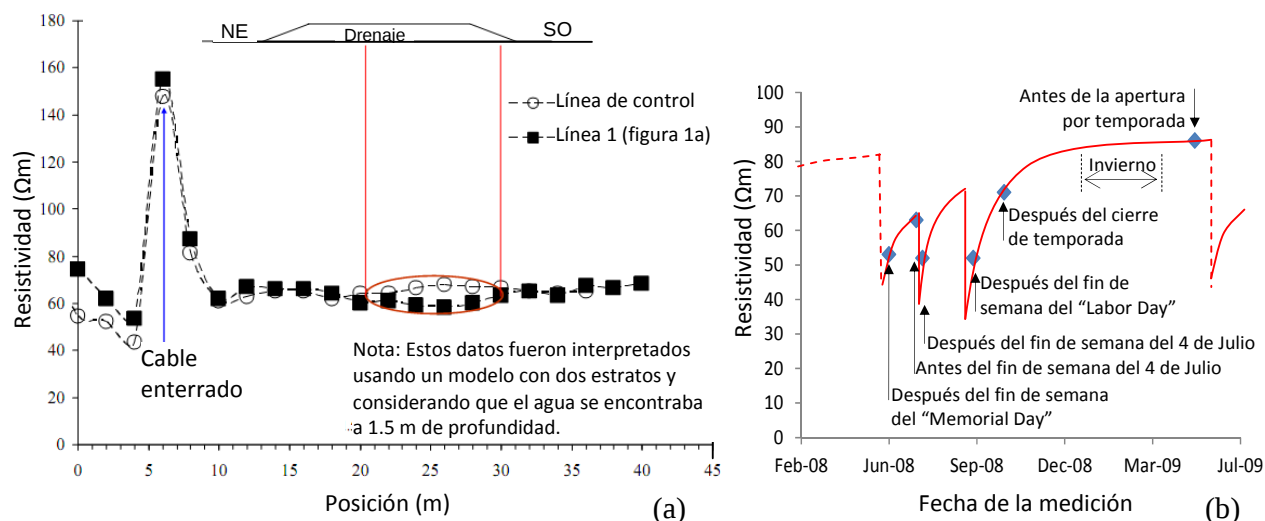


Figura 7: Resultados de medición usando inducción electromagnética: (a) Posición de la pluma en la Línea 1 de sondeo, y (b) Variación de la resistividad promedio durante días de carga y atenuación de la concentración de la pluma (línea continua).

Los datos de resistividad eléctrica también indican que solamente un 50% del sistema descarga efluente (i.e., zonas de baja resistividad eléctrica en las Figuras 6 y 7a), lo que indicaría que a pesar de haber sido sobredimensionado un 150%, el sistema estaría trabajando con una eficiencia de solamente 75%. Mediciones de altura del lago y de piezómetros en las perforaciones (Figura 1a) indican también que el tamaño de la pluma del efluente es dominado por el flujo de agua subterránea y la recarga que se produce cada primavera en el estado de Wisconsin (producto del deshielo y las lluvias de primavera en abril).

CONCLUSIONES

Los métodos geofísicos son herramientas importantes para el estudio de procesos hidrogeológicos de superficies. En este manuscrito se estudió el movimiento de efluente séptico en dos lugares con distintos tipos de carga séptica (i.e. continua y discontinua) y con distintos tipos de suelos. La combinación de métodos geofísicos permitió obtener imágenes de la dirección y tamaño de la pluma de contaminantes. Estos resultados permiten monitorear el funcionamiento de sistemas sépticos en tiempo y espacio y evaluar la posibilidad de contaminación del agua subterránea.

AGRADECIMIENTOS

Los datos y los resultados fueron obtenidos y evaluados en colaboración con Kevin Masarik y Craig Schuettelpelz en una propiedad privada y en un parque en los condados de Dane y Portage en Wisconsin, Estados Unidos. Este estudio fue presentado en el 2^{do} Encuentro Latino de Profesores de Geotecnia organizado por J. Carlos Santamarina y Miguel Pando. La Fundación Goizueta proveyó los recursos para financiar el encuentro. Los estudios en este manuscrito fueron financiados por USGS, Wisconsin Water Resources Institute, y Shell Undergraduate Research Fund. La dedicación, creatividad y apoyo de estos individuos y organizaciones es realmente agradecida.

REFERENCIAS

- Attia, A.M., Fratta, D. y Bassiouni, Z. (2008). "Electrical resistivity measurements on unsaturated Berea sandstones core specimens", *Oil & Gas Science and Technology - Revue d'IFP Energies Nouvelles*, Vol. 63, No. 2, pp. 203-217.
- Borchardt, M.A., Bertz, P.D., Spencer, S.K. y Battigelli, D.A. (2003). "Incidence of enteric viruses in groundwater from household wells in Wisconsin", *Applied and Environmental Microbiology*, Vol. 69, No. 2, pp. 1172-1180.
- Converse, J.C., Tyler, E.J. y Peterson, J.O. (1989). "Design of Wisconsin at-grade soil absorption system", *Applied Engineering in Agriculture*, Vol. 5, No. 1, pp. 73-78.
- Damasceno, V., Fratta, D. y Bosscher, P.J. (2009). "Development and validation of a low-cost electrical resistivity tomographer for soil process monitoring", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 46, No. 7, pp. 842-854.
- Ernstson, K. y Scherer, H.U. (1986). "Self-potential variations with time and their relation to hydrogeologic and meteorological parameters", *Geophysics*, Vol. 51, No. 10, pp. 1967-1977.

- Fratta, D., Schuettelpelz, C. C. y Santamarina, J. C. (2007). "Hurricane Katrina: Geotechnical Observations in Biloxi, Mississippi", *GeoStrata* (Invited paper - Technical Paper edited by the Editor). Jan.-Feb. 2007, pp. 19-22.
- Hu, H., Cheng, Y. y Lin, J. (2007). "On-site treatment of septic tank effluent by using a soil adsorption system", *Practice Periodical of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste Management*, Vol. 11, No. 3, pp. 197-206.
- Klein, K.A., y Santamarina, J.C. (2003). "Electrical conductivity in soils: underlying phenomena", *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, Vol. 8, No. 4, pp. 263-273.
- Lin, Y.-T., Schuettelpelz, C., Wu, C. y Fratta, D. (2009). "A combined acoustic and electromagnetic wave-based technique for bathymetry and subbottom profiling in shallow waters", *Journal of Applied Geophysics*, Vol. 68, pp. 203-218.
- Lin, Y.-T., Wu, C.H., Fratta, D. y Kung, K.-J. S. (2010). "Integrated acoustic and electromagnetic wave-based technique to estimate subbottom sediment properties", *Near Surface Geophysics*, Vol. 8, No. 3, pp. 213-221.
- Loke, M.H. y Barker, R.D. (1996). "Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-newton method", *Geophysical Prospecting*, Vol. 44, Issue 1, pp. 131-152.
- Lowe, K.S. y Siegrist, R.L. (2008). "Controlled field experiment for performance evaluation of septic tank effluent treatment during soil infiltration", *Journal of Environmental Engineering*, Vol. 134, No. 2, pp. 93-101.
- Lowry, C., Fratta, D., y Anderson, M. (2009). "Using ground penetrating radar to identify processes controlling spring flow in a peat dominated wetland", *Journal of Hydrology*, Vol. 373, pp. 68-79.
- Reynolds, J. (1997). *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*, J. Wiley & Sons, New York, NY, 796 p.
- Rhoades, J.D., Raats, P.A.C. y Prather, R.J. (1976). "Effects of liquid-phase electrical conductivity, water content, and surface conductivity on bulk soil electrical conductivity", *Soil Science Society of America Journal*, Vol. 40, No. 5, pp. 651-655.
- Santamarina, J.C., Rinaldi, V.A., Fratta, D., Klein, K.A., Wang, Y.-H., Cho, G.-C. y Cascante, G. (2005). "A survey of elastic and electromagnetic properties of near-surface soils", in: *Near-Surface Geophysics - Vol. 13*, D. Buttler, editor, SEG Books, Tulsa, Oklahoma, pp. 71-87.
- Telford, W.M., Geldart, L.P. y Sheriff, R.E. (1990). *Applied Geophysics*, 2nd Edition, Cambridge University Press, 770 p.
- Topp, G.C., Davis, J.L. y Annan, A.P. (1980). "Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines", *Water Resources Research*, Vol. 16, No. 3, pp. 574-82.
- U.S. EPA (2002). *Onsite Waste Water Treatment Systems Manual*, URL: http://www.epa.gov/owm/septic/pubs/septic_2002_osdm_all.pdf, accedido: 30 de septiembre de 2011.
- Wisconsin Administrative Code (2006). "Chapter NR 812: Well Construction and Pump Installation", Register, January 2006, No. 601, Wisconsin Department of Natural Resources, Madison, WI, 105 p.