

# CWR: ALTERNATIVA PARA DETECCION DE NAPLs

M. F. Serrano Guzmán<sup>\*1</sup>, D. D. Pérez Ruiz<sup>\*2</sup>, A. Puppala<sup>\*3</sup>, I. Padilla<sup>\*4</sup>

<sup>\*1</sup>Universidad Pontificia Bolivariana, <sup>\*2</sup>Pontificia Universidad Javeriana de Cali,

<sup>\*3</sup>Universidad de Texas en Arlington, <sup>\*4</sup>Universidad de Puerto Rico, Recinto Universitario de

Mayagüez

Recibido Marzo 24, 2010 – Aceptado agosto 30, 2010

<http://dx.doi.org/10.18566/puente.v4n2.a03>

**Resumen**— Cambios en la calidad del medio ambiente se evidencian por alteraciones en la calidad de los recursos naturales como el agua, aire, y suelo. Se han adelantado investigaciones relacionadas con las técnicas de tratamiento para mejorar la calidad de una fuente de agua, para controlar las emisiones atmosféricas, o para detener los procesos erosivos de los taludes, entre muchas que se distinguen por su contenido técnico.

Con cualquiera de estas soluciones se mitigan los impactos negativos causados por el desarrollo industrial y por la mayoría de actividades de construcción del Ingeniero Civil. Sin embargo, se debe incursionar en la búsqueda de técnicas que permitan detectar el deterioro ambiental que no es perceptible, es decir, aquel que ocurre en el subsuelo. Específicamente, el objetivo del presente trabajo es presentar los resultados obtenidos al utilizar la técnica de pozos cruzados (CWR Cross Well Radar) para detección de contaminación en el suelo y plantear el uso de dicha técnica para la detección de hidrocarburos.

Esta técnica utiliza una antena transmisora y otra receptora instaladas en pozos en el suelo; un impulso electromagnético es enviado y se registran los valores de los coeficientes de transmisión y reflexión con los cuales es posible estimar las permitividades dieléctricas del suelo; variaciones en estas propiedades muestran perturbaciones en el medio. En este artículo se presentan los resultados correspondientes a la respuesta electromagnética, evidenciada en la atenuación de la onda, cuando hay presencia de un objeto (pedazo de acrílico) en el suelo. Se muestra entonces, la viabilidad de utilizar la técnica CWR como una alternativa no destructiva del suelo, la cual se puede adaptar en campo para la detección de hidrocarburos.

**Palabras clave**— detección, contaminación, suelos, compuestos clorinados, hidrología agua subterránea, zona vadosa

**Abstract**— Adverse changes in the environmental quality cause negative effects in natural resources as water, air, and soil, whose impacts. Consequently, there are researches about treatment of water, control of atmospheric emissions, or control of erosive processes in slopes, and often these publications have useful technical information. Moreover, Civil Engineers are responsible for negative impacts generated in building construction activities. Nevertheless, it is necessary to prepare research about solutions to diminish environmental deterioration that is not perceptible by human; that is, research about underground contamination.

This article focuses about different techniques have been used to detect contamination in the underground, specifically to detect chlorinated solvents, and specifically the use of Cross Well Radar (CWR). In addition, it is expecting that the technique may be adapted to use in hydrocarbons detection. CWR use a transmitter and a receiver antenna located in wells; an electromagnetic impulses is sent and transmission and reflection coefficients are used to determine dielectric permittivity in the soil. Results about detection of a plexiglass object have been included. Then, it is shown that CWR is a non invasive technique that may be used to detect contamination, and may be adapted to detect hydrocarbons.

**Keywords**— detection, contamination, soil, chlorinated solvents, hydrology, groundwater, vadose zone

M.F. Serrano Guzmán, Ingeniera Civil, Docente Asociado Ingeniería Civil, Universidad Pontificia Bolivariana, mariaf.serrano@upb.edu.co.

D.D. Pérez-Ruiz, Docente Asociado Ingeniería Civil, Pontificia Universidad Javeriana de Cali, diegoperezr@gmail.com.

A. Puppala, Docente Titular Ingeniería Civil, Universidad de Texas en Arlington, ajpuppala@gmail.com.

I. Padilla, Docente Asociado Ingeniería Civil, Universidad de Puerto Rico, Recinto Universitario de Mayagüez, ipadill@attglobal.net.

## I. INTRODUCCIÓN

Los contaminantes en el suelo pueden encontrarse en fase gaseosa, fase acuosa, adsorbidos al suelo, o aislados si no encuentran afinidad con la química del suelo [1]. Existen diferentes técnicas para medir las concentraciones en las distintas fases, y las tecnologías de detección están encaminadas a localizar los compuestos en función de la fase predominante del mismo en el medio poroso [2]. La contaminación de suelos y aguas subterráneas por

compuestos clorinados, especialmente por compuestos mas densos que el agua (DNAPLs, dense non-aqueous phase liquids, por su descripción en inglés) causa deterioro a la calidad del ambiente y pone en riesgo la salud humana. Estos contaminantes pueden permanecer por largo tiempo en el ambiente [2], [3], [4], [5], [6]. Su movilidad hace difícil la localización, caracterización y posterior remediación de los suelos en donde se han encontrado áreas expuestas a este tipo de contaminación. Se hace necesario el desarrollo de tecnologías que permitan la detección, para posteriormente incursionar en técnicas para la remediación de los suelos contaminados.

El uso de antenas localizadas en pozos, conocido como cross well radar (CWR por sus siglas en ingles) ha presentado resultados favorables para detectar objetos sólidos en suelos bajo condiciones saturadas [7]. Estudios posteriores demostraron que CWR puede ser utilizado para detectar compuestos clorinados en ambientes secos y saturados [8]. Específicamente, esta revisión técnica describe las tecnologías para la detección de DNAPLs y presenta una aplicación de la técnica de CWR, así como también muestra aplicaciones de CWR para la detección de LNAPLs, como los hidrocarburos.

### A. Tipos de NAPLs

Existen dos grandes tipos de NAPLs: los densos y los livianos. DNAPLs (Dense Non Aqueous Phase Liquids) son compuestos más densos que el agua y pueden estar presentes en el subsuelo contaminando sitios ya que persisten en la fase gaseosa y, adicionalmente, pueden movilizarse ayudados por el flujo de agua subterránea [5], [6] (Figura 1). Al igual que los LNAPLs (light non-aqueous phase liquids, por su descripción en inglés), menos densos que el agua, hacen parte de los fluidos que no mojan [8], [9] y por algunos investigadores han sido considerados inmóviles [10]. Ante un derrame de estos compuestos, los DNAPLs pueden desplazarse hasta el fondo de una capa confinante de un acuífero, en tanto que los LNAPLs pueden viajar en la dirección que se desplacen las aguas subterráneas. En ambos casos, los compuestos deben vencer la altura crítica para penetrar en zona vadosa o en medio saturado. En conclusión, la dinámica del agua subterránea favorece el desplazamiento de estos contaminantes y la formación de extensiones de contaminación que ocupan grandes volúmenes de acuíferos, aumentando con ello el riesgo de contaminación hacia otros receptores [8], [11], [12].

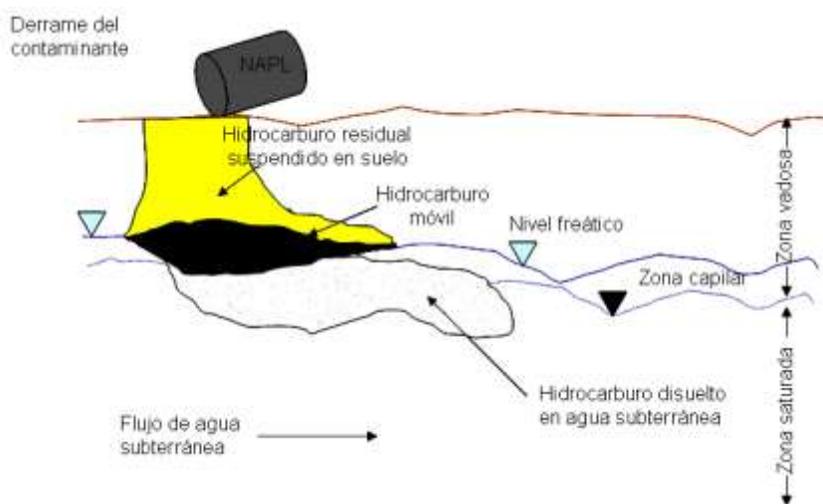


Fig.1. Distribución del NAPL luego de un derrame del contaminante

### Dinámica de movilización de los DNAPLs

El agua es desplazada cuando los DNAPLs entran al suelo, creando una interface inestable entre los fluidos debido a las propiedades de los fluidos y del medio poroso [13]. (Figura 2). Cuando los DNAPLs se encuentran en

cantidades suficientes en la zona no saturada o en la saturada con volúmenes capaces de vencer la altura crítica para penetrar la masa de suelo, empiezan a desplazarse inicialmente por gravedad, hasta que en la fase libre puedan desplazarse como formando glóbulos [14]. Posteriormente, se forman extensiones a manera de “dedos” que pueden

desarrollarse a una razón de flujo que varía dependiendo del tipo de suelo y de las condiciones iniciales de humedecimiento (histéresis). En estas condiciones, la movilidad de estos “dedos” de contaminante puede extenderse grandes distancias antes de penetrar completamente la matriz porosa [15]. La sorpción de estos compuestos hidrofóbicos en la materia orgánica ha sido estudiada para varios tipos de suelos.

Adicionalmente, existen varias expresiones químicas que permiten estimar la sorpción específicamente para el tricloroetileno (TCE) y que pueden ser usadas para otro tipo de químicos que tengan propiedades similares [16].

#### *Relación entre la presión capilar y la saturación del suelo*

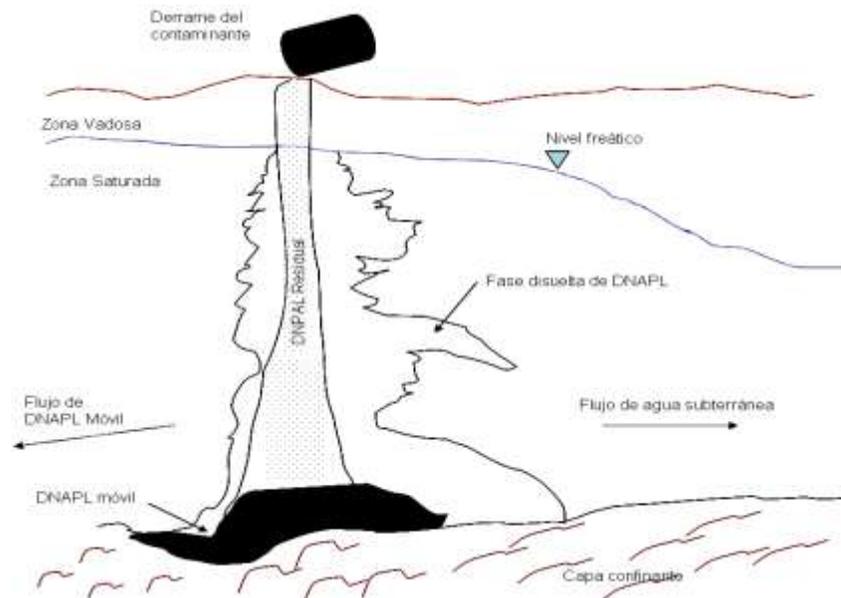


Fig. 2. Movilidad del DNAPL en la matriz de suelo

#### **B. USOS DE NAPLs**

La contaminación por compuestos clorinados causada en los suelos y en los depósitos de agua subterránea genera un problema ambiental principalmente en lo referente a la afectación de la calidad de los reservorios subterráneos. Estos compuestos no son regularmente depositados en el ambiente en forma pura, sino que a menudo son descargados como resultado de procesos industriales en los que son usados como solventes [14], [19]. Es conocido que estos contaminantes clorinados se han infiltrado en el suelo por derrames involuntarios de tanques en los cuales habían sido almacenados en el pasado [20]. En la zona no saturada, zona vadosa, pueden facilitarse procesos de volatilización de estos compuestos [21]. Por otro lado, hay evidencia de concentraciones del orden de ppb en depósitos de agua subterránea [4]. Existen dos grandes tipos de NAPLs: los densos y los livianos. DNAPLs (Dense Non Aqueous Phase Liquids) son compuestos

Los compuestos clorinados han sido usados en

Como se expresó anteriormente, los NAPLs son fluidos que no mojan, en tanto que el agua tiene la propiedad de humedecer la matriz de suelo. La existencia de tensión superficial entre los dos fluidos hace que exista diferencia de presión con lo cual estos fluidos se retienen a la matriz del suelo [5], [6], [17]. A la diferencia de presión entre los dos fluidos se le conoce como presión capilar y para el caso de los NAPLs se estima como la presión de los fluidos que no mojan (como TCE) menos la presión del fluido que moja (como el agua). Es comprensible que los NAPLs pueden desplazar agua de la matriz del suelo cuando la presión capilar se incrementa y que los fenómenos de histéresis pueden ocasionar desplazamiento de estos compuestos [17]

aplicaciones comerciales e industriales y pueden ser encontrados en varios productos caseros [7]. Así mismo, han sido usados para la producción de cloroformo, químicos para refrigeración y productos usados para preparación de compuestos en los extinguidores, y como desengrasantes [18]. Los compuestos clorinados fueron introducidos en la sociedad en los primeros años del siglo 20 [2], [18] y su uso se extendió hacia la Segunda Guerra Mundial [17].

Los compuestos más comunes que se han utilizado son tricloroetileno (TCE), percloroetileno (PCE), y tricloroetano (TCA), e inclusive gran cantidad de compuestos inhibidores de corrosión y antioxidantes [2]. El TCE, específicamente, ha sido muy usado en limpiezas de partes mecánicas, en tanto que el PCE en preparación de aerosoles y removedores de pintura. Hacia mediados del siglo pasado, estos químicos fueron parte esencial en la fabricación de motores eléctricos, maquinaria y computadores.

### C. METODOS DE DETECCION

El conocimiento de la dinámica del transporte del agua y solutos en el suelo es relevante para la agricultura, hidrología, e investigaciones ambientales y en aplicaciones de ingeniería a diferentes escalas [22], [23], [24]. Por tal razón, existe una necesidad de desarrollar e integrar técnicas de detección y monitoreo de contaminación en el suelo en la zona saturada y no saturada.

Se ha expresado anteriormente que la localización de contaminantes es el primer paso para una posterior remediación de los suelos [23], [26]. Numerosas tecnologías se han utilizado para caracterizar el subsuelo [12], [19] y en todas ellas se conoce la impredecible movilidad de los contaminantes [3]. Estas tecnologías abarcan aquellas que incluyen invasión del suelo para la extracción de muestras, y otras que son no invasivas (Tabla 1), las cuales serán

suscintamente explicadas a continuación.

#### *Técnicas invasivas*

Los métodos invasivos han sido utilizados para detección de compuestos clorinados y para la caracterización en el subsuelo en diferentes aplicaciones geofísicas. En estos métodos se introduce un muestreador que penetra el subsuelo y toma una muestra para posterior análisis [19].

Estos muestreadores pueden determinar directamente el nivel de contaminación en el sitio, o tomar las muestras para ser estudiadas en el laboratorio. Para el caso específico de los compuestos clorinados, existen algunas técnicas que han sido probadas con buenos resultados:

TABLA I  
CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DE LAS TÉCNICAS PARA DETECCIÓN DE DNAPLS

<i>Técnica</i>	<i>Característica</i>	<i>Referencia</i>
<i>Invasiva</i>	Utiliza muestreadores dentro del suelo. Pueden tomar muestras a diferentes profundidades, imágenes del suelo utilizando sensores, o usar geomembranas que permitan determinar propiedades de la matriz de suelo como la permitividad. Dependiendo de la técnica puede ser empleada en zona saturada o no saturada.	[7, 8, 19, 27, 28, 29]
<i>No Invasiva</i>	Evita la migración vertical de compuestos o el movimiento a través de grietas o fisuras. Permiten medir propiedades físicas y químicas del suelo Pueden utilizarse para seguir procesos de remediación de suelos contaminados.	[8, 19, 25, 26, 30, 31]

o Muestras de centro: a manera de “cuchara” se extrae la muestra de suelo a diferentes profundidades. Con este método se han llegado a hacer reproducciones en tres dimensiones de extensión de la contaminación para ciertos compuestos [19].

o Cono de penetración con visión: es un penetrómetro al cual se le ajusta un cable conectado a una cámara. Este sistema provee información sobre estratigrafía con bastante exactitud [22] y permite detectar glóbulos de DNAPLs [7], [19].

o Fluorescencia inducida por laser: Permite determinar indirectamente la localización de DNAPLs mediante la adaptación de un sensor óptico que mide la fluorescencia del compuesto [19].

o Muestreador con membranas: esta tecnología desarrollada por Geoprobe Systems permite localizar compuestos volátiles utilizando una fina membrana a manera de sensor, localizada en una malla de acero inoxidable. Este sensor permite estimar la permitividad aparente del suelo usando unos datos de calibración de propiedades dieléctricas conocidas versus. voltage generado [28], [29]. Respecto a la técnica, existe preocupación sobre la influencia de la salinidad del suelo y la temperatura en las lecturas de los sensores de la membrana [27].

o Muestreador de Ribbon: Permite detectar extensión y glóbulos de NAPL en el subsuelo y trabaja en zona vadosa y en zona saturada [19].

#### *Técnicas no invasivas*

El uso de técnicas no invasivas evita la migración vertical de estos compuestos, además que pueden proporcionar una descripción mas detallada de la extensión de los mismos en el subsuelo [19], [30] y son tiempo-efectivos en la detección [25], [26]. Los métodos geofísicos son técnicas no invasivas o semi-invasivas que cumplen diferentes funciones aplicadas a la ingeniería.

Una variedad de métodos geofísicos permite en forma no invasiva determinar las propiedades físicas y químicas del subsuelo [1], [32], [33]. La aplicabilidad de estas tecnologías depende del tipo de compuesto que se pretenda localizar y de las condiciones geológicas del medio. Cabe destacar que estas técnicas son útiles para hacer seguimiento a los procesos de descontaminación (remediación) de áreas contaminadas [31].

Para el caso específico de este artículo, se mencionarán aquellas técnicas útiles para la detección de DNAPLs: Ground Penetrating Radar (GPR), tomografía de resistencia eléctrica (ERT por sus siglas en inglés), inducción vertical,

técnicas de reflexión sísmica, y antenas en pozos (CWR, cross well radar en inglés).

o Ground Penetrating Radar (GPR)

Ground Penetrating Radar (GPR) envía una onda a través de la matriz del suelo y dependiendo del contraste de las propiedades electromagnéticas del medio, esta onda se refleja [3], [4], [22], [34], [35], [36] y puede ser entonces estimado el tiempo de viaje de la onda [37], y esta información ser empleada para diferentes aplicaciones. El contraste en las propiedades dieléctricas del medio es uno de los más importantes parámetros a considerar para la detección de objetos utilizando esta técnica [23], [38].

Esta tecnología ha sido usada para determinar el perfil del nivel freático [39], definir estratigrafía de suelos y seguir frentes de agua subterránea [31], monitorear movimiento de contaminantes [23], [24], entre otras muchos usos en ingeniería. Esta tecnología presenta una mejor resolución que otros métodos geofísicos [4] y tiene una gran aplicabilidad para propósitos de exploraciones hidrogeológicas [23], [24], [32], [35], y puede ser una técnica utilizable para detectar zonas donde existan DNAPLs depositados [26].

o Tomografía de resistencia eléctrica (ERT)

En este caso se aplica un campo eléctrico que permite determinar variaciones en la resistividad del suelo mediante el uso de dos electrodos a través de los cuales se aplica una corriente constante [40], [41], [42]. Esta técnica requiere buen contacto entre los electrodos y el suelo [40] y deben considerarse factores como el control de la profundidad y el tipo de suelo para mejorar la precisión de esta tecnología [44].

Esta técnica eléctrica ha sido usada para propósitos ambientales por la habilidad para observar cambios en resistividad por la migración de contaminación en el agua o del agua misma en la zona vadosa [32], [45], [46] y ha permitido la delimitación de contaminación por gasolina [46] y de DNAPLs [19], [41], [42].

o Inducción vertical

Por este método se pueden obtener imágenes en tres dimensiones de la resistividad del suelo. Esta tecnología provee buena resolución para la localización de DNAPLs, y es mas efectiva en suelos arenosos, limosos y arcillosos que en suelos consolidados y no consolidados [19].

o Polarización inducida

Este método ha sido usado para exploración mineral [47, 48] y en aplicaciones ambientales [49], [50], [51] como en la detección de contaminantes orgánicos [50], [51]. Este método se basa también en variaciones en las lecturas de voltage inducido en el suelo y en la respuesta de la resistividad del suelo [47], [51], [52] y se han reconstruido imágenes en dos y tres dimensiones partiendo de la información almacenada [53].

o Reflexión Sísmica

Los métodos sísmicos han sido usados para elaborar mapas de distribución geológica, e hidrológica [36], así como para determinar heterogeneidades del suelo [55] y definir la posición del nivel freático [54]. La tecnología no ha sido utilizada para detectar DNAPLs pero si puede detectar fracturas y canales en el suelo a través de los cuales se puede movilizar el compuesto.

o Antenas localizadas en pozos , Cross Well Radar (CWR)

Esta tecnología, al igual que GPR, utiliza antenas introducidas en el suelo. En el caso de CWR estas antenas se introducen en pozos. La geología del subsuelo y los poros de los fluidos causan atenuación de la amplitud de la onda que se envía a través de las antenas [54] con lo cual la detección de compuestos se hace partiendo de cambios en las propiedades dieléctricas de la matriz de suelo [56].

La técnica es exitosa cuando los compuestos contenidos en el suelo presentan propiedades dieléctricas que difieren a las del suelo sin contaminación. Por tal razón, variaciones del contenido de humedad y de la composición mineral del suelo pueden favorecer la aplicabilidad de esta técnica para detección. Estudios previos han demostrado la aplicabilidad de esta técnica para detectar compuestos [8], [57], [58], [59], [60] aunque una de las mayores limitaciones es que las antenas deben estar colocadas a pocos metros unas de otras lo cual lo hace no viable para todos los casos [8], [22]. Al igual que GPR, CWR está limitada para grandes concentraciones de DNAPL [19].

El uso de altas frecuencias permite mejores resoluciones para detectar el contaminante, pero como se explicó anteriormente, requiere mayor proximidad de las antenas. A medida que la distancia entre las antenas se incrementa la amplitud de la onda decrece, presentándose dificultades para diferenciar en la respuesta el nivel de ruido del suelo [8], [19]. En consecuencia, deben continuarse los estudios para aplicar y mejorar esta tecnología para detectar distribución gradual de los compuestos clorinados.

## II. APLICACIÓN DE CWR PARA DETECTAR OBJETOS ENTERRADOS

La tecnología CWR ha sido probada para detectar y monitorear compuestos y/o objetos localizados en zona no saturada bajo condiciones variables de humedad [8], [19] con resultados aceptables (Figura 3).

Para la adquisición de datos se desarrolló una interfase en Visual Basic y para el análisis de información se preparó otra desarrollada en Matlab. Con estas herramientas computacionales, los parámetros de dispersión (S-Parameters por su nombre en inglés) fueron almacenados en un computador de escritorio, y posteriormente analizados utilizando un programa que se desarrolló para tal efecto: Permittivity.

Así mismo, con Permittivity se determinó la permitividad del suelo  $\epsilon_r$ . Una vez determinada la permitividad se procedió a calcular la resistividad  $p$ , que es el inverso de la velocidad de viaje  $v$  de la onda utilizando la siguiente ecuación [8], [32], [56], [61], [62], [63], [64], [65]:

$$p \approx \frac{1}{v} = \frac{\sqrt{\epsilon_r}}{c} \quad (1)$$

Con los valores de resistividad se pueden construir tomogramas utilizando Tomography. Se observó durante la experimentación que se requiere un mínimo de lecturas de antenas de 5 a lado y lado para obtener buena resolución de los tomogramas, lo cual es tema de otra publicación.

La aplicación aquí presentada se basó en el uso de un tanque en dos dimensiones, con aberturas en las paredes laterales las cuales permitieron la inserción de las antenas dentro de la matriz de suelo. Estas antenas, transmisoras-reflectoras, envían la señal de un lado al otro del tanque.

#### *Caso de aplicación de CWR*

A continuación se presentan resultados obtenidos para detección de objetos en el suelo utilizando la técnica CWR dentro de este tanque. Una vara de 1 cm de sección recta en material plexiglass se introdujo hasta una profundidad de 25 cm. Se observaron variaciones en las lecturas electromagnéticas en función de la frecuencia cuando un objeto se introdujo dentro de la muestra de suelo (Figura 5).

Se infiere que hay mayores pérdidas de señal en donde la distancia de viaje de la onda a través del suelo es mayor. Esto es causado por la atenuación de la energía debido a las heterogeneidades del suelo. Adicionalmente, también se presentaron variaciones causadas por la inserción del objeto que causa cambios en la distribución de los granos de la muestra de suelo, cambiando por ello la respuesta electromagnética de la señal.

En el caso de reflexión se observaron mayores pérdidas en el rango entre 500 y 700 MHz. Comparando estas respuestas con los resultados de transmisión se puede apreciar que en este rango las medidas estuvieron muy próximas al nivel de ruido del analizador de señales. **Estas pérdidas también pueden ser atribuidas a variaciones en la radiación de la antena (Figura 6).**

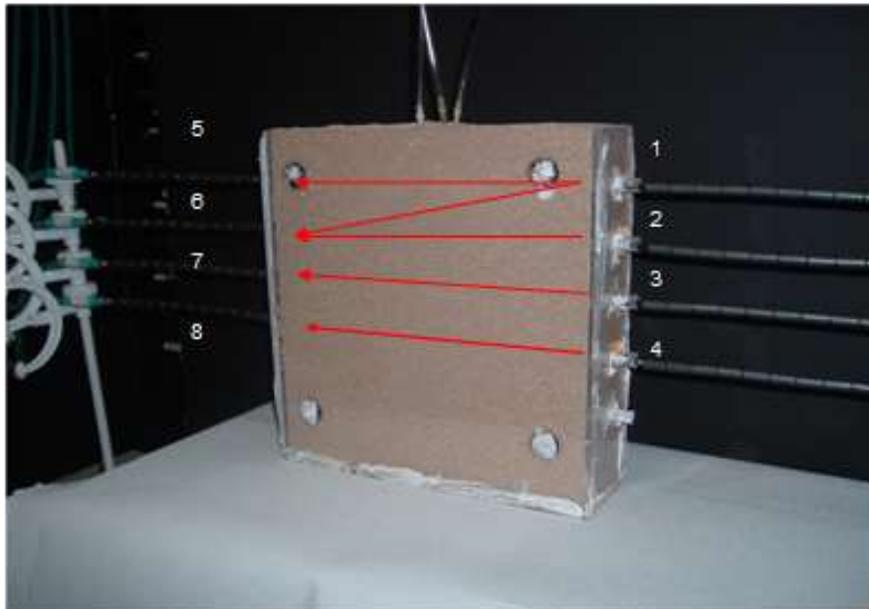


Fig. 3. Tanque en dos dimensiones utilizado para CWR

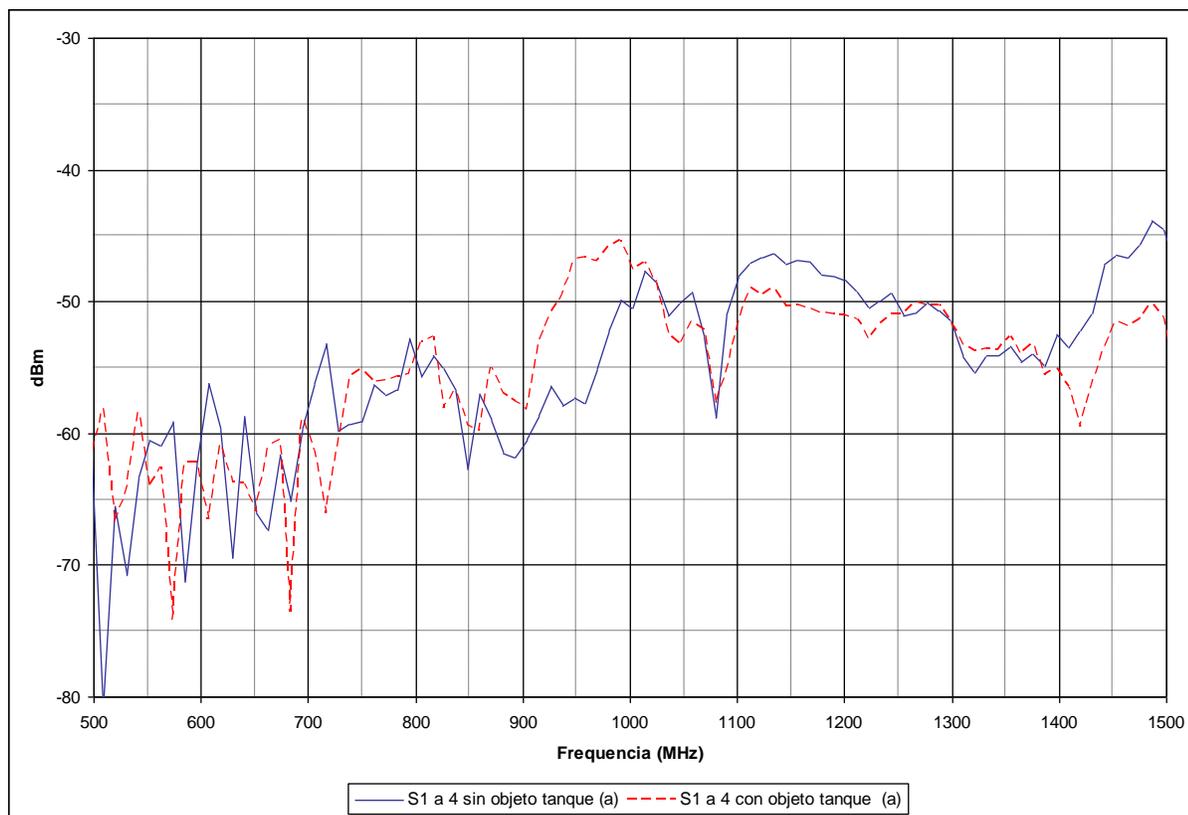


Fig.4. Medidas de transmisión de antena transmisora localizada a 10 cm de la superficie y la receptora localizada a 30 cm

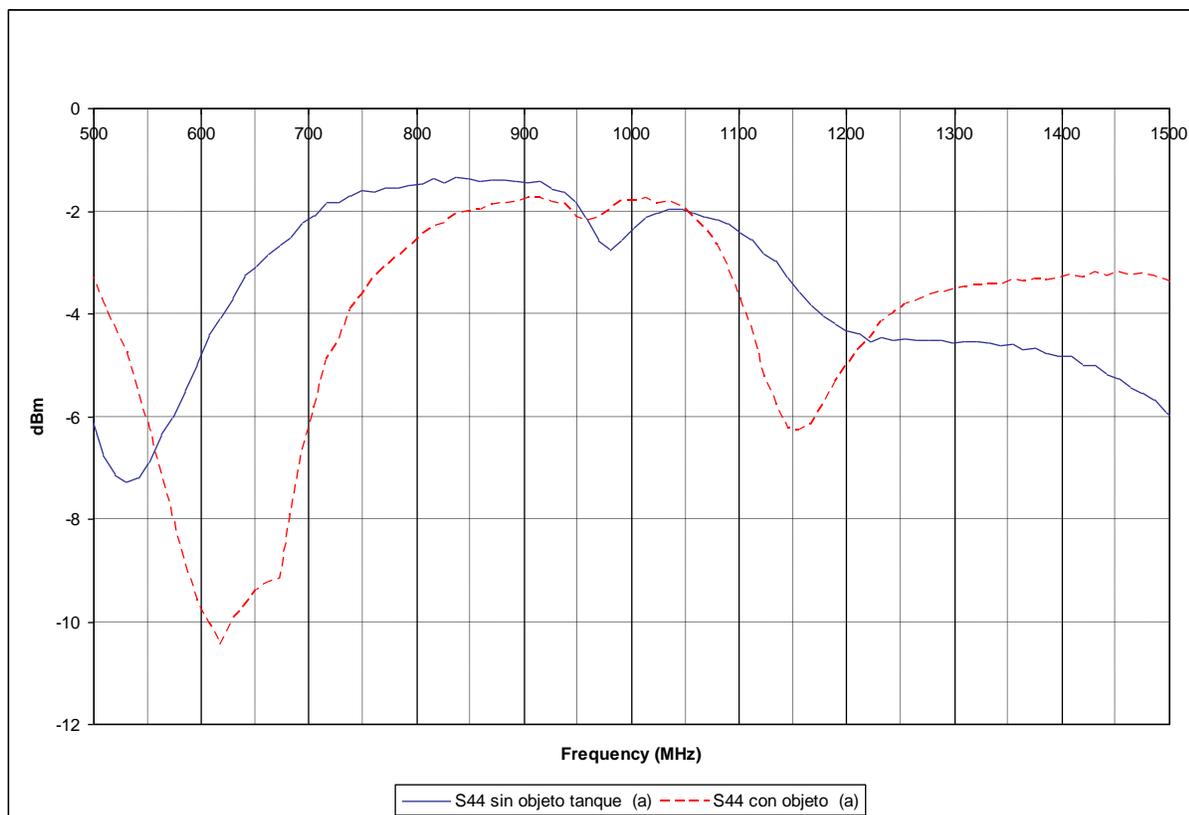


Fig.5. Medidas de reflexión de antena transmisora localizada a 10 cm de la superficie

### III. CONCLUSIONES

La disposición inadecuada de subproductos industriales está generando contaminación de los suelos y aguas subterráneas. Aunque son variados los métodos para detección de los contaminantes, la selección del método adecuado depende de factores litológicos, localización del contaminante, y concentración del mismo, entre otros.

En este documento se presentaron técnicas de detección de compuestos más densos que el agua (DNAPLs), dentro de los cuales se encuentran el tricloroetileno (TCE) y percloroetileno (PCE). La forma heterogénea como se distribuyen estos compuestos, hacen difícil su localización, caracterización, y posterior remediación a nivel de la zona vadosa o la zona saturada. Las tecnologías semi-invasivas o no invasivas presentan una gran viabilidad para este fin, entendiéndose que con ellas se puede hacer detección de fugas de tanques almacenados en el suelo o incluso llegar a delimitar extensión de la contaminación.

Los ensayos aplicando la técnica de CWR en un tanque en dos dimensiones mostraron cambios en las señales antes y después de introducir un objeto dentro del suelo. Es entendible, que el insertar el objeto se cambió la orientación de los granos del suelo y la señal encuentra obstáculos para su viaje y por lo tanto la energía se atenúa.

Para los efectos de este estudio se asumió que el suelo no presentaba pérdidas por conducción eléctrica, de manera que los cambios en las respuestas electromagnéticas pudieran ser interpretados como variaciones en las propiedades dieléctricas del suelo. Diferencias en la respuesta electromagnética se explican por heterogeneidades del suelo y al efecto de las condiciones de barrera impuestas por el confinamiento del material dentro del tanque.

Los parámetros de transmisión y de reflexión que se pueden determinar partiendo de las lecturas de CWR permiten la estimación de los cambios de permitividades del suelo. Este hecho, sugiere que la técnica pueda ser utilizada para la detección de hidrocarburos y ser útil en procesos de remediación de áreas contaminadas.

### AGRADECIMIENTOS

A la Dirección General de Investigaciones y a Colciencias por cofinanciar la movilidad del Dr. Annand Puppala.

### BIOGRAFÍA



María Fernanda Serrano Guzmán. Ingeniera Civil, Especialista en gerencia de Proyectos de Construcción de la Universidad Industrial de Santander, Especialista en Ingeniería Ambiental de la Universidad Pontificia Bolivariana de Bucaramanga,

Magister y Doctorado en Ingeniería Civil de la Universidad de Puerto Rico, recinto Universitario de Mayagüez. Líder del grupo DeCoR y del semillero SIIC. Designada Directora General de Investigaciones de la Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga en el 2009.

### REFERENCIAS

- [1] J.M. Carcione, G. Seriani, y D. Gei, "Acoustic and Electromagnetic Properties of Soils Saturated with Salt Water and NAPL", *Journal of Applied Geophysics*, vol. 52, no. 4, pp. 177-191, 2003.
- [2] M. Moran, J. S. Zagorski, y P.J. Squillage, "Chlorinated Solvents in Groundwater of the United States", *Environmental Science and Technology*, vol. 41, no. 1, pp. 74-81, 2007.
- [3] K.W. Sneddon, M. H. Powers, R. H. Johnson, y E. P. Poeter, "Modeling GPR Data to Interpret Porosity and DNAPL Saturations for Calibration of a 3-D Multiphase Flow Simulation", *United States Geological Survey, Open File Report 2002-2451*, Denver, 2002.
- [4] K.W. Sneddon, G. R. Olhoeft, y M. H. Powers, "Determining and Mapping DNAPL Saturation Values from Noninvasive GPR Measurements", in *Proceeding of SAGEEP Arlington*, 21-25 Febrero, 2000.
- [5] M.L. Brusseau, N.T. Nelson, and M.S. Constanza-Robinson, "Partitioning Tracers Tests for Characterizing Immiscible-fluid Saturations and Interfacial Areas in the Vadose Zone", *Vadose Zone Journal*, vol. 2, pp. 138-147, 2003.
- [6] M. Jalbert y J. H. Dane, "Correcting Laboratory Retention Curves for Hydrostatic Fluid Distributions", *Soil Science Society of America Journal*, vol. 65, pp. 648-654, 2001.
- [7] M. Farid, *DNAPL Detection Using Cross Well Radar*, PhD. Dissertation, Northeastern University, Boston, 2004.
- [8] María F. Serrano-Guzman, *Detection and Monitoring of DNAPLs in the subsurface under transient conditions using Cross Well Radar*, PhD. Dissertation, 2008.
- [9] M.P. Whelan, E.A. Voudrias, y A. Pearce, *DNAPL pool dissolution in saturated porous media: procedure development and preliminary results*, *Journal of Contaminant Hydrology*, vol. 15, no. 3, pp. 223-237, 1994.
- [10] M. Oostrom, M.D. White, R. J. Lenhard, P.J. Van Geel, y T.W. Wietsma, *A Comparison of Models Describing Residual NAPL Formation in the Vadose Zone*, *Vadose Zone Journal*, vol. 4, pp. 163-174, 2005.
- [11] L.S. Wadley, R. W. Gillham, y L. Gui, *Remediation of DNAPL Source Zones with Granular Iron: Laboratory and Field Tests*, *Ground Water*, vol. 43, no. 1, pp. 9-18, 2005.
- [12] B.L. Parker, J. A. Cherry, S. W. Chapman, y M. A. Guilbeault, *Review and Analysis of Chlorinated Solvent Dense Nonaqueous Phase Liquid Distributions in Five Sandy Aquifers*, *Vadose Zone Journal*, vol. 2, pp. 116-137, 2003.
- [13] H.H. Trantham y D.S. Durnford, *DNAPL Source Zone Characterization using a Stochastic Aggregation Model*, *Proceedings of the 1998 Conference on Hazardous Waste Research: Bridging Gaps in Technology and Culture*, 18-21 Mayo, Snowbird, UT, 1998.

- [14] ITRC Interstate Technology and Regulatory Council, DNAPL Source Reduction: Facing the Challenge. Disponible: <http://www.itrcweb.org/Documents/DNAPLs-2.pdf>, 2002, Accesado en October 2006.
- [15] W. Jury, Z. Wang, y A. Tuli, A Conceptual Model of Unstable Flow in Unsaturated Soil during Redistribution, *Vadose Zone Journal*, vol. 2, pp. 61-67, 2003.
- [16] T. Olesen, J. Gamst, P. Moldrup, T. Komatsu, y D. E. Rolston, Diffusion of Sorbing Organic Chemicals in the Liquid and Gaseous Phases of Repacked Soil, *Soil Science Society of America Journal*, vol. 65, pp. 1585-1593, 2001.
- [17] D.S. Durnford, D.B. Mc. Whorter, C.D. Miller, A. Swanson, F. Marinelli y H. L. Trantham, "DNAPL and LNAPL distributions in soils; experimental and modeling studies", Colorado State University, October. Disponible: <http://handle.dtic.mil/100.2/ADA342524>, 1997. Accesado en Abril, 2006.
- [18] R.E. Jackson y V. Dwarakanath, Chlorinated Degreasing Solvents: Physical-Chemical Properties Affecting Aquifer Contamination and Remediation, *Ground Water Monitoring and Remediation*, Fall, vol. 19, no. 4, pp. 102-110, 1999.
- [19] ITRC Interstate Technology and Regulatory Council, Dense Non-Aqueous Phase Liquids (DNAPLs): Review of Emerging Characterization and Remediation Technologies Disponible: <http://www.itrcweb.org/Documents/DNAPLs-1.pdf>, 2000, Accesado en September 2006.
- [20] M. Oostrom, J. H. Dane, y T. W. Wietsma, A Review of Multidimensional, Multifluid Intermediate-Scale Experiments: Nonaqueous Phase Liquid Dissolution and Enhanced Remediation, *Vadose Zone Journal*, vol. 5; pp. 570-598, 2006.
- [21] M. Pantazidou y N. Sitar, Emplacement of Nonaqueous Liquids in the Vadose Zone, *Water Resources Research*, vol. 29, no. 3, pp. 705-722, 1993.
- [22] W. P. Clement, W. Barrash, y M. D. Knoll, "Reflectivity Modeling of a Ground- Penetrating-Radar Profile of a Saturated Fluvial Formation", *Geophysics*, vol. 71, no. 3, pp. 59-66, 2006.
- [23] S. Lambot, M. Antoine, I. van den Bosch, M. Vanclooster, y E. C. Slob, Effect of Soil Roughness on the Inversion of Off-ground Monostatic GPR signal for Noninvasive Quantification of Soil Properties, *Water Resources Research*, vol. 42, no. 3, p. W3403, 2006.
- [24] S. Lambot, M. Antoine, I. van den Bosch, E. C. Slob, y M. Vanclooster, Electromagnetic Inversion of GPR Signals and Subsequent Hydrodynamic Inversion to Estimate Effective Vadose Zone Hydraulic Properties, *Vadose Zone Journal*, vol. 3, pp. 1072-1081, 2004.
- [25] R.H. Johnson, Characterization of Subsurface DNAPL Movement with Ground Penetrating Radar and Inverse Multiphase Flow Simulations, PhD Dissertation, The Colorado School of Mines, Colorado, 2005.
- [26] R.H. Johnson y E. P. Poeter, Interpreting DNAPL Saturations in a Laboratory-Scale Injection Using One- and Two-Dimensional Modeling of GPR Data, *Ground Water Monitoring and Remediation*, vol. 25, no. 1, pp. 159-169, 2005.
- [27] T.J. Kelleners, D. A. Robinson, P.J. Shouse, J.E. Ayars, y T.H. Skaggs, Frequency Dependence of the Complex Permittivity and Its Impact on Dielectric Sensor Calibration in Soils, *Soil Science Society of America Journal*, vol.76, pp 67-76, 2005
- [28] D.A. Robinson, T.J.Kelleners, J. D. Cooper, C.M.K. Gardner, P.Wilson, I.Lebon, y S. Logsdon, Evaluation of a Capacitance Probe Frequency Response Model Accounting for Bulk Electrical Conductivity: Comparison with TDR and Network Analyzer Measurements, *Vadose Zone Journal*, vol. 4, pp. 992-1003, 2005.
- [29] D.A. Robinson, C.M.K. Gardner, y J. D. Cooper, Measurement of Relative Permittivity in Sandy Soils Using TDR, Capacitance and Theta Probes: Comparison Including the Effects of Bulk Soil Electrical Conductivity, *Journal of Hydrology*, vol. 223, no. 3, pp.198-211,1999.
- [30] G. Cassiani, C. Strobbia, y L. Gallotti, "Vertical Radar Profiles for the Characterization of Deep Vadose Zones", *Vadose Zone Journal*, vol. 3, pp. 1093-1105, 2004.
- [31] F. Francisca y V. A. Rinaldi, Complex Dielectric Permittivity of Soil-Organic Mixtures (20MHz-1.3GHz), *Journal of Environmental Engineering*, Abril, vol. 129, no. 4, pp. 347- 357, 2003.
- [32] S. Garambois, P. Sénéchal, y H. Perroud, On the Use of Combined Geophysical Methods to Assess Water Content and Water Conductivity of Near-surface formations, *Journal of Hydrology*, vol. 259, no. 1, pp. 32-48, 2002.
- [33] G. Buselli y K. Lu, Groundwater Contamination Monitoring with Multichannel Electrical and Electromagnetic Methods, *Journal of Applied Geophysics*, vol. 48, no. 1, pp. 11-23, 2001.
- [34] S. Hanafy y S.A. al Hagrey, Ground-Penetrating Radar Tomography for Soil-moisture Heterogeneity, *Geophysics*, vol. 71, no. 1, pp. 9-18, 2006.
- [35] S. Lambot, E.C. Slob, I. van den Bosch, B. Stockbroeckx, B. Scheers, y M. Vanclooster, GPR Design and Modeling for Identifying the Shallow Subsurface Dielectric Properties, Second International Workshop on Advanced GPR, 14-16 Mayo, Delft, pp. 130-135, 2003.
- [36] K. Watson, D. Fitterman, R.W. Saltus, A. McCafferty, G. Swayze, S.Church, K. Smith, M. Goldhaber, S. Robson, y P. McMahon, Application of Geophysical Techniques to Minerals-Related Environmental Problems, United States Geological Survey, Open File Report 01-458. Disponible: <http://pubs.usgs.gov/of/2001/ofr-01-0458/ofr-01-0458.pdf>, 2001
- [37] J.K. Peterson, y D. C. Nobes, Environmental Geophysics at Scott Base: Ground Penetrating Radar and Electromagnetic Induction as Tools for Mapping Contaminated Ground at Antarctic Research Bases ,*Cold Regions Science and Technology*, vol. 37, no. 2, pp. 187-195, 2003.
- [38] T.W. Miller, J.M. Hendrickx, y B. Borchers, Radar Detection of Buried Landmines in Field Soils, *Vadose Zone Journal*, vol. 3, pp. 1116-1127, 2004.
- [39] D. Rucker y T.P.A. Ferré, Near-surface Water Content Estimation with Borehole Ground Penetrating Radar Using Critically Refracted Waves, *Vadose Zone Journal*, vol. 2, pp. 247-252, 2003.
- [40] Corwin D.L, y S. M. Lesch, "Application of soil Electrical Conductivity to Precision Agriculture: Theory, Principles, and Guidelines", *Agronomy Journal*, vol. 95, no. 3, pp. 455-471, 2003.
- [41] A. Furman, A.W. Warrick, y T. P. A. Ferré, Electrical Potential Distributions in a Heterogeneous Subsurface in Response to Applied Current: Solution for Circular Inclusions, *Vadose Zone Journal*, vol. 1, pp. 273-280, 2002.
- [42] A. Furman, T. P. A. Ferré, y, A.W. Warrick, A Sensitivity Analysis of Electrical Resistivity Tomography Array Types Using Analytical Element Modeling, *Vadose Zone Journal*, vol. 2, pp. 416-423, 2003.
- [43] E. W. Harmsen y H. Parsiani, Inverse Procedure for Estimating Vertically Distributed Soil Hydraulic Parameters Using GPR, NOAA-CREST/NASA-EPSCoR Joint Symposium for Climate Studies University of Puerto Rico- Mayaguez, 2003.
- [44] N. Zhang, G.Fan, K.H.Lee, G.J. Kluitenberg, y T.M.Loughin, Simultaneous Measurement of Soil Water Content and Salinity using a Frequency-Response Method, *Soil Science Society of America Journal*, vol. 68, 1515-1525, 2004.
- [45] S. Liu y T. Yeh, An Integrative Approach for Monitoring Water Movement in the Vadose Zone, *Vadose Zone Journal*, vol. 3, pp. 681-692, 2004.
- [46] A. Benson, K. L. Payne, y M. A. Stubben, "Mapping Groundwater Contamination using dc Resistivity and VLF Geophysical Methods- A Case Study", *Geophysics*, vol. 62, no. 1, pp. 80-86, 1997.
- [47] J. Yang, Three-Dimensional Complex Resistivity Analysis for Clay characterization in Hydrogeologic Study, PhD Dissertation, University of California, Berkeley, 2002.
- [48] W. H. Pelton, S.H. Ward, P.G. Hallof, W.R. Sill, y P. H. Nelson, Mineral Discrimination and Removal of Inductive Coupling with Multifrequency IP, *Geophysics*, vol. 43, no. 3, pp. 588-609, 1978.
- [49] M. Tong, Li L., Wang W., y Y. Jiang, Determining Capillary Pressure Curve, Pore-size Distribution, and Permeability from

Induced Polarization of Shaley Sand, *Geophysics*, vol. 71, no. 3, pp. N33-N40, 2006.

[http://water.usgs.gov/ogw/bgas/publications/SAGEEP03\\_Lane/ind ex.html](http://water.usgs.gov/ogw/bgas/publications/SAGEEP03_Lane/ind ex.html), 2003, consultado en Enero 2009.

- [50] A. Kemna, A. Binley, y L. Slater, Crosshole IP Imaging for Engineering and Environmental Applications, *Geophysics*, vol. 69, no. 1, pp. 97-107, 2004.
- [51] K. Titov, A. Kemna, A. Tarasov, y H. Vereecken, Induced Polarization of Unsaturated Sands Determined through Time Domain Measurements, *Vadose Zone Journal*, vol. 3, pp. 1160-1168, 2004
- [52] R.T. Shuey, y M. Johnson, On the Phenomenology of Electrical Relaxation in Rocks, *Geophysics*, vol. 38, no. 1, pp. 37-48, 1973.
- [53] M. Gasulla, J. Jordana, y R. Pallás-Areny, 2D and 3D Subsurface Resistivity Imaging Using a Constrained Least-Squares Algorithm, First World Congress on Industrial Process Tomography, Buxton, Greater Manchester, Abril 14-17, 1999.
- [54] S. Garambois, P. Sénéchal, and H. Perroud, On the Use of Combined Geophysical Methods to Assess Water Content and Water Conductivity of Near-surface formations, *Journal of Hydrology*, vol. 259, no. 1, pp. 32-48, 2002.
- [55] M. Eppstein y D. Dougherty, "Efficient Three-dimensional Data Inversion: Soil Characterization and Moisture Monitoring from Cross-Well Ground-Penetrating Radar at a Vermont Test Site", *Water Resources Research*, vol. 34, no. 8, pp. 1889-1900, 1998.
- [56] Maria F. Serrano-Guzman y Diego D. Pérez, ART to develop Tomograms in Matlab, *Revista Avances en Sistemas e Informática*, Vol. 6 No. 1, 2009.
- [57] M Farid, A.N. Alshawabkeh, y C.M. Rappaport, Modeling Borehole Dipole Antenna Patterns for Cross-well Radar DNAPL Imaging, *Electronic Proceedings of the 12th Pan-American Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Cambridge, MA., pp. 261-268, 2003.
- [58] M. Farid, Alshawabkeh, A. N., y Rappaport, C. M., "Laboratory Experimental Setup for Cross-well Radar", *Proceedings of SAGEEP Conference*, San Antonio, TX, 2003.
- [59] M. Farid, Alshawabkeh, A. N., y Rappaport, C. M., "DNAPL Detection using Cross-Well Radar", *Environmental Geotechnics, Proceeding, 4th ICEG*, pp. 465-470, 2002.
- [60] Maria F. Serrano-Guzman, Padilla I., and R. Rodriguez, Two-Dimensional Detection of Underground Contamination and Buried Objects Using Cross-Well Radar, *Proceeding of SPIE Radar sensor technology. Conference Vol. 6210*, Orlando, pp. R1-R11, 2006.
- [61] S. Attia al Hagrey Said, Geophysical Imaging of Root-zone, Trunk, and Moisture Heterogeneity, *Journal of Experimental Botany Advance Access*, vol. 58, no. 4, pp. 839-854, 2007.
- [62] O. Buyukozturk, Tzu-Yang Yu., and J.O.Ortega, "A Methodology for Determining Complex Permittivity of Construction Materials Based on Transmission-only Coherent, Wide-bandwidth Free-space Measurements", *Cement & Concrete Composites*, vol. 28, pp. 349-359, 2006.
- [63] J. Lane, F.D. Day-Lewis, J.M. Harris, F.P. Haeni, and S.M. Gorelick, Attenuation-difference Radar Tomography Results of a Multiple Plane Experiment at the U.S. Geological Survey fractured Rock Research Site, *USGS Ground Water Information, Branch of Geophysics, Mirror Lake, New Hampshire*, 1999a. Disponible: <http://water.usgs.gov/ogw/bgas/publications/attenuation/>, consultado en Diciembre, 2008.
- [64] J.W. Lane, D. L. Wright, and E.P. Haeni, Borehole Radar Tomography Using Saline Tracer Injections to Image Fluid Flow in Fractured Rock, in Morganwalp, D.W. and Buxton, H.T., eds., *U.S. Geological Toxic Substances Hydrology Program -- Proceedings of the Technical Meeting*, Charleston, South Carolina, *USGS Water-Resources Investigations Report 99-4018C*, vol. 3, pp. 747-756, 1999 (b). Available: <http://water.usgs.gov/ogw/bgas/imaging/>, consultado en Diciembre, 2008.
- [65] J.W. Lane, F.D. Day-Lewis, R.J.Versteeg, and C. C. Casey, Object-Based Inversion of Crosswell Radar Tomography Data to Monitor Vegetable Oil Injection Experiments, *Proceedings at the Symposium on the Application of Geophysics to Environmental and Engineering Problems SAGEEP*, Texas. Disponible: