

.Detección de contaminantes en acuíferos mediante el método geoelectrico: gráficos de sensibilidad como herramienta para la elección de un dispositivo electrodico apropiado.

María Victoria Bongiovanni⁽¹⁾, Vivian Grünhut⁽²⁾

⁽¹⁾Facultad de Ingeniería, Universidad Austral, LIDTUA-CIC, CONICET.

Mariano Acosta 1611, B1629WWA Pilar, Buenos Aires.

5239-8000 int 8500

mbongiovanni@austral.edu.ar

⁽²⁾Facultad de Ingeniería, Universidad Austral, LIDTUA, CIC, CONICET.

Mariano Acosta 1611, B1629WWA Pilar, Buenos Aires.

5239-8000 int 8500

vgrunhut@austral.edu.ar

Introducción

El proceso de explotación de reservorios de hidrocarburos, ya sea convencional o no convencional, puede tener un impacto negativo en el medio ambiente. Aunque se tomen las medidas necesarias para evitar cualquier tipo de daño, uno de los principales riesgos es la contaminación de algún acuífero. La calidad del agua podría ser potencialmente afectada por algún derrame de agua salada (brine), pérdidas en el entubado de un pozo o derrames accidentales de químicos utilizados en el proceso de fracturación hidráulica (Arthur and Cole 2014). Actualmente, debido a los avances tecnológicos, esta técnica es ampliamente utilizada para iniciar la producción de petróleo en un reservorio no convencional, que anteriormente no fuera económicamente viable, incrementando la posibilidad de daños ambientales. El potencial riesgo al medio ambiente de estos químicos filtrándose de las zonas fracturadas o fallas en los pozos continúa causando controversia.

Más aún, tomando en cuenta que el agua subterránea es uno de los principales recursos de agua usado en el proceso de fracturación y que son requeridas cantidades significativas (Mathis 2011), es importante realizar estudios regulares con el objetivo de ver si existe alguna zona contaminada y poder remediarla.

Entre todos los métodos geofísicos utilizados para la caracterización de un acuífero, la tomografía eléctrica (ERT por sus siglas en inglés: Electrical Resistivity Tomography) es uno de los más comunes debido a su sensibilidad a algunas propiedades hidrológicas. Dado que cualquier agente contaminante tendría una conductividad eléctrica diferente al agua que se encuentra en el acuífero, los métodos geoelectricos pueden ser muy útiles para detectar y, más aún, monitorear la evolución de la contaminación.

Durante los últimos 10 a 15 años la instrumentación de sondeo de tomografía eléctrica ha avanzado rápidamente, permitiendo acumular grandes cantidades de datos de forma rápida y automática y brindando la oportunidad de caracterizar la subsuperficie y monitorear las propiedades subsuperficiales con una mayor resolución en tiempo y espacio.

La principal ventaja de un monitoreo hecho con tomografía eléctrica desde la superficie es que es poco invasivo y automatizado, facilitando el monitoreo de flujos de

aguas subterráneas a largo plazo. Este tipo de monitoreo ha sido exitosamente llevado a cabo por Cassiani *et al.* (2006), Monego *et al.* (2010) and Robert *et al.* (2012), aunque posee algunas restricciones. Por ej. en la resolución (Ellis and Oldenburg 1994), en la profundidad (Nguyen *et al.* 2009) y en la no unicidad de la respuesta geofísica. Para superar estas restricciones, en particular las limitaciones de profundidad, estamos forzados a considerar y testear diferentes configuraciones de electrodos para obtener resultados exitosos.

En este trabajo, consideramos la posibilidad de usar la tomografía eléctrica no solamente desde la superficie sino, también combinada con electrodos en pozo para detectar, caracterizar y eventualmente monitorear algún acuífero contaminado que yace por arriba de un reservorio. Hemos hecho un estudio sintético para ver si es posible no sólo detectar la contaminación, que podría ser tanto resistiva debido a una pérdida de una migración de CO₂ o conductora debido a una pérdida de brine, sino que también bajo qué condiciones podría ser caracterizada.

Con el objetivo de satisfacer este propósito, además de resolver el problema directo se tiene que hacer la inversión 3D. Hay que tener presente que estamos interesados en identificar y caracterizar la contaminación de una parte de un acuífero profundo, que yace por arriba de un reservorio de petróleo aproximadamente a 250 m de profundidad. Esto no es un detalle menor si se tiene en cuenta las restricciones geométricas del problema que dificulta el uso de programas convencionales de inversión.

Para resolverlo, hemos simulado un modelo de capas cuya dimensión y resistividad fue obtenida de mediciones provenientes de pozos de producción de petróleo. Basado en este modelo, hemos hecho diferentes simulaciones con una pluma contaminante variando la resistividad de la misma. Hemos calculado la sensibilidad para el caso no contaminado usando el modelo directo con una configuración de electrodos solo en superficie, en superficie y en pozo, y con todos los electrodos en un mismo pozo.

Es importante resaltar que este tipo de estudio sintético debería ser hecho antes que las mediciones de campo. Si este estudio de sensibilidad no puede detectar la contaminación, no vale la pena hacer las mediciones de campo, pudiéndose ahorrar tiempo y dinero.

Sensibilidad

La función sensibilidad describe el grado en el que un pequeño cambio en la resistividad de una sección de la subsuperficie puede influir en el potencial medido por una configuración electródica particular. Cuanto mayor sea el valor de la función de sensibilidad, mayor será la influencia de la región subsuperficial en la medición. Configuraciones diferentes dan diferentes respuestas sobre la misma sub-superficie. Algunos arreglos proporcionan una mejor resolución sobre los cambios verticales mientras que otros proporcionan una mejor resolución para los cambios horizontales. Si tenemos alguna idea de la estructura geológica a delinear, es mejor utilizar el arreglo adecuado, para obtener un mejor resultado. El objetivo del presente trabajo es ver si es posible la detección de la anomalía. Para esto usamos COMSOL Multiphysics 5.3 a través del modelado directo 3D y la interpretación de los diagramas de sensibilidad para determinar cuál es el mejor arreglo para detectar una estructura subsuperficial particular.

Matemáticamente, la función de sensibilidad está dada por la derivada de Frechet (McGillivray y Oldenburg 1990), dada por

$$F_{3D}(x, y, z) = \frac{1}{4\pi^2} \frac{x(x-a)+y^2+z^2}{[x^2+y^2+z^2]^{1.5} [x(x-a)+y^2+z^2]}$$

Esto proporciona la función de sensibilidad de Frechet para la configuración electródica polo-polo que consiste en una sola corriente y un electrodo potencial. Para obtener la derivada de Frechet para un arreglo general de cuatro electrodos, es necesario sumar las contribuciones de los cuatro pares de potencial de corriente. Las sensibilidades relativas para un medio homogéneo son puramente geométricas e independientes de la resistencia del medio o conductividad de la corriente, mientras que un medio heterogéneo perturba la sensibilidad en la posición de los electrodos de potencial.

En este trabajo se utilizó la interfaz de corriente eléctrica del módulo AC/DC de COMSOL Multiphysics 5.3. Este módulo proporciona un entorno para la simulación de fenómenos electromagnéticos en 2D y 3D y permite el cálculo de la sensibilidad de una configuración de electrodos, resolviendo el problema directo para dos situaciones de dipolos de inyección. De este modo, se pueden comparar todas las configuraciones electródicas que se desee, y realizar un estudio comparativo de sensibilidad.

Descripción del modelo

El sitio que modelamos fue previamente descrito en Bongiovanni *et al.* (2015). Es un reservorio de petróleo con una profundidad de 500 m aproximadamente, ubicado en el oeste de la República Argentina. El acuífero yace por arriba del reservorio que se encuentra actualmente bajo recuperación asistida y concentramos nuestro estudio en un área de 1 km², aproximadamente. Hemos decidido usar este modelo en particular porque había cierto interés en la región. Para construirlo utilizamos datos eléctricos conocidos adquiridos de pozos durante el proceso de perforación, así como también valores de porosidad junto a la interpretación geológica de rocas provenientes principalmente del reservorio. Con los valores eléctricos obtenidos de los registros eléctricos, hemos construido el modelo de capas mostrado en la Fig. 1. La primera capa (A) resistiva tiene un valor medio de $\rho = 100 \Omega\text{m}$. Las 2 capas B y D tienen un valor de $\rho = 20 \Omega\text{m}$ y la capa C tiene un valor de $\rho = 10 \Omega\text{m}$, correspondiente a la ubicación del acuífero.

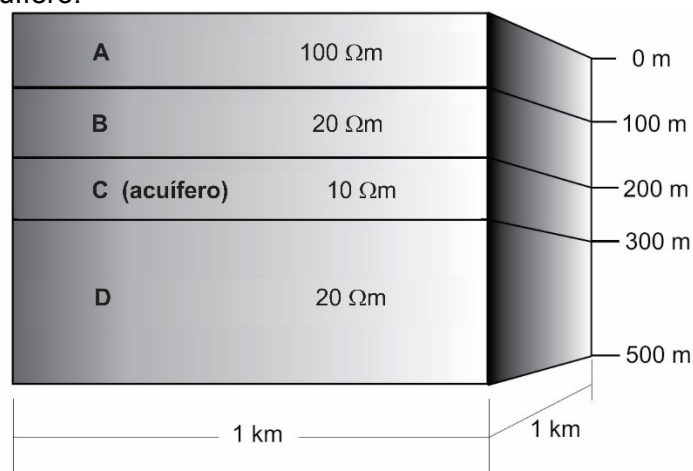


Figura 1 Modelo de resistividades (extraído de datos presentados en Bongiovanni *et al.* (2015)). La pluma contaminante está ubicada en el centro de la capa C correspondiente al acuífero.

La forma de la pluma contaminante se muestra en la Fig. 2 y fue moldeada con el objetivo de reproducir una pérdida de petróleo o brine. Hemos considerado una zona de contaminación de 50 m de ancho, desde 200 a 250 m de profundidad.

La Fig. 2 muestra la ubicación y dimensión de la zona de contaminación en el plano xy. Hemos simulado tres tipos diferentes de contaminación: altamente resistiva ($\rho = 10000 \Omega\text{m}$, por ej., un confinamiento de CO_2), resistiva ($\rho = 100 \Omega\text{m}$, por ej., un derrame de petróleo con valores de resistividad variable dependiendo del grado de biodegradación, bajo o alto, como se muestra en De la Vega *et al.* (2003) or Atekwana *et al.* (2000) y conductora ($\rho = 0.1 \Omega\text{m}$, por ej., una contaminación con brine). También hemos simulado el caso sin contaminación, para verificar que los resultados obtenidos son causados por la contaminación y no producto del modelo de capas o de la malla utilizada.

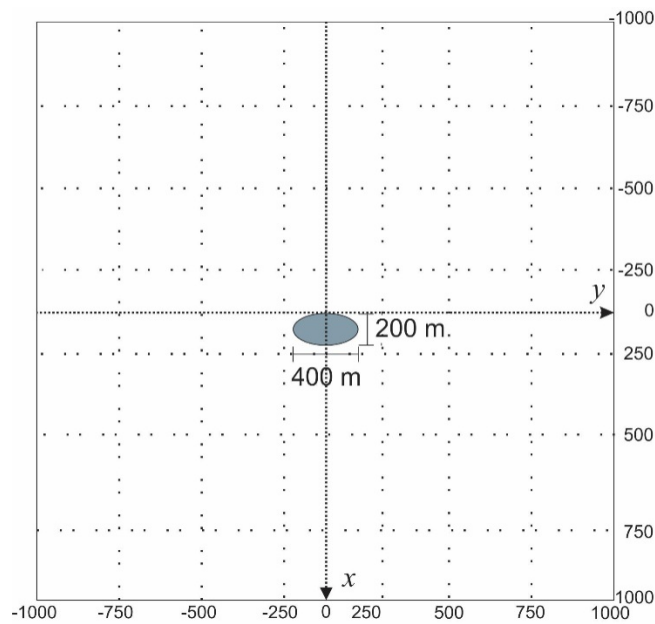


Figura 2 Vista de corte de la ubicación de la zona de contaminación en $z = -250 \text{ m}$.

Modelo Directo

Una vez que determinamos la geometría y las propiedades físicas del suelo, simulamos el método geoelectrico, es decir, la inyección de corriente continua mediante un par de electrodos A y B, y la medición de la diferencia de potencial en otro par de electrodos M y N, obtenida como resultado de esa inyección.

Los electrodos fueron modelados como una fuente puntual. El problema directo se resolvió con la técnica de elementos finitos, utilizando el programa COMSOL 5.3. La malla final contiene un total de 432.302 elementos y se muestra en la Fig. 3. Para el problema de inversión hemos utilizado el paquete BERT (por sus siglas en inglés: BoundlessElectricalResistivitytomography) (Günther, Rücker and Spitzer 2006).

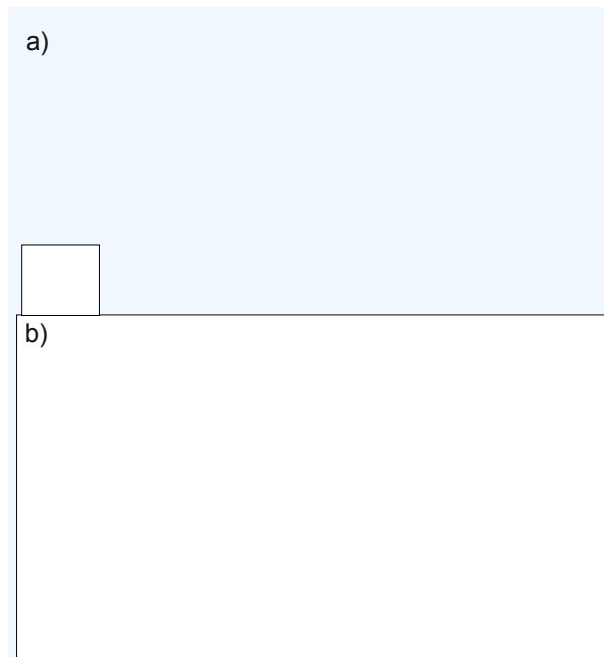


Figura 3: Malla de elementos finitos del modelo 3D (a) y (b) vista de corte en $z = -225$, donde se encuentra la anomalía. Se puede apreciar claramente la mayor densidad de elementos cerca de la zona contaminada.

Superficie

Empezamos considerando solo mediciones desde la superficie para ver si era posible la detección de la delgada zona contaminada. Hemos hecho mediciones con electrodos de corriente y potencial ubicados ambos en la superficie en las líneas X100 y X200 como se muestra en la Fig. 4.

Superficie-pozo

Luego, hemos considerado una configuración más compleja con seis y ocho líneas en la superficie para la inyección de corriente y los electrodos de potencial ubicados en un solo pozo. La Fig. 4 muestra las ubicaciones de las líneas de superficie, el pozo P0 y la pluma contaminante. Hemos utilizado 31 electrodos en cada línea de superficie. La máxima profundidad de investigación puede ser estimada como 250 m ya que la máxima distancia entre A y B fue de 600 m. La inyección de corriente fue de 3A para que el voltaje de respuesta estuviera por arriba del nivel del ruido. Esta fue la máxima inyección de corriente que se puede alcanzar con los instrumentos disponibles (Kiesling *et al.* 2010). Hemos simulado 9 electrodos de potencial en el pozo, enterrados cada 15 m desde 162 a 282 m de profundidad. La distancia entre los pozos enterrados fue de 15 m para garantizar un factor geométrico menor a 30 km para todas las mediciones. Esto significa que tres electrodos enterrados se encuentran dentro de la profundidad de la contaminación. Cada diferencia de potencial $V_M - V_N = \Delta V_{MN}$ fue medida en dos electrodos consecutivos y saltándose uno entre dos consecutivos. Por lo tanto, para cada inyección AB, hemos obtenido 15 valores de V_{MN} en el pozo. Hemos realizado 1620 mediciones con 177 electrodos. Hay 6 líneas de superficie, ubicadas simétricamente alrededor del pozo, 3 paralelas al eje x y 3 paralelas al eje y.

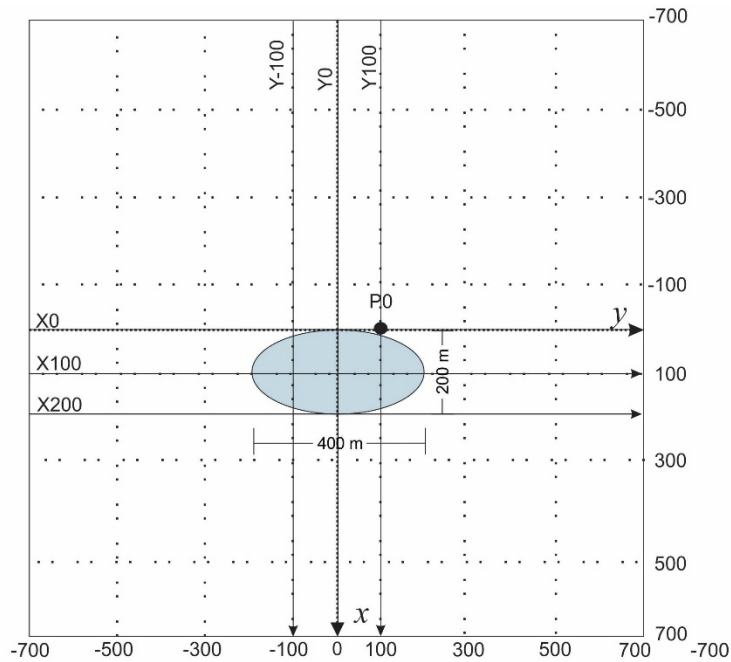


Figura 4 Líneas de prospección con electrodos de corriente en superficie y de potencial en el pozo P0 localizado en $(0,100,z)$, cerca de la ubicación de la pluma.

Resolución del problema inverso

Una vez que los valores potenciales para todos los casos simulados fueron obtenidos, estos han sido utilizados como información para resolución del problema inverso llevado a cabo por otro programa, el paquete (Günther et al. 2006) BERT (boundlesselectricalresistivitytomography). Este programa permite obtener una imagen superficial sabiendo la ubicación de los 4 electrodos de cada medición A, B, M y N; además de los valores de VMN.

Dado el espaciamiento vertical del pozo (orden de metros) y el espaciamiento vertical de los electrodos superficiales (orden de kilómetros), el volumen a ser invertido cubre un rango de escalas. Esa es la razón por la cual necesitamos usar una malla tetraédrica que permita incluir posiciones arbitrarias de electrodos. Para sobrellevar estas restricciones geométricas, el cálculo inverso fue hecho con el código BERT que permite usar este tipo de malla.

La malla utilizada en el proceso de inversión fue de $1.6 \times 1.6 \times 0.5$ km, con más de 400.000 celdas tetraédricas no estructuradas, usando el generador de mallas TenGen (Si 2003; 2015).

Resultados y Discusión

Es importante notar que a cierta distancia de los electrodos, no esperamos encontrar una imagen de resistividad significativa. La resolución lateral está limitada por la separación de electrodos como se muestra en Picottiet al. (2013). Hay una disminución gradual en la sensibilidad fuera del volumen de los electrodos, conduciendo a una más bien baja resolución de imagen de resistividad a unos metros de los electrodos. Los valores de la resistividad más allá del volumen de los electrodos no es probable que sean muy confiables. Nuestro enfoque es similar al que fue usado

en Oldenburg y Li (1999), alterar los valores de la resistividad en el modelo inicial, llevar a cabo la inversión subsecuente, y después observar las diferencias entre ambos modelos. En nuestros ejemplos, la resolución lateral del pozo falla en detectar toda la zona de contaminación y solo alcanza una pequeña parte de este.

Además, los valores de resistividad de profundidades mayores de 250 m y no son muy confiables. Esta es la razón por la cual mostramos nuestra selección de resultados hasta esta profundidad.

Análisis de sensibilidad

Una forma de estimar la viabilidad para detectar el contaminante es realizar un estudio de sensibilidad. Para ello, hemos calculado la sensibilidad para el caso no contaminado utilizando el modelo directo en superficie, superficie-pozo y la configuración dipolo-dipolo en un solo pozo. Hemos utilizado el software COMSOL Multiphysics® para calcular la sensibilidad. En el caso de la configuración de superficie, la ubicación de los electrodos fue $A = (0, -250, 0)$, $B = (0, -700, 0)$, $M = (0, 200, 0)$ y $N = (0, 650, 0)$, en el caso superficie-pozo fue $A = (0, 350, 0)$, $B = (0, 250, 0)$, $M = (0, 100, -207)$ y $N = (0, 100, -237)$, y en caso dipolo-dipolo en pozo fue $A = (0, 100, -177)$, $B = (0, 100, -207)$, $M = (0, 100, -237)$ y $N = (0, 100, -267)$. La Fig. 5 muestra la sensibilidad para la configuración superficial. Se puede ver que las zonas de mayor sensibilidad, tanto negativa como positiva, se concentran alrededor de los electrodos, y no llegan a la zona contaminada.

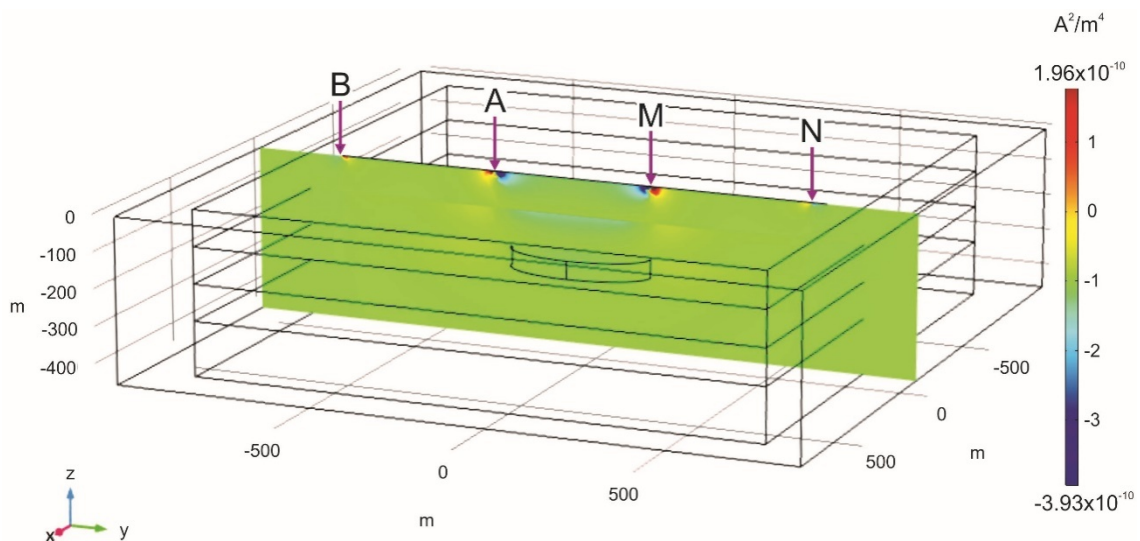


Figure 5: Map de sensibilidad para un arreglo electrodico superficial, sin contaminación.

En la Figura 6 se muestran los gráficos de sensibilidad para la configuración superficie-pozo. En los tres casos los electrodos M y N están en la misma posición: $M = (0, 100, -207)$ y $N = (0, 100, -207)$. En el caso a) la posición de los electrodos de corriente es $A = (0, 350, 0)$, $B = (0, -250, 0)$, O sea, los electrodos se encuentran sobre la superficie, ubicados simétricamente con respecto al pozo. En el caso b) se encuentran en $A = (0, -100, 0)$ y $B = (0, -700, 0)$ ambos a un mismo lado del pozo). Para el caso c) $A = (0, 700, 0)$ y $B = (0, 100, 0)$, también ubicados del mismo lado con respecto al pozo, pero el electrodo B está alineado con el mismo. Los valores de sensibilidad obtenidos con el software COMSOL son de un orden similar al obtenido en Mishra, Shalivahan and Benerjee (2015) y en Zhou *et al.* (2012). En todos los casos, los valores de alta

sensibilidad se encontraron alrededor de los electrodos y los valores de baja sensibilidad lejos de ellos. Claramente los valores de alta sensibilidad alcanzan la zona contaminada, pero el alcance lateral no llega a detectarla en toda su extensión. De la comparación de los tres casos a), b) y c), surge que las formas de las zonas de alta sensibilidad varían de acuerdo a la posición relativa de los electrodos.

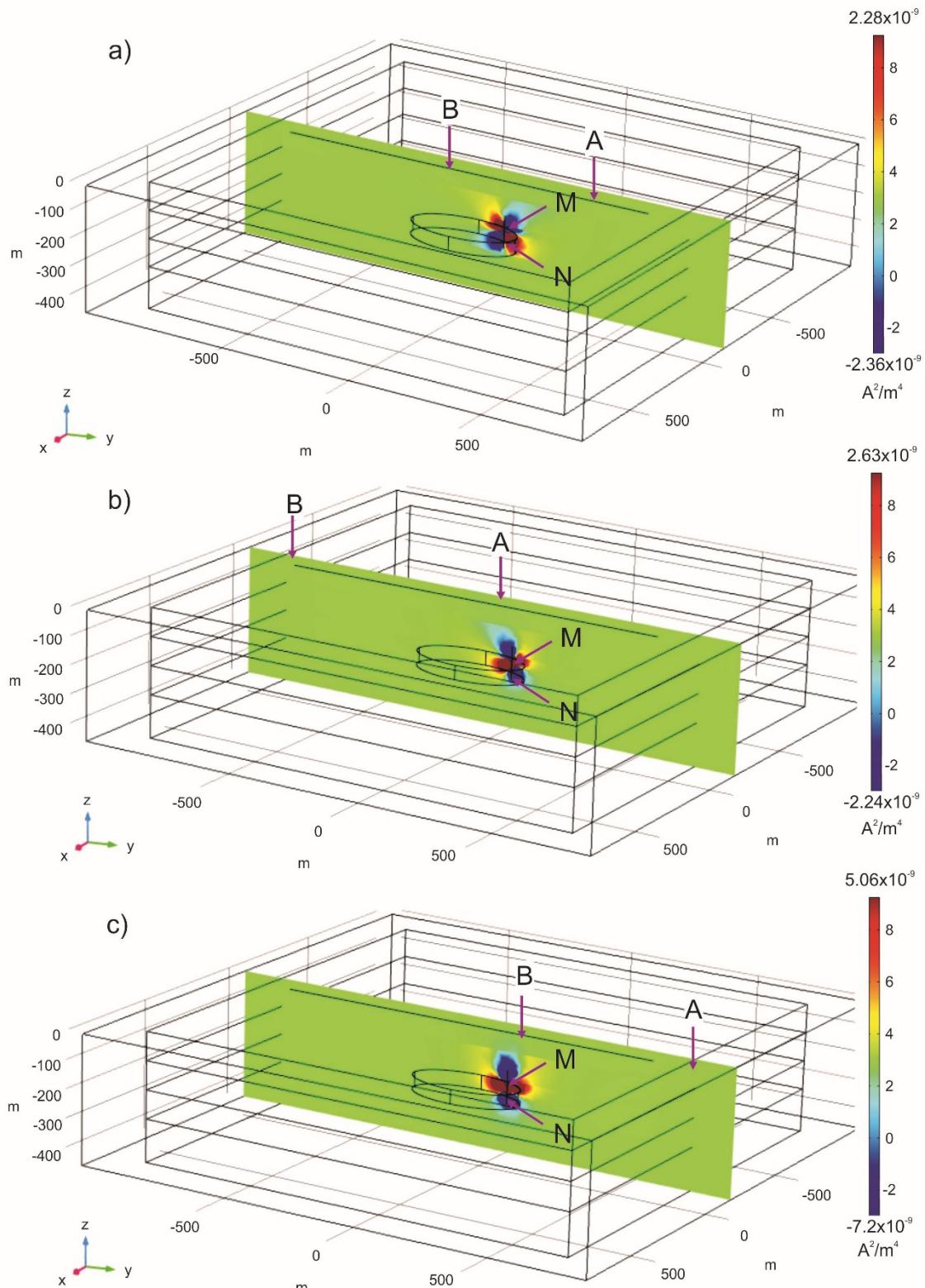


Figure 6: Mapa de sensibilidad para el arreglo electrodico superficie-pozo. Los electrodos M y N están ubicados en el pozo y los A y B en superficie, a) a ambos lados

del pozo, b) de un mismo lado del pozo y c) de un mismo lado del pozo, con B justo alineado encima del mismo.

En la Figura 7 se muestra el mapa de sensibilidad para el caso dipolo-dipolo en el pozo. Si bien los valores de sensibilidad son mayores en comparación con las otras figuras, el alcance lateral es menor. El hecho de que los electrodos A y B estén en superficie mejora el alcance lateral del estudio.

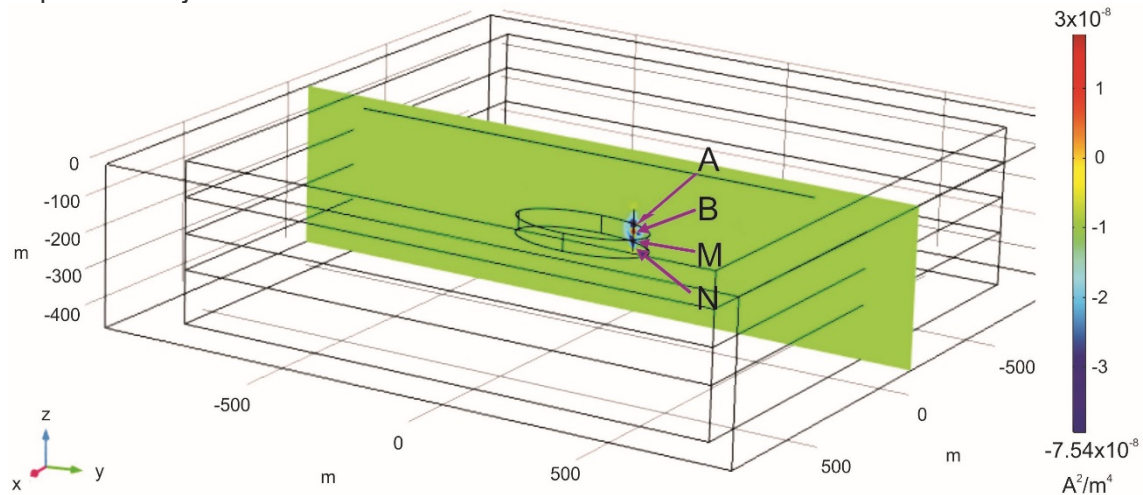


Figure 7: Mapa de sensibilidad para la configuración dipolo-dipolo en pozo.

En todos los casos, los gráficos muestran tanto valores negativos como positivos. Esto significa que, si se coloca un cuerpo pequeño con una resistividad mayor que el medio en zonas negativas, el valor de resistividad aparente medido disminuirá. Asimismo, si el cuerpo de alta resistividad se coloca donde hay valores de sensibilidad positivos grandes, la resistividad aparente medida aumentará (Mishra et al 2015).

Configuración de superficie

Empezamos considerando sólo mediciones superficiales ERT. Como muestra la figura 8, obtuvimos los mismos resultados para a) un caso no contaminado b) un caso conductivo y c) un caso altamente resistivo, indicando que hasta en el caso más favorable, el más resistivo, no es detectable contaminación es detectable. Las figuras 8a, 8b y 8c muestran los resultados para la pluma considerada, con 50m de ancho. Los modelos de resistividad de las configuraciones contaminadas (figuras 8b y 8c) son comparables con la no contaminada (figura 8a): para los tres casos, los resultados muestran un modelo de capas que es totalmente consistente con la que evaluamos sin nada de contaminación: una capa más resistiva por sobre $z = -100\text{m}$ y otra capa menos resistiva por debajo. Estos resultados confirman que la configuración superficial no puede distinguir si hay una zona contaminada entre los 200 y 250 metros de profundidad o no. Es evidente que la resolución limitada de la configuración de estos electrodos sugiere la conveniencia de localizar electrodos en profundidad con el objetivo de tener una detección exitosa y una caracterización posible de la pluma.

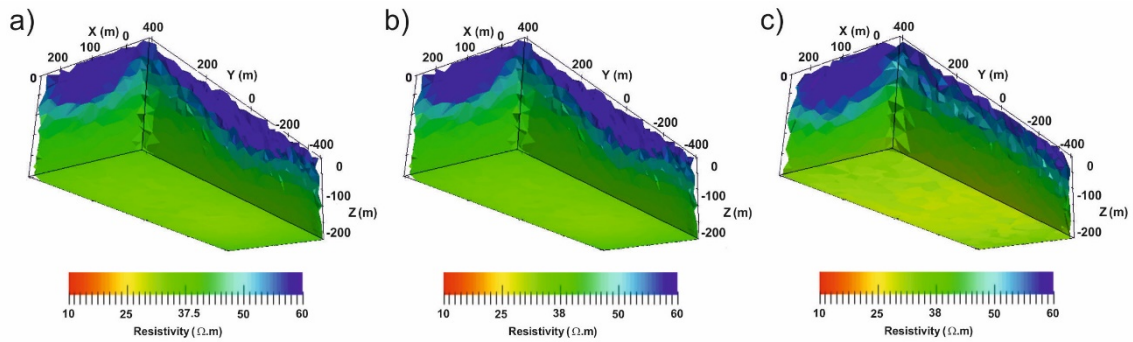


Figura 8: Imagen 3D de resistividad obtenida en $z = -225\text{m}$, con la configuración superficial para el caso no contaminado (a), caso con contaminación conductiva (b), y caso con contaminación altamente resistiva.

Configuración superficie-pozo

En primer lugar, consideramos el caso no contaminado para corroborar que no haya efectos falsos a causa de la malla o la configuración de los electrodos, entre otras causas posibles. El resultado obtenido usando solo un pozo es mostrado en la figura 9. Claramente este reproduce el modelo de capas propuesto, donde la capa superior ($z \geq -200\text{ m}$) es más resistiva que la más baja ($z \leq -200\text{ m}$). Además, mirando la escala de los valores de resistividad, la figura 9 casi reproduce los valores propuestos. La escala obtenida en este caso es muy similar a la que fue propuesta para esta profundidad ($\rho = 20\ \Omega\text{m}$ para $z > -200\text{ m}$ y $\rho = 10$ para $z < -200\text{ m}$).

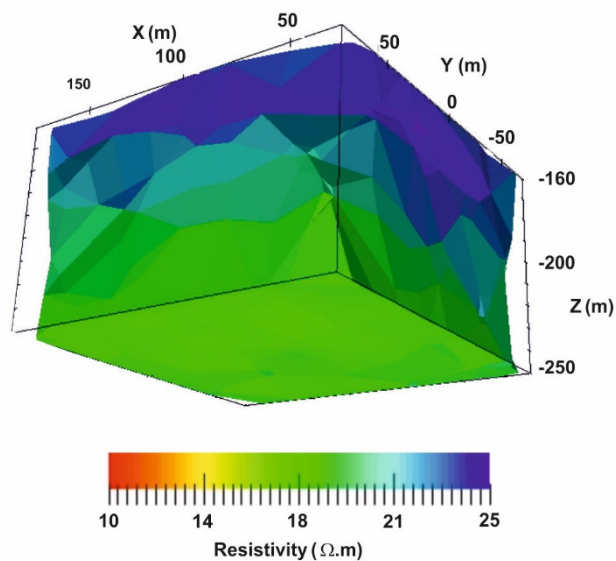


Figura 9: Imagen 3D de resistividad obtenida de la configuración correspondiente a la fig. 4 para el caso sin contaminación. Vista de corte a $z = -250\text{ m}$.

Una vez que hayamos obtenido el resultado sin contaminación y evaluado la factibilidad para detectar el contaminante, seremos capaces de compararlo con otros casos de contaminación considerados con el objetivo de ver si hay alguna diferencia.

El resultado de la inversión 3-D obtenido cuando la pluma más altamente resistiva considerada ($\rho = 10000\ \Omega\text{m}$), es mostrado en la figura 10. Comparando este caso con el no contaminado (Fig. 9), se puede observar claramente la detección de la pluma resistiva cercana al pozo, pero su ancho no pudo ser recuperado.

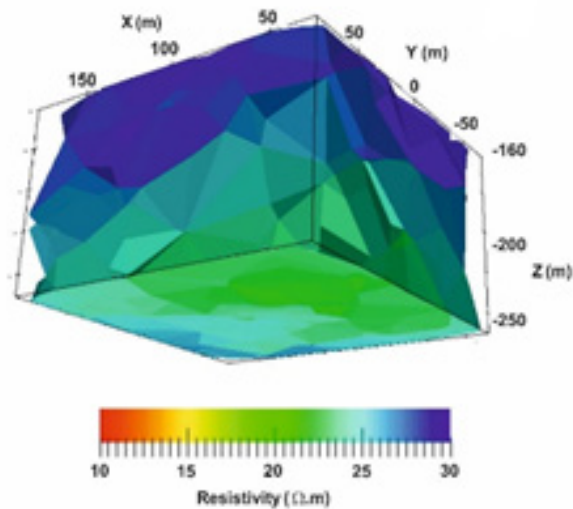


Figura 10 imagen 3D de resistividad obtenida con la configuración de la figura 4 para el caso con contaminación altamente resistiva ($\rho = 10000 \Omega\text{m}$). Vista de corte a $z=-250$ m y pluma de 50 m de ancho.

Considerando contaminación menos resistiva ($\rho = 100 \Omega\text{m}$) el gráfico 3D (Figura 11) muestra que el contaminante se vuelve menos detectable. Además, comparando la fig. 10 con la fig. 11, es evidente la mejor detección de la pluma resistiva más alta ya que las dimensiones laterales detectadas son mayores. Sin embargo, la pluma resistiva puede ser detectada.

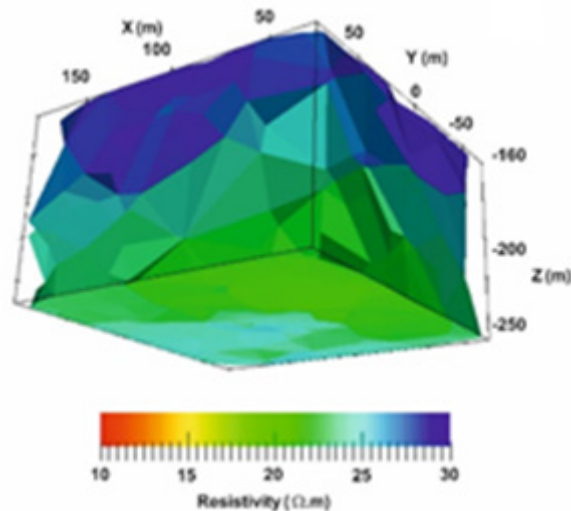


Figura 11: Imagen 3D de resistividad obtenida con la configuración de la figura 4 para el caso contaminado resistivo ($\rho = 100 \Omega\text{m}$). Vista de corte en $z=-250$ m y pluma de 50 m de ancho.

Hasta ahora, los resultados obtenidos muestran una detección exitosa de una contaminación resistiva (en ambos casos considerados) cuando está cerca del pozo. Por otro lado, hemos considerado una contaminación conductiva con una resistividad de $\rho = 0.1 \Omega$. Los resultados obtenidos son mostrados en la figura 12. Nótese la escasa detección y la limitón de esta configuración en el hecho de que el ancho de la

contaminación parece desaparecer cuando es cercana al pozo, pero, sin embargo, es posible detectarla.

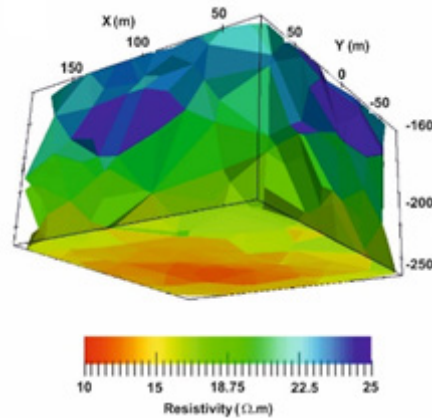


Figura 12 imagen 3D de resistividad obtenida de la configuración de la figura 4 del caso de contaminación resistiva ($\rho = 0.1 \Omega\text{m}$). Vista de corte en $z=-250$ m y pluma de 50 m de ancho.

Como se puede observar en las figuras 10, 11 y 12, es posible detectar la contaminación con la configuración superficie-pozo, ubicado lo suficientemente cerca del único pozo utilizado para localizar los electrodos de potencial. Estos resultados muestran una gran ventaja por sobre la configuración de superficie que ni siquiera podía detectarlo. También intentamos hacer algunas mediciones solo del pozo, es decir, inyectar la corriente y medir las potenciales diferencias del mismo pozo. Tal como lo predecían los estudios de sensibilidad, en este caso las mediciones no penetraron lo suficiente como para obtener una imagen de la pluma, como está determinado también en Picottiet *al.* (2013). Esa es la razón por la cual es conveniente usar mediciones superficie-pozo para tener resultados exitosos.

Conclusiones

Hemos estudiado la factibilidad de mediciones ERT de superficie-pozo para detectar y caracterizar una pluma de contaminación en un acuífero profundo que se encuentra sobre un reservorio de petróleo. Esta contaminación puede haber sido causada por derrames o fugas de brine, filtraciones de pozos de petróleo abandonados y mal protegidos y derrames accidentales de químicos usados en fracturamiento hidráulico, entre otros. Por eso hemos considerado contaminaciones resistivas o conductivas. Teniendo en cuenta este problema, tenemos que tener en cuenta que la detección de una capa delgada a esa profundidad es una cuestión difícil de resolver.

Después de realizar gráficos de sensibilidad y varias simulaciones incluyendo la configuración ERT de superficie y la configuración superficie-pozo, llegamos a la conclusión de que la detección de una anomalía a 250 m de profundidad es factible sólo con mediciones de superficie-pozo, ya que hemos obtenido resultados satisfactorios. Si bien se pueden medir cambios de resistividad significativos con esta configuración, no fue posible caracterizar completamente la pluma ya que estábamos limitados por la resolución lateral de los electrodos. Los resultados obtenidos muestran claramente que el cálculo de la sensibilidad es un método idóneo para predecir el alcance de una determinada configuración electródica, y que es una herramienta útil a la hora de elegir la configuración apropiada.

Referencias

- Arthur M. and Cole, D.R. 2014. Unconventional Hydrocarbon Resources: Prospects and Problems. *Elements***10**, 257–264.
- Atekwana E. A., Sauck W.A. and Werkema D.D. 2000. Investigations of geoelectrical signatures at a hydrocarbon contaminated site. *Journal of Applied Geophysics***44**, 167–180.
- Binley A., Keery J., Slater L., Barrash W. and Cardiff M. 2015. The hydrogeologic information in cross-borehole complex conductivity data from an unconsolidated conglomeratic sedimentary aquifer. *Geophysics***81**(6), E409–E421.
- Bongiovanni M.V., Osella A., De la Vega M. and Tichno A. 2013. Detection of brine plumes in an oil reservoir using the geoelectric method. *Jornalof Geophysical Engineering***10**, 045006.
- Bongiovanni M.V., Grünhut V., Osella A. and Tichno A. 2015. Numerical simulation of surface-downhole geoelectrical measurements in order to detect brine plumes. *Journal of Applied Geophysics***116**, 215–223.
- Cassiani G., Bruno V., Villa A., Fusi N. and Binley A. M. 2006. A saline tracer test monitored via time-lapse surface electrical resistivity tomography. *Journal of Applied Geophysics***59**(3), 244–259.
- Comsol Multiphysics v. 5.3. www.comsol.com. COMSOL AB, Stockholm, Sweden.
- Doetsch J., Ingeman-Nielsen T., Christiansen A.V., Fiandaca J.L., Auken E. and Elberling B. 2015. Direct current (DC) resistivity and induced polarization (IP) monitoring of active layer dynamics at high temporal resolution. *Cold Regions Science and Technology***119**, 16–28.
- Ellis R.G. and Oldenburg D.W. 1994. Applied geophysical inversion. *Geophysical Journal International***116**(1), 5–11.
- Günther T., Rücker C. and Spitzer K. 2006. Three-dimensional modeling and inversion of dc resistivity data incorporating topography – part II: Inversion. *Geophysical Journal International***166**, 506–517.
- He Z., Zhao G., Yu G., He T. and Wan H. 2013. Borehole-to-surface TFEM technique applications in geologically complex areas. *SEG Technical Program Expanded Abstracts***32**, 790–794.
- Kemna A., Binley A. and Slater L. 2004. Crosshole IP imaging for engineering and environmental applications. *Geophysics***69**(1), 97–107.
- Kiessling D., Schmidt-Hattenberger C., Schuett H., Schilling F., Krueger K., Schoebel B., Danckwardt E., Kummerow J. and the CO₂ SINK Group. 2010. Geoelectrical methods for monitoring geological CO₂ storage: First results from cross-hole and surface-downhole measurements from the CO₂ SINK test site at Ketzin (Germany). *International Journal of Greenhouse Gas Control***4**, 816–826.
- Martinho E. and Almeida F. 2006. 3D behaviour of contamination in landfill sites using 2D resistivity/IP imaging: case studies in Portugal. *Environmental Geology***49**, 1071–1078.
- Mathis M. 2011, 'Shale Natural Gas – Water Use Management', Presentation to the Interstate Council on Water Policy Annual Meeting in St Louis, <<http://www.icwp.org/cms/conferences/Mathis14Oct2011.pdf>>
- Mishra D., Shalivahan and Banerjee, A. 2015. Sensitivity plots using COMSOL 5.1 Multiphysics; a tool for optimizing geophysical field survey. *Excerpt from the Proceeding of the 2015 COMSOL Conference in Pune*.
- Monego M., Cassiani G., Deiana R., Putti M., Passadore G. and Altissimo, L. 2010. A tracer test in a shallow heterogeneous aquifer monitored via time-lapse surface electrical resistivity tomography. *Geophysics***75**(4), WA61–WA73.
- Nguyen F., Kemna A., Antonsson A., Engesgaard P., Kuras O., Ogilvy R., Gisbert J., Jorreto S. and Pulido-Bosch A. 2009. Characterization of seawater intrusion using 2D electrical imaging. *Near Surface Geophysics***7**, 377–390.

- Oldenburg D.W. and Li Y. 1999. Estimating depth of investigation in dc resistivity and IP surveys. *Geophysics***64**(2), 403–416.
- Picotti S., Grünhut V., Osella A., Gei D. and Carcione J. M. 2013. Sensitivity analysis from single-well ERT simulations to image CO₂ migrations along wellbores. *The leading Edge***32**(5) 504–512.
- Robert T., Caterina D., Deceuster J., Kaufmann O. and Nguyen F. 2012. A salt tracer test monitored with surface ERT to detect preferential flow and transport paths in fractured/karstified limestones. *Geophysics***77**(2), B55–B67.
- Si H. 2003, TETGEN: A 3D Delaunay tetrahedral mesh generator, <http://tetgen.berlios.de>, accessed 01 December 2010.
- Si H. 2015. TetGen, a Delaunay-based quality tetrahedral mesh generator. *ACM Trans. Mathematical Software***41**(11), 1–36. <http://dx.doi.org/10.1145/2629697>.
- Ustra A.T., Elis V.R., Mondelli G., Zuquette L.V. and Giacheti H.L. 2012. Case study: a 3D resistivity and induced polarization imaging from downstream a waste disposal site in Brazil. *Environmental Earth Science* **66**, 763–772.
- Zhou H., Xu L., Cao Z., Hu J. and Liu X. 2012. Image reconstruction for invasive ERT in vertical oil well logging. *Chinese journal of Chemical Engineering* **20**(2), 319–328.