

TOMOGRAFÍAS ELÉCTRICAS EN EL BASURERO MUNICIPAL CIUDAD DE GUALEGUYCHÚ, PROVINCIA DE ENTRE RÍOS: EVIDENCIAS DE CONTAMINACIÓN

Cristina POMPOSIELLO, Cristina DAPEÑA, Pamela BOUJON y Alicia FAVETTO

Instituto de Geocronología y Geología Isotópica (INGEIS), CONICET, Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires.
E-mails: cpomposi@ingeis.uba.ar, dapenna@ingeis.uba.ar, pamela@ingeis.uba.ar, favetto@ingeis.uba.ar

RESUMEN

Un importante problema asociado a los rellenos sanitarios es la formación de lixiviado y el riesgo de contaminación del agua subterránea. La conductividad eléctrica del lixiviado es más alta que la del agua natural, consecuentemente el contraste en esta propiedad permite detectar la pluma de contaminación utilizando estudios geoelectrónicos. En este trabajo se presentan nuevos datos obtenidos en dos rellenos sanitarios de diferente edad localizados en la ciudad de Gualeguaychú. Se realizaron varias tomografías eléctricas utilizando la configuración electródica de dipolo-dipolo y se interpretaron a partir de modelos bidimensionales. Los modelos obtenidos sobre los rellenos sanitarios presentan una primera capa, con valores altos de resistividad y con heterogeneidades que representan la basura enterrada. Por debajo de este nivel se observan bajos valores de resistividad atribuibles a la contaminación debida a los lixiviados. Los modelos obtenidos en zonas sin relleno, pero cercanas al mismo, presentan baja resistividad en la capa más superficial y estos valores podrían deberse no sólo a la presencia de lixiviados sino también a la presencia de arcillas, dado que estos resultados no concuerdan con los valores de conductividad específica determinados en el agua freática. Se estimaron parámetros hidroquímicos a partir de la resistividad eléctrica de las zonas más conductoras para evaluar algunas características ambientales del relleno.

Palabras clave: *Relleno sanitario, Geofísica ambiental, Modelos de resistividad eléctrica.*

ABSTRACT: *Electrical tomographies in the sanitary landfill of the city of Gualeguaychú, province of Entre Ríos: Evidences of contamination..*

An important problem associated to sanitary landfills is the leachate production and the risk of groundwater contamination. The leachate electrical conductivity is often much greater than natural groundwater; consequently the contrast found in this property allows the detection of the plume using geoelectrical methods. This paper reports new geophysical data obtained from two landfills of different age located in Gualeguaychú city. Several tomographies using dipole-dipole electrode configurations were performed and interpreted from bidimensional models. The models obtained on landfills have a first layer with high resistivity values and heterogeneities representing waste disposal. Low resistivity anomalies were detected below the level where the wastes were buried; those were attributed to contamination caused by leachate. The models obtained in areas without solid wastes, but near the landfill boundary present low resistivity at the most superficial layer. These values could be due to the contamination at the border of the waste disposal and also by the presence of clays, considering that the results do not agree with the value of the specific conductivity determined in the phreatic water. The hydrochemical parameters were estimated in the most conductive zone to evaluate the environmental features of the landfill.

Keywords: *Landfill, Environmental Geophysics resistivity-model.*

INTRODUCCIÓN

Una gestión integral de los residuos sólidos domiciliarios requiere un adecuado proceso de acciones para su manejo a diferentes escalas con el objeto de proteger el ambiente y la calidad de vida de la población. En la mayoría de los países desarrollados se observa una tendencia a disminuir la generación de residuos e incentivar los programas de reciclaje. En los

rellenos sanitarios los residuos se descomponen o biodegradan y desprenden sustancias perjudiciales originando lixiviados, los cuales pueden migrar formando una pluma contaminante y llegar a los cursos de agua superficial y acuíferos. El método geofísico empleado en esta investigación es altamente eficiente en la determinación de zonas con grandes contrastes de resistividad eléctrica y principalmente en medios de muy baja resis-

tividad debido a la presencia de fluidos salinos. Este tipo de metodología permite monitorear el alcance de la contaminación a través del tiempo.

Desde principios del 2004 se están realizando regularmente estudios geofísicos en el marco de un proyecto multidisciplinario en el basurero municipal de Gualeguaychú, provincia de Entre Ríos, Argentina. El mismo está situado al sur de la ciudad homónima, cerca de la confluen-

cia del arroyo El Cura con el río Gualaguaychú (Fig. 1a). El primero actúa como colector natural de la escorrentía superficial del área y lleva agua todo el año, generando un fuerte impacto ambiental por la descarga sin tratar de los efluentes cloacales de la ciudad.

El predio del basurero se utilizó inicialmente como lugar de extracción de materiales, lo que permitió utilizar las depresiones para la acumulación de residuos sólidos. En el mismo hay dos rellenos colmatados y cerrados de distinta edad y un tercero en funcionamiento. Estos sitios de deposición final de residuos no han sido construidos siguiendo los mecanismos de ingeniería moderna de los rellenos sanitarios que pretenden reducir sus impactos negativos en el medio ambiente. En la actualidad, los rellenos sanitarios se disponen básicamente en una depresión en el terreno, cubierta por una membrana inferior impermeable, con sistema de recolección de lixiviados, sistema de recolección de gases y una cobertura superior. Todos estos elementos no están necesariamente presentes en todos los rellenos. En el caso del basurero municipal de Gualaguaychú, no hay registros de la construcción de los rellenos y no existe sistema de recolección de lixiviados ni de gases. En el relleno más extenso y antiguo se observa que los residuos han sido depositados en un sistema de celdas paralelas.

En este trabajo se presentan nuevos datos obtenidos en los dos rellenos cerrados mencionados. En el más grande y antiguo (Relleno A), cerrado en el año 1998, se encontraron evidencias de contaminación a partir de varios estudios geoelectrónicos, perfilajes horizontales y sondeos verticales utilizando configuraciones dipolo-dipolo (DD) y Schlumberger respectivamente y prospecciones con georradar utilizando antenas de 150 y 500 MHz (Pomposiello *et al.* 2008a, b). El más pequeño (Relleno B), cerrado en el año 2003, se estudia por primera vez en este trabajo.

A partir de la conductividad eléctrica de las zonas más conductoras detectadas

por debajo de los rellenos en los modelos geoelectrónicos se estimaron parámetros geoquímicos del lixiviado, aplicando relaciones empíricas discutidas en Meju (2000). Asimismo, como algunos de estos parámetros varían con el tiempo es posible a partir de estos datos evaluar la edad del relleno (Farquhar 1989, Meju 2000).

Por otro lado, la conductividad eléctrica del agua determinada en los freáticos instalados fuera de la zona donde no hay basura enterrada, pero ubicados alrededor del predio, se relacionó con la conductividad eléctrica determinada en los modelos 2D obtenidos en las tomografías en el mismo punto y profundidad.

ANTECEDENTES

Pomposiello *et al.* (2004) efectuaron algunos estudios geofísicos preliminares dentro y fuera del basurero más grande y antiguo. El principal objetivo fue tomar contacto con el problema para poder diagramar los perfiles geofísicos futuros que garantizaran la mejor evaluación de la posible contaminación producida por el basurero.

Orgeira *et al.* (2004) realizaron un relevamiento magnetométrico y de acuerdo al modelado realizado con estos datos por Prezzi *et al.* (2005) descartaron la presencia de tambores enterrados conteniendo elementos tóxicos.

Pomposiello *et al.* (2005a, b, 2008a, b) presentaron el grado de avance en las interpretaciones de los estudios geofísicos realizados hasta abril de 2005.

La composición química de los lixiviados depende de varios factores tales como el tipo de residuo, las velocidades de descomposición química, las precipitaciones locales, la geomorfología y el ambiente geológico. Las modificaciones en parámetros tales como temperatura, pH, conductividad eléctrica (σ), sólidos totales disueltos (STD), concentración de nitratos y cloruros, entre otros, son indicadores de la calidad del agua. En tal sentido, se realizaron muestreos preliminares para evaluar química e isotópicamente las aguas superficiales y subterráneas, a par-

tir de muestras obtenidas en los molinos cercanos y en varios pozos freáticos, de hasta 2,30 m de profundidad, ubicados alrededor del predio (Panarello *et al.* 2005). También se determinó la composición isotópica del CO₂ en el suelo y la concentración de gases como CO₂, N₂, O₂ y CH₄ para evaluar la madurez del relleno (Valencio *et al.* 2003, Sanci *et al.* 2006a, b).

CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS E HIDROGEOLÓGICAS LOCALES

Desde el punto de vista regional esta zona forma parte de la Llanura Chaco Pampeana (Russo *et al.* 1979). Las unidades involucradas en la zona de trabajo corresponden a las unidades geológicas Formación Salto Chico, Grupo Punta Gorda y Formación La Picada y se describen de acuerdo a Iriondo (1980), Fili *et al.* (1994) y Fili (2001).

Formación Salto Chico (Rimoldi 1963)

Esta unidad de edad plioceno-pleistocena temprana está compuesta por arenas gruesas y finas de color amarillo y rojo, también es frecuente la gravilla y la grava, con intercalaciones de arcillas de color verde y estratos irregulares de rodados finos y gruesos. Es de origen fluvial y portadora del acuífero principal de la zona. Tiene un espesor máximo de 60 m y se encuentra entre los 3,5 y 120 m de profundidad.

Grupo Punta Gorda (Iriondo 1980)

Comprende a las Formaciones Alvear y Hernandarias, una sucesión de edad pleistocena media a tardía. En general para el este de la provincia de Entre Ríos se define la Formación Hernandarias (Reig 1956) que corresponde a una cubierta sedimentaria de tipo pampeano depositada en ambientes palustres y eólicos. La parte superior está constituida por limos, limos arenosos y arcillas castaños, pardas y rojizas con presencia de abundantes concreciones de carbonato

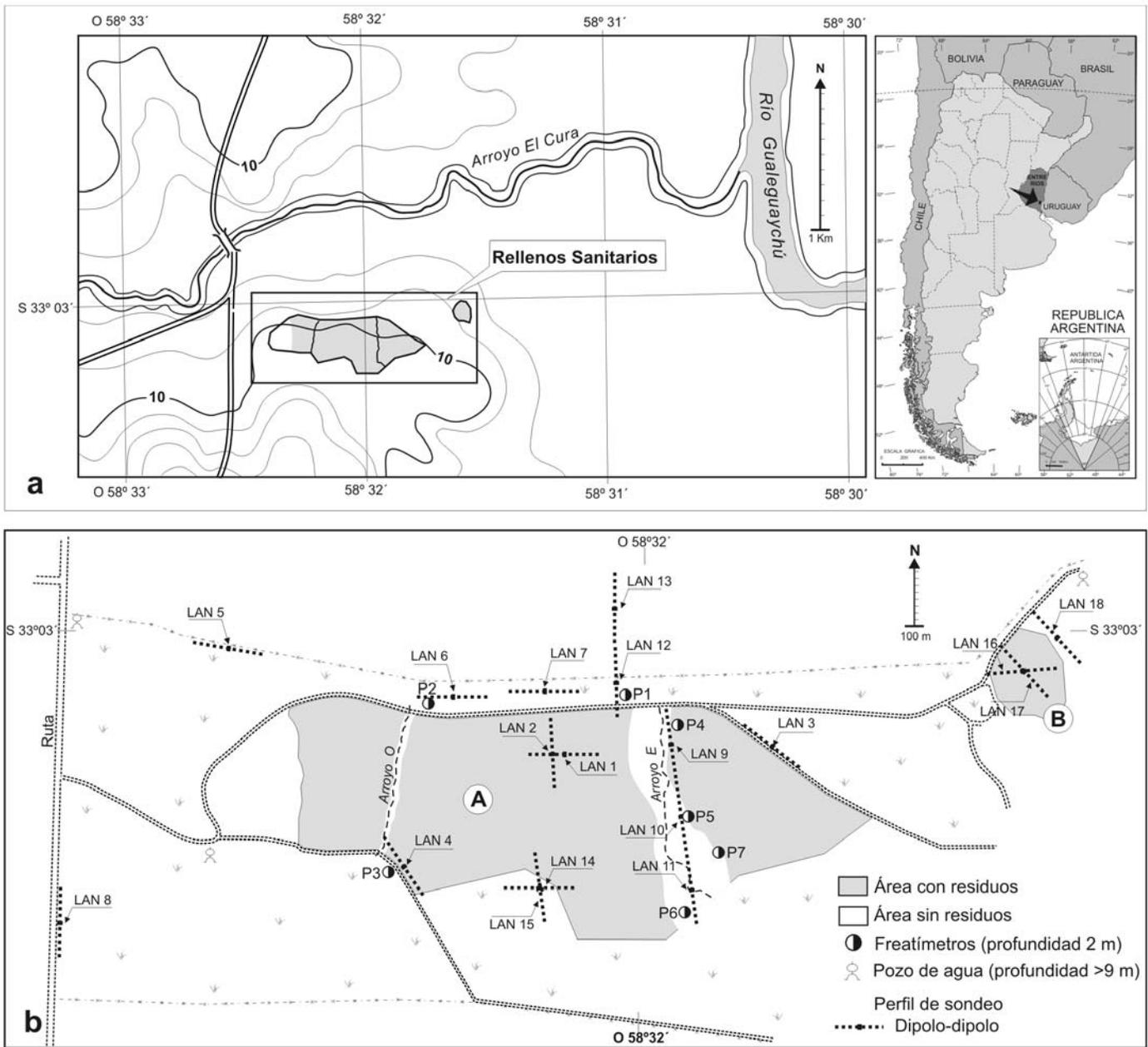


Figura 1: a) Mapa de ubicación del predio del relleno sanitario y la provincia de Entre Ríos, Argentina. b) Mapa esquemático con los perfiles sondeados: dipolo-dipolo y los freáticos.

de calcio. La parte inferior es más arcillosa con presencia de yeso en forma de cristales hojosos aislados y de color gris verdoso. Por otro lado, en las cercanías del área de estudio Guida y González (1984) encontraron evidencias geomorfológicas y estratigráficas de expansiones estuáricas vinculadas a niveles marinos relativamente elevados durante el Pleistoceno tardío que están incluidas en esta

formación. El espesor de la Formación Hernandarias varía entre 20 m y 40 metros. Esta unidad constituye el sustrato del relleno sanitario y se encuentra entre 5 y 30 m de profundidad. Desde el punto de vista hidrogeológico es un acuitarado que contiene al nivel freático. La calidad del agua es pobre y se utiliza para proveer de agua potable a algunas chacras y para abrevar al ganado.

Formación La Picada (Iriondo, 1980)
Corresponde a los depósitos sedimentarios holocenos que forman el relleno aluvial de los ríos y arroyos de la región. Forma una terraza baja y bien desarrollada. Su composición varía de un valle a otro, dependiendo de la naturaleza de las cuencas respectivas (litología y pendientes locales). Su granulometría es en general arenosa en la sección inferior y en la

superior está constituida por limo de color castaño y arcilla negra. La circulación del agua está limitada al subálveo y generalmente presenta contaminación. Su espesor varía entre 1 a 3,5 metros.

APLICACIÓN DEL MÉTODO GEOELÉCTRICO DIPOLO-DIPOLO

Adquisición de datos

Para la realización de las tomografías eléctricas se utilizó un equipo no comercial. El mismo fue construido con una fuente de corriente conectada a un generador de 1000 W que permitió obtener intensidades de hasta 3 Amper. Los electrodos tanto de corriente como de potencial son de acero inoxidable y en algunos casos fue necesario utilizar electrodos no polarizables para medir el potencial. La corriente y potencial se mediaron con amperímetro y voltímetros muy precisos. El voltímetro utilizado permite restar el potencial de contacto y guardar los datos en una computadora. En general se observó repetitividad en las mediciones y en caso que esto no sucedió se promediaron los valores.

Se realizaron perfiles geoelectricos utilizando la configuración DD con 21 electrodos ($a = 5$ m (abertura del dipolo) y una separación entre dipolos con $n = 1, \dots, 18$), obteniendo un total de 171 datos medidos. De esta manera se obtienen pseudosecciones de resistividad eléctrica con un total de 100 m de longitud.

Inversión de datos

Los modelos bidimensionales (2D) de resistividad eléctrica se obtuvieron invirtiendo los datos experimentales con un software que usa el algoritmo DCINV2D (Oldenburg *et al.* 1993). Este programa permite incorporar la topografía del sitio. Se hicieron varias pruebas utilizando diferentes modelos iniciales con resistividad eléctrica constante. El programa va ajustando la respuesta con los datos hasta obtener el modelo definitivo. La manera de observar la bondad del ajuste del modelo es a través de la variación del *misfit*

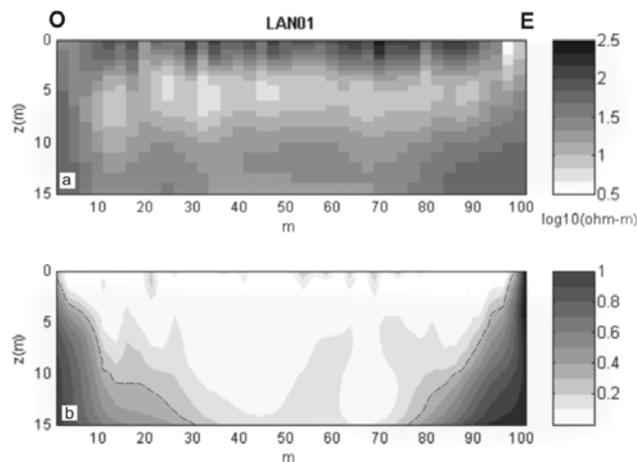


Figura 2: a) Modelo bidimensional de resistividad eléctrica para el LAN01; b) Índice DOI calculado a partir de la inversión de datos usando como modelo inicial 50 y 5 ohm m.

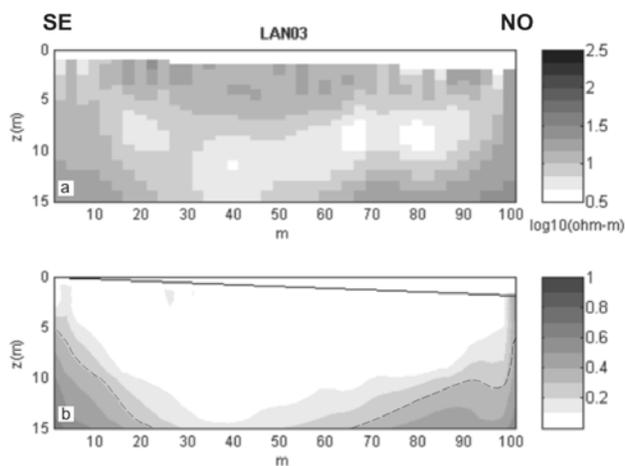


Figura 3: LAN03, referencias como en figura 2 y considerando la variación de la topografía (1m de desnivel en 100 m de perfil).

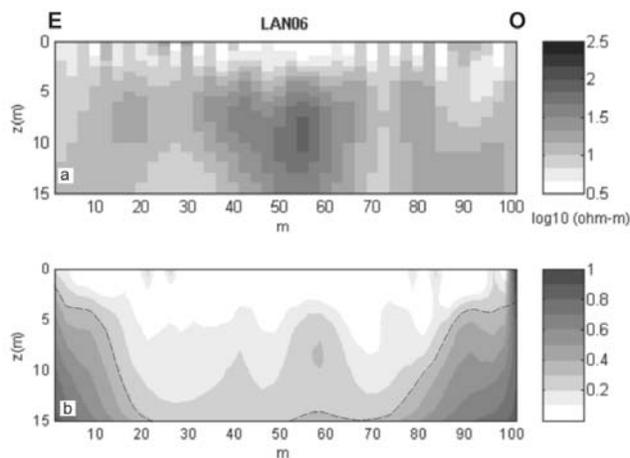


Figura 4: LAN06, referencias como en Figura 2.

fit en función de las iteraciones para comprobar la convergencia dentro del error de los datos. El óptimo ajuste de los datos se obtiene cuando el *misfit* llega al número de grados de libertad del sistema (número de datos), valores por debajo crean estructuras irreales mientras que

valores por encima pueden restar nitidez. Se estableció la "profundidad de investigación" definida como la profundidad por debajo de la cual los datos experimentales son insensibles al valor de la resistividad del modelo inicial. Se cuantificaron las diferencias entre modelos posi-

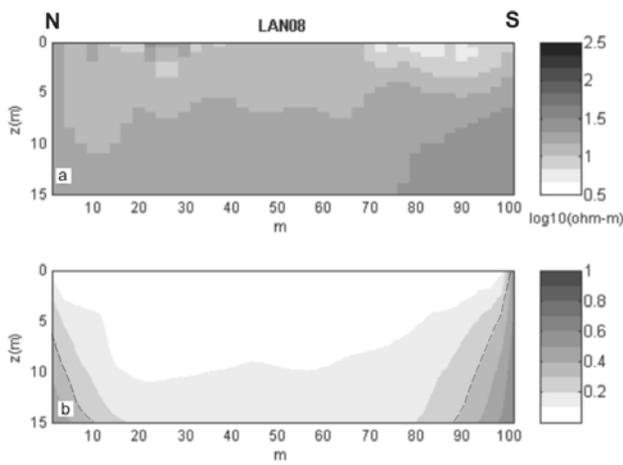


Figura 5: LAN08, referencias como en Figura 2.

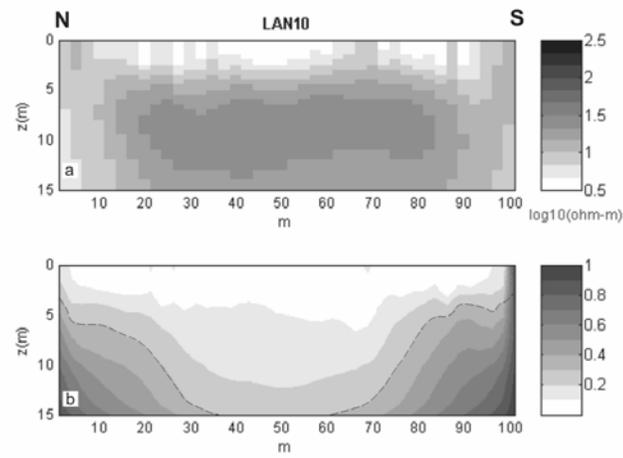


Figura 6: LAN10, referencias como en Figura 2.

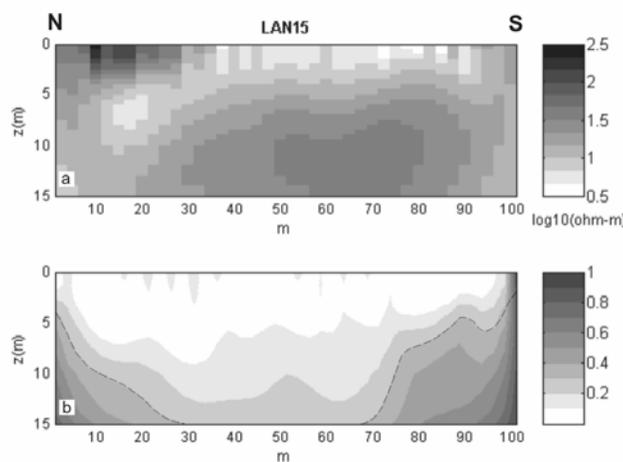


Figura 7: LAN15, referencias como en Figura 2.

En los lugares donde R es cercano a cero el modelo obtenido tiene mayor confiabilidad, mientras que cuando R se acerca a 1 indica baja credibilidad. Se considera un valor crítico de R igual a 0,3. En este estudio se presentan los resultados obtenidos de la comparación de los modelos usando 5 ohm m y 50 ohm m como modelo inicial.

RELACIÓN ENTRE LA CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA Y LOS PARÁMETROS HIDROQUÍMICOS

Los análisis químicos realizados en agua subterránea modificada por la presencia de lixiviados en diferentes regiones geográficas han demostrado que la conductividad eléctrica determinada en estudios geoelectrónicos tiene una fuerte correlación lineal con el total de sólidos disueltos (STD) y con el contenido de cloruro disuelto (Cl) (Meju 2000 y sus referencias). Además, Farquhar (1989) y Meju (2000) señalan que la composición del lixiviado varía con la edad del relleno y que para rellenos recientes el contenido de ácidos orgánicos, amonios y STD son altos, pero a partir de la biodegradación de la masa en el tiempo la concentración de esos parámetros decrece. Es decir que conociendo estos valores se podría estimar la edad del relleno sanitario.

Asimismo, Meju (2000) señala que determinando la conductividad eléctrica del sustrato saturado (σ_b) se pueden predecir los valores de STD a través de las siguientes ecuaciones:

$$\log \sigma_b = -0,3215 + 0,7093 * (\log \text{STD}) \quad (1)$$

$$\log \sigma_b = -0,333 + 0,6453 * (\log \text{STD}) \quad (2)$$

donde σ_b se expresa en mS/m y STD en mg/L. Las ecuaciones (1) y (2) determinan un valor mínimo y máximo de STD respectivamente.

A partir del valor de STD se puede predecir la conductividad del agua (Σw) y el contenido de Cl utilizando las siguientes

bles a través del índice DOI (*Depth of investigation*) que permite estimar a qué profundidad la estructura obtenida ya no es sustentada por los datos (Oldenburg y Li 1999). Considerando dos inversiones con diferente resistividad eléctrica como modelo inicial, ρ_{1r} y ρ_{2r} , se define el índice DOI como

$$R(x, y) = \frac{m_1(x, z) - m_2(x, z)}{m_{1r} - m_{2r}}$$

Siendo m_{1r} y m_{2r} el logaritmo decimal de la resistividad eléctrica del modelo inicial respectivamente y $m_1(x, z)$ y $m_2(x, z)$ los logaritmos de las resistividades del modelo resultante para cada caso en el punto (x, z) .

ecuaciones:

$$\log \text{STD} = 0,8 + 1,015 * (\log \sigma_w) \quad (3)$$

$$\log \text{Cl} = -0,256 + 1,2 \log \sigma_w \quad (4)$$

donde σ_w se expresa en mS/m y los otros parámetros en mg/L.

Estas relaciones fueron determinadas en un relleno sanitario de Durban, Sudáfrica (Bell y Jermy 1995). Datos de otros rellenos en Australia (Buselli *et al.* 1990) y Canadá (Birks y Eyles 1997) también muestran la misma tendencia lineal que los datos de Durban.

El contenido de agua (W) se puede determinar a través de una relación entre la conductividad in situ y el contenido de agua en un yacimiento de sal de roca y libre de arcillas (Yaramanci 1994):

$$\sigma_b = \sigma_w * W^m \quad (5)$$

Siendo W el contenido de agua en porcentaje de volumen (vol %) y m el factor de cementación, cuyo valor se encuentra entre 1,6 y 1,9.

Es decir que las edades de los residuos se pueden determinar considerando las relaciones y los cambios en la concentración de los parámetros químicos del lixiviado tales como Cl, STD, pH, entre otros (Farquhar 1989, Meju 2000).

TRABAJO DE CAMPO

Descripción del sitio

El área de trabajo está ubicada por debajo de la cota 10 m y la pendiente regional, de muy bajo gradiente, es aproximadamente N-NE, hacia el arroyo El Cura y el río Gualeguaychú (Fig. 1a).

Los residuos en el relleno A se dispusieron en módulos paralelos (celdas) de aproximadamente 0.8 -1 m de ancho. Prezzi *et al.* (2005) estimaron que la máxima profundidad que alcanzan las celdas es 2.3 metros. Los límites y su superficie son irregulares, siguiendo la geometría que deviene de la alineación de las celdas y estableciendo un suave resalto. En el borde norte se forma una canaleta entre

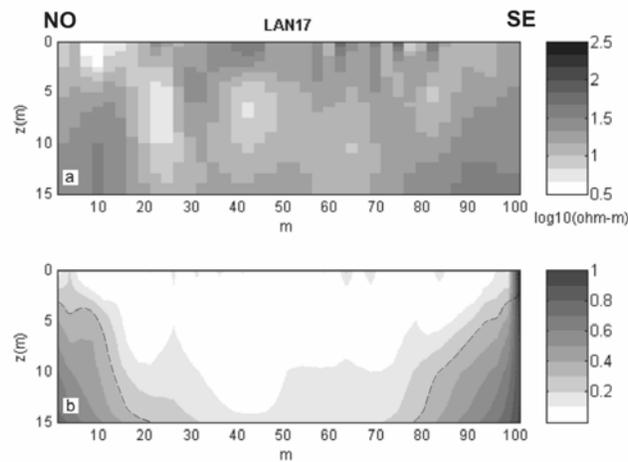


Figura 8: LAN17, referencias como en Figura 2.

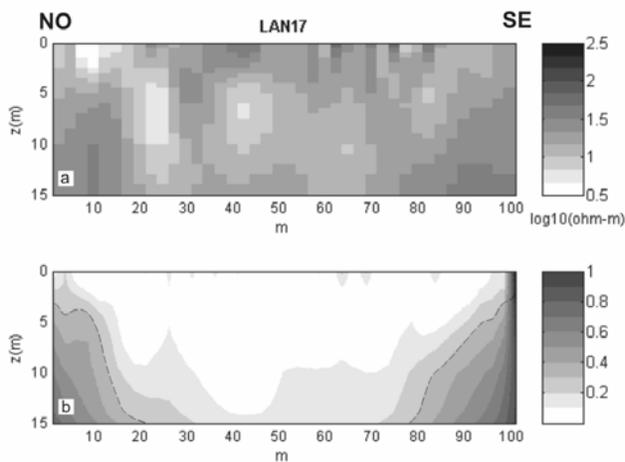


Figura 9: LAN18, referencias como en Figura 2.

el relleno y el camino donde se acumula agua. El relleno A está dividido en tres partes, entre el sector central y la parte oeste hay una zona sin residuos que funciona como un arroyo con agua permanentemente (arroyo O, Fig. 1b). El sector oriental esta separado del central por una zona sin residuos más extensa que también funciona como un curso de agua intermitente (arroyo E, Fig.1b). Ambos tienen aproximadamente dirección N-S, llevan agua abundante después de grandes lluvias y desaguan de manera indefinida del otro lado del camino formando zonas de anegamiento (Fig. 1b). Las depresiones entre celda y celda actúan como reservorios de agua después de las lluvias. El relleno B es mucho mas chico que el relleno A como se puede observar en el mapa de la figura 1b. La forma de almacenamiento fue distinta a la del primer relleno. No se construyeron celdas y por

información obtenida de los responsables del Basurero Municipal de Gualeguaychú la basura fue seleccionada y prensada antes de depositar.

Prospección geofísica

La ubicación de todos los perfiles horizontales utilizando la configuración dipolo-dipolo realizados en varios estudios geoelectricos desde 2003 se presentan en la figura 1b. Se utilizó el equipo experimental previamente explicado y el programa de inversión desarrollado por Oldenburg *et al.* (1993).

Entre el 2003 y 2005 se realizaron para evaluar el relleno A los perfiles LAN01 a LAN08. Los perfiles: LAN01, LAN02 y LAN04 están localizados en el interior del basurero para obtener información del relleno mismo y de los lixiviados. Los perfiles LAN03, LAN05, LAN06, LAN07 y LAN08 se encuentran en los bordes

del relleno donde no hay residuos. El LAN03 está ubicado en el borde este con una orientación SE-NO. El LAN05 está situado en el borde NO del relleno, mientras que los LAN06 y LAN07 están en el borde norte y en la zona de descarga del flujo superficial y subterráneo. La interpretación preliminar de los perfiles LAN01, LAN02 y LAN03 fue realizada por Pomposiello *et al.* (2004). El LAN08 ubicado a 500 m hacia el sudoeste se eligió como referencia para determinar las resistividades de la zona no afectada por los residuos (Fig. 1b).

En el 2006 se agregaron alrededor del relleno A los perfiles LAN09 a LAN15. Los perfiles LAN09, LAN10 y LAN11 están situados con dirección aproximadamente NS sobre la zona del arroyo E, donde no hay residuos, y cercanos a los freáticos P4, P5, P6 y P7 (Fig. 1b). Los LAN12 y LAN13 están en la parte norte con dirección NS y los LAN14 y LAN15 están en la parte sur del relleno. En estos dos últimos se midió parte sobre los residuos y parte fuera de los mismos. En el relleno B se realizaron los perfiles LAN16 a LAN18. Los LAN16 y LAN17 se cruzan aproximadamente en su parte media y el LAN18, con orientación NO-SE, está en el borde NE, donde no hay residuos (Fig. 1b).

Freáticos

En el año 2005, con el objeto de monitorear el agua freática se construyeron siete pozos de 2,30 m de profundidad fuera del área donde se dispusieron los residuos (Fig. 1b). Estas perforaciones se ubican, dos en el borde sur del relleno, dos en el borde norte y el resto en la zona de borde entre el sector central y el sector este del relleno. Fueron construidos para controlar el nivel, composición química e isotópica del agua freática. Se encamisaron con PVC y se colocaron filtros de grava y tapa en ambos extremos.

Los niveles freáticos medidos responden rápidamente a la precipitación. El sentido del escurrimiento del sistema freático es N-NE hacia el arroyo El Cura y el río Gualeguaychú, ambos de carácter efluente.

La temperatura y la conductividad eléctrica del agua fueron medidas periódicamente *in situ*. En un medio isótropo, poroso, saturado con agua y con presencia de arcilla las conductividades en (mSm^{-1}) se relacionan por la siguiente expresión:

$$\sigma_b = \sigma_w/F + \sigma_s \quad (6)$$

donde σ_b es la conductividad del sustrato, σ_w es la conductividad del fluido y σ_s es la conductividad de la arcilla, F es el factor de formación definido como $F = \phi^m$ por Archie (1942), donde ϕ es la porosidad y m es el factor de cementación que es enteramente dependiente de la forma de la partícula resistiva, variando desde 1,2 para esfera a 1,9 para fragmentos planos. Con esta expresión se estimará la porosidad del sustrato.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Modelos 2D de resistividad eléctrica

Los datos de resistividad aparente obtenidos en los perfiles DD se invirtieron para determinar los modelos 2D de resistividad eléctrica. Se realizaron varias inversiones modificando los parámetros de entrada del programa (número de iteraciones, coeficientes de la función objetivo, resistividad del modelo inicial) logrando ajustes del orden del 5% entre los datos experimentales y los datos predichos por el modelo. En particular se usaron diferentes modelos iniciales con resistividad eléctrica uniforme de 5, 10, 50, 100, 500 y 1000 ohm m y una grilla de celdas rectangulares de 48 nodos en la dirección del perfil y 47 nodos en profundidad. El tamaño de cada celda aumenta con la profundidad y fuera del área donde se instalaron los electrodos.

Se han seleccionado para la discusión los resultados de los perfiles LAN01, LAN03, LAN06, LAN08, LAN10 y LAN15, del relleno A y los perfiles LAN17 y LAN18 del relleno B (Fig. 3 a 9). Tanto los modelos 2D de resistividad eléctrica y del índice DOI se presentan entre 0 m y 15 m de profundidad. Se consideró que esta profundidad es la más adecuada para

describir las características geoelectricas superficiales y además para poder comparar todos los modelos a las mismas profundidades.

En la figura 2a se presenta el modelo obtenido por Pomposiello *et al.* (2004 y 2008a) para el LAN01 (Oeste-Este). El modelo muestra una primera capa con un espesor de 2 m a 3 m y una resistividad de 100 a 1000 ohm m. Esta capa aloja los residuos y el espesor concuerda con el determinado en un estudio magnético realizado en la misma área (Orgeira *et al.*, 2004). Una segunda capa de espesor entre 4 m y 5 m y con bajos valores de resistividad (~ 5 ohm m) determina el piso del depósito de residuos y la alta conductividad indica la presencia de fluidos ricos en sales probablemente producto del lixiviado. La tercer capa tiene una resistividad de alrededor de 15 ohm m y un espesor de más de 10 metros.

En la figura 2b se presenta el índice DOI, donde se observa que en la parte central tiene un valor de 0,3 a una profundidad mayor de 15 m, mientras que en las partes extremas (oeste y este del perfil) este valor se observa a menores profundidades (< 5 metros).

El modelo de resistividad eléctrica para el LAN02 (norte-sur) obtenido por Pomposiello *et al.* (2004 y 2008a, b) es muy similar al LAN01. Presenta una capa resistiva superficial, una capa muy conductora intercalada y una tercera capa más resistiva de alrededor de 15 ohm m. El índice DOI tiene valores similares a las mismas profundidades que el caso anterior.

En el modelo correspondiente al LAN04, que está ubicado en la parte sur del relleno sanitario (Fig. 1b), se observa la capa más superficial con una resistividad eléctrica superior a los 100 ohm m y un espesor entre 2 m y 3 metros. Tanto en esta capa como en los LAN01 y LAN02 se encuentran los residuos domésticos y subyacente se halla una capa cuyo espesor no supera los 6 m con bajos valores de resistividad (~ 6 ohm m) lo cual indica al igual que en los otros dos perfiles evidencias de contaminación. La tercera

capa presenta una resistividad mayor a 10 ohm m y la máxima profundidad de investigación obtenida es 23 metros.

El centro del LAN03 ubicado en el borde oriental del relleno sanitario, se encuentra alrededor de 2,27 m más bajo que los perfiles LAN01 y LAN02, y con una diferencia de nivel entre sus extremos de 1 m aproximadamente, siendo la parte más alta la ubicada al SE (Fig. 1b). En este perfil se tuvo en cuenta la topografía para invertir los datos y obtener el modelo (Fig. 3a). El mismo presenta una capa conductora de 4 ohm m con un espesor variable alrededor de 5 metros. Su techo varía desde una profundidad de 5 m cerca del límite NO del perfil hasta una profundidad de 10 m a los 40 m del extremo SE. La resistividad por encima y por debajo de esta capa es de alrededor de 20 ohm m. En este caso no se presenta la capa resistiva superficial (> 100 ohm m) observada en LAN01, LAN02 y LAN04 debido a la ausencia de residuos. En la figura 3b se presenta el índice DOI, en la parte central y a 15 m de profundidad alcanza un valor de 0.2.

Los perfiles (LAN05, LAN06 y LAN07) que están ubicados en el borde norte tienen un desnivel de 2 m aproximadamente por debajo de los LAN01 y LAN02 (Fig. 1b). Los modelos obtenidos en estos perfiles (Pomposiello *et al.*, 2008a) muestran una resistividad superficial entre 3 y 5 ohm m. La resistividad obtenida coincide con la determinada en la segunda capa del relleno sanitario. Por debajo se halla una capa más resistiva con una resistividad (~ 15 ohm m) y se observan cuerpos resistivos (~ 100 ohm m) a una profundidad alrededor de los 10 metros que han sido relacionados con la presencia de cuerpos de tosca. El modelo obtenido para el LAN06 se muestra en la figura 4a, donde se observa que la capa superficial más conductora tiene un espesor entre 2 m y 5 metros. A profundidades mayores se observa un cuerpo resistivo (alrededor de 120 ohm m) a una distancia $x = 54$ m y $z = 9$ m asociado nuevamente a la presencia de tosca. Cuerpos conductores de resistividad del orden de

12 ohm m se observan, cuyos centros se pueden localizar en $x = 27$ m y $z = 14$ m y en $x = 72$ m y $z = 9$ metros. Estos cuerpos pueden ser atribuidos a parte de la pluma de lixiviado que fluye en la misma dirección que la escorrentía superficial del área. En la figura 4b se presenta el índice DOI cuyo valor de 0.3 se encuentra a una profundidad menor a 15 metros. Se puede observar que entre 55 m a 60 m (horizontalmente) donde la capa superficial es más conductora y tiene mayor espesor, valores del índice DOI presentan un máximo relativo a una profundidad de 14,9 metros. Pomposiello *et al.* (2008 a) presentaron los resultados de un Sondeo Eléctrico Vertical que coincide con la parte central del modelo 2D del LAN06. El modelo 1D que se obtuvo es comparable con el 2D ya que este modelo muestra una primera capa con un espesor de 2 m y resistividad de 4 ohm m y otra capa de 20 m de espesor y resistividad de 14 ohm m. Por consiguiente, si se considera que la capa conductora detectada es explicada por la presencia de fluidos salinos típicos de lixiviados o también a la presencia de arcillas, la contaminación está restringida solamente a la capa más superficial (< 5 metros).

En el LAN08, usado de referencia fuera del predio del basurero, Pomposiello *et al.* (2008a) obtuvieron un modelo que no presenta cuerpos conductores. Se observa solamente en la parte sur un conductor superficial (7 ohm m) que no es comparable a lo observado en los otros perfiles, por lo tanto se atribuye a otras causas de contaminación, por ejemplo por el tráfico de camiones, ya que el mismo está sobre una ruta y cercano a la entrada de un campo. La resistividad en la parte central del perfil ($x = 50$ m) aumenta desde un valor de 10,4 ohm m hasta 15,6 ohm m a los 15 m de profundidad. En general la resistividad determinada en todo el modelo es < 20 ohm m (Fig. 5a). El índice DOI alcanza valores de 0,3 a profundidades mayores debido a que la resistividad eléctrica es en promedio más alta que los casos analizados anteriormente (Fig. 5b). Un Sondeo Eléctrico Vertical reali-

zado en el mismo lugar dio resultados coincidentes a los obtenidos en el perfil 2D del LAN08 (Pomposiello *et al.* 2008a).

Los perfiles LAN09, LAN10 y LAN11 están ubicados en una zona donde no hay residuos y cercanos a los freáticos P4, P5, P6 y P7 (Fig. 1b). En los modelos se observa que la parte más superficial (< 5 m) es más conductora alcanzando valores de 3 ohm m a 6 ohm m y por debajo se observa que la resistividad varía entre 10 ohm m a 30 ohm m, observándose también algún cuerpo resistivo que puede ser interpretado como tosca. En la figura 6a se presenta el modelo 2D para el LAN10 y en la figura 6b el índice DOI. En los primeros 5 m se determinaron bolsones conductores que pueden ser debidos a la presencia de lixiviado así como también a que los sedimentos contengan abundante arcilla. El índice DOI toma valores menores a 0,3 en la parte central a 15 m de profundidad y en los bordes del perfil a profundidades de alrededor de 5 metros. En los modelos correspondientes a los perfiles LAN12 y LAN13 que se ubican en el borde norte con orientación Norte-Sur (Fig. 1b), se observa también una capa conductora superficial hasta los 5 m y resistividades mayores a mayor profundidad.

Los perfiles LAN14 y LAN15 se ubican en la parte sur del relleno A (Fig. 1b). Estos perfiles fueron realizados un 30% sobre los residuos y el 70% restante fuera del relleno. Los modelos 2D muestran que sobre los residuos superficialmente la resistividad es alta, alrededor de 250 ohm m y con un espesor de 3 metros aproximadamente. Este resultado concuerda con los perfiles LAN01, LAN02 y LAN04 analizados anteriormente que muestran que donde se alojan los residuos la resistividad es la más alta. Por debajo de los mismos se observa un cuerpo conductor de resistividades alrededor de 6 ohm m que se va acercando a la superficie en la parte donde no hay residuos. Donde no hay residuos la resistividad superficial varía entre 3 ohm m y 6 ohm m con un espesor variable entre 2 m y 5 me-

tros. Por debajo la resistividad varía entre 20 ohm m a 40 ohm m. En la figura 7a se muestra el modelo correspondiente al perfil LAN15 y en la figura 7b el índice DOI. Se observa que el valor 0.3 no se alcanza en la parte central a los 15 m de profundidad y en el extremo norte del perfil este valor se encuentra a 10 m mientras que el extremo sur a 5 metros. Esto se debe que a que en la parte norte la parte superficial es más resistiva debido a la presencia de los residuos.

En el relleno B, de menor tamaño, se realizaron dos perfiles sobre los residuos y uno fuera de ellos, LAN16, LAN17 y LAN18 respectivamente (Fig. 1b). Los modelos 2D correspondientes a los perfiles sobre los residuos muestran que los primeros metros (~2.5 m) se caracterizan por una resistividad eléctrica entre 20 ohm m y 70 ohm m. Estos valores son inferiores a los determinados en el relleno A y la diferencia observada podría deberse a que el proceso de enterramiento y selección de los desechos fue diferente. En la figura 8a se presenta el modelo 2D de resistividad eléctrica del perfil LAN17 con dirección NO-SE. En la parte donde se alojan los residuos la resistividad oscila entre 20 ohm m a 70 ohm m. Entre 1 m a 10 m sobre la superficie se observa una zona conductora con resistividad ~4 ohm m. Probablemente en esta parte no hay residuos. Por debajo del depósito de residuos se observan entre 4 m y 10 m de profundidad unos cuerpos conductores con resistividad entre 5 ohm m y 10 ohm m indicando presencia de fluidos ricos en sales, probablemente producto del lixiviado. En los perfiles sobre el relleno A también se han observado estos valores de resistividad que son característicos de contaminación. En la figura 8b se presenta el índice DOI, se observa que en la parte central y a 15 m este índice es menor a 0,2. Este resultado se debe que en promedio la resistividad es más alta que la determinada en el relleno A.

En la figura 9a se presenta el modelo 2D del perfil LAN18 obtenido en el borde norte del relleno B. El mismo se ubica paralelo al LAN17 y está ~ 1, 2 m por de-

bajo del mismo. Se observan zonas muy conductoras (~3,5 ohm m) en distintas partes del modelo que también pueden ser explicadas como plumas de lixiviado. En general la resistividad del medio varía entre 10 ohm m a 30 ohm m. En el borde NO entre 1 m y 10 m no se pudo modelar debido que se cruzó sobre un camino de tierra mejorado que interfirió en la medición. En la figura 9b se presenta el índice DOI de este perfil. Nuevamente en la parte central y a 15 m no se alcanza el valor de 0,3.

Conductividad eléctrica del agua freática y superficial

Este proyecto multidisciplinario incluye estudios geoquímicos e isotópicos de las aguas subterráneas, superficiales y efluentes en el predio del basurero. En este marco, uno de los parámetros medidos es la conductividad eléctrica (CE). Los rangos de CE medidos en los efluentes y cuerpos de agua superficial (acumulaciones temporarias, etc.) dan valores entre 170 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y 800 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y los medidos en los freáticos entre 240 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y 8300 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Se observa un aumento de sur a norte y SE a NO, en la dirección del flujo regional. Estos valores están fuertemente influenciados por las precipitaciones, observándose dilución después de cada evento (Panarello *et al.* 2005, Dapeña, *com. pers.*). Por otro lado, los efluentes del relleno activo muestran conductividades de hasta 10 000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y también exhiben una rápida respuesta a la influencia de las lluvias.

Cálculo de parámetros químicos

En el Cuadro 1 se presentan los parámetros químicos calculados para los rellenos A y B. En los perfiles LAN01, LAN02 y LAN04 se determinó en la parte central del modelo ($x = 50$ m) la profundidad donde se observa el mínimo de resistividad. En los LAN14 y LAN15 se analizó solamente la parte del perfil que tiene residuos, definiendo allí la profundidad donde se observa la mínima resistividad. En los LAN16 y LAN17 se determina-

ron los mínimos de resistividad eléctrica observada y a qué profundidad corresponden. Se aplicaron los procedimientos descritos por Meju (2000) y se obtuvieron los parámetros hidroquímicos presentados en el Cuadro 1. Al comparar los resultados obtenidos, se observa que los valores determinados usando la ecuación (2) son un poco más del doble de los correspondientes al usar la ecuación (1). Si bien los resultados presentados en el cuadro son aproximados, estos valores pueden ser considerados como valores máximos y mínimos de predicción en este estudio y son útiles para evaluar las condiciones ambientales presentes. Debe tenerse en cuenta que estos cálculos representan una aproximación y que los parámetros dependen de la composición del lixiviado, infiltración, tipo de residuos depositados y materiales geológicos.

Los años del relleno A se han inferido utilizando los valores de mínima resistividad obtenida en los modelos (Cuadro 1). Se puede definir un rango entre 5 y 20 años y que coincide con la edad del basurero municipal ya que el mismo fue cerrado completamente por lo menos 5 años antes de hacer este estudio. Para el relleno B la edad estimada es de 5 a 10 años. Nuevamente concuerda con la fecha de cierre del mismo alrededor de 3 años antes de relevar los perfiles.

En el Cuadro 2 se presenta la comparación entre la resistividad eléctrica obtenida en los freáticos con la resistividad determinada en los modelos geoeléctricos en el mismo punto y profundidad, debido a que los perfiles coinciden con los freáticos. También utilizando las expresiones de Meju (2000) se estimó la conductividad y resistividad del fluido. Se observa que la resistividad estimada es mucho más baja que la determinada experimentalmente. La explicación de esta discrepancia puede deberse a que hay muchos niveles de arcilla y las expresiones de Meju (2000) utilizadas no contemplan la presencia de la misma.

Además, la conductividad del agua subterránea medida en los freáticos se relacionó con la conductividad eléctrica del

CUADRO 1: Parámetros químicos calculados para el relleno A y el relleno B. Los valores de mínimos de resistividad eléctrica obtenidos b se usaron para predecir STD (a) con la ecuación (1) y (b) con la ecuación (2); la conductividad del fluido es predicha usando la ecuación (3) y el contenido de cloro con la de la ecuación (4); El contenido de agua W es estimado de la ecuación (5) y los años son inferidos usando el contenido de STD y Cl- (Meju, 2000).

PERFILES	σ_b (mS/m)	STD	σ_w	Cl	W	Años	PERFILES	σ_b (mS/m)	STD	σ_w	Cl	W	Años
	ρ_b (ohm m)	Predicho (mg/L)	Predicho (mS/m)	Predicho (mg/L)	Estimado (vol %)			ρ_b (ohm m)	Predicho (mg/L)	Predicho (mS/m)	Predicho (mg/L)	Estimado (vol %)	
LAN01 (a) X = 50m Z = 4,5m	169,49 (5,9)	3944,58	568,43	1121,02	52,89	10-20	LAN01 (b) X = 50m Z = 4,5m	169,49 (5,9)	9342,64	1329,28	3106,98	33,82	5-10
LAN02 (a) X = 50m Z = 6m	109,29 (9,15)	2124,89	309,02	539,49	57,86	10-20	LAN02 (b) X = 50m Z = 6m	109,29 (9,15)	4733,25	680,25	1390,60	38,19	10-20
LAN04 (a) X = 50m Z = 5m	135,50 (7,38)	2877,00	416,53	771,92	55,37	10-20	LAN04 (b) X = 50m Z = 5m	135,50 (7,38)	6604,41	944,51	2061,80	35,98	5-10
LAN14 (a) X = 4,5m Z = 4,7m	197,90 (5,05)	4907,87	704,97	1451,46	51,25	10-20	LAN14 (b) X = 4,5m Z = 4,7m	197,90 (5,05)	11878,80	1684,13	4127,17	32,40	0-5
LAN15 (a) X = 7,4m Z = 6,7m	163,99 (6,10)	3765,27	542,97	1061,04	53,25	10-20	LAN15 (b) X = 17,4m Z = 6,7m	163,99 (6,10)	8876,89	1263,96	2924,70	34,13	5-10
LAN16 (a) X = 9,3m Z = 6m	104,17 (9,60)	1985,82	289,08	498,00	58,44	10-20	LAN16 (b) X = 9,3m Z = 6m	104,17 (9,60)	4393,86	632,17	1273,50	38,71	10-20
LAN17 (a) X = 1,7m Z = 6,6m	207,47 (4,82)	5245,64	752,45	1570,28	50,75	5-10	LAN17 (b) X = 1,7m Z = 6,6m	207,47 (4,82)	12780,39	1810,00	4500,02	31,98	0-5

CUADRO 2: Comparación entre la resistividad del fluido medida en los freáticos y la resistividad del modelo 2D en el mismo punto y profundidad de donde se sacó la muestra de agua. La última columna presenta la resistividad del agua estimada usando (a) ecuación (1) y (b) ecuación (2).

Freatímetro	Perfil	Profundidad (m)	σ_{WM} (fecha) (mS/m), (mes /año)	ρ_{WM} (ohm m)	ρ_B (ohm m)	ρ_W Predicha (ohm m) (a) (b)
P1	LAN07	2,15	204,0 (4/05)	4,90	5,75	0,72 - 3,22
P1	LAN12	2,15	136 (12/06)	7,35	9,12	1,46 - 3,22
P2	LAN06	2,10	174,3 (4/05)	5,73	6,90	0,96 - 2,19
P4	LAN09	1,76	267,0 (12/06)	3,74	5,43	0,66 - 1,57
P5	LAN10	1,45	490,0 (12/06)	2,04	3,14	0,29 - 0,73
P6	LAN11	2,00	75,2 (12/06)	13,29	11,63	2,12 - 4,52
P7	LAN11	2,05	123,6 (12/06)	8,09	8,27	1,26 - 2,81

acuífero libre determina a partir del modelo 2D en el mismo punto y profundidad. Se observó una buena correlación lineal entre ambas conductividades. Esto indica que el factor de la formación es casi homogéneo en el acuífero. Por medio de la expresión empírica (ec. 6), asumiendo presencia de arcilla y usando $m = 1.3$, se determinó la porosidad alrededor de 54% y la resistividad de la arcilla apro-

ximadamente en 20 ohm m (Pomposiello *et al.* 2008b).

CONCLUSIONES

A partir de los estudios realizados se han detectado para el relleno A valores altos de conductividad por debajo del relleno sanitario, que alcanzarían los 10 m de profundidad, posiblemente debidos a los

lixiviados alojados en el Grupo Punta Gorda. Esta unidad que constituye el sustrato donde se dispusieron los residuos, puede que sea conductor no solamente por el lixiviado sino por la presencia de arcilla o algún nivel marino que fue detectado en esta formación por Guida y González (1984).

Las zonas aledañas también presentan superficialmente zonas muy conductoras que pueden deberse a la migración de los lixiviados a través del flujo subterráneo o a la litología de los depósitos. En el límite norte del relleno A se detectó una capa superficial eléctricamente conductora y se midieron valores relativamente altos de conductividad eléctrica en los pozos. También se han encontrado cuerpos resistivos (~100 ohm m) en un medio de resistividad del orden de los (~15 ohm m). Estas anomalías se han interpretado como variaciones litológicas del Grupo Punta Gorda.

En el límite este, fuera del área donde se depositaron los residuos (LAN03), se en-

cuentra una zona conductora. La misma se localiza en el extremo NO a la misma profundidad que la determinada debajo del relleno sanitario A y se profundiza hacia el SE alcanzando una profundidad superior a los 12,5 metros. Hasta el momento, esta última anomalía no se ha podido explicar y se necesitan nuevas investigaciones geofísicas y datos de perforaciones para reconocer si es producto de los lixiviados o alguna otra causa, como los niveles marinos encontrados por Guida y González (1984) en el Grupo Punta Gorda.

En el relleno B sobre los residuos se observa una capa superficial resistiva pero con valores inferiores a los observados en el relleno A y tampoco se observan por debajo de ellos valores muy conductores. Estos resultados pueden deberse a que los residuos fueron más compactados y por lo tanto, probablemente tengan menos agua intersticial disponible que en el relleno A. En el perfil realizado en el borde norte se observan cuerpos conductores atribuibles a la presencia de lixiviados productos del relleno.

A partir de la conductividad eléctrica de las zonas más conductoras por debajo de los rellenos, se predijeron parámetros hidroquímicos del lixiviado utilizando las relaciones empíricas establecidas por Farquhar (1989) y Meju (2000). Los valores de la resistividad del fluido determinados por estas leyes empíricas no han sido corroborados experimentalmente debido que no se realizaron pozos sobre los residuos para evitar que el lixiviado se desparece y contamine. El contenido de agua (W) estimado puede que sea mayor al verdadero por que se utilizó la (ec. 5) que no tiene en cuenta la presencia de arcilla. Se observó que los valores de resistividad del fluido estimada a partir de las resistividades del modelo obtenidos donde no hay residuos no son comparables con las resistividades determinadas en los pozos. Esta discrepancia puede deberse a que las expresiones obtenidas por Meju (2000) no son aplicables a este caso o por la presencia de niveles de arcilla. Por último se utilizó la ley de Archie que tiene en cuen-

ta presencia de la misma. De esta manera se estimó la resistividad de la arcilla en 20 ohm m y la porosidad en 54%.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a Eduardo Llambías y Gabriel Giordanengo por su asistencia técnica y al Lic. Fernando Stöckli por su colaboración. Este trabajo de investigación fue realizado con fondos de la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica en el marco del proyecto PICT 2002, N°12243.

TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- Archie, G.E. 1942. The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. *Transactions American Institute of Mining Metallurgical and Petroleum Engineers*, 146: 54-62.
- Bell, F.G. y Jermy, C.A. 1995. A seepage problem associated with an old landfill in the greater Durban area. En Sarsby, R.W. (ed.) *Waste Disposal by Landfill GREEN'93*: 607-614, A. A. Balkema, Rotterdam.
- Birks, J. y Eyles, C.A. 1997. Leachate from landfills along the Niagara Escarpment. En Eyles, N. (ed.) *Environmental Geology of Urban Areas*. Geological Association of Canada 24: 347-363. Canada.
- Buselli, G., Barber, C., Davis, G.B. y Salama, R.B. 1990. Detection of groundwater contamination near waste disposal sites with transient electromagnetic and electrical methods. En Ward, S.H. (ed.) *Geotechnical Environmental Geophysics* 2: 27-39.
- Farquhar, G.J. 1989. Leachate: production and characterisation. *Canadian Journal of Civil Engineering* 16: 317-325.
- Fili, M. 2001. Síntesis geológica e hidrogeológica del noroeste de la provincia de Entre Ríos - República Argentina. *Boletín Geológico y Minero* 112: 25-36, Madrid.
- Fili, M., Tujchneider, O., Perez, M. y Paris, M. 1994. Investigaciones geohidrológicas en la provincia de Entre Ríos. En Bocanegra, E. y Rapaccini, A. (eds.) *Temas actuales de la Hidrología subterránea*. Consejo Federal de Inversiones y Universidad Nacional de Mar del Plata, 299-313, Mar del Plata.

Guida, N.G. y González, M.A. 1984. Evidencias paleoestuarías en el sudeste de Entre Ríos. Su evolución con niveles marinos relativamente elevados del Pleistoceno superior y Holoceno. 9° Congreso Geológico Argentino, Actas 3: 577-594, S.C. Bariloche.

Iriondo, M. 1980. El Cuaternario de Entre Ríos. *Asociación de Ciencias Naturales del Litoral*, Revista 11:125-141, Santa Fe.

Meju, M. 2000. Geoelectrical investigation of old abandoned, covered landfill sites in urban areas: model development with a genetic diagnosis approach. *Journal of Applied Geophysics* 44: 115-150.

Oldenburg, D. W. y Li, Y. 1999. Estimating depth of investigation in dc resistivity and IP surveys. *Geophysics* 64: 403-416.

Oldenburg, D. W., McGillivray, P. R. y Ellis, R. G. 1993. Generalized subspace method for large scale inverse problems. *Geophysical Journal International* 114: 12-20.

Orgeira, M. J., Vázquez, C. A. y Ostera, H. 2004. Relevamiento magnetométrico terrestre de rellenos sanitarios. Estudio piloto en Gualeguaychú. *Entre Ríos. Revista de la Asociación Geológica Argentina* 59(3): 501-505.

Panarello, H., Dapeña, C., Ostera, H. y Stöckli, F. 2005. Caracterización química e isotópica preliminar del basurero municipal de Gualeguaychú, provincia de Entre Ríos, Republica Argentina. 4° Congreso Argentino de Hidrogeología, Actas 2: 17-26, Río Cuarto.

Pomposiello, M.C., Favetto, A. y Ostera, H.A. 2004. Resistivity imaging and Ground Penetrating Radar survey at Gualeguaychú landfill, Entre Ríos Province, Argentina: Evidences of a contamination plume. 17th Workshop on Electromagnetic Induction in the Earth, Hyderabad, India. Publicado en la web <http://www.emindia2004.org>.

Pomposiello C., Favetto A., Dapeña C. y Boujon P. 2005a. Evaluación de la pluma contaminante aplicando métodos geofísicos en el relleno de residuos domiciliarios de Gualeguaychú, Entre Ríos, Argentina. 16° Congreso Geológico Argentino, Actas 3: 673-678, La Plata.

Pomposiello C., Favetto A., Boujon P., Dapeña C. y Ostera, H. 2005b. Evidencias de pluma de contaminación detectadas por un estudio geofísico en el basurero municipal de Gualeguaychú, provincia de Entre Ríos Argentina. 4° Congreso Argentino de Hidrogeología, Ac-

- tas 1: 181-190, Río Cuarto.
- Pomposiello C., Boujon P., Dapeña C. y Favetto A. 2008a. Evidencias de pluma de contaminación detectadas por métodos geofísicos en el Basurero Municipal de Gualeguaychú, Entre Ríos, Argentina. *Revista Latino-Americana de Hidrogeología Subterránea (ALHSUD)* 6: 11-24.
- Pomposiello, C., Dapeña, C., Boujon, P., Favetto, A. y Sancí, R. 2008b. Tomografías eléctricas en el Basurero Municipal ciudad de Gualeguaychú, provincia de Entre Ríos, Argentina. IX Congreso Latinoamericano de Hidrología Subterránea. ALHSUD CD T-56. 8P, Quito.
- Prezzi, C. Orgeira, M.J., Vásquez, C. J. A y Ostera, H. 2005. Ground Magnetic Survey of a municipal solid waste landfill: pilot study in Argentina. *Environmental Geology* 47: 889-897.
- Reig, O. 1956. Sobre la posición sistemática de "Zygolestes paranensis" Ameghino y de "Zygolestes entrerrianus" Ameghino. Centro de Estudiantes del Doctorado en Ciencias Naturales de Buenos Aires. *Revista Holmbergia* 5 (12-13): 209-226, Buenos Aires.
- Rimoldi, H. 1963. Aprovechamiento del río Uruguay en la zona de Salto Grande. 1era. Jornadas Geológicas Argentinas, *Anales* 2: 287-310, Buenos Aires.
- Russo, A., Ferello, R.E. y Chebli, G. 1979. Cuenca Chaco Pampeana. En Turner, J.M.C (ed.) *Geología Regional Argentina, 2° Simposio de Geología Regional Argentina*, Academia Nacional de Ciencias 1: 139-183, Córdoba.
- Sanci R., Ostera, H., Cagnoni, M. y Panarello, H. 2006a. ^{13}C and CO_2 fluxes from a landfill, Gualeguaychú, Entre Ríos, Argentina. Preliminary Report. 5° South American Symposium on Isotope Geology, Short Papers: 461-463, Punta del Este.
- Sanci R., Ostera, H. y Panarello, H. 2006b. Caracterización de la evolución de un relleno Sanitario en Gualeguaychú, provincia de Entre Ríos, Argentina: Evidencias geoquímicas e isotópicas. 11° Congreso Geológico Chileno, *Actas* 2: 141-144, Antofagasta.
- Valencio, S.A. Ostera, H.A. y Panarello, H.O. 2003. Monitoring the evolution of ^{13}C of CO_2 gas from a landfill in Gualeguaychú, Argentina: First results from a case study. 4° South American Symposium on Isotope Geology, Short Papers 1: 128-130, Salvador.
- Yaramanci, U. 1994. Relation of in situ resistivity to water content in rock salts. *Geophysical Prospecting* 41: 229-239.

Recibido: 17 de septiembre, 2008

Aceptado: 2 de junio, 2009