

# **Análisis geoestadístico de datos de potencial espontáneo para determinar el flujo del nivel freático en la localidad cercana a la Estación Cachicamo, Campo Cachicamo, Área Mayor de Socororo, Estado Anzoátegui**

*Antonio Ughi\*, Universidad Central de Venezuela y Victor Casas, Universidad Central de Venezuela.*

## **Resumen**

En este trabajo se exponen los resultados y análisis de un estudio realizado con datos de potencial espontáneo, que se llevó a cabo durante el mes de marzo de 2005 en los alrededores de una fosa ubicada en el Campo Cachicamo, Área Mayor de Socororo.

Desde una perspectiva regional el campo se encuentra emplazado sobre la cuenca del Río Agua Clara, el cual es abastecido por varios afluentes y tributarios que se localizan en las cercanías de la estación de flujo Cachicamo. Desde el punto de vista ambiental resulta relevante evaluar el posible impacto que pudiera acarrear un derrame de petróleo proveniente de la fosa o de la estación de flujo sobre estos tributarios.

Se realizaron 351 mediciones de potencial a lo largo de 14 líneas utilizando el método de gradientes, y referenciado todas las lecturas a una estación base común.

Con el propósito de facilitar la interpretación de los resultados de SP, se utilizaron técnicas geoestadísticas para generar mapas que permitan identificar la dirección de flujo del nivel freático en la zona estudiada.

Los resultados visualizados en un mapa de contornos generado con kriging, muestran que existe una clara correlación entre las zonas donde están presentes cárcavas de erosión y las anomalías observadas en el mapa de contornos. Estas relaciones sólo se hicieron evidentes

gracias a la técnica de kriging, la cual resultó ser adecuada para la interpretación de este tipo de datos.

## **Summary**

In this paper we show the results and analysis of a self potential study held in March 2005 in an oil pit placed in the Cachicamo Field, Socororo.

From a regional overview, the oil field is placed on the Agua Clara river basin which is supplied by several affluents and tributaries that are near the Cachicamo flow station. From an environmental viewpoint, it is relevant to evaluate the possible impact of an oil polluting plume from the pit or station over these tributaries.

We take 351 readings in 14 lines using the gradient method and tie the measurements to the same base station.

In order to facilitate the interpretation of the SP results, we use geostatistical techniques to generate contour maps where we can infer the direction flow of the water table in the study area.

The results shown in the isoproperties maps generated by kriging reveal the existence of a clear correlation between the gullies and the anomalies. This relationship is only observable with the use of kriging technique that proved to be the best form to interpret the SP data.

## Análisis geoestadístico de datos de potencial espontáneo

### Introducción

El Área Mayor de Socororo, es un conjunto de campos petroleros asignados a la Universidad Central de Venezuela en el marco de los convenios operativos y está operado a través de la empresa mixta PetroUCV. En el Campo Cachicamo ubicado al sur del área se encuentra la estación de flujo homónima que posee dos fosas petroleras dentro de la zona de las instalaciones. Desde una perspectiva regional, el campo se encuentra emplazado sobre la cuenca del Río Agua Clara, el cual es abastecido por varios afluentes y tributarios que se localizan en las cercanías de la estación de flujo. Desde el punto de vista ambiental resulta relevante evaluar el posible impacto que pudiera acarrear un derrame de petróleo proveniente de la fosa o de la estación de flujo sobre estos tributarios.

La presente investigación está enfocada en determinar la existencia y dirección del flujo del nivel freático en la zona adyacente a la Estación de Distribución Cachicamo, ubicada en el Campo Cachicamo, con el propósito de evaluar el potencial riesgo de contaminación de los acuíferos y ríos presentes en las cercanías de la estación en caso de que alguna de las instalaciones presentara filtraciones subterráneas.

Los métodos eléctricos y electromagnéticos han sido ampliamente utilizados en el campo de la Geofísica Ambiental e Hidrogeofísica (Abbas et al., 2004; Louis et al., 2002) con el propósito de detectar contaminación (Cahyna et al., 1990), infiltración (Cahyna, 1990; Mazác et al., 1990) y existencia de acuíferos cercanos a las zonas afectadas (Goldstein et al., 1990; Ross et al., 1990), entre otras aplicaciones; sin embargo, los equipos necesarios para llevar a cabo adquisiciones de este tipo son costosos.

El método de potencial espontáneo se presenta como un procedimiento de bajo costo de adquisición, ya que el equipo utilizado es sencillo, requiere de una reducida permanencia en campo y fácil procesamiento de

los datos. Sin embargo, los resultados de SP plantean algunos retos a la hora de interpretarlos, por lo que se requiere aplicar algún método que facilite esta fase. Se han propuesto varias metodologías de interpretación y modelado en función de los objetivos a estudiar (Sill, 1983; Ernstson y Scherer, 1986), con resultados variables.

La utilización de la geoestadística como herramienta para generar mapas de propiedades está ampliamente establecida en el medio geofísico por su capacidad para mostrar la continuidad espacial de las variables estudiadas, en consecuencia se plantea en esta investigación utilizarla para evaluar si facilita la interpretación de datos de SP convencionales.

### Localización del estudio

La fosa petrolera estudiada pertenece a la empresa PetroUCV (empresa mixta entre PDVSA y la Universidad Central de Venezuela) y está ubicada en el Campo Cachicamo, Área Mayor de Socororo, Estado Anzoátegui (Figura 1).

La estructura posee unas dimensiones de 55 m de largo, 45 m de ancho y 2 m de profundidad. Su contenido es principalmente agua residual y petróleo. El nivel de este contenido es bajo (aproximadamente 40 cm) debido a que es una fosa perteneciente a una estación de flujo abandonada desde hace varias décadas.

La morfología del terreno donde se encuentra la estación de flujo es plana con una pendiente suave hacia el sur. En el lateral occidental de la fosa se encuentran cárcavas de erosión que han desgastado el terreno y creado un cauce de hasta 2 m de profundidad. En el lateral oriental la erosión ha comenzado a actuar produciendo otra cárcava de menor profundidad (de 0,5 m a 1 m aproximadamente).

Localmente en la zona se observan sedimentos constituidos por arenas sueltas de grano fino y con gran

## Análisis geoestadístico de datos de potencial espontáneo

contenido de cuarzo. Desde el punto de vista de las propiedades físicas del área, se presenta un suelo bastante seco y con resistividad eléctrica alta, lo cual representa una ventaja para el estudio ya que el flujo del nivel freático se debería detectar con facilidad.

En la zona de las cárcavas la humedad del nivel freático se encuentra a 15 cm de profundidad en la base de los cauces, los cuales discurren aproximadamente de norte a sur siguiendo la pendiente natural del terreno.

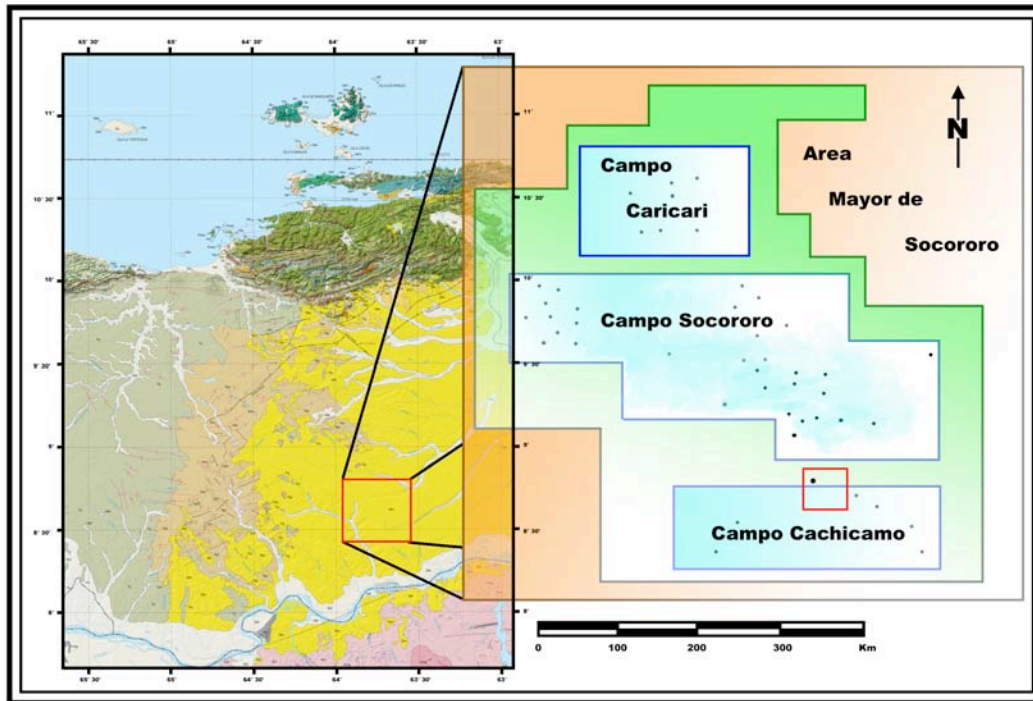


Fig. 1 Mapa geológico y de ubicación de la fosa en estudio, Campo Cachicamo, Área Mayor de Socororo.

Lado izquierdo del gráfico: Mapa de geología regional tomado de Hackley et al. (2005).

### Adquisición y procesamiento de los datos

Los datos fueron adquiridos por un grupo de estudiantes de la Universidad Central de Venezuela cursantes de la asignatura Geofísica de Campo, durante el mes de marzo del año 2005.

Para la adquisición de los datos se dispusieron de 9 líneas N-S y 5 líneas E-O, paralelas a los laterales de la fosa (Figura 4a). La longitud de las líneas es de 120 m a 205 m, la separación entre las mismas es de 13 m y la distancia entre cada estación o punto de medición es de 5 m.

Para realizar las lecturas de potencial espontáneo (SP) se utilizaron electrodos impolarizables (vasos cerámicos porosos y permeables con una solución saturada de sulfato de cobre). El método de adquisición fue el de gradiente por su versatilidad en la toma de medidas y baja influencia de errores casuales.

La secuencia de procesamiento consistió de cuatro etapas: eliminación de datos anómalos, suavizado de datos, referencia de potenciales entre líneas y generación del mapa de potencial. En la primera etapa se eliminaron los datos falsos producto de errores casuales ocurridos durante la adquisición. La segunda etapa

## Análisis geoestadístico de datos de potencial espontáneo

consistió en un suavizado por ajuste de regresión mediante el método Loess (suavizado móvil de regresión ponderado localmente, Figura 2). Para referenciar los potenciales de las diferentes líneas, se tomaron las líneas A y B como referencia y como estación base, la estación común a las líneas A y B (Figura 4a). Los perfiles de potencial espontáneo de las líneas A y B se ajustaron de modo que la estación base tuviera valor  $\Delta V=0$ . Posteriormente, cada perfil de línea fue referenciado al valor del potencial cuya estación interceptara las líneas A o B. El ajuste consiste en desplazar todos los valores de potencial de la línea, mediante una suma o resta de los valores.

Luego de referenciar todos los datos a una estación común, se procedió a generar el mapa de contornos de potencial espontáneo (Figura 5a), el mapa de residuos (es decir, la diferencia entre la señal regional o de larga longitud de onda y la señal residual o de corta longitud de onda (Figura 5b)) y el mapa de gradiente o campo eléctrico (Figura 5c) calculado según la expresión:

$$E = -\nabla V \quad (1)$$

donde E es el campo eléctrico.

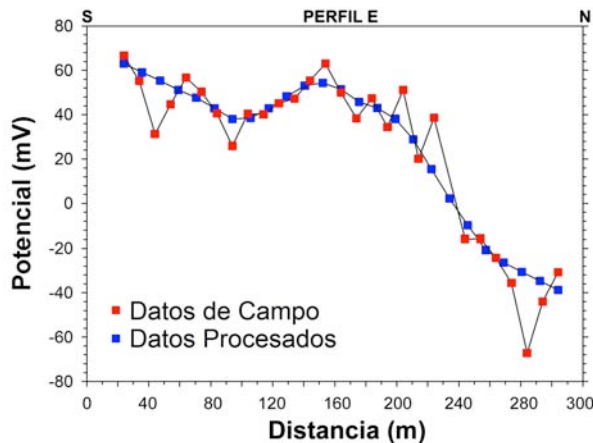


Fig. 2 Suavizado por método Loess. Se puede observar cómo mediante la eliminación de datos erróneos y suavizado, el perfil adquiere mejores características de variaciones de potencial en función de la variación espacial de 5 m entre estación.

## Análisis geoestadístico

La primera fase de este estudio consistió en realizar una evaluación de los datos desde el punto de vista estadístico, analizando la distribución poblacional de los mismos mediante el uso de histogramas de frecuencia (Figura 3) y cálculo de medidas de tendencia central y dispersión.

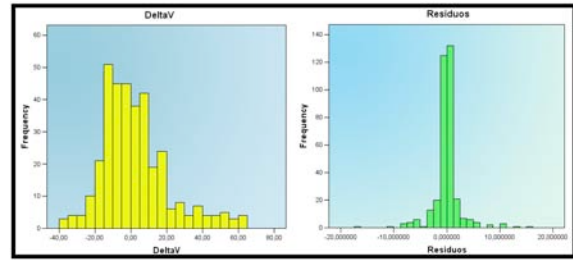


Fig. 3 Histogramas de frecuencia de los datos de SP y residuos.

Esta fase permitió identificar los datos erróneos alejados de la distribución principal, información que se utilizó como soporte y validación a la primera fase del procesamiento antes descrita.

Posteriormente, se calculó el variograma omnidireccional para observar el comportamiento global de los datos. El modelo teórico que permitió el mejor ajuste de este variograma fue el “modelo de efecto de hoyo”, en este caso el valor de la función de semivarianza para una distancia horizontal de 50 m coincidió con el valor de la misma función para una distancia de 75 m lo que sugiere la existencia de una estructura cíclica o periódica con una dimensión horizontal de 25 m aproximadamente.

## Análisis geoestadístico de datos de potencial espontáneo

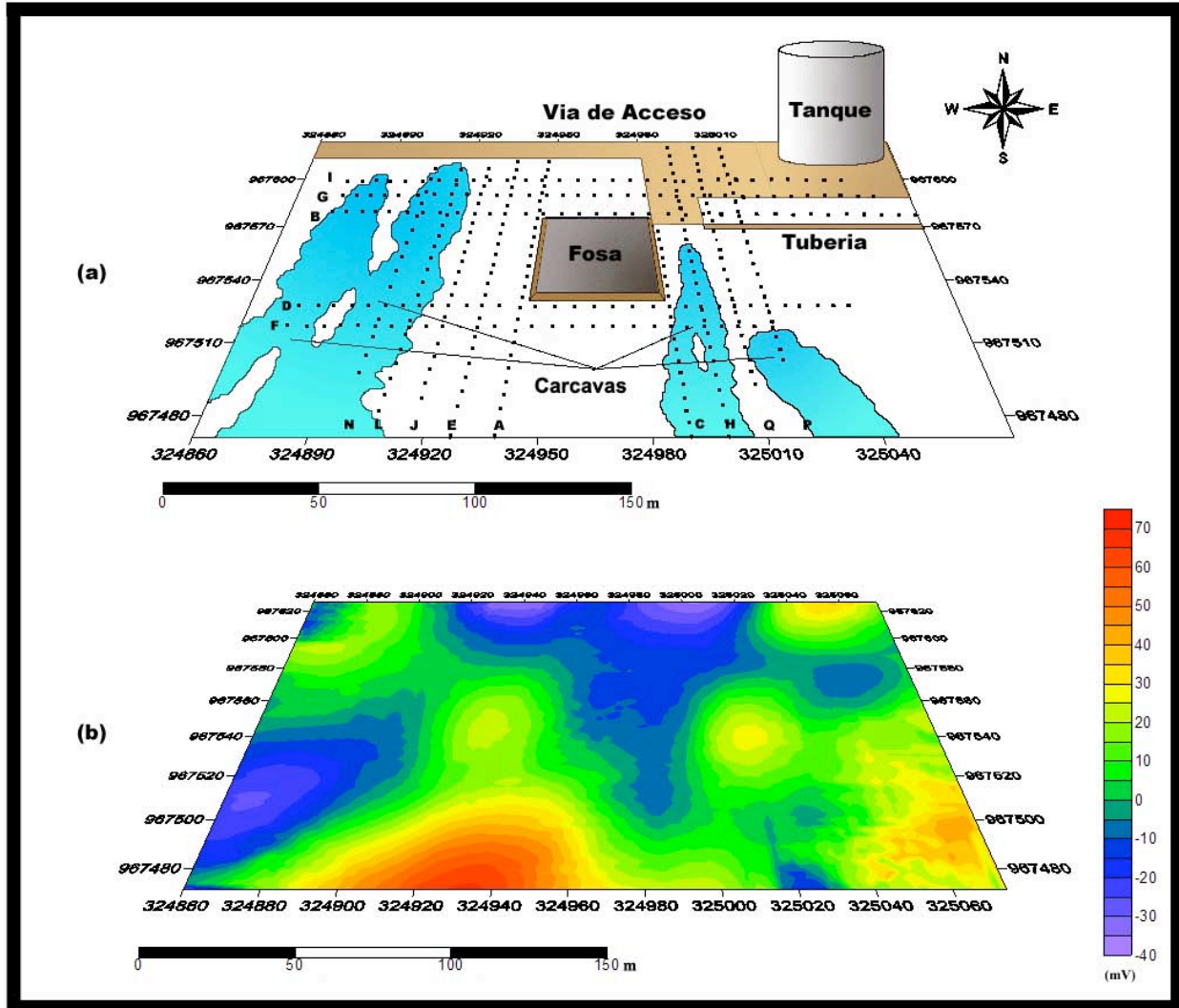


Fig. 4 a) Mapa base con la ubicación de las estaciones de potencial espontáneo y las instalaciones petroleras, b) Mapa generado con kriging utilizando la elipse de anisotropía y los variogramas direccionales ajustados con el modelo de efecto de hoyo.

(Las coordenadas de los mapas están en el sistema UTM, huso 20, datum geodésico: La Canoa).

## Análisis geoestadístico de datos de potencial espontáneo

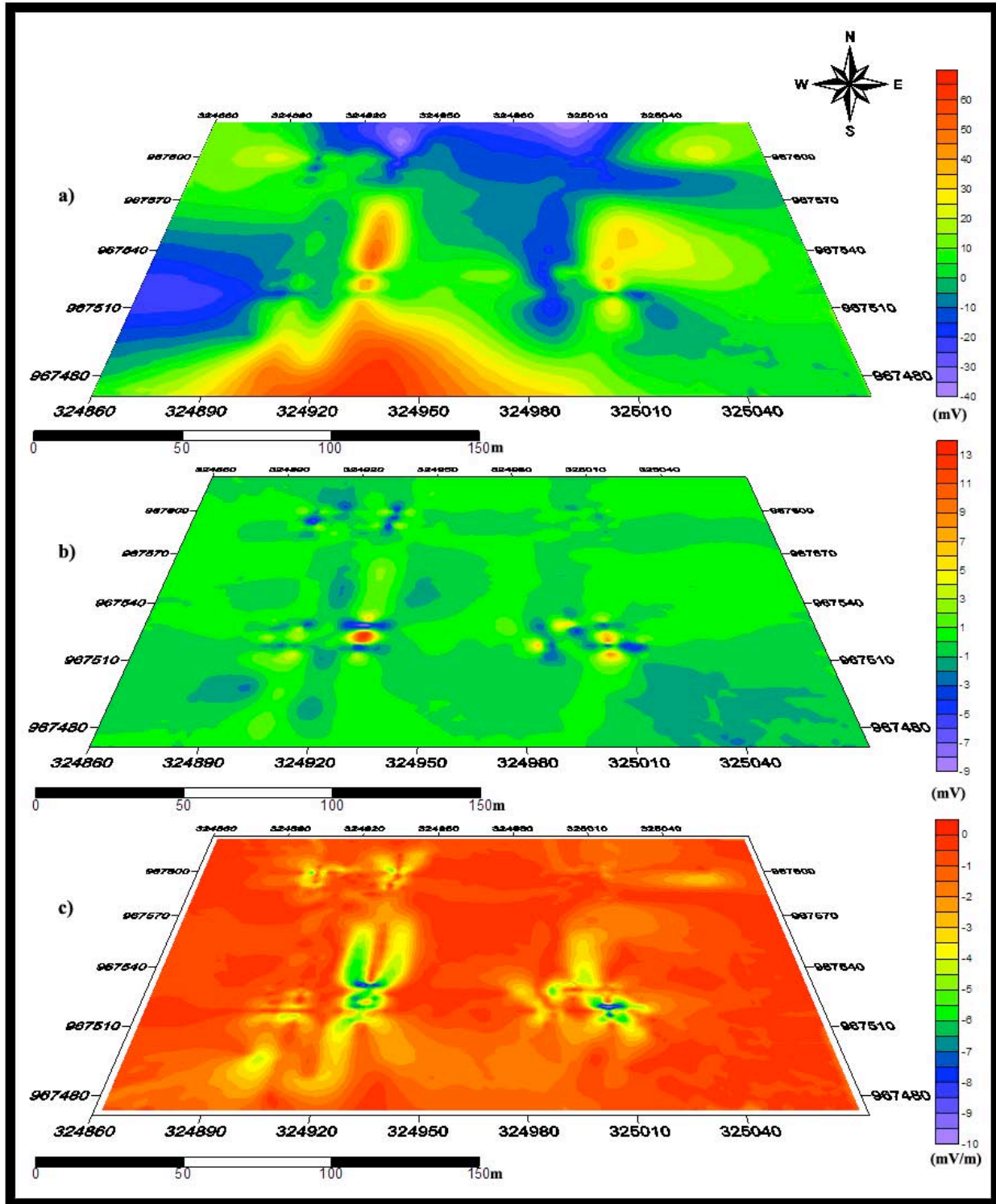


Fig. 5 a) Mapa de potencial espontáneo, b) Mapa de residuos y c) Mapa de gradientes (campo eléctrico).  
(Las coordenadas de los mapas están en el sistema UTM, huso 20, datum geodésico: La Canoa).

## Análisis geoestadístico de datos de potencial espontáneo

Seguidamente se calcularon los 6 variogramas direccionales con una tolerancia de 15° y un salto de 30°. De nuevo el modelo teórico de variograma que permitió obtener el mejor ajuste para los variogramas direccionales fue el modelo de efecto de hoyo. Una vez ajustados los variogramas se calculó la elipse de anisotropía con la que se pudo generar el mapa de propiedades con la técnica de kriging (Figura 4b).

El análisis de los histogramas de frecuencia revela una distribución sesgada hacia los valores negativos de la muestra, así como también la existencia de tres modas. Este comportamiento estadístico sugiere la existencia de tres poblaciones solapadas, la primera en un rango de 0 a 20 mV, está relacionada con un efecto regional debido a la topografía del lugar, la segunda población que además posee la moda principal, se encuentra dentro de un rango de -40 a 0 mV y está relacionada con la presencia de cárcavas y socavaciones por erosión del terreno que se encuentran a ambos lados de la fosa; estas socavaciones se profundizan y ensanchan hacia el sur. La tercera población, con un rango de 20 a 60 mV, se correlaciona con el flujo del nivel freático presente en las cárcavas ubicadas en el lateral occidental de la fosa, esta hipótesis está sustentada además por el mapa de campo eléctrico (Figura 5c) que muestra las líneas de campo en dirección norte – sur a ambos lados de la fosa en perfecta coincidencia con la ubicación de las cárcavas de erosión. Por otra parte, al analizar el mapa de isopropiedad (Figura 4b) se observa la misma correspondencia entre las zonas que poseen un valor de potencial de cero mV y las cárcavas de erosión visibles en el área (Figura 4a). En estos mapas de isopropiedades, la técnica de interpolación con kriging utilizando la información proveniente de los variogramas contribuyó a eliminar el efecto regional de la topografía y resaltar los contornos de los valores que correlacionan con las cárcavas de erosión y con el flujo del nivel freático.

## Discusión y conclusiones

El análisis estadístico realizado a los datos de SP reveló la existencia de tres poblaciones dentro de la muestra de 351 mediciones de potencial. Resulta difícil identificar individualmente los tres efectos solapados a partir de la información del mapa de isocontornos de potencial y determinar los elementos geomorfológicos causantes de su existencia, razón por la cual, la utilización de las herramientas estadísticas facilitó notablemente la interpretación de los resultados.

La principal población observada en el histograma, con rangos de potencial entre -40 y 0 mV, se asocia a la presencia de cárcavas y socavaciones por erosión del terreno que se encuentran a ambos lados de la fosa. La segunda población de datos, con rangos de potencial entre 0 y 20 mV, se relaciona con el efecto regional debido a la topografía del lugar, y la tercera población, con un rango de 20 a 60 mV, está asociada al flujo del nivel freático en la zona de las cárcavas ubicadas a ambos lados de la fosa.

Por otra parte, el análisis geoestadístico muestra una clara correspondencia entre las anomalías observadas en el mapa generado con kriging simple y las zonas donde se encuentran las cárcavas de erosión que han desgastado la superficie del terreno a ambos lados de la fosa (Figuras 4a y 4b).

Resulta interesante destacar que a 300 m aproximadamente al sur-este de la estación de flujo, se encuentra un tributario del Río Agua Clara. En la margen norte del río se observa una secuencia de areniscas de 2 m a 4 m de espesor que drena agua al afluente. La ubicación y flujo de estos manantiales se encuentra en correspondencia directa con el nivel freático observado 300 m más al norte en la zona de la fosa y la estación de flujo, lo que claramente sugiere la existencia de todo un sistema de acuíferos subterráneos que fluyen de norte a sur

## Análisis geoestadístico de datos de potencial espontáneo

siguiendo la pendiente natural del terreno hasta desembocar en el río. Este flujo, identificado gracias a la combinación de las técnicas geoestadísticas clásicas con los datos de potencial espontáneo, permite suponer que en la eventualidad de producirse un derrame de petróleo en la estación de flujo, la pluma de contaminación se infiltrará hacia el sur siguiendo la dirección natural de flujo del acuífero, razón por la cual se recomienda diseñar las medidas de seguridad necesarias para evitar tales contingencias.

### Agradecimientos

Deseamos expresar nuestro agradecimiento a todos los profesores y estudiantes del curso Geofísica de Campo 2005, especialmente al Prof. Franklin Ruiz, por todas las disertaciones sobre el método de potencial espontáneo y su valiosa colaboración en este trabajo y al Prof. José Cavada por sus atinados comentarios y correcciones. Además, deseamos ofrecer un especial agradecimiento a los Ingenieros Adolfo Alzurú y Jesús Patiño de la empresa mixta PetroUCV, por la colaboración prestada y sin cuyo apoyo no se hubiera podido realizar la presente investigación.

### Referencias

- Abbas, A., Atya, M., Al-Sayed, E. and Kamei, H. 2004, Assessment of groundwater resources of the Nuweiba area at Sinai Peninsula, Egypt by using geoelectrical data corrected for the influence of near surface inhomogeneities: *Journal of Applied Geophysics*, 56, 107 – 122.
- Cahyna, F. 1990, Monitoring of artificial infiltration using geoelectrical methods: *Geotechnical and Environmental Geophysics, Investigation in Geophysics N° 5, Society of Exploration Geophysicists*, 101 – 106.
- Cahyna, F., Mazác, O. and Venhodová, D. 1990, Determination of the extent of cyanide contamination by surface geoelectrical methods: *Geotechnical and Environmental Geophysics, Investigation in Geophysics N° 5, Society of Exploration Geophysicists*, 97 – 99.
- Ernst, K. and Scherer, U. 1986, Self-potential variations with time and their relation to hydrogeologic and meteorological parameters: *Geophysics*, 51, (10), 1967 – 1977.
- Goldstein, N., Benson, S. and Alumbaugh, D. 1990, Saline groundwater plume mapping with electromagnetics: cyanide contamination by surface geoelectrical methods: *Geotechnical and Environmental Geophysics, Investigation in Geophysics N° 5, Society of Exploration Geophysicists*, 17 – 25.
- Hackley, P., Urbani, F., Karlsen, A. and Garrity, C. 2005, Geologic shaded relief map of Venezuela: Open file report.
- Louis, I., Vafidis, A., Louis, F. and Tassopoulos, N. 2002, The use of geophysical prospecting for imaging the aquifer of Lakka carbonates, Mandouli Euboea, Greece: *Journal of the Balkan Geophysical Society*, 3, (5), 97 – 106.
- Mazác, O., Benês, L., Landa, I. and Maskova, A. 1990, Determination of the extent of oil contamination in groundwater by electrical methods: *Geotechnical and Environmental Geophysics, Investigation in Geophysics N° 5, Society of Exploration Geophysicists*, 107 – 112.
- Ross, H., Mackelprang, C. and Wright, P. 1990, Dipole – Dipole electrical resistivity surveys at waste disposal study in Northern Utah: *Geotechnical and Environmental Geophysics, Investigation in Geophysics N° 5, Society of Exploration Geophysicists*, 145 – 152.
- Sill, W. 1983, Self-potential modeling from primary flows: *Geophysics*, 48, (1), 76 – 86.