

# Digital processing of geoelectrics data applying the Ridge Regression in the Parish Olegario Villalobos of the Municipality Maracaibo, Zulia State

**Wilmer Márquez, María Cardozo y Gerson Villasmil**

*Laboratorio de Geofísica, Departamento de Geofísica, Facultad de Ingeniería, Universidad del Zulia. Maracaibo (4001), Venezuela. E-mail: wmarquez@luz.ve*

## Abstract

This investigation, is based on the Ridge Regression method for the processing digital of geoelectrics data, applied in 1970 by Marquardt, Hoerl and Kennard, and in 1973 by Joseph Robert Inman, which involve robust statistical parameters to obtain better results of apparent resistivity values and thickness for lineally dependent systems, using, the Vertical Electric Sound Method under the Schlumberger electrodic configuration in the Parish Olegario Villalobos of the Municipality Maracaibo. This geoelectric information is processed with the Ghosh Method, applying lineal models that generate curves of apparent resistivity for optimizing the obtained variables with the Ridge Regression method, the half error and the residual variance, among other indicate the residual deviation, the estimate range and the noise level on the data, the last one is defined in 3% as a product of the relationship between the half percentage error and the standard deviation which define reliable parameters in the interpretation phase of the is geoelectrics these profile indicate the presence of fresh water aquifer, with a top of 30 m, a base of 80 m profile and a flow of 2 L/seg, in the sector Las Mercedes school.

**Key words:** Ridge regression, Ghosh method, Schlumberger configuration, vertical electric sound, iso-resistivity.

## Procesamiento digital de datos geoelectrónicos mediante la aplicación de la Regresión Anidada en la Parroquia Olegario Villalobos del Municipio Maracaibo, Estado Zulia

### Resumen

Esta investigación, retoma el método de la Regresión Anidada para el procesamiento digital de datos geoelectrónicos, aplicado en 1970 por Marquardt, Hoerl y Kennard, y en 1973 por Joseph Robert Inman, incorporando parámetros estadísticos robustos, que permitan obtener mejores resultados de valores de resistividad aparente y espesores en sistemas linealmente dependientes, utilizando para tal fin, el Método del Sondeo Eléctrico Vertical bajo la configuración electródica tipo Schlumberger en la Parroquia Olegario Villalobos del Municipio Maracaibo. Esta información geoelectrónica es procesada con el Método de Ghosh, aplicando modelos lineales que generan curvas de resistividad aparente para posteriormente optimizar con el método de la Regresión Anidada las variables obtenidas. El error medio y la varianza residual, entre otros, indican la desviación de los residuales, el rango de estimación y el nivel de ruido en la data; este último definido en 3%, es el producto de la relación entre el error medio porcentual y la desviación estándar, la cual, define parámetros confiables en la fase de interpretación de los perfiles geoelectrónicos. Estos perfiles

indican la presencia de acuíferos de agua dulce, con un tope de 30 m, una base de 80 m y un caudal de 2 L/seg, en el sector del colegio la Merced.

**Palabras clave:** Regresión Anidada, método de Ghosh, configuración Schlumberger, sondeo eléctrico vertical, isorresistividad.

## Introducción

El Trabajo de Investigación denominado: "Procesamiento digital de datos geoelectricos mediante la aplicación de la Regresión Anidada en la Parroquia Olegario Villalobos del Municipio Maracaibo, Estado Zulia", tiene como objetivo fundamental, la implementación del algoritmo matemático conocido como la Regresión Anidada, para el procesamiento digital de datos geoelectricos en el área de estudio, con el fin, de establecer una herramienta que permita estimar valores de resistividad verdadera y espesores a partir de pequeños valores de resistividad aparente, que conforman sistemas linealmente dependientes, que no poseen solución por otros métodos.

El trabajo está conformado por dos fases: la primera fase, enfoca todo lo referente a la recolección de la información en campo, incluyendo lo relativo a la adquisición de datos geoelectricos, a través del Método del Sondeo Eléctrico Vertical, mediante la configuración eléctrica Schlumber-

ger. La segunda fase, involucra el procesamiento y la optimización de la información, mediante la implementación de sistemas lineales discretos en función de un modelo convolucional, por medio del ensamblaje de la teoría algorítmica del modelo de Ghosh utilizando el Método Geoelectrico Resistivo Digital y la aplicación de la Regresión Anidada, para la inversión de valores de resistividad en el área de estudio.

## Procedimientos Operativos

### Ubicación geográfica

Estado: Zulia.

Municipio: Maracaibo.

Parroquia: Olegario Villalobos.

### Adquisición de datos geoelectricos

La fase de adquisición, se fundamentó en obtener información geoelectrica de la Parroquia Olegario Villalobos (Figura 1), a través de la medi-

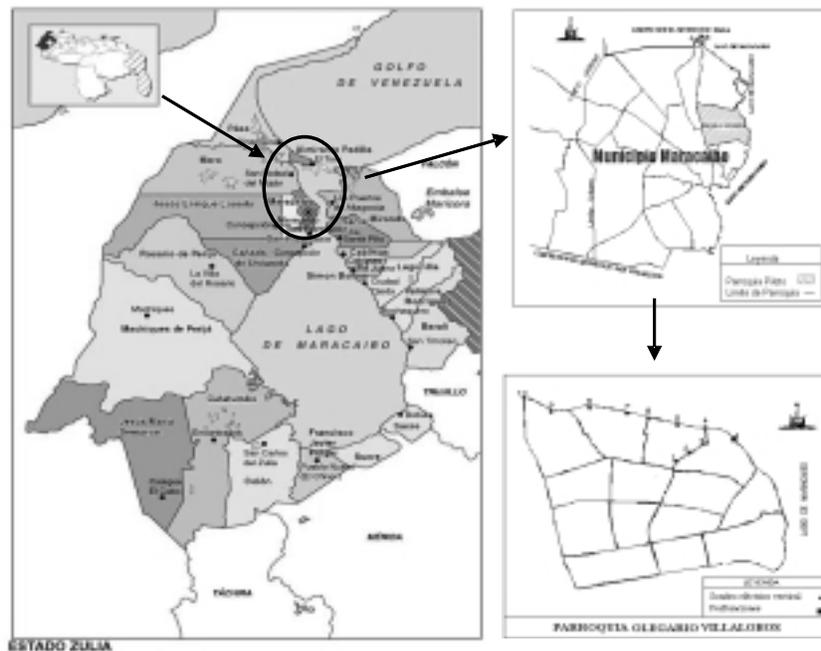


Figura 1. Plano de ubicación del Municipio Maracaibo.

ción de diez (10) Sondeos Eléctricos Verticales pertenecientes a un mallado distribuido a lo largo del tramo Plaza de Toros-Mercado las Goajiras, diseñados para una profundidad de investigación de 200 metros aproximadamente.

La ejecución de los Sondeos Eléctricos Verticales, implicó un tendido de las líneas de emisión, simétricas con respecto al centro del sondeo, para una configuración electródica tipo Schlumberger. En la Tabla 1 y Figura 2, se muestran las coordenadas de los sondeos y la perforación referidas al Sistema Catedral de Maracaibo y su ubicación geográfica respectivamente.

**Procesamiento y ajuste**

El procesamiento de los datos geoelectricos, se fundamenta en la representación gráfica de los valores de resistividad y distancia (AB/2), por medio de curvas bilogarítmicas que están en función de los espesores de las capas [1], y son interpretadas mediante procedimientos de igualación de curvas, utilizando el método del punto auxiliar, generando sistemas lineales discretos (Ghosh, 1971), donde la curva de resistividad aparente de un sondeo puede ser representada como la respuesta de un proceso de convolución entre una señal de entrada (definida como la transformada de resistividad del modelo geoelectrico) y la función de transferencia del sistema definido como una función de Bessel de primer orden y en primera clase [2].

En este sentido, se puede establecer que un modelo geológico definido en función de los parámetros de espesor y resistividad para un número finito de capas, puede ser expresado en término de su transformada de resistividad, tomando en consideración, que en cada interfase geoelectrica se puede determinar un coeficiente de reflexión resistivo según la siguiente ecuación:

$$K_{J-1} = \frac{\rho_{J-1} - \rho_J}{\rho_{J-1} + \rho_J} \tag{1}$$

$\rho$ : resistividad real de la capa.

$K_{J-1}$ : coeficientes de reflexión resistiva.

De esta forma, la transformada de la resistividad para un subsuelo estratificado, puede ser calculada en forma recursiva a partir de la expresión:

**Tabla 1**  
Coordenadas de los Sondeos Eléctricos Verticales

SEV	Norte (m)	Este(m)
1	206452	200120
2	206658	200216
3	206958	200620
4	207997	199199
5	207357	199613
6	207147	200242
7	206977	200756
8	206474	201028
9	205954	201036
10	205153	200902
Perforación	Norte (m)	Este(m)
1	205004	200984



Figura 2. Plano de ubicación de los sondeos eléctricos verticales y perforaciones, en la parroquia Olegario Villalobos.

$$T_J(\lambda) = \frac{W_J(\lambda) + T_{J+1}(\lambda)}{1 + W_J(\lambda) * T_{J+1}(\lambda) / \rho^2 \rho} \tag{2}$$

donde:

$$W_J = \rho_J \frac{1 - e^{-2\alpha_J \lambda}}{1 + e^{-2\alpha_J \lambda}} \tag{3}$$

A partir del conocimiento de la transformada de la resistividad del modelo geoelectrico ( $T$ ), y de la resistividad aparente, se puede definir el modelo convolucional expresado como:

$$\rho_m = \sum_J^m b_J * T_{m-J} \quad (4)$$

$\rho$  : valores digitales de resistividad aparente.

$b_J$  : valores digitales del filtro de convolución.

$T$  : valores digitales de la transformada de resistividad.

Posteriormente, para obtener los valores de resistividad, se procede a convolucionar los valores de la serie digital de la transformada de la resistividad con el filtro digital.

En la fase de procesamiento de la información, se utilizó el Método geoelectrico digital resistivo con un ensamblaje optimizado de la teoría algorítmica de los modelos convolucionales de Ghosh, mediante un tratamiento de los parámetros específicos de Johansen, bajo la configuración electrónica tipo Schlumberger (Figura 3), para un conjunto de diez (10) sondeos con la finalidad de estudiar las características hidrogeológicas del subsuelo y la posibilidad de detectar acuíferos que permitan la recomendación de sitios óptimos para la perforación y la explotación de pozos en la Parroquia Olegario Villalobos.

El procesamiento de la información, se realizó mediante el apoyo de un modelo geológico inicial (Figura 4), el cual, se introdujo en el programa de cálculo Geosev, diseñado por el Departamento de Geofísica de la Universidad del Zulia (LUZ), para iniciar el proceso de iteración, y de esta forma obtener los valores definitivos de espesores y resistividades que serán utilizados para inferir desde el punto de vista geológico la litología, la composición mineralógica de la roca y el potencial acuífero del subsuelo en el área de estudio.

Los resultados obtenidos en esta fase, son representados por un conjunto de curvas que son luego clasificadas de acuerdo a la etapa del procesamiento, es decir, la primera etapa corresponde con la representación gráfica de los datos crudos obtenidos en campo, definiendo con ello, un conjunto de curvas denominadas curvas preprocesadas (Figuras 5 y 6). La segunda etapa,

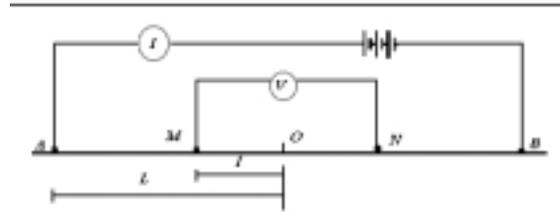


Figura 3. Configuración electrónica tipo Schlumberger.

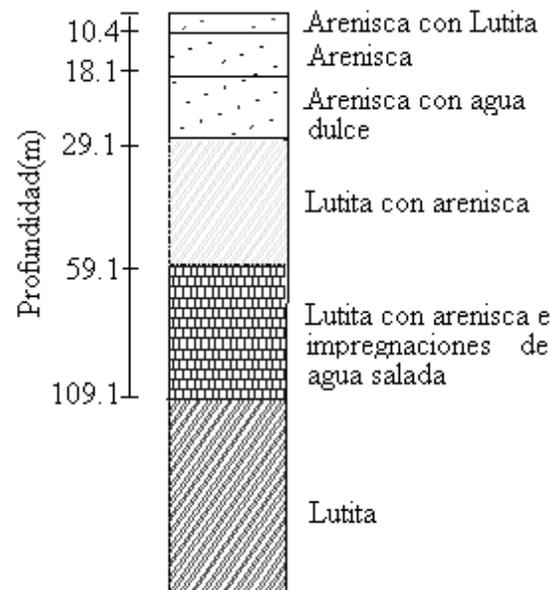


Figura 4. Modelo geológico inicial.

está basada en el ajuste de los datos, mediante la aplicación de la interpolación cúbica y el método de los cuadrados mínimos, con la finalidad de suavizar las curvas y obtener valores filtrados de resistividad; en esta etapa las curvas se denominan curvas procesadas (Figuras 7 y 8).

### Optimización de los resultados

Los resultados obtenidos, han sido optimizados con el Método de la Regresión Anidada (Figura 9), el cual, permite comparar las curvas de campo con un conjunto de curvas patrones, incorporando variables estadísticas de control [3], con el objeto de determinar, mediante un proceso de interpolación las características geoelectricas de las curvas de campo, definiendo con ello, un modelo inicial de datos, que permite indicar el

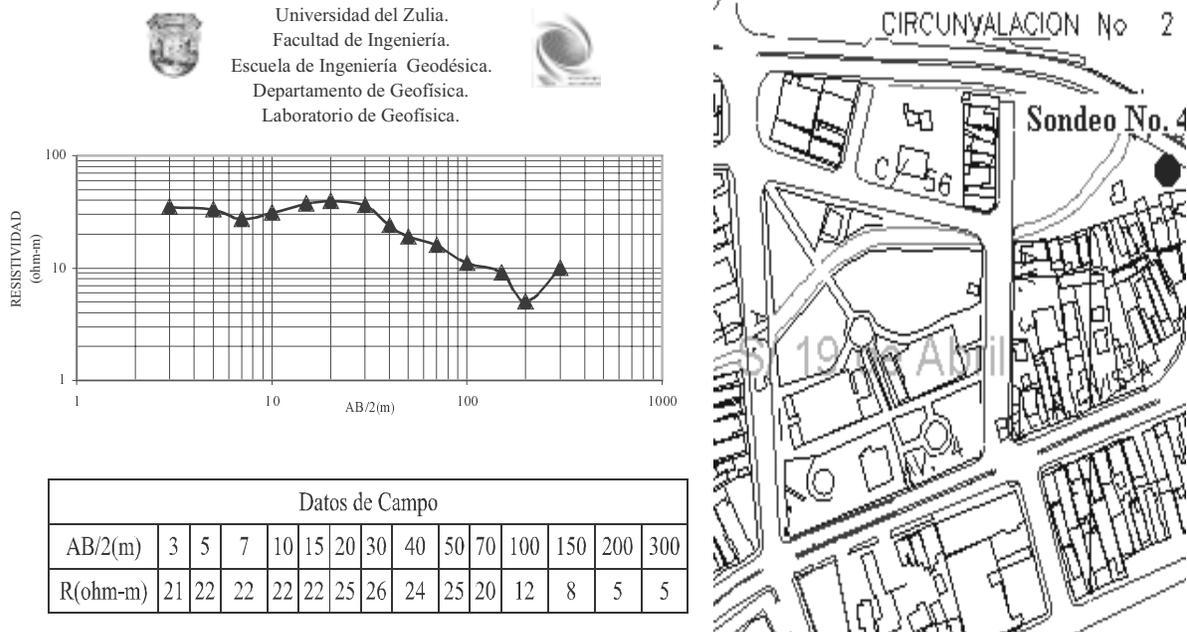


Figura 5. (a) Datos de campo y curva pre-procesada del sondeo eléctrico vertical N° 4.  
(b) Ubicación geográfica del sondeo eléctrico vertical N° 4.

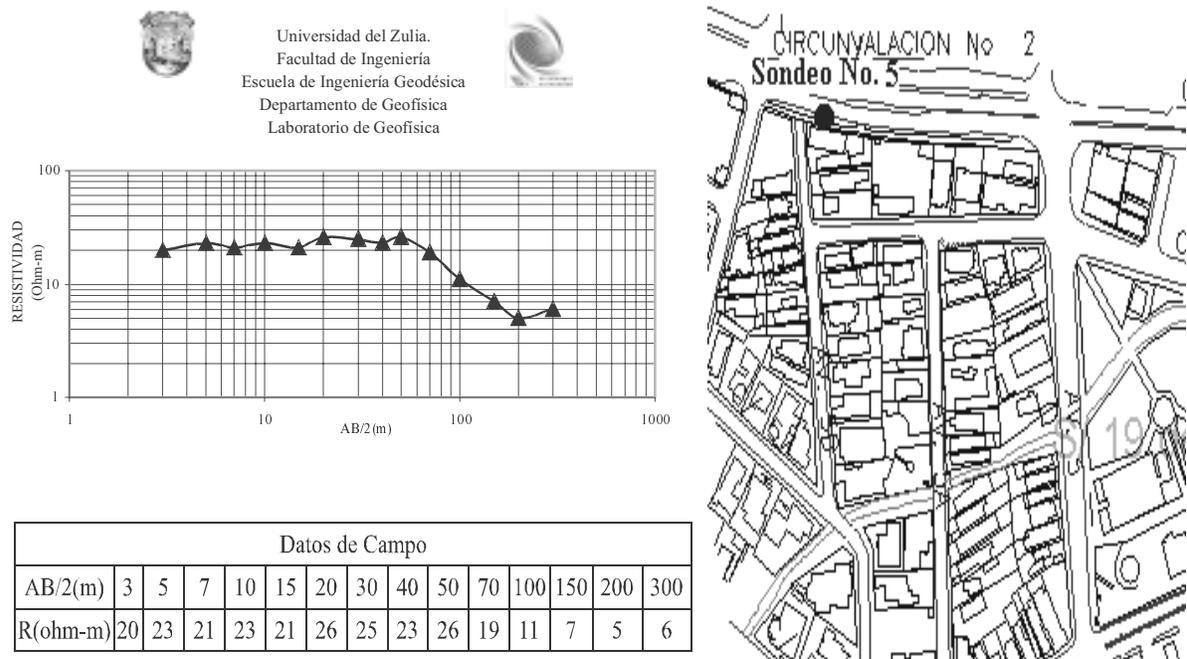


Figura 6. (a) Datos de campo y curva pre-procesada del sondeo eléctrico vertical N° 5.  
(b) Ubicación geográfica del sondeo eléctrico vertical N° 5.

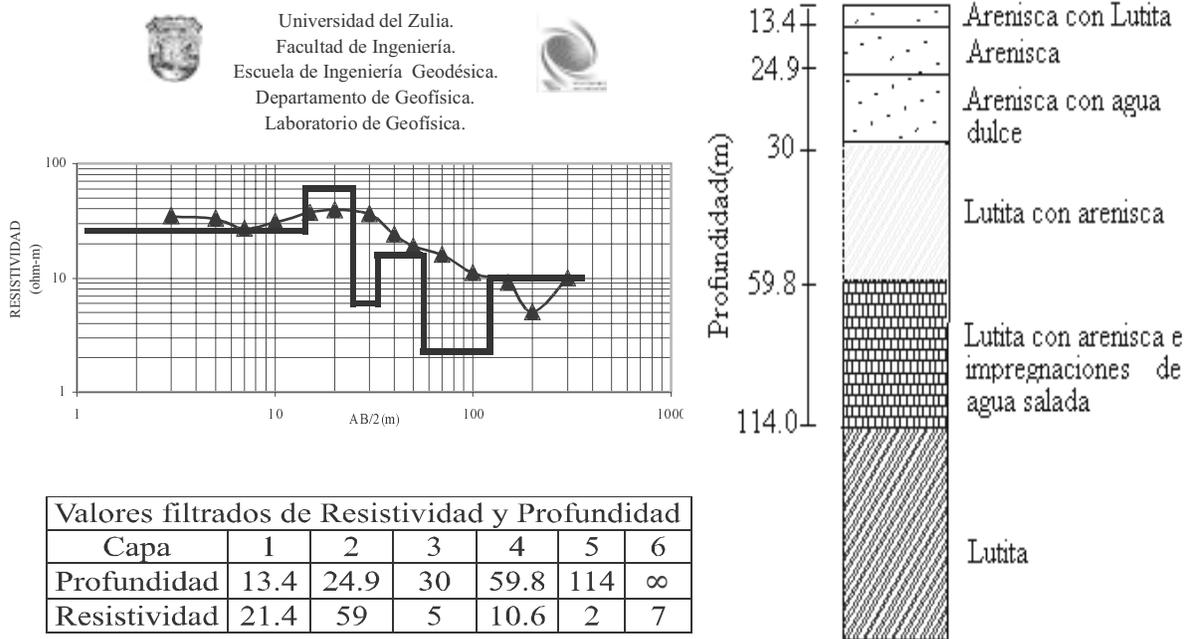


Figura 7. (a) Curva ajustada del sondeo eléctrico vertical N° 4 y datos de campo filtrados y ajustados por mínimos cuadrados. (b) Columna estratigráfica del sondeo eléctrico vertical N° 4.

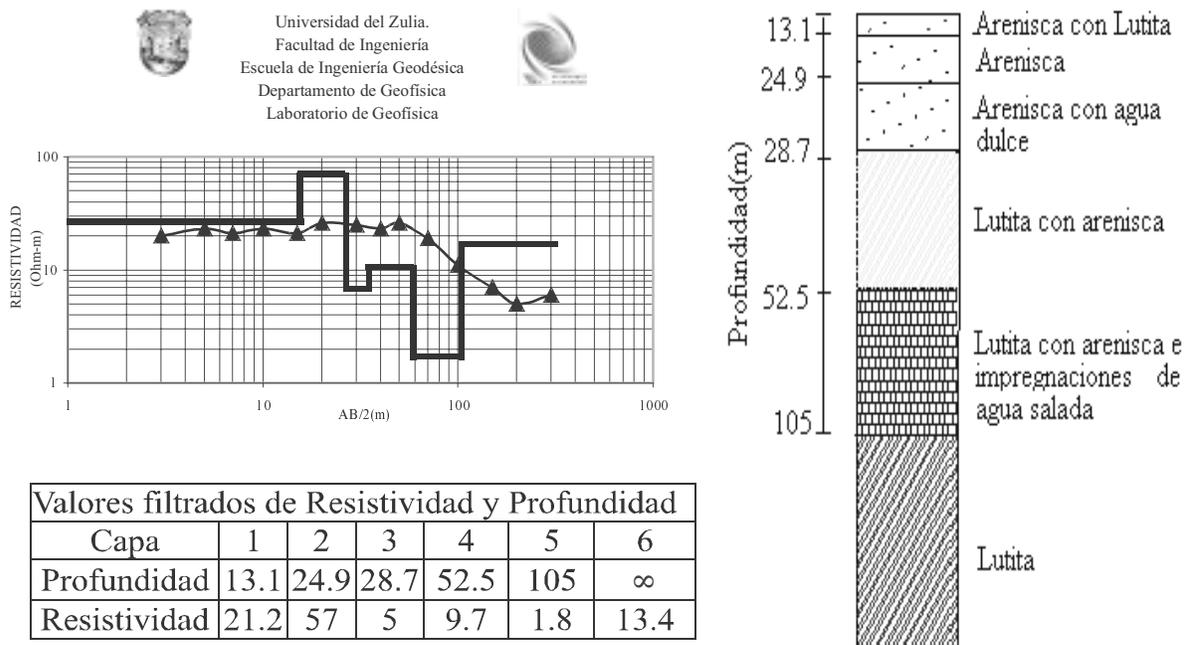


Figura 8. (a) Curva ajustada del sondeo eléctrico vertical N° 5 y datos de campo filtrados y ajustados por mínimos cuadrados. (b) Columna estratigráfica del sondeo eléctrico vertical N° 5.

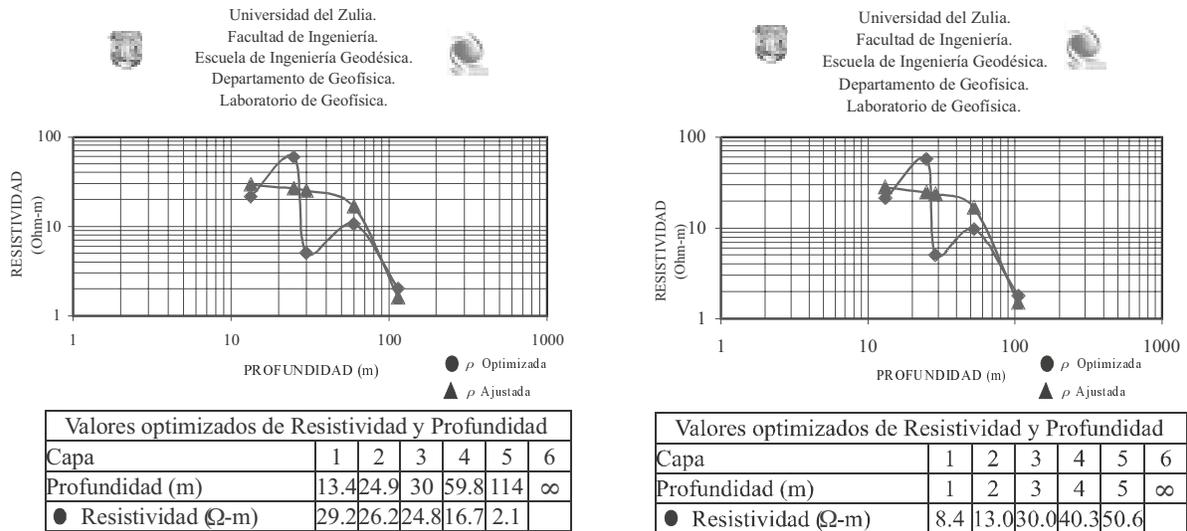


Figura 9. (a) Curva Optimizada del S E V N° 4. (b) Curva Optimizada del S E V N° 5.

nivel de ruido en los datos y predecir la exactitud con la cual se estimarán los parámetros para sistemas linealmente dependientes [4].

El modelo matemático que describe este método es el siguiente:

$$A = \frac{\partial G(P, x)}{\partial P_1} \tag{5}$$

$$N = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & \rho_{12}\sigma_1\sigma_2 & \rho_{1n}\sigma_1\sigma_n \\ \rho_{12}\sigma_1\sigma_2 & \sigma_2^2 & \rho_{2n}\sigma_2\sigma_n \\ \rho_{1n}\sigma_1\sigma_n & \rho_{2n}\sigma_2\sigma_n & \sigma_n^2 \end{bmatrix} \tag{6}$$

$$M = \sigma^2 N \tag{7}$$

$$\Delta G = A \Delta P \tag{8}$$

$$\Delta P = \rho_i - \rho_n \tag{9}$$

$$\sigma^2 = \frac{(\Delta G)^t N^{-1} \Delta G}{N - M} \tag{10}$$

$$\text{cov}(P) = \sigma^2 (A^t N^{-1} A)^{-1} \tag{11}$$

$$[\text{cor}(P)]_{ij} = \frac{[\text{cov}(P)]_{ij}}{\sqrt{[\text{cov}(P)]_{ii} * [\text{cov}(P)]_{jj}}} \tag{12}$$

$\rho_1$ : resistividad en la capa 1

$\rho_n$ : resistividad aparente Schlumberger

p: vector de parámetros desconocidos

G(P,x): resistividad aparente medida

cor: matriz de correlación

cov: matriz de covarianza

$\sigma^2$ : varianza residual

En la Tabla 2 se muestran los resultados obtenidos con la Regresión Anidada.

Los parámetros estadísticos obtenidos con la Regresión Anidada (Tabla 2), permiten generar un modelo de datos de Regresión que garantiza el nivel de ruido en la muestra en 3%, para controlar la calidad de los resultados, considerando las variables estadísticas: error medio, que indica la desviación de los residuales en un intervalo de  $-2.14 \cdot 10^{-15}$  a  $-1.33 \cdot 10^{-16}$ , el error medio porcentual, el cual, se refiere a los valores absolutos de los residuales en función de las estimaciones y es igual a  $-81.84\%$  y  $-80.47\%$ , generando un gran valor de varianza residual, producto de la razón entre el error medio porcentual y la desviación estándar, indicando una buena posición para el modelo hipotético de datos y la matriz de correlación que garantiza la dependencia lineal entre las variables generando sistemas matriciales singulares, ideales para ser resueltos por este método.

Tabla 2  
Parámetros de la Regresión Anidada

Sondeo Eléctrico Vertical	4		5	
	$\rho$ ( $\Omega$ -m)	Prof (m)	$\rho$ ( $\Omega$ -m)	Prof (m)
Desviación Estándar	40,46	23,23	36,55	22,51
Kurtosis	0,69	1,35	0,93	1,30
Valor Sesgado	1,27	1,57	1,36	1,55
R-square ( $\Omega$ -m)	25.13%		24.48%	
Error Absoluto Medio ( $\Omega$ -m)	13.33		13.04	
Error Medio ( $\Omega$ -m)	$-2.14 \cdot 10^{-15}$		$-1.33 \cdot 10^{-16}$	
Error Medio Porcentual ( $\Omega$ -m)	-81.84%		-80.47%	
Matriz de Correlación	1.0-0.82 -0.82 1.0		1,0-0,81 -0,81 1,0	
Modelo Ajustado de la Regresión Anidada( $\Omega$ -m)	$\rho=32.89-0.27*Prof$		$\rho=31,97-0,29*Prof$	

Tabla 3

Capa	1	2	3	4	5	6
Profundidad	10.7m	20.0m	46.9m	95.8m	126.1m	$\infty$
Litología	Arenisca con Lutita	Arenisca	Arenisca con agua dulce	Lutita con arenisca	Lutita con Arenisca e impregnacion es de Agua Salada	Lutita

### Interpretación

Las curvas de Sondeos Eléctricos Verticales obtenidas para la Parroquia Olegario Villalobos, fueron agrupadas y correlacionadas con la perforación a fin de establecer un control adicional que permita la eliminación de anomalías atribuibles a efectos superficiales. De la interpretación de los diez (10) sondeos eléctricos verticales para la determinación de acuíferos explotables, se definieron seis (6) unidades geoelectricas. Estas unidades representan el perfil geoelectrico del subsuelo, donde cada unidad corresponde a un conjunto de capas geológicas con propiedades físicas relativamente comunes, pero predominantes en comparación con el resto de las unidades definidas [5]. A continuación se indican las características de las unidades geoelectricas, en la Tabla 3.

La zona, que de acuerdo a sus características geoelectricas y la disposición de su columna estratigráfica es la más apta para la explotación de acuíferos, se encuentra en el sector del Colegio La Merced en la Avenida Bella Vista, debido a la presencia de Arenisca con agua dulce a una profundidad entre un tope de 30 m y una base de 80 m aproximadamente con un caudal de 2 L/seg. Los mapas de isorresistividades obtenidos se muestran en la Figura 10.

### Conclusiones

Los resultados obtenidos en esta investigación, indican que la Regresión Anidada es un poderoso método para el procesamiento e interpretación de datos geoelectricos, ya que, define un modelo de datos, que permite predecir la

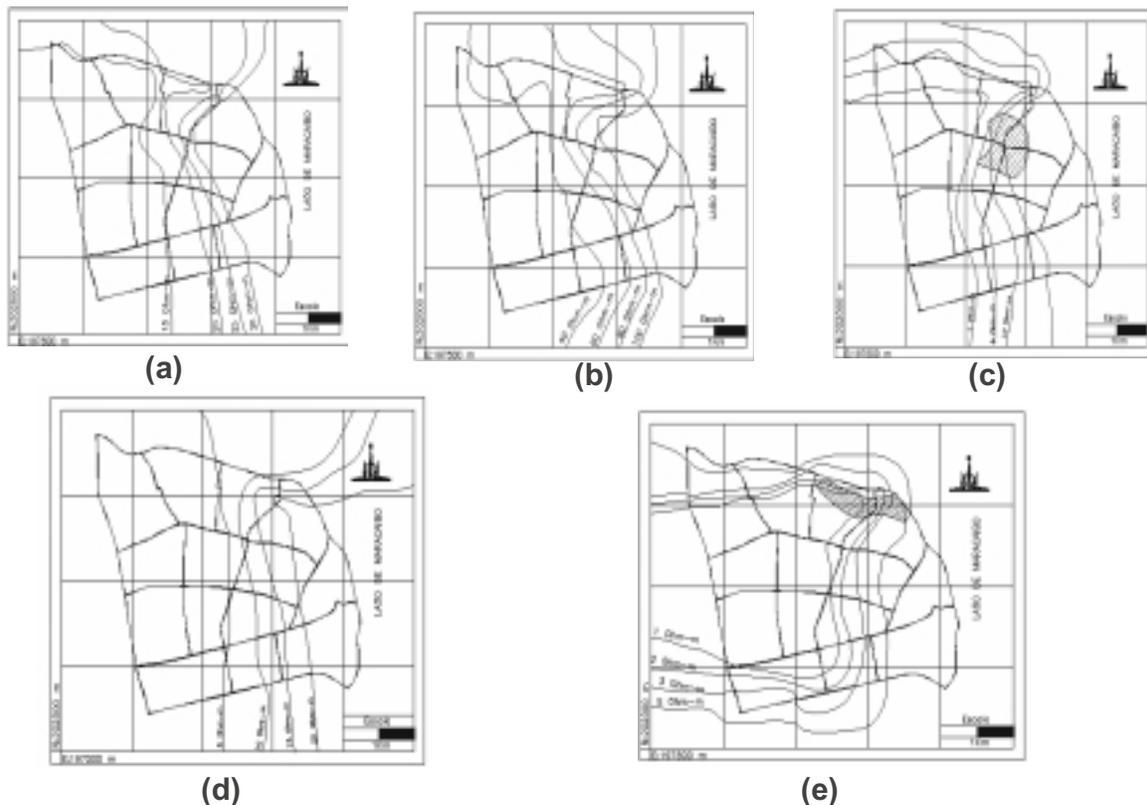


Figura 10. Mapas de Isorresistividades de las siguientes capas: (a) capa1, (b) capa2, (c) capa3, (d) capa4, (e) capa 5.

exactitud, con la cual, se estimarán los parámetros de resistividad y profundidad, que constituyen un sistema linealmente dependiente, mediante la combinación del modelo lineal de Ghosh con el modelo de la Regresión Anidada. En esta investigación se aplicó la Regresión Anidada para un modelo de seis capas, obteniendo estimadores estadísticos entre  $-2.14.10^{-16}$  y  $-1.33.10^{-16}$  para el error medio, lo que indica una muestra plenamente controlada y con mínimo de ruido igual a 3%, así como también, el error medio porcentual, el cual, se refiere a los valores absolutos de los residuales en función de las estimaciones y es igual a  $-81.84\%$  y  $-80.47\%$ , indicando que el valor de las estimaciones son pequeñas, generando un gran valor de varianza residual indicando una buena posición para el modelo hipotético de datos. Adicionalmente, se pudo definir un modelo de regresión para establecer los nuevos valores de resis-

tividad, caracterizando con ello, las unidades geoelectricas, en función de su profundidad, composición de los materiales del subsuelo y su representación en mapas de isoresistividades para la parroquia Olegario Villalobos. La interpretación de estas unidades geoelectricas permitió indicar la presencia de acuíferos de agua dulce en la zona del Colegio La Merced, a una profundidad tope de 30 m y base de 80 m aproximadamente con un caudal de 2 L/seg. A profundidades mayores se interpreta la presencia de acuíferos de agua salada.

### Referencias Bibliográficas

1. Balzan L y Vielma D., 1991, Estudios de Sondeos Eléctricos Verticales Paramétricos para la definición de Acuíferos en la zona de Mara. Trabajo Especial de Grado, Universidad del Zulia. Maracaibo, páginas: 35-40.

2. Guillermo B. M, 1991, Sistema Computarizado para la Interpretación Selectiva de curvas de Sondeo Eléctrico Vertical en la configuración tipo Schlumberger: Trabajo de Ascenso, Universidad del Zulia. Maracaibo, páginas: 70-76.
3. Gutiérrez M.A., 1982, Estudios Comparativos del Método Eléctrico prospectivo con los Métodos Tradicionales en los estudios de suelos para obras civiles: Trabajo Especial de Grado, Universidad del Zulia. Maracaibo, páginas: 98-102.
4. Hoerl. AE. and Kennard, R.W, 1970, Ridge Regression: biased estimation for nonorthogonal problems, v. 12, páginas: 55-67.
5. Joseph R.I., 1975 Resistivity Inversion with Ridge Regression, Society of Exploration Geophysicists, páginas: 798-817. Vol. 40, Nº 5.

Recibido el 7 de Octubre de 2002

En forma revisada el 20 de Octubre de 2003