# Modelación Numérica de la Resistividad Eléctrica del Subsuelo

## Resumen

Uno de los problemas importantes en la Ingeniería Civil y otras disciplinas (Física, geofísica, geotecnia, Ingeniería ambiental, minería, arqueología, etc), es conocer una ó varias características y propiedades del subsuelo. El método usual directo tradicional para conocer estas características es la exploración del subsuelo a través de perforación de sondeos. Este método tradicional no siempre es viable por razones económicas y técnicas, lo que hace atractivo y necesario el uso de otras metodologías como la exploración geofísica. La Universidad de los Andes fué posiblemente la primera en ofrecer cursos en métodos geofísicos aplicados a la Ingeniería Civil (1), y hoy en día existen varias perspectivas en el desarrollo, investigación y aplicación de estos métodos. En este artículo se presenta una breve descripción del método geofísico de resistividad eléctrica del subsuelo (ó geoelectricidad), y los avances que el Departamento de Ingeniería Civil ha realizado especialmente en el área de modelación numérica. Esta investigación fue realizada con el apoyo del Institute of Applied Geoscience TNO de Holanda.

## Introducción

La resistividad (eléctrica) es una propiedad por la cual los cuerpos (rocas, por ejemplo), se oponen al avance de la corriente eléctrica; fenómeno cuyos principios se basan en la ley de Ohm (2).

La mayoría de las rocas (ó suelos) son conductores de electricidad, y su resistividad depende principalmente del tipo de roca, del contenido de agua intersticial, de la temperatura, de los sólidos disueltos (tipo concentración de iones), de la forma, tamaño y distribución de los granos, del grado de fraccionamiento y cementación.

En la práctica el método de resistividad ó geoelectricidad consiste en energizar una porción del subsuelo a través de un circuito de corriente como el que se presenta en la figura 1, y analizar el comportamiento ó respuesta bajo esta energización. Se puede observar que se induce una corriente I a través de dos electrodos de corriente A y B, midiendo la diferencia de potencial ó voltaje V registrado por medio de dos electrodos de potencia M y N. A mayor separación de los electrodos de corriente se energiza una porción de terreno mas grande, obteniendo por consiguiente una respuesta del subsuelo a mayor profundidad. Este procedimiento se conoce con el nombre de sondeo geoeléctrico.

## Métodos Tradicionales de Análisis

Teniendo en cuenta lo descrito anteriormente, el método de resistividad eléctrica busca detectar las discontinuidades, anomalías ó cambios verticales y laterales en las propiedades eléctricas del subsuelo, mediante mediciones realizadas en la superficie del terreno. Por lo tanto, la respuesta medida en la superficie tiene la información generada a nivel agregado de las discontinuidades tanto laterales como en profundidad. El parámetro medido en la superficie es la resistividad "aparente".

Para poder desagregar la respuesta obtenida se ha utilizado tradicionalmente la teoría analítica de filtros lineales, cuyo resultado lleva a la solución ó interpretación analítica de sondeos geoeléctricos, obteniendo la resistividad "real" del subsuelo.

**CARLOS E. MOLANO CAJIGAS**
Ingeniero Civil, Uniandes.MSc. IHEE, Holanda. Profesor de Ingeniería Civil, Uniandes. Area de especialización; Aguas Subterráneas.

La gran desventaja de los métodos analíticos tradicionales de interpretación es el hecho de que se aplican en terrenos con condiciones geológicas y geomorfológicas relativamente sencillas, y con configuraciones simétricas de electrodos unipotenciales (Figura 1). La interpretación tradicional del sondeo geoeléctrico supone que la distribución de corriente es simétrica en todas las direcciones del espacio a partir del punto de inducción, lo que supone que la topografía sea plana y las capas estratificadas horizontalmente sin discontinuidades laterales; si alguna de estas condiciones no se cumple, la interpretación analítica puede ser prácticamente imposible (3). Con esto no se debe pensar que los métodos tradicionales no se deben usar, ya que por otra parte la gran ventaja de estos procedimientos analíticos es el hecho que son simples de utilizar siempre que se puedan aplicar en áreas en donde se cumplan

las posiciones descritas.

## Modelación Numérica

Dado que la distribución del potencial (o voltaje) eléctrico en el subsuelo la rige ecuaciones diferenciales del tipo La Place, se pueden emplear técnicas numéricas (de elementos-finitos ó diferencias-finitas, por ejemplo) modelando terrenos con cualquier morfología y con distribuciones complejas de la resistividad el subsuelo, obteniendo la respuesta en la superficie con cualquier distribución de electrodos de corriente potencial.

Recientemente se han desarrollado instrumentos geoeléctricos multicanales con cables multielectródicos que permiten ejecutar sondeos continuos, obteniendo los resultados representados en curvas de resistividad aparente para cualquier arreglo de electrodos (4).

La Universidad de los Andes comenzó a incursionar en la simulación de sondeos geoeléctricos aplicando inicialmente técnicas de diferencias finitas, y recientemente técnicas de elementos finitos considerando redes triangulares en dos dimensiones. Aunque un subsuelo heterogéneo tiene propiedades eléctricas en las tres dimensiones del espacio, y además un electrodo puntual genera un campo tridimensional, se estan utilizando modelos bidimensionales ya que los sondeos eléctricos continuos y normales casi siempre se ejecutan a lo largo de un perfil, obteniendo datos en dos dimensiones; es decir, el método exige que los arreglos de electrodos sean colineales y preferiblemente orientados perpendicularmente al rumbo de las estructuras del subsuelo.

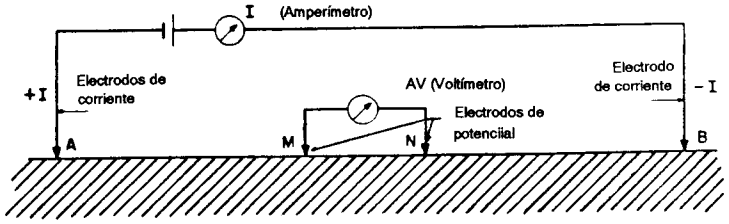



Fig.1.:Principio del método de Resistividad Eléctrica.

## Solución Matricial

Para obtener una precisión adecuada en los resultados debe usarse una red bien densa de elementos finitos, obteniendo por consiguiente un sistema matricial muy grande. Recientemente se comenzó a resolver estos sistemas matriciales almacenándolos en forma vectorial compacta, aplicando técnicas tanto tradicionales (Descomposición de Cholesky, por ejemplo), como de gradientes conjugados con sistemas de precondicionamiento matricial, logrando obtener excelentes resultados en computadores personales.

## Soluciones Numéricas y Analíticas

Para comparar las soluciones obtenidas mediante el método de elementos finitos con las correspondientes soluciones analíticas unidimensionales, se simularon varios casos teóricos mediante modelos de varias capas estratificadas horizontalmente. Los resultados mostraron que la solución numérica estaba dentro de un 5% de error con relación a las soluciones analíticas.

## Caso Real de Estudio

El método aquí descrito se aplicó en un area en el sur de Holanda, en donde se ejecutó una línea de sondeos geoeléctricos tripotenciales continuos (4). La sección transversal estudiada se presenta en la figura 2, en donde se indican los valores de resistividad del subsuelo obtenidos mediante soluciones analíticas. Puede observarse que se

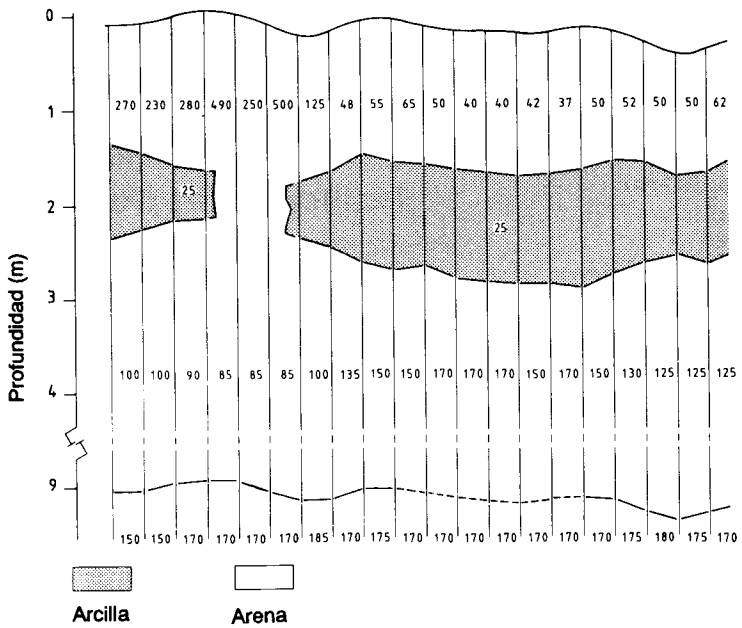



Fig.2.:Sección estudiada, resistividades en Ohm-m.

presentan heterogeneidades en las propiedades eléctricas del subsuelo.

Parte de la red de elementos finitos que se utilizó para modelar la sección de suelo se muestra en la figura 3, la cual está compuesta por 4229 elementos triangulares y 2286 nodos (5) Para presentar los sondeos continuos se simularon 330 configuraciones de electrodos.

En la Figura 4 están los datos observados en campo y obtenidos numéricamente; en el eje vertical se indica la separación media de electrodos de corriente (AB/2) y en el eje horizontal las coordenadas del terreno. Las líneas de isovalores corresponden a las resistividades aparentes medidas y simuladas. Se puede ver que los resultados arrojados por el modelo se aproximan con bastante precisión a los resultados observados.

## Conclusiones E Investigaciones Futuras

La simulación numérica de sondeos geoeléctricos por elementos finitos descrito en este artículo muestra la versatilidad que este proceso tiene para modelar distribuciones de resistividad complejas en cualquier tipo de subsuelo.

Esta metodología tiene un campo de aplicación muy amplio, ya que es una herramienta de gran utilidad para tener una solución más acorde con la realidad en problemas relacionados con la respuesta de sondeos geoeléctricos ejecutados en medios eléctricamente no homogéneos y anisotrópicos con topografía irregular y condiciones geológicas complejas; condiciones muy frecuentes en el medio colombiano, en las cuales las técnicas numéricas pueden ser el único medio de análisis.

Aún el uso de la geoelectricidad continua con varias configuraciones de electrodos (tripotencia,por ejemplo), con su correspondiente modelación numérica ha sido muy poco utilizada en nuestro medio; sin embargo, los resultados que aqui se presentan y los obtenidos en otros estudios de exploración geofísica muestran el amplio campo de acción que puede tener esta técnica. En exploración de aguas subterráneas ofrece muchas posibilidades; en minería por ejemplo en la exploración de canteras para agregados, en localización de cauces enterrados para minería de oro; en geotécnia también ofrece muchas posibilidades, en ingeniería ambiental para localizar y monitorear el flujo de contaminantes; en arqueología y en otras disciplinas y situaciones en donde esta metodología puede tener aplicación.

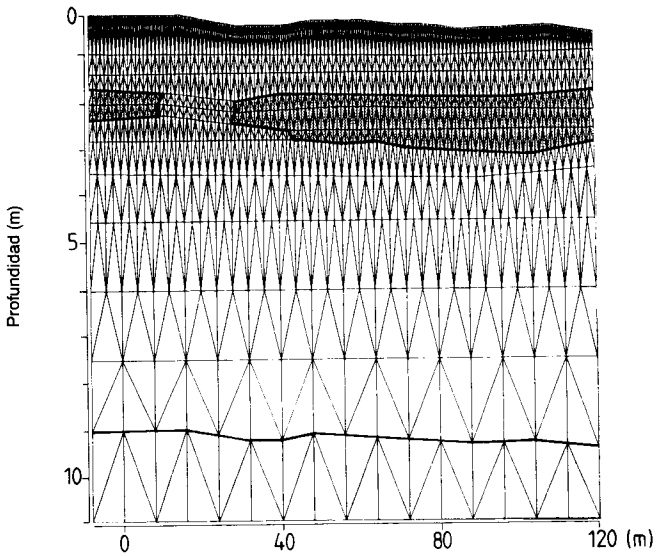


Fig.3.: Red de Elementos Finitos para la sección dada en fig.2.

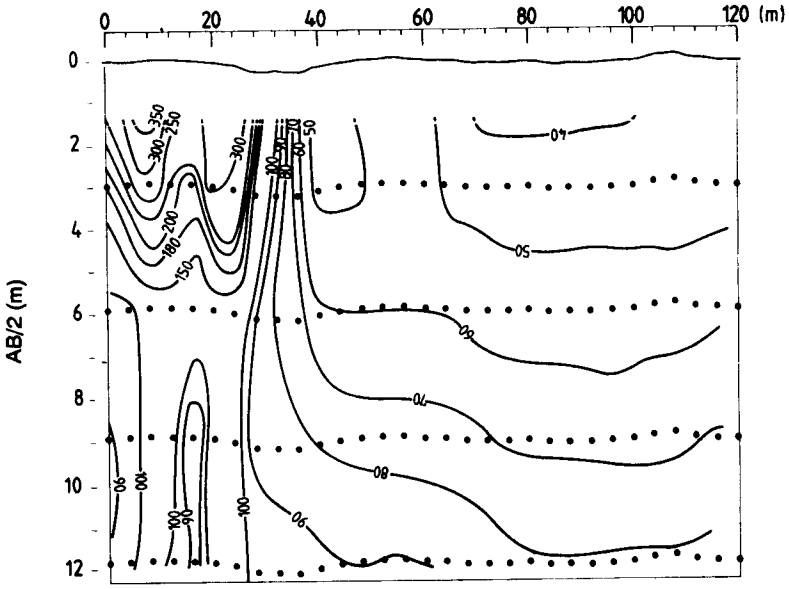
En la Universidad existen varias versiones de computador (para el VAX y computadores personales), pero solo una preliminar amigable a nivel de usuario, es decir, para poder ser utilizada por geólogos, geofísicos, ingenieros, etc. Actualmente se está planeando hacer una o más versiones amigables que incluyan varias opciones de entrada de datos con diferentes configuraciones de electrodos.

Se ha planteado continuar con las investigaciones en la resolución matricial, analizando la sensibilidad en la respuesta, tiempos de proceso y uso de memoria, utilizando varios sistemas de cálculo.

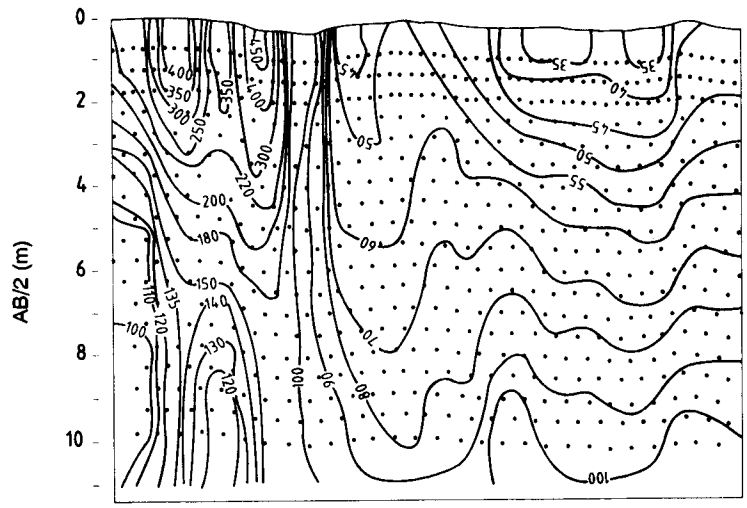
Por otra parte, se esta investigando más a fondo los problemas de conversión de tres a dos dimensiones en la simulación numérica de resistividad electrica, mediante transformaciones matriciales y transformaciones del coseno de Fourier.

El uso de técnicas de optimización como la programación lineal para obtención de resultados es muy promisorio en la modelación numérica de la resistividad del subsuelo, ya que una exitación en el sistema se obtiene simplemente mediante la aplicación de corriente eléctrica, llegando a tener cualquier cantidad de respuestas del terreno bajo diferentes cargas eléctricas, teniendo por consiguiente un buen número de ecuaciones de estado y de restricción.

En el país hay varios equipos de geoelectricidad puntual tanto por parte de la empresa privada como en entidades de gobierno




(a) Datos observados




(b) Datos simulados

**Fig.4.:Datos observados (a) y resultados numéricos (b).Valores en Ohm-m.**

y universidades. Respecto a los equipos de sondeos geoeléctricos continuos los pocos que se producen en el exterior son muy costosos y aún en el país no hay ninguno a nivel operacional, solo existe uno manual en una firma consultora.

En la Facultad de Ingeniería también se ha planteado la posibilidad de hacer investigaciones en esta dirección, ya que se podrían construir prototipos con alto nivel tecnológico y con costos relativamente bajos.

## Equipo de Trabajo

El personal que ha participado dentro de esta investigación está compuesto por profesores y estudiantes del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de los Andes, y por investigadores del Institute of Applied Geosciencie TNO de Holanda.

Del Departamento de Ingeniería Civil participaron los profesores Carlos Molano y Orlando Soto, y el estudiante de posgrado Manuel Salamanca. También se han desarrollado varios proyectos y tesis de grado relacionados con el tema, y recientemente se incluyó en el texto y programa del curso de Métodos Geofísicos la metodología aquí descrita(2). Por parte del Institute of Applied Geoscience TNO se ha tenido como codirector del proyecto al geofísico R.A. Van Ovemeeren con la colaboración de varios investigadores y expertos holandeses.

### Referencias


(1) *SARRIA M.ALBERTO. 1991.Ingeniería Colombiana e Ingeniería Uniandina.Revista de Ingeniería Uniandina,V.1, p. 35-41.*

(2) *SARRIA M, ALBERTO. 1991 . Introducción a los Métodos Geofísicos en la Ingeniería Civil. 2a Ed. Departamento de Ingeniería Civil, Uniandes.*

(3) *KEAREY, P. y M. BROOKS, 1987 . An Introduction to Geophysical Exploration. Blackwell Scient. Publ. Oxford.*

(4) *VAN OVERMEEREN,R.A. Y RITSEMA, I.L. 1988. Continuous vertical electrial sounding. First Break 6 (10),313-324.*

(5) *MOLANO ,C. E., SALAMANCA, M. y R. A. VAN OVERMEEREN, 1990. Numerical Modelling Of Standard and Continuous Vertical Electrical Soundings, Geophysical Prospecting 38, pp 705-718.*