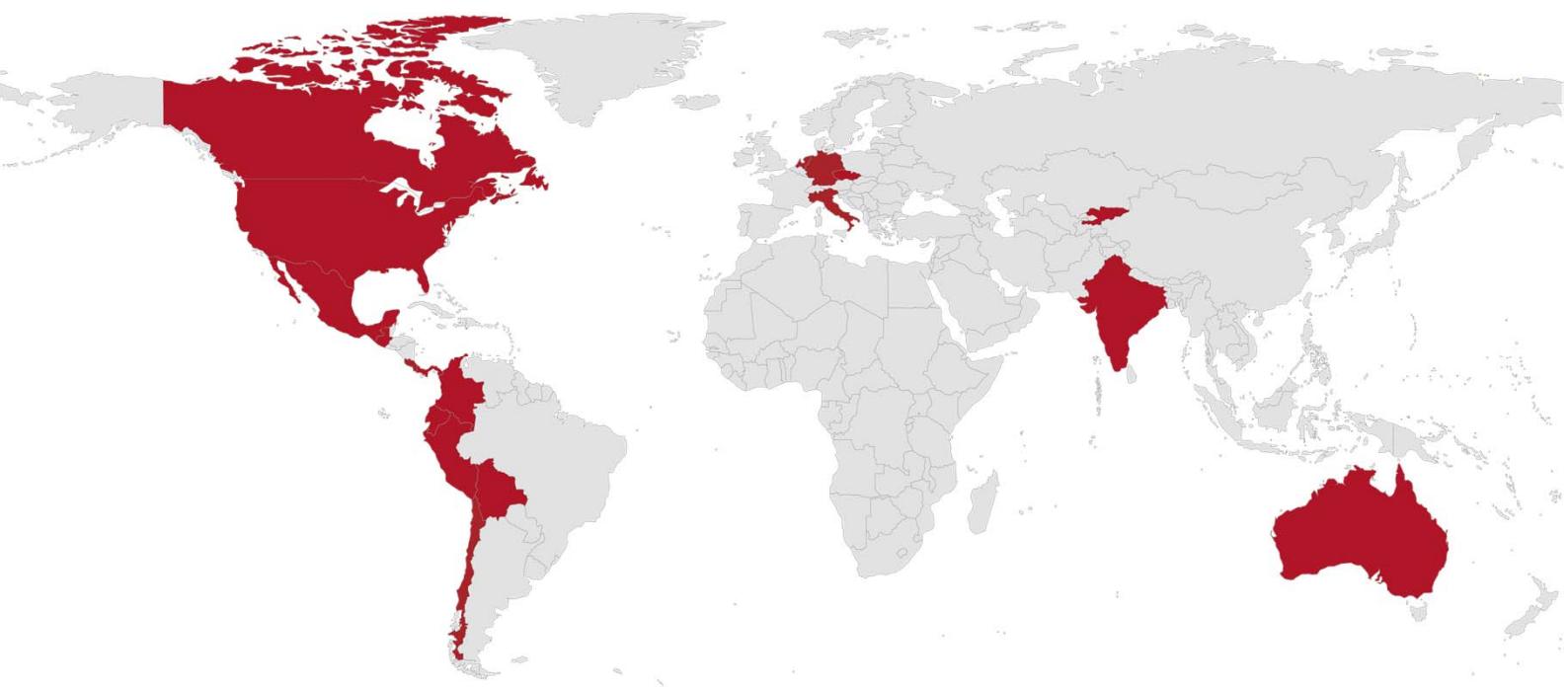




**GEOTEM**  
Ingeniería S.A. de C.V.



## CONSULTORES EN EXPLORACIÓN DEL SUBSUELO



AMBIENTAL



PETRÓLEO



GEOTERMIA



GEOHIDROLOGÍA



MINERÍA



GEOTECNIA



ARQUEOLOGÍA





## Contenido

### GEOTEM Ingeniería SA de CV

#### Mensaje del Director

#### Métodos Electromagnéticos

Método Magnetotelúrico (MT)	1
Método Radio – Magnetotelúrico (RMT)	3
Método Audio - Magnetotelúrico de Fuente Controlada (CSAMT)	5
Transitorio Electromagnético en el Dominio del Tiempo (TEM)	7
Georadar de Penetración Terrestre (GPR)	9
Perfilaje Electromagnético	11

#### Métodos Sísmicos

Sísmica en Pozo (Cross-Hole, Down-Hole, Up-Hole)	13
Reflexión Sísmica	15
Refracción Sísmica	17
Ánalysis de Ondas Superficiales Multicanal (MASW)	19
Autocorrelación Espacial (SPAC)	21

#### Métodos Potenciales

Prospección Gravimétrica (GRV)	23
Prospección Magnetométrica (MAG)	25

#### Métodos Eléctricos

Sondeo Eléctrico Vertical (SEV)	27
Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE)	29
Polarización Inducida (IP)	31
Polarización Inducida Espectral (SIP)	33

#### Registro Geofísico de Pozos

35

#### Espectrometría de Rayos Gamma (GR)

37

#### Sistema de Posicionamiento Global (GPS)

39



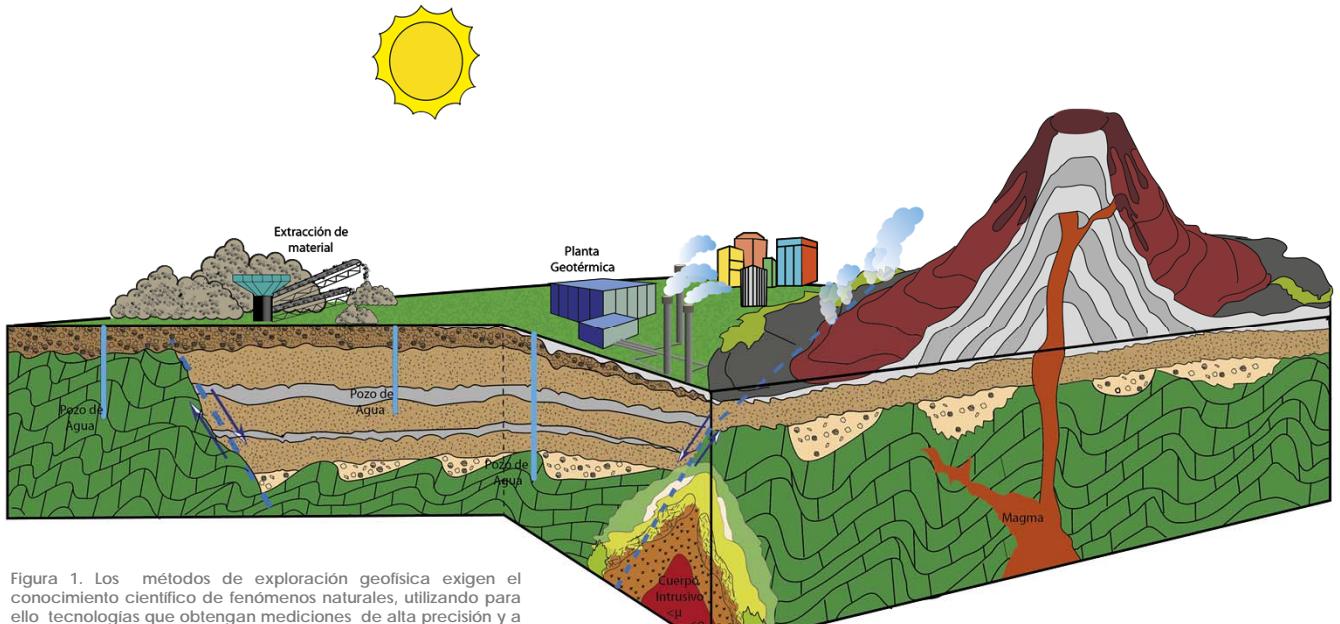


Figura 1. Los métodos de exploración geofísica exigen el conocimiento científico de fenómenos naturales, utilizando para ello tecnologías que obtengan mediciones de alta precisión y a su vez cumplan con las soluciones teóricas de las complejas ecuaciones físico-matemáticas, con la finalidad de localizar estructuras geológicas favorables para depósitos de valor comercial.

**GEOTEM Ingeniería S.A. de C.V.** es una empresa mexicana con más de 20 años de experiencia en la exploración del subsuelo mediante métodos geofísicos. A través de su historia ha sido innovadora, brindando servicios especializados de alta calidad y de última generación en áreas multidisciplinarias, entre las que destacan: el mapeo de aguas subterráneas, exploración minera, medio ambiente y sustentabilidad, evaluación de riesgos geológicos, exploración petrolera, geotermia y arqueología.

### Visión

Ser reconocida como una empresa líder en exploración geofísica, con altos estándares de calidad e innovación constante, para generar resultados que contribuyen con el progreso y mejora de la calidad de vida.

### Misión

Ofrecer servicios de exploración confiables y representativos del subsuelo mediante la excelencia operativa, capacitación constante y vanguardia tecnológica, permitiendo satisfacer eficazmente las necesidades de nuestros clientes.





Geotem Ingeniería, es una empresa mexicana dedicada a la exploración del subsuelo donde sus servicios de carácter geofísico están dirigidos principalmente a estudios de exploración Geohidrológica, Minera, Geotécnica, Geotérmica, Ambiental, Arqueológica y Petrolera.

A lo largo de estos últimos 20 años el grupo técnico que integra GEOTEM, ha participado activamente tanto en nuestro país y en el extranjero, aplicando tecnologías de vanguardia en la búsqueda de reservorios naturales, como agua, petróleo y minerales, con la finalidad de satisfacer las necesidades de la población y la industria.

A través de nuestra historia como empresa hemos participado, en la evaluación de sitios para hacer realidad proyectos como PRESAS, CARRETERAS, DESARROLLOS PETROQUÍMICOS, CARACTERIZACIONES AMBIENTALES, PLANTAS DE REBOMBEO, MINAS, PLANTAS GENERADORAS DE ENERGIA, entre muchos otros proyectos para el sector público y privado, apoyando con ello en el desarrollo económico del país.

Para la prestación de servicios con el alto nivel tecnológico que caracteriza a GEOTEM, hemos desarrollado alianzas estratégicas con proveedores de equipo en el extranjero y asesores que permiten complementar y fortalecer nuestros equipos de trabajo.

Nos ocupamos para qué la gente que integra GEOTEM, constantemente reciba capacitación en el manejo de las tecnologías de campo y proceso, de tal manera que con su desarrollo profesional tenga la oportunidad de logros y satisfacciones personales, y con ello demostrar que no es necesario ser una empresa grande para ser una gran empresa.

Así, nuestros clientes reciben en cada uno de los trabajos que nos encomiendan, un producto hecho con altos estándares de calidad, que nos permiten mantener una relación duradera, donde ambas partes salgan beneficiadas.

Nuestros servicios profesionales son primordialmente de contacto directo con la naturaleza, por ello buscamos mantener un compromiso socialmente responsable y amigable con el medio ambiente.

Queremos invitarlos a conocer nuestras capacidades de servicios a través de por lo menos unas 100 técnicas geofísicas que podemos ofrecer, y también agradecer a todos nuestros clientes con quienes mantenemos una sociedad de negocio, su confianza y lealtad, a lo largo de estos años que nos han permitido ser una empresa de innovación y creatividad para alcanzar este éxito compartido.

Ing. Carlos Pita  
Director General





# Método Magnetotelúrico

## Exploración Profunda de Resistividades

### Introducción

El principio del método MT es registrar simultáneamente las variaciones de los campos eléctrico y magnético naturales de la tierra. Estos dos campos ortogonales se relacionan linealmente mediante una cantidad denominada impedancia electromagnética, la cual permite calcular la propiedad física conocida como resistividad asociada a los diferentes materiales del subsuelo.

La profundidad de investigación está relacionada con por la duración temporal de registro de la señal, esto permite calcular impedancias para frecuencias de hasta 0.0001 Hz, alcanzando profundidades de decenas de kilómetros

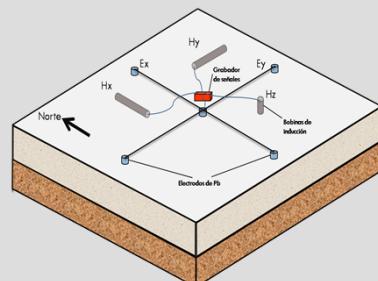


Figura 1. Arreglo esquemático de un sitio de adquisición MT. Se muestran dos dípolos: Ex orientado norte-sur y Ey orientado este-oeste, además de tres bobinas de inducción (Hx, Hy y Hz) orientados en dirección de las tres componentes del campo magnético terrestre.

### Sistema ADU-07e

Empleamos el sistema de registro de banda ancha ADU-07e fabricado por Metronix Geophysics. [www.geo-metronix.de](http://www.geo-metronix.de)

### Electrodos Impolarizables

Electrodos de Sulfato de plomo, de buena estabilidad.

Electrodos de cloruro de plata, de excelente estabilidad para frecuencias menores a 0.01Hz



### Ventajas

- ✓ Profundidad de investigación desde metros hasta decenas de kilómetros.
- ✓ Posibilidades de inversión de datos 1D, 2D y 3D.
- ✓ Se obtienen valores de resistividad y profundidades absolutas.
- ✓ Entrega valiosa información estructural y de dimensionalidad del medio, muy útil en estructuras complejas.
- ✓ Complementa modelos geológicos, sísmicos y potenciales.
- ✓ Requiere de espacios no mayores a 50 m<sup>2</sup> para su implementación.
- ✓ Buena resolución vertical basada en una estadística confiable.

### Aplicaciones

- ✓ Caracterización de acuíferos profundos.
- ✓ Búsqueda de reservorios geotérmicos.
- ✓ Prospección de recursos minerales.
- ✓ Mapeo de estructuras en medios complejos.
- ✓ Exploración de hidrocarburos.

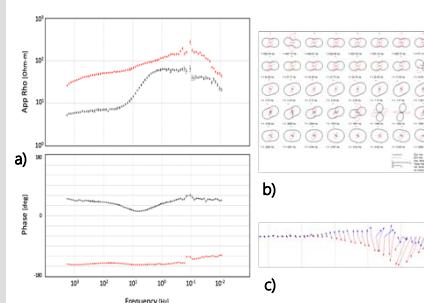


Figura 2. a) Curvas de Amplitud y Fase representativas del medio geoelectromagnético. b) Diagramas polares para el análisis de dimensionalidad y direccionalidad. c) Tipper apunta hacia el máximo gradiente de flujo electromagnético.

Las variaciones de los campos magnéticos y eléctricos se miden con ayuda de magnetómetros de inducción de amplio espectro y dípolos aterrizados, los cuales registran las componentes ortogonales de dichos campos y envían la información a un digitalizador de señales, donde se convierten los pulsos analógicos a señales digitales y se almacenan para su posterior proceso e interpretación

El método magnetotelúrico tiene algunas variantes en función del rango de frecuencias adquiridas y el tipo de fuente: MT, AMT, RMT CSAMT.

### Sensor MFS-06e

Bobina de inducción, rango de frecuencia 0.00025 Hz a 10 kHz. Bandas de frecuencia 0.00025 Hz a 500 Hz (chopper encendido) y 10Hz a 10 kHz (chopper apagado)

### Sensor MFS-07e

Bobina de inducción, rango de frecuencia 0.001 Hz a 50 kHz. Bandas de frecuencia 0.001 Hz a 500 Hz (chopper encendido) y 10Hz a 50 kHz (chopper apagado)

### Caso I: Geotermia

Con el fin de identificar estructuras de gran magnitud y horizontes conductores asociados a fuentes geotérmicas, se llevó a cabo un estudio de exploración geofísica mediante el método Magnetotelúrico (MT) en una zona geotérmica del país. Este estudio consistió en la realización de 80 sondeos MT espaciados aproximadamente a 2Km. Los resultados muestran estructuras de gran magnitud con una dirección preferencial NW-SE asociada a zonas de debilidad y/o fracturamiento secundario.

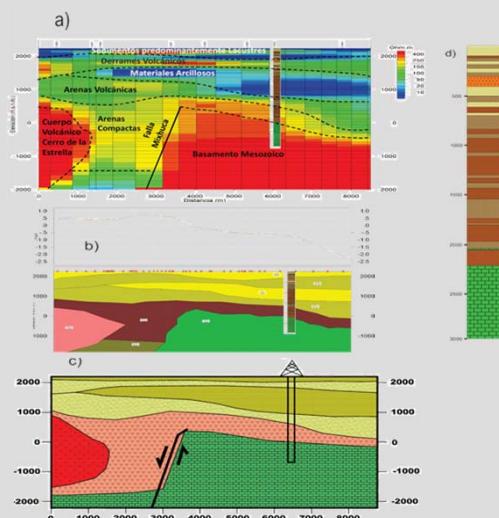


Figura 5. a) Resultados de la inversión 2D de resistividad con datos de 8 sondeos MT. b) Perfil gravimétrico de Bouguer modelado a partir de la distribución de resistividades obtenido en la inversión 2D de datos MT. c) Sección Geológica modificada de Pérez-Cruz (1986). d) Corte litológico simplificado del pozo Iuliyehualco-1, perforado con la ayuda de PEMEX con profundidad de 3000 m.

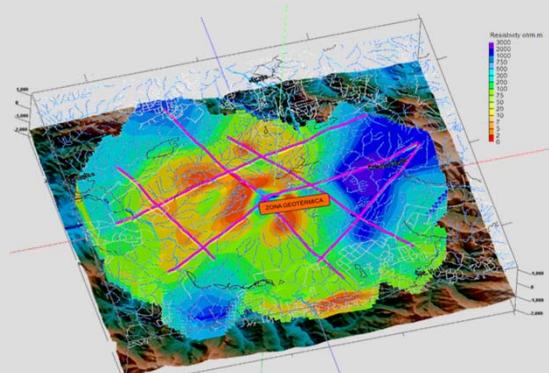


Figura 4. Modelo geeléctrico en 3D del cuerpo volcánico y su asociación con zonas con mayor debilidad y fracturamiento secundario.

### Caso II: Mapeo de Estructuras

Se realizó un proyecto de exploración geofísica en la Ciudad de México, con el fin de caracterizar la presencia del basamento calcáreo que la subyace. Con la exploración conjunta MT y Gravimetría se delimitó la cima de una unidad resistiva asociada a un cuerpo de alta densidad, cuyos resultados se correlacionan con la presencia de una una falla de gran magnitud, descrita en el año 1986 (Perez Cruz).

### Referencias

- RANDALL MACKIE & RODI, Nonlinear Conjugate Gradients Algorithm for 2D MT inversion, Geophysics 66, 2001.
- CONSTABLE S.C., Parker R.L., Constable C.G., "Occam's Inversion: A practical algorithm for generating smooth models from electromagnetic sounding data", Geophysics, v52, n3, marzo 1987.
- JI MATZANDER, M. WILDE: METRONIX ADU-07e, Operator's Manual, Metronix Measurement Instruments and Electronics Ltd., 1998.
- THOMPSON, D. T., EUDPH: A new technique for making computer-assisted depth estimators from magnetic data, Geophysics, Vol. 47, No.1 (1982).
- VOZOFF, KEEVA, The Magnetotelluric Method in the Exploration of Sedimentary Basins. Geophysics, vol. 37, No. 1, February 1972, p. 98-141.

## Método Magnetotelúrico

### Exploración Profunda de Resistividades



Figura 6. Adquisición de datos magnetotelúricos en zona desértica, al norte del país.



Figura 7. Adquisición de datos magnetotelúricos en zona desértica, estado de coahuila.



Figura 8. Adquisición de datos magnetotelúricos dentro de complejo volcánico.



Figura 9. Adquisición de datos magnetotelúricos, con fines de exploración geotérmica.



Figura 10. Adquisición de datos magnetotelúricos con fines de exploración hidrogeológica.



Figura 11. Adquisición de datos magnetotelúricos en la faja neovolcánica.



# Método Radio-Magnetotelúrico

## Exploración Detallada de Estructuras y Cuerpos Someros

### Introducción

El método Radio-Magnetotelúrico (RMT) es una variante del método Magnetotelúrico para la exploración superficial, mide las componentes del campo eléctrico ( $E_x$  y  $E_y$ ) así como las tres componentes del campo magnético ( $H_x$ ,  $H_y$ ,  $H_z$ ) con el fin de describir la estructura resistiva de la Tierra.

El RMT utiliza bandas de alta frecuencia, de este modo posee un rango de frecuencias más amplio que le permite tener mejor resolución en partes inferiores y superiores del subsuelo de alrededor de 300m de profundidad.

### Grabador ADU-07e

Empleamos el grabador de datos geofísicos de banda ancha ADU-07e fabricado por Metronix geophysics (descripción a detalle en [www.geo-metronix.de](http://www.geo-metronix.de)).



Figura 3. Sistema ADU-07e Metronix

- Grabador de Datos Metronix ADU-07e**
- Frecuencia de Muestreo 524.000 – 100 Hz
  - Conversión A/D 24 Bit
  - Sincronización Reloj GPS ±30 ns
  - Sensibilidad 0.05 V/nT
  - Sensor Ruido  $5 \times 10^{-5}$  nT/√Hz @ 1 kHz
  - Rango de Temperatura -40°C +70°C



Figura 4. Grabador ADU-07e Metronix



Figura 5. Sensor SHFT-02

### Sensor SHFT-02

Bobina de inducción triple de super alta frecuencia (1-300kHz), muestra características de ruido extra-ordinariamente bajas. Solo este sensor mide variaciones de campo magnético en 3 ejes ortogonales.

### Sensor SHFT-02

- Rango de Frecuencia 1 – 300 kHz
- Banda de Frecuencia 1 – 300kHz (Chopper Off)
- Voltaje de Salida +/- 10V
- Función: Bobina de Inducción con amplificador de corriente
- Temperatura de Operación: -25°C + 60°C



Figura 6. Sensor SHFT-02

### Ventajas

- ✓ Adquisición rápida.
- ✓ Uso de frecuencias de mas de 1kHz.
- ✓ Gran cantidad de estadística.
- ✓ Resolución en las primeras decenas de metros.

### Caso I: Exploración Minera

Se realizo un estudio Radio Magnetotelúrico para caracterizar estructuras esbeltas como betas. Con los resultados obtenidos se formaron perfiles geoelectricos y mapas de resistividad a diferentes profundidades. Los mapas de resistividad indican la presencia de materiales resisitivos marcados como zonas anómalas asociadas a betas de cuarzo, la mayor parte de estas estructuras con interés geológico-minero están situados en los bordes de las zonas de alta resistividad. La figura 7 muestra un mapa de resistividad a una profundidad de 15m en el se identifican 4 zonas anómalas con posible interés minero.

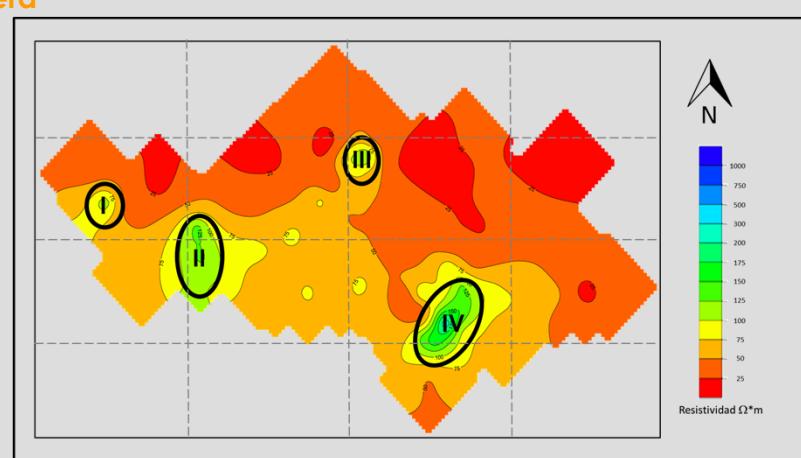


Figura 7. Mapa de Resistividad (profundidad de 15m)

### Aplicaciones

- ✓ Ambiental.
- ✓ Geohidrología.
- ✓ Exploración Minera.
- ✓ Geotecnia

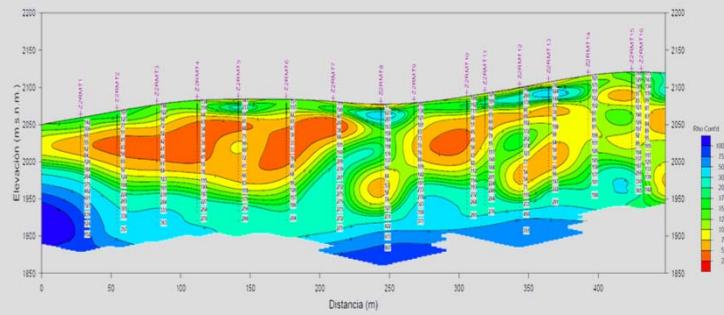


Figura 8. Perfil Geoelectrónico

### Referencias

- Randall Mackie & Rodi, Nonlinear Conjugate Gradients Algorithm for 2D MT inversion, *Geophysics* 66, 2001.
- Constable S.C., Parker R.L., Constable C.G., "Occam's Inversion: A practical algorithm for generating smooth models from electromagnetic sounding data", *Geophysics*, v 52, n3, marzo 1987.
- Winglink, User's Manual, Edition 4, © Gosestem srl, Milan, Italia, 1994.
- U. Molzander; M. Wilde; METRONIX ADU-07e, Operator's Manual, Metronix Measurement Instruments and Electronics Ltd.
- Thompson, D.T., Eulph: A new technique for making computer-assisted depth estimators from magnetic data, *Geophysics*, Vol. 47, No.1 (1982).

# Método Radio-Magnetotelúrico

Exploración Detallada de Estructuras y Cuerpos Someros



Figura 7. Bobina Triaxial SHFT-02



Figura 8. Adquisición Geofísica RMT



Figura 9. Equipo RMT



Figura 10. Implementación en campo equipo RMT



Figura 11. Electrodo Metálico con Amplificador



Figura 12. Bobina SHFT-02 (Triaxial Hx, Hy, Hz)



# Método Audio-Magnetotelúrico de Fuente Controlada (CSAMT)

## Inyección de Corriente Multidipolar

### Introducción

El método CSAMT en su modalidad de inyección de corriente multi-dipolar, es una variante que permite trabajar dentro de los alcances del AMT y MT.

La resolución de este método permite obtener mayor certidumbre en las frecuencias de Audio y con ello definir contrastes resitivos que integran el subsuelo, esto le permite desenvolverse dentro áreas multidisciplinarias, tales como: minería, petróleo, geotermia y geohidrología, entre las más importantes.

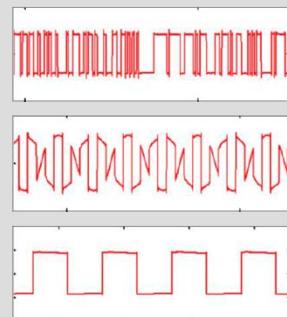


Figura 1. Pulso de señal transmitido por el sistema TXM-22.

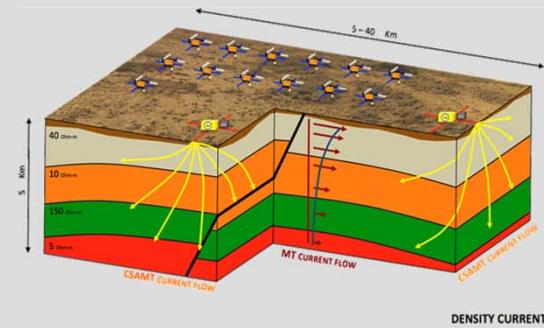


Figura 2. Comparativa del flujo de corriente del método magnetotelúrico de fuente natural (MT) y fuente controlada (CSAMT).

La exploración del subsuelo mediante el método CSAMT en su modalidad de inyección de corriente multidipolar permite una profundidad de investigación desde los primeros metros y hasta los 5 Kilómetros, mediante un poderoso motogenerador de 50kVA; éste potente sistema de transmisión genera un campo electromagnético de mayor intensidad en un amplio rango de frecuencias, reduciendo los tiempos de grabación y minimizando incertidumbre en la banda muerta del método magnetotelúrico de fuente natural.

### Motogenerador de 50KVA

Este motogenerador de 50KVA es capaz de liberar 440V en 3 fases, cumpliendo con las especificaciones del sistema TXM-22 y TXB-07 optimizando y maximizando su potencia.

### Caja de Control TXB-07

Este sistema controlador de corrientes de transmisión permite crear diferentes formas de pulsos de salida debido a su modulación de ancho de pulso (PWM). Cuenta con sincronización GPS y conexión W-LAN o LAN

### Transmisor TXM-22

Su diseño en aluminio y un peso de 35 Kg hace de este sistema un potente y versátil transmisor de energía, capaz de generar un campo electromagnético de +/- 40A en un rango de frecuencia de 1024s a 8192Hz. El sistema TXM-22 permite rotar el vector de polarización debido a su construcción con 3 electrodos de salida, obteniendo una inyección de corriente tensorial.



Figura 3. Implementación en campo del método CSAMT en la modalidad de inyección multi-dipolar con los sistemas TXM-22, TXB-07 y Motogenerador de 50KVA.

### Ventajas

- ✓ Profundidad de investigación con mayor certidumbre desde metros hasta 4 a 5 kilómetros.
- ✓ Menor tiempo de adquisición en comparación con la técnica MT.
- ✓ Posibilidades de inversión de datos 1D, 2D y 3D.
- ✓ Se obtienen valores de resistividad y profundidades absolutas en comparación con métodos potenciales.
- ✓ Entrega valiosa información estructural, así como dimensionalidad del medio.
- ✓ Complementa información en modelado de datos sísmicos o potenciales.
- ✓ Eficaz en zonas con ruido antropogénico.

### Inyección Multidipolar

En el método convencional de CSAMT existe sólo un vector de polarización, cuya dirección es paralela al dipolo de inyección; energizando el medio con una dirección preferencial.

Actualmente con la variante de inyección de corriente multidipolar se pueden obtener 6 vectores de polarización: 0°, 120°, -120°, 30°, 150° y -90°. Los vectores de polarización pueden rotarse durante un intervalo de medición establecido, o bien, un ángulo de polarización específico para una frecuencia de medición determinada.

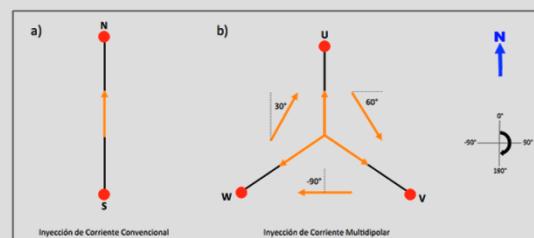


Figura 4. a) Vector de polarización resultante al inyectar corriente en un dipolo orientado N-S (Inyección de corriente convencional). b) Vectores de polarización resultantes a partir de la combinación de los electrodos de inyección. Los vectores colineales a los electrodos U, V y W corresponden a los ángulos 0°, 120° y -120° respectivamente, son generados a partir del flujo negativo de corriente en 2 electrodos y el flujo positivo de corriente en 1 electrodo. Los vectores de polarización de 30°, 60° y -90° son generados a partir del flujo de corriente únicamente en dos electrodos.

### Aplicaciones

- ✓ Caracterización de agua subterránea.
- ✓ Búsqueda de reservorios geotérmicos.
- ✓ Prospección de recursos minerales.
- ✓ Mapeo de estructuras geológicas.
- ✓ Exploración de hidrocarburos.
- ✓ Caracterización de estructuras finas y betillas mineralizadas.

### Modo Tensorial

La posibilidad de rotar el vector de polarización en 6 direcciones principales, permite que esta variante del método CSAMT obtenga mayor certidumbre en la información estructural medida, discriminando la dirección preferencial de las estructuras someras de las profundas; esto se logra mediante pulsos cuadrados, triangulares, sinusoidales de hasta 40A en un amplio rango de frecuencias que incitan el medio.

### Referencias

<http://178.63.62.205/mtxgeo/index.php/transmitter/txm-22>

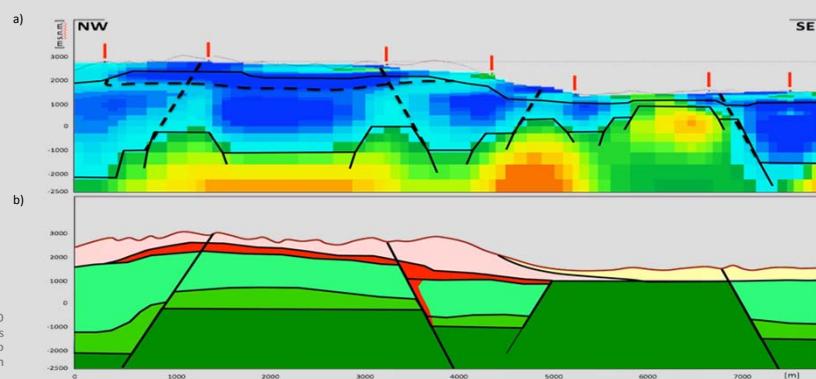


Figura 5. a) Modelo geeléctrico con inversión 2D de una sección construida a partir de 7 sondos AMT-MT de fuente controlada. b) Modelo geológico conceptual sobre la sección de exploración geofísica.

## Método Audio-Magnetotelúrico de Fuente Controlada (CSAMT)

### Inyección de Corriente Multidipolar



Figura 6. Colocación de un polo de inyección de corriente.



Figura 7. Sistemas utilizados para la implementación del método CSAMT, Tx y Rx.



Figura 8. Sistemas utilizados para la transmisión de corriente Tx, Motogenerador de 50 kVA, TXM-22 y TXB-07.



Figura 10 . Motogenerador de 50kVA



Figura 11 Polo de inyección de corriente de aproximadamente 2m x 2m x 50cm.



## Transitorio Electromagnético en el Dominio del Tiempo (TDEM)

### Caracterización Electro-Estratigráfica del Subsuelo

#### Introducción

El Transitorio electromagnético es un método de fuente controlada que consiste en energizar el subsuelo con una bobina que induce corriente continua, después de un intervalo de tiempo el pulso de corriente se interrumpe abruptamente, el cambio rápido en el campo primario generado por el transmisor producirá corrientes eléctricas en cuerpos conductores en el subsuelo que se disiparán y la región interior del conductor reflejara un decremento en su campo magnético y las corrientes inducidas comenzaran a fluir en el medio.

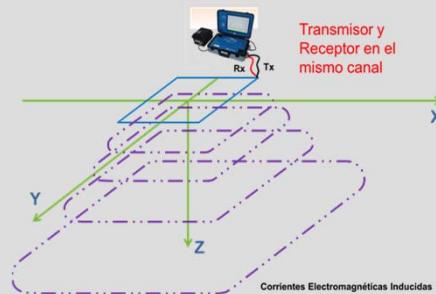


Figura 1. Esquematización de las corrientes inducidas por el corte abrupto del campo primario generado.

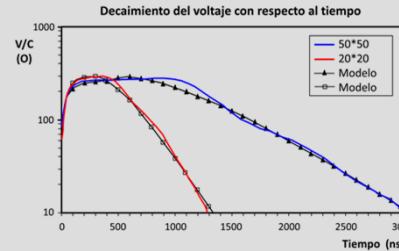


Figura 2. Curva de decaimiento de voltaje con respecto al tiempo. El campo disminuye rápidamente, y es de especial interés el decaimiento de la señal con respecto al tiempo cuando la señal del transmisor está apagada. El análisis de estos cambios da la distribución de resistividad con la profundidad en la tierra.

Un receptor en la superficie mide las variaciones de campo magnético secundario, este registra un decaimiento de voltaje exponencial con el tiempo, que contiene información sobre la distribución de resistividades ya que depende de la magnitud y distribución de la corriente inducida. En las técnicas electromagnéticas inductivas en el dominio del tiempo se utiliza como transmisor una bobina de forma rectangular, los diferentes arreglos se clasifican en función de la configuración que presenta el transmisor y receptor.

#### Terra-TEM

- Transmisor: 10 amperes
- Receptor: 500Hz con 3 canales simultáneos verdaderos
- Memoria interna: 1GB
- Interface externa: USB
- Dimensiones: 51x35x16cm
- Peso: 13kg.



Figura 3. Equipo Terra-TEM

#### TEM-FAST 48 HPC

- Configuración 1 o 2 loops: 10\*10 m -500\*500 m
- 1-4 Amperes
- Rango de tiempo: 4μs-16ms
- 48 ventanas de tiempo
- Voltaje: 100nV-10V
- Dimensiones: 103\*27\*310mm
- Peso: 1.5 Kg.



Figura 4. Equipo TEM-FAST 48 HPC

#### Transmisor TX-50

Permite el uso de voltajes de hasta 100V, para la inyección de corrientes de hasta 50 Amps - despliega la corriente en el transmisor y el voltaje de entrada.

#### Transmisor TX-32

Permite corrientes de salida de 0.25 a 32 Amps, regulación de la corriente de acuerdo al tamaño del loop y al voltaje suministrado.



Figura 5. Adquisición en cualquier tipo de clima (Equipo Terra TEM).

#### Ventajas

- Alta resolución lateral.
- Mejor eficiencia que cualquier método de corriente continua para profundidad mayor de 300m.
- Capacidad de reescalamiento del tamaño de la bobina según la profundidad de investigación.
- Buen funcionamiento en superficies donde el terreno es resistivo, salvando problemas de resistencias de contacto.

#### Aplicaciones

- Caracterización litológica.
- Caracterización Geohidrológica.
- Exploración de minerales.
- Exploración somera incluyendo investigaciones Geotécnicas y de Ingeniería Civil.
- Estudios de Agua Subterránea y Salinidad.
- Estudios Ambientales.
- Evaluación de riesgos geológicos.
- Estudios Geotérmicos.
- Estudios Arqueológicos.

#### Caso I: Geohidrología

La propiedad física que refleja cambios más significativos ante la presencia de agua es la conductividad eléctrica. Los métodos inductivos resultan convenientes para la exploración de recursos geohidrológicos, donde los perfiles de resistividad evidencian cambios importantes en las características físicas de las rocas y con base en el comportamiento espacial de los estratos más conductores es posible asociar zonas con saturación.

#### Caso II: Geotermia

En la geotermia los modelos conceptuales pueden ser estudiados a través de métodos indirectos mediante el conocimiento de la distribución espacial de algunas de las propiedades físicas de las rocas, en particular la resistividad es afectada por la temperatura por lo que la elección del método es muy importante para estudiar fenómenos propios de los sistemas hidrotermales. La buena resolución lateral que ofrece el método TDEM contribuye a la elaboración de un mapa geológico con énfasis en rasgos vulcanológicos y estructurales, y estudios Geohidrológicos que ayuden a la evaluación de posibles reservas geotérmicas.

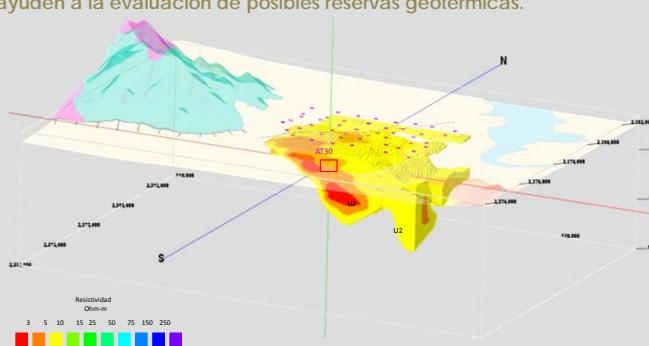


Figura 7. Delimitación de unidad conductora asociada a materiales de alteración como Riolita, Toba Riolítica y Andesita.

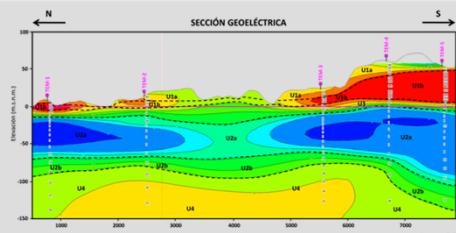


Figura 6. Distribución geoelectrónica.

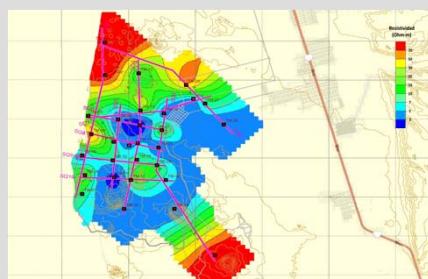


Figura 8. Mapa de Resistividad a 0 m.s.n.m, muestra la continuidad lateral de las unidades identificadas en el estudio geohidrológico.

#### Referencias

- CONSTABLE S.C., Parker R.L., Constable C.G., "Occam's Inversion: A practical algorithm for generating smooth models from electromagnetic sounding data", Geophysics, v. 52, n3, marzo 1987.
- TERRATEM 3, Operator's Manual, Types M, MM, and MMS, v. 61.4.9, Mineral Control Instruments Limited (ACN 007 954 627), Australia, 1993.
- TEMIX S, Temix v 3.0, User's Manual, Transient Electromagnetic Data Interpretation Software, © Interpex Limited, Golden Co. 1993.
- THOMPSON, D.T., EULDPH: A new technique for making computer-assisted depth estimators from magnetic data, Geophysics, Vol. 47, No. 1 (1982), Pags. 31-37
- WINGLINK, User's Manual, Edition 4, © Goseystem srl, Milan, Italia, 1994.

## Transitorio Electromagnético en el Dominio del Tiempo (TDEM)

### Caracterización Electro-Estratigráfica del Subsuelo



Figura 9. Equipo TERRA TEM y Transmisor TX-32 (Der.).



Figura 10. Equipo TERRA TEM (Izq.) y Transmisor TX-50 (Der.).



Figura 11. Estudio con fines geotermicos. Equipo TERRA TEM / Transmisor TX-32.



Figura 12. Operador en campo con equipo TEM- FAST 48.



Figura 13. Determinación de la intrusión por agua de mar. Equipo TEM- FAST 48.

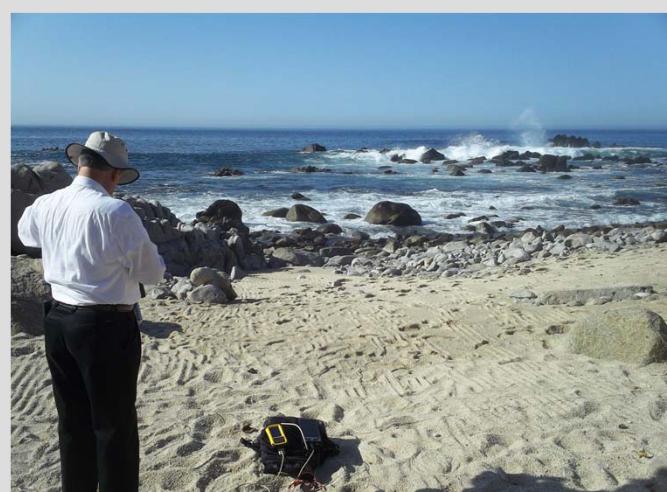


Figura 14. Intrusión salina. Equipo TEM-FAST 48.



# Georadar de Penetración Terrestre

## Exploración Somera de Alta Resolución

### Introducción

El método de Georadar de Penetración Terrestre (GPR), se refiere a las técnicas electromagnéticas diseñadas para la localización de objetos y estructuras en el subsuelo. Con una profundidad del orden de los 20 a los 30 metros.

Este método se basa en el uso de ondas electromagnéticas en una banda de frecuencias de los 10 - 1000 MHz. Las ventajas de este método es que las señales son relativamente cortas y el ancho de banda puede ser generado y radiado al subsuelo para detectar variaciones anómalas en las propiedades dieléctricas de los distintos materiales geológicos.

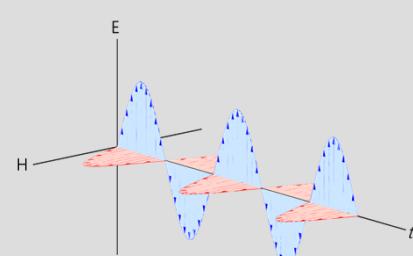


Figura 1. Las ondas planas son una buena aproximación de las ondas reales en muchas situaciones prácticas. La propagación de las ondas electromagnéticas puede ser representada por la ecuación de onda. La propagación es tomada a lo largo del eje z, perpendicularmente al campo eléctrico (E) y el magnético (H) como se muestra en la figura.

### Penetración

La penetración de la onda electromagnética dependerá de la frecuencia de transmisión y de las propiedades eléctricas del medio, de manera que, con antenas de baja frecuencia, se alcanza una mejor penetración que con antenas de alta frecuencia. De igual manera se obtiene una buena penetración en materiales poco conductores (arenas secas, granito, caliza, concreto) ya que la atenuación de la señal de radar en materiales conductores, como en arenas arcillosas, es mayor.

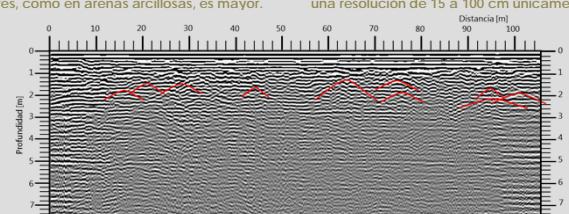


Figura 2. Representación típica de una sección de Radar de Penetración Terrestre (Radargrama). Las hipérbolas representadas de color rojo, muestran las anomalías típicas de tuberías.

### Resolución

La resolución mejorará al incrementarse la frecuencia de transmisión de la señal del radar. Es común utilizar diferentes frecuencias de transmisión en un mismo estudio. Por ejemplo, en condiciones óptimas, antenas de 1000 a 500 MHz son capaces de penetrar entre 0.5 a 5 metros con resolución de 0.5 a 5 cm, mientras que en el mismo material, antenas de 300 a 80 MHz alcanzarían profundidades de 10 hasta 15 metros, pero con una resolución de 15 a 100 cm únicamente.

### Sistema GPR

Para la obtención de radargramas se utilizan instrumentos de alta tecnología. El sistema empleado por GEOTEM Ingeniería SA de CV es el MALA de Geoscience que es líder en el desarrollo tecnológico de GPR.

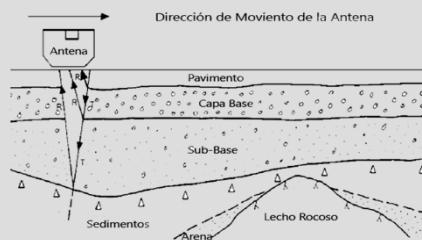
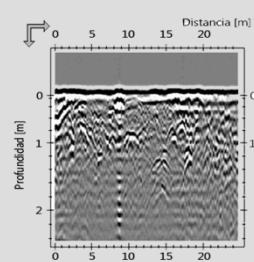


Figura 3. Sistema de Adquisición de GPR. La antena se desplaza de forma lineal sobre el área que se desea prospectar, generando en tiempo un radargrama.



### Mala GeoScience

- Alimentación 12V
- Temperatura de Operación -20° - 50°C
- Antenas Blindadas (10Hz-1GHz)
- Odómetro Integrado
- Interface PC-Control



Figura 5. Antenas de 100, 250 y 500 MHz.

### Ventajas

- ✓ Diversidad de Antenas (10-1000MHz)
- ✓ GPS (Opcional)
- ✓ Alta Resolución
- ✓ Fácil Adquisición
- ✓ No invasivo ni destructivo.

### Aplicaciones

- ✓ Cartografía de espesores de los glaciares.
- ✓ Detección de cavidades.
- ✓ Exploración minera somera.
- ✓ Localización de fallas y fracturas.
- ✓ Cartografía de estructuras geológicas.
- ✓ Localización de objetos enterrados.
- ✓ Localización de grietas en concreto.
- ✓ Localización de infraestructura eléctrica y sanitaria.
- ✓ Ciencia Forense

### Caso I: Detección de Ductos

Este estudio se realizó en una zona de derrames de hidrocarburos.

Se utilizó una combinación de tres antenas con frecuencia de 100MHz para objetivos más profundos, 250MHz (Figura 6) y de 500MHz para los más someros. Los resultados muestran medianas hipérbolas en los radargramas que son asociadas a ductos y tuberías.



Figura 6. Levantamiento de Georadar con antena de 250MHz.

### Caso II: Obra Civil

En zonas urbanas resulta imprescindible esta tecnología de alta resolución para la detección de tuberías de drenaje, luz, teléfono e infraestructura civil.

Los radargramas obtenidos enfatizan información confiable señalando in-situ zonas que deberán protegerse durante las obras de cimentación.



Figura 7. Brigada de Radar de Penetración Terrestre con antena de 250MHz, durante la adquisición de radargramas, con la finalidad de localizar infraestructura subterránea.

### Referencias

- Applied Geophysics Second Edition, W.M. Telford, L.P. Geldart, R.E. Sheriff, Cambridge University Press, United Kingdom 1990.
- Reynolds, M. John, 1998, An Introduction to Applied and Environmental Geophysics, John Wiley Sons.
- Sanderberg, C. H., 1958, Terrain Corrections for an Inclined Plane in Gravity Computations. Geophysics, 23, no. 4, 701-711.
- Segerstrom, K. 1956, Estratigrafía y Tectónica del Cenozoico entre México DF y Zimapán Hgo. Congreso Geológico Internacional México.
- Sharma V. Prem, 2002, Environmental and Engineering Geophysics. Cambridge University Press, UK.
- Daniels D. 2004, Ground Penetrating Radar, 2nd edition. IEE, London.
- Davis, J. L., and Annan, A. P 1989, Ground Penetrating Radar for High Resolution Mapping of Soil and Rock Stratigraphy: Geophysics Prosp. 37, 531 - 551.

# Georadar de Penetración Terrestre

## Exploración Somera de Alta Resolución



Figura 8. Antena de Georadar de Penetración de frecuencia de 100MHz.



Figura 9. Ubicación de infraestructura civil con antena de 100 MHz



Figura 10. Localización de ductos con una antena de 250MHz



Figura 11. Muestreo GPR para la localización de ductos, antena 250MHz.



Figura 12. Muestreo Geofísico para la localización de tuberías, antena con frecuencia de 250MHz.



Figura 13. Ubicación de tuberías y ductos., utilizando la antena de 500MHz, que proporciona radargramas poco profundos pero con mayor detalle.



# Perfilaje Electromagnético

## Caracterización Somera de la Conductividad Eléctrica del Subsuelo

### Introducción

Algunos equipos que miden la conductividad eléctrica del subsuelo utilizan la susceptibilidad magnética de los materiales. Las mediciones se basan en la cuantificación de un campo magnético inducido, orientado a un dipolo vertical-horizontal. El campo magnético medido está conformado por una parte imaginaria (fuera de fase), proporcional a la conductividad del subsuelo (unidades en  $\Omega \text{ m}$ ) y una parte real (en fase) determinada por las propiedades magnéticas mostradas en el campo primario.

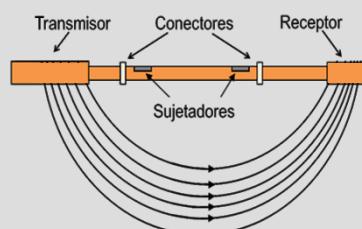


Figura 1. Equipo de medición de conductividad eléctrica CMD.

El campo magnético inducido se genera en el transmisor, y es registrado en el receptor. La profundidad de investigación se determina por la distancia entre ambos dipolos.

### Sistema de Perfilaje EM

El instrumento de registro CMD incluye 5 modalidades de medición de alta precisión, dos rangos de profundidad y calibraciones manuales y de fábrica.

Los parámetros que mide son la conductividad aparente en  $\text{mS/m}$  y la fase en ppm (determinada por la susceptibilidad magnética).

Figura 3.  
Sistema de medición con el método Perfilaje Electromagnético, utilizando el equipo CMD-4 fabricado por GF Instruments.



### Ventajas

- ✓ Método no invasivo.
- ✓ Respuesta rápida y resolutiva de la conductividad del subsuelo.
- ✓ Operación en condiciones climáticas extremas.
- ✓ Mapeo a diferentes profundidades con rango de 0.5 a 9 [m].
- ✓ Visualización de la gráfica de conductividad y fase en tiempo real.

### Aplicaciones

- ✓ Estudios de Ingeniería Geológica y Civil.
- ✓ Monitoreo ambiental.
- ✓ Arqueología.
- ✓ Agricultura.
- ✓ Detección de objetos metálicos y tuberías.

### Caso I: Detección de objetos metálicos

El método de conductividad eléctrica permite conocer el comportamiento del subsuelo con buena resolución a diferentes profundidades. La caracterización de la distribución espacial de anomalías geofísicas asociadas a la presencia de cuerpos metálicos contribuye en aspectos importantes para la construcción de infraestructura.

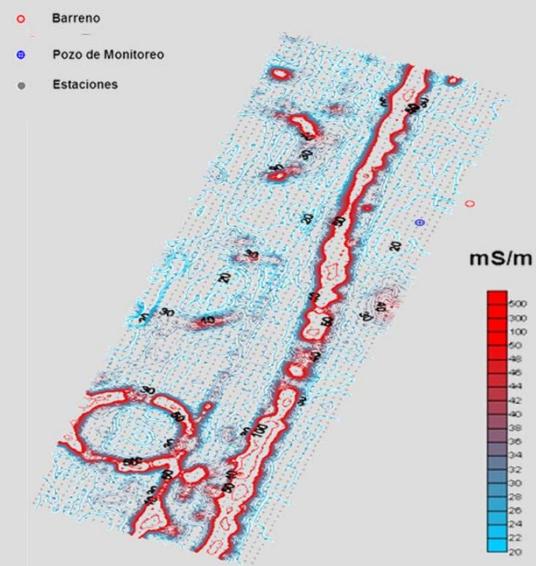


Figura 4. Mapa de Conductividad Eléctrica del Subsuelo. Configuración realizada a partir de más de 3000 lecturas en una ex-Refinería con la finalidad de detectar objetos metálicos enterrados.

### Unidad de Control

- Tiempos de medición entre 0.1 – 20 seg
- Compatible con receptor GPS
- Almacenamiento: hasta 150 000 puntos
- Pantalla gráfica LCD, con luz de fondo blanca
- Transferencia de datos USB
- Baterías recargables. 24 a 32 horas de medición continuas
- Adaptador AC/DC para 100-240 V AC, 50-60 Hz
- Dimensiones: 270x90(145)x60mm
- Peso: 0.7 Kg
- Temperatura de operación: -10°C a 50°C

### Antena:

- Dos rangos de profundidad
- Rangos de medición:
  - Conductividad: 1000  $\text{mS/m}$  resolución 0.1 $\text{mS/m}$
  - Relación de Fase:  $\pm 80\text{ppm}$ , resolución 10ppm
- Precisión de las lecturas:  $\pm 4\%$  en 50  $\text{mS/m}$
- Frecuencia de operación: 10KHz
- Profundidad efectiva para cada modo High/Low:
  - CMD-1: 1.5m/0.75m
  - CMD-2: 3.0m/1.5m
  - CMD-4: 6.0m/3.0m

### Caso II: Localización de tuberías metálicas

Otra aplicación común es la detección de ductos metálicos para apoyar en trabajos de exploración directa cuando se planea una caracterización ambiental. Esta corresponde a una primera fase de exploración que apoyara toda una secuencia de actividades multidisciplinarias.

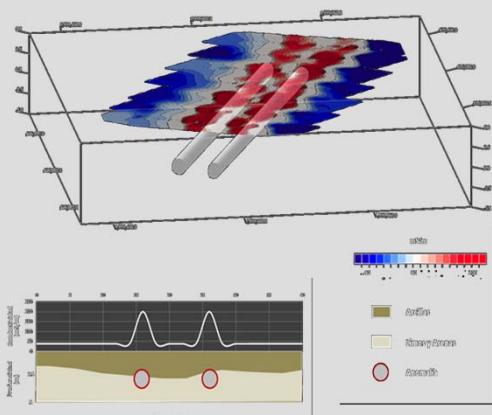


Figura 5. Mapa de Conductividad Eléctrica en un sitio en el Sureste de México para localizar tuberías de distribución de hidrocarburos. Se observa la presencia de 2 ductos con dirección Este-Oeste.

### Referencias

- Anderson, L. J. & E.Gosk (1989): Applicability of vulnerability Maps.. Environ Geol Water Sci 13, 39-43
- Kirsch R., Sengpiel K.P. Voss W. 2003. The use of electrical conductivity mapping in the definition of an aquifer vulnerability index. Near Surface Geophysics, Vol. 1 pp.13-19
- Modin I.N., Shevkin V.A., Bobatchev A.A., Bolshakov D.K., Leonov D.A., Vladov M.L. 1997. Investigations of oil pollution with electrical prospecting methods. 3rd Meeting Environmental and Engineering Geophysics. Aarhus, Denmark

# Perfilaje Electromagnético

Caracterización Somera de la Conductividad Eléctrica del Subsuelo



Figura 6. CMD – 1 Mini Explorer



Figura 7. CMD – 1 Mini Explorer



Figura 8. CMD – 1 Mini Explorer



Figura 9. CMD – 2



Figura 10 . CMD – 4 Explorer



Figura 11. CMD – 1 Mini Explorer



# Sísmica de Pozos (Cross-Hole, Down-Hole, Up-Hole)

## Caracterización Geosísmica y Estimación de Módulos Elásticos

### Introducción

Las pruebas de sísmica de pozos, permiten obtener parámetros elástico-dinámicos de los materiales del subsuelo de manera puntual y estimar el comportamiento dinámico del sitio ante diferentes tipos de eventos sísmicos.

La construcción de grandes obras civiles estipula el uso de estas técnicas que ayuden en el diseño estructural siendo ya una metodología convencional.

El sistema de medición consiste en colocar un geófono triaxial con un sistema de anclaje que garante que las ondas se reciben directamente de la pared del pozo, una fuente de energía capaz de generar polarización en la onda de corte y un dispositivo digitalizador con un intervalo de muestreo de alta resolución de señales sísmicas, como se muestra en la figura 1.

### Descripción del equipo utilizado

El sensor es un geófono triaxial con frecuencia base de 10 Hz, fabricado por R.T. Clark Industries Inc. en Estados Unidos de Norteamérica, cumple con la norma D4428 Standard Test Methods for Crosshole Seismic Testing publicada por la Sociedad Americana de Pruebas y Materiales (ASTM por sus siglas en inglés). El geófono contiene un sistema de anclaje de acero, cuya función es mantener el geófono inmóvil y pegado a la pared del pozo. La disposición de los sensores en las tres direcciones ortogonales (x, y & z), se encuentran dentro del sensor para determinar los tiempos de arribo de las ondas S al dispositivo, debido a que viajan más lento que las onda P, las ondas S se encuentran ocultas en el tren de ondas P, por lo que solamente se hace posible su detección utilizando un geófono triaxial. El dispositivo que genera las ondas sísmicas es conocido como fuente sísmica Ballard que consiste en un mecanismo de alta potencia y amplio espectro de respuesta, con opción reversible, Ballard Source Seismic System, manufacturado por R.T. Clark Industries Inc. El equipo mencionado anteriormente se muestra en la figura 3

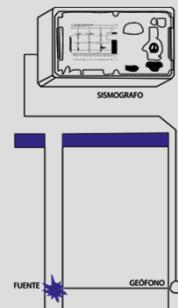


Figura 1. Diagrama de Crosshole

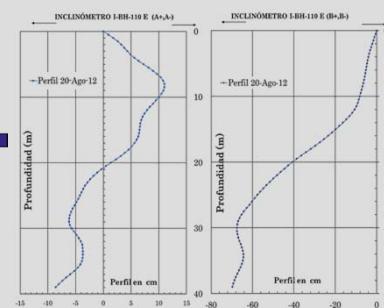


Figura 2. Perfiles de desplazamiento en cada uno de los barrenos en profundidad y en planta.



Figura 3. Geófono Triaxial de Pozo y fuente sísmica Ballard R.T. Clark, instalación de el equipo para el registro Crosshole. Foto GEOTEM

### Adquisición de datos Crosshole

Es imprescindible tener un control de la trayectoria de los barrenos mediante tecnologías de alta precisión, así determinar de manera correcta los cálculos en las velocidades.

Entre algunos de los métodos para obtener los datos de inclinación de los barrenos perforados se implementa tuberías especiales de PVC, la cual cuenta con dos pares de ranuras orientados ortogonalmente. La interpretación y cálculo de las distancias entre barrenos se lleva a cabo después de la rotación hacia las direcciones N-S y E-W, la corrección se hace a cada 0.5m con respecto a la profundidad. (figura 2)

Las mediciones de campo del Cross-Hole, consisten en colocar la fuente y receptor a las mismas profundidades siguiendo esta secuencia a lo largo del pozo.

### Especificaciones de la fuente

Frecuencia central	400 Hz
Rango dinámico del disparador	120db
Localización del disparador superior	Anciado en la argolla
Peso	6 kg
Sistema de anclaje	Cámara de aire de doble pared remplazable
Sistema de inflado	Manual
Presión de la cámara	6 kg
Longitud del dispositivo	Hasta 120 psi
	45 cm

### Geófono

Frecuencia base	10 Hz
Sensores Internos	3
Longitud del cable	100 m
Peso del sensor	3 kg
Longitud	60 cm
Diametro	50 mm

### Equipos

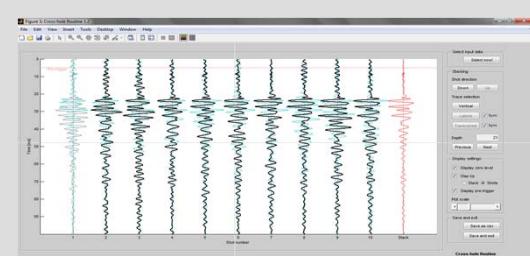
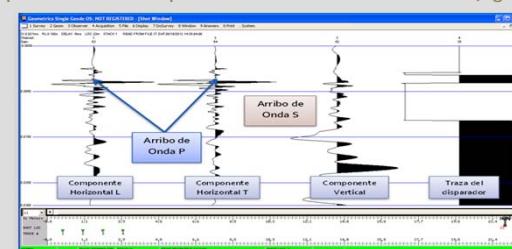
Ras-24	24 canales (Selstronic ®)
Geode	24 canales (Geometrics ®)
Software	
Seismodule Controller de Geometrics (adquisición y control de calidad)	
Programa elaborado en Matlab (análisis por componente y profundidad)	
Reflexw (picado de los tiempos de arribo)	

### Ventajas

- ✓ Caracterizar in-situ cada horizonte del subsuelo.
- ✓ Resolución a mayor profundidad en comparación con otros métodos superficiales.
- ✓ Mayor exactitud en el cálculo de Vs y Vp.
- ✓ Detección de capas de menor espesor.

### Determinación de velocidad de onda Compresional y de Corte

La caracterización elástico-dinámica del subsuelo se obtiene de manera puntual. Estas pruebas se realizan a profundidades del orden de 40m hasta 100m, y a lo largo de los barrenos se calculan las velocidades de las ondas P y S. La dificultad de aplicar esta técnica radica en la identificación de las ondas S. El software para la adquisición de los datos es Seismodule Controller de Geometrics (Figura 4), para el proceso de las trazas sísmicas se utilizó una rutina propia en MATLAB (Figura 5), y para la visualización y picado de los tiempos de arribo se utiliza REFLEXW v6 (Figura 6).



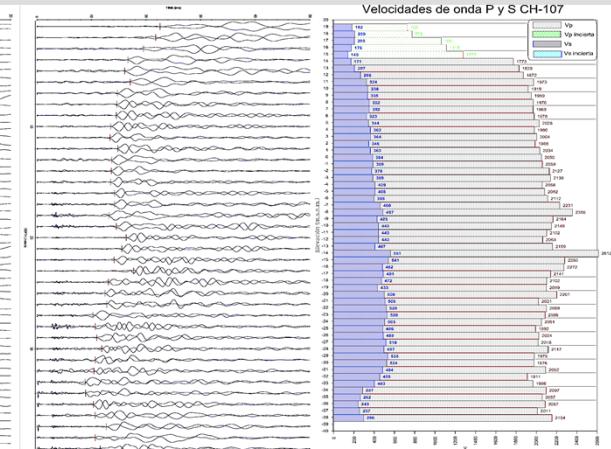
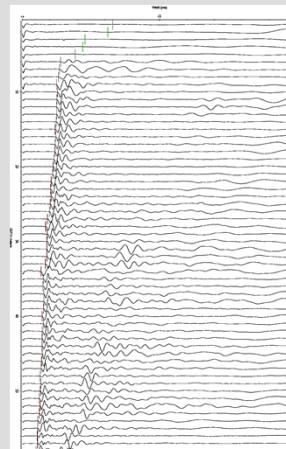
### Aplicaciones

- ✓ Caracterización litológica.
- ✓ Control de compactación de suelos.
- ✓ Estimación de los parámetros dinámicos de los materiales.
- ✓ Caracterización de oquedades y cavernas.
- ✓ Diseño estructural.

### Referencias

- Park, C.B., Miller, R.D., and Xia, J., 1998b, Ground roll as a tool to image near-surface anomaly: Technical Program with biographies, SEG, 68th Annual Meeting, New Orleans, Louisiana, 874-877.
- Matthews, M.C., Hope, V.S., & Clayton, C.R., 1996: The use of surface waves in the determination of ground stiffness profiles.- Proc. Inst. Civ. Engineers, Geotech. Engineering, 119: 84-95.

Los resultados presentan valores de Vs y Vp congruentes con la zona de estudio. La correlación de manera puntual a diferentes profundidades Vp y Vs, permiten estimar unidades de diferentes compacidades, en este sitio la variación de la velocidad es mayor a profundidad y los primeros metros se encuentran con un mayor grado de alteración.



## Sísmica de Pozos (Cross-Hole, Down-Hole, Up-Hole)

### Caracterización Geosísmica y Estimación de Módulos Elásticos



Figura 6. Trabajo en campo, calibración del equipo



Figura 7. Trabajo en campo, control de calidad de los datos



Figura 8. Metodología en campo, fuente-receptor



Figura 9. Fuente Sísmica Ballard



Figura 10. Geófono de 3 componentes



Figura 11. Sismógrafo RAS24 y distribución del equipo en el sitio



Figura 12. PC portátil y sismógrafo GEODE



# Reflexión Sísmica

## Caracterización Sismo-Elástica y Estimación de Espesores

### Introducción

El método Sísmico de Reflexión (su variante superficial shallow) constituye una herramienta geofísica con gran resolución para el estudio del subsuelo en el rango de decenas de metros de profundidad.

El resultado final es una sección distancia-tiempo en la que se resaltan los diferentes reflectores existentes en el subsuelo. Para obtener una sección confiable se tienen que identificar los tipos de ondas de interés del resto de las señales recuperadas con los geófonos.

Las reflexiones de las ondas de compresión se producen en las interfaces del subsuelo donde existe suficiente contraste en los valores de impedancia acústica como se muestra en la Figura 1.

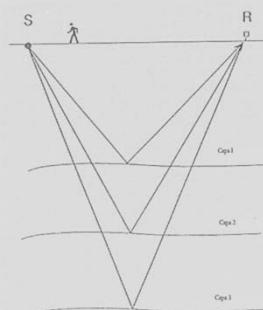


Figura 1. Este es un ejemplo simplificado de la reflexión de las trayectorias de los rayos en un medio con 3 capas.

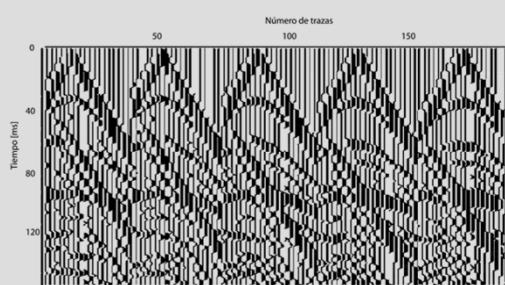


Figura 2. Grafica de sismogramas generados para una sección sísmica de reflexión

### Consideraciones en la representación de la sección sísmica de reflexión

La campaña para la adquisición de datos esta en función de las características geológicas y/o el objetivo a resolver.

El numero de canales, espaciamiento de estos, offset y tipo de fuente deben ser considerados para cada sitio a estudiar.

La sección debe ser interpretada sin ninguna ambigüedad, considerando las pertinentes interpretaciones geológicas.

Es muy importante la obtención de distancia - profundidad a partir de la sección sísmica distancia-tiempo, debido a que el proceso de los datos puede generar reflexiones que no corresponden a la geología.



### Ventajas

- ✓ Aporta información muy detallada del subsuelo.
- ✓ Se utiliza en sitios donde el Georadar de Penetración Terrestre es afectado por ruido electromagnético.
- ✓ Ofrece cubrir áreas mas grandes en menos tiempo.

### Aplicaciones

- ✓ Utilizado en la localización del estrato competente debajo de aluvión en las cercanías de sitios con material no consolidado.
- ✓ Empleado en la ubicación de minas abandonadas y cavidades por disolución de rocas.

### Referencias

- GEOMETRICS. Seisview Seismic Refraction Processing Software User's Manual, EG&G Geometrics, 1986.  
GEOMETRICS. Engineering Seismic Reflection Software, 1986.  
Society of Exploration Geophysicists. GEOPHYSICS, Volumen 63, nº 4. Julio-Agosto 1.998. Special Section. Shallow Seismic Reflection Papers.  
DOWD, J. P. 1986. Practical aspects of shallow seismic reflection. Notes of a short course presented in London U.K. December-91.  
MUSGRAVE A.W., Seismic Refraction Prospecting: Society of Exploration Geophysicists, 1967.  
SEISTRONIX. RAS-24 Remote Acquisition System, Operator's Manual v2.0, 2003.  
Feasibility of CDP seismic reflection to image structures in a 220-m deep, 3m thick coal zone near Palay, Coahuila, México.

### Adquisición

La metodología de trabajo mas utilizado en los estudios sísmicos de Reflexión superficial, es el conocido como CDP (Common Depth Point), este consiste en registrar las señales sísmicas provenientes de un mismo punto reflector del subsuelo de las diversas combinaciones entre los puntos de tiro y geófonos. Con este procedimiento es factible sumar en la señal en el procesamiento de los datos, los registros que tienen ese punto reflector común y mejorar la relación señal/ruido. Para garantizar una buena sección sísmica de reflexión, el diseño de adquisición es cuidadosamente planeado y los datos son seleccionados y filtrados. En la figura 2 se muestran los datos adquiridos para generar una sección de reflexión.

### Software de Inversión

Reflexw (comercial), incorporación de algoritmos académicos para la elaboración de la visualización de la sección sísmica.

### Equipos

Ras-24 24 canales (Seistronix ®)  
Geode 24 canales (Geometrics ®)  
Doremi 24 canales (SARA electrónica ®)

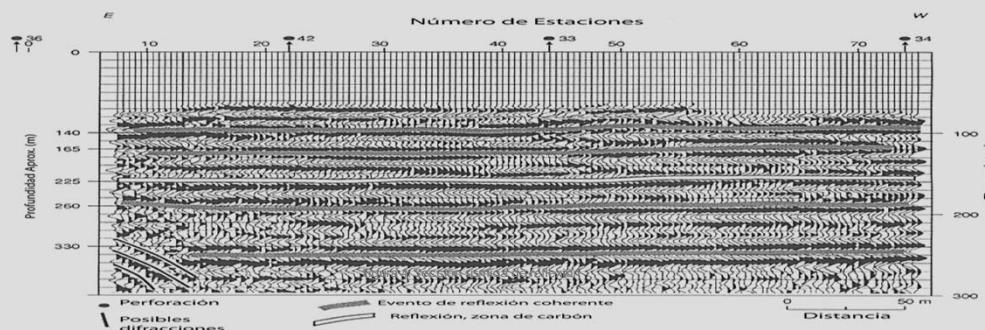
### Geófonos

Se cuenta con diferentes tipos de geófonos a diferentes frecuencias:

4.5 [Hz] (verticales)  
28 [Hz] (verticales)  
100 [Hz] (verticales)  
10 [Hz] (horizontales)

### Caso I: Detección de horizonte de carbón

La reflexión sísmica se utiliza para localizar horizontes de carbón con espesor de 3m a profundidades de hasta los 220m. La sección resultante identifica de manera clara el objetivo del horizonte de carbón (en blanco), y los estratos reflectores coherentes a profundidades aproximadas de 140, 165, 222, 258, 335 (en gris) y sugiere un plegamiento donde se estima existan fallas intermitentes. (Figura 4).



### Caso II: Caracterización sísmica para la localización a profundidad de la unidad más competente

Este ejemplo es una aplicación para geotecnia donde se realiza la caracterización de la compacidad de los materiales referente a una dirección preferencial donde se cimentara un edificio. La exploración geofísica consistió en la realización de un barrido de tendidos sísmicos de longitud total de 94 m, con profundidad de exploración que va de los 20 a los 40 m. Se compara con una sección sísmica de Vp, se identificaron en las sección, 3 Unidades : U1 con Vp=600 a 1000 m/s, U2 con Vp=1000 a 1800 m/s, U3 con Vp=1800 a 3000 m/s. (Figura 5)

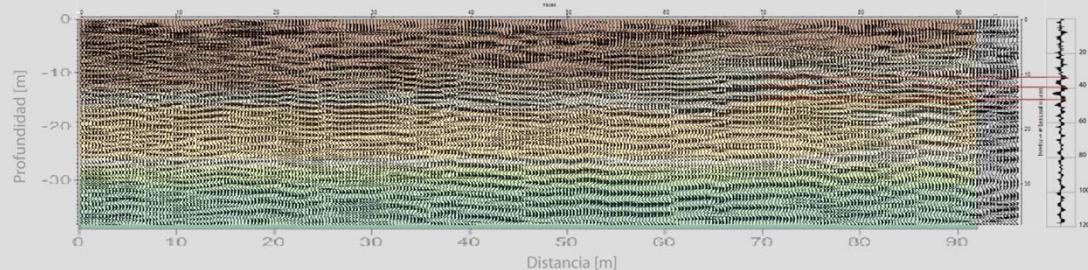


Figura 5. Sección Sísmica de reflexión y refracción.

## Reflexión Sísmica

### Caracterización Sismo-Elástica y Estimación de Espesores



Figura 7. Métodos combinados refracción y reflexión para la zonificación del subsuelo a detalle



Figura 8. Equipo de registro Seistronix y brigada de exploración sísmica



Figura 9. Apilamiento de la señal, Sísmica de Reflexión



Figura 10. Exploración Sísmica para detección de cavernas



Figura 11. Material para reflexión sísmica



Figura 12. Reflexión sísmica aplicada a la detección de Tuberías



# Refracción Sísmica

## Caracterización Sismo-Elástica y Estimación de Espesores

### Introducción

Este método forma parte de los estudios sísmicos, el cual inició su desarrollo en la década de los 50's. La refracción sísmica fue empleada en la industria petrolera antes de que los métodos de reflexión sísmica evolucionaran, sin embargo el método de refracción ofrece una opción para obtener información del subsuelo de manera sencilla como se muestra en la figura 1. En estudios que tienen como objetivo los primeros 30 metros y ayuda a determinar la arabilidad para encontrar la roca sana, encontrar la profundidad del estrato más competente

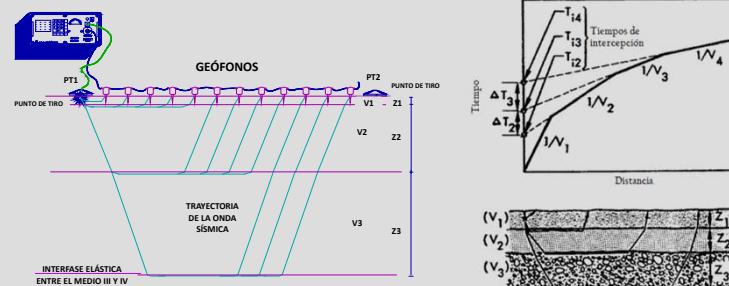


Figura 1. Tendido de refracción, se basa en trayectorias de tiempo mínimo que emplean las ondas elásticas en propagarse desde el punto de la superficie en donde son generadas, hasta los diferentes horizontes refractores del subsuelo regresando a otro punto ubicado en la superficie, en donde las señales son detectadas por una serie de sensores o geófonos

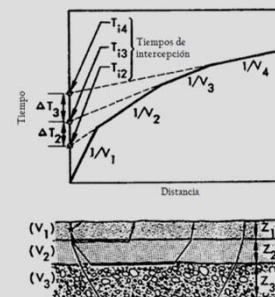


Figura 2. Gráfica tiempo vs distancia para la determinación de la velocidad de la onda "P", correspondiente a un medio estratificado con múltiples valores de propagación de ondas acústicas

### Tomografía Sísmica

Las nuevas tecnologías aplicadas para el manejo de mayor cantidad de datos sísmicos, se utilizan para obtener más detalle lateral con respecto a variaciones de velocidades símicas, definen mejor la disposición de los espesores y detalle lateral de las diferentes unidades Geosísmicas. El algoritmo iterativo se ajusta un modelo inicial a los tiempos de viaje obtenidos a partir de la propagación de ondas símicas.



Figura 3. Tendido de Refracción sísmica, cuenta con 24 geófonos, sismógrafo RAS-24, marro y placa (dispositivo generador de impactos) (Foto: GEOTEM)

### Ventajas

- ✓ Ofrece resultados in-situ para exploración somera.
- ✓ Adquisición en sitios de difícil acceso, como: presas túneles y trazos carreteros.
- ✓ Complementa estudios de métodos potenciales y electromagnéticos.
- ✓ Ofrece cubrir áreas más grandes en menos tiempo.
- ✓ Sirve como alternativa en donde los métodos eléctricos y EM son susceptibles a ruido.

### Aplicaciones

- ✓ Caracterización litológica.
- ✓ Determinar la arabilidad de los materiales.
- ✓ Permite la detección de la profundidad del basamento y su relieve
- ✓ Explotación de canteras.
- ✓ Bancos de materiales.
- ✓ Proporciona información para estimar módulos elásticos dinámicos

### Geófonos

Se utilizan diferentes tipos de geófonos a diferentes frecuencias:

- 4.5 [Hz] (verticales)
- 28 [Hz] (verticales)
- 100 [Hz] (verticales)
- 10 [Hz] (horizontales)

### Software de Inversión

Reflexw (comercial), Tremix, Dinver, incorporación de algoritmos académicos para la elaboración de la tomografía sísmica.

### Equipos

Ras-24 24 canales (Seistrionic ®)  
Geode 24 canales (Geometrics ®)  
Doremi 24 canales (SARA electrónica ®)

### Caso I: Caracterización de la unidad de cobertura

Este estudio fue realizado para caracterizar la unidad de cobertura, donde se realizaron perfiles de refracción con geófonos verticales y horizontales para el registro de ondas "P" y "S" y determinar sus características mecánicas del subsuelo. Los resultados presentaron dos capas las cuales coinciden en un contraste a una profundidad entre 7 y 10 m tanto para  $V_p$  como  $V_s$ . Los resultados se presentan en secciones donde  $V_s$  está indicado con valores de velocidades en óvalos y  $V_p$  en rectángulos. Figura 4

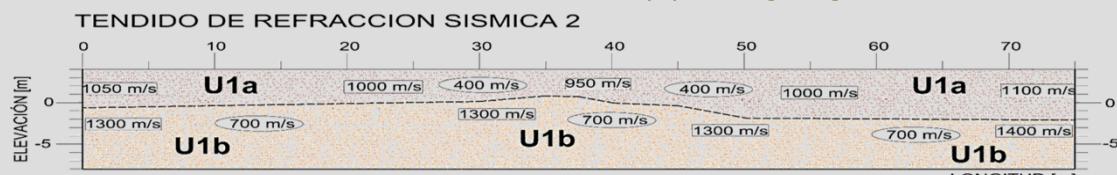


Figura 4. Sección de refracción sísmica con  $V_p$  y  $V_s$  y su distribución espacial

### Caso II: Determinación de velocidad de onda "P" para la unidad más competente de desplante

Este ejemplo es una aplicación para geotecnia donde se realiza la caracterización de la compacidad de los materiales a lo largo del eje de la cortina de una presa ubicada en el estado de Veracruz. La exploración geofísica en la ejecución de Tendidos de Refracción Sísmica (TRE) a lo largo del eje, con profundidad de exploración que va de los 20 a los 50 m. los resultados permitieron obtener 3 unidades que agrupan las características del subsuelo, encontrando que la de mayor competencia se encuentra a 30 metros de profundidad con velocidades superiores a los 3000 m/s, la cual se considera apta para desplante de la obra. Figura 5

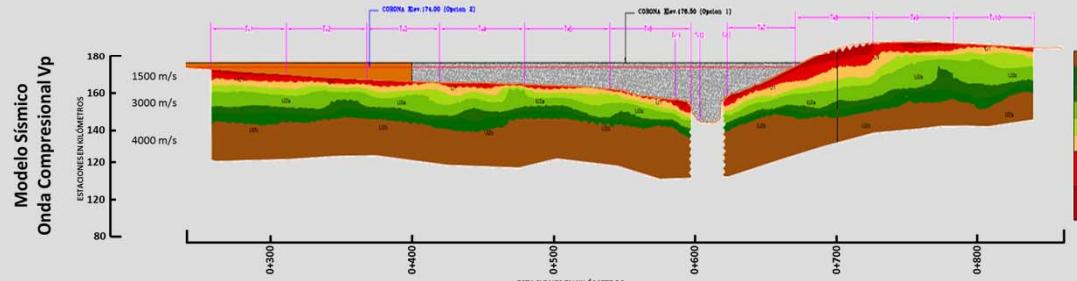


Figura 5. Sección Geosísmica de  $V_p$  a lo largo del eje (en la parte superior), y secciones transversales al eje de la cortina (mostrados a la derecha)

### Referencias

- GEOMETRICS, Seisview Seismic Refraction Processing Software User's Manual, EG&G Geometrics, 1986.
- GEOMETRICS, Engineering Seismic Reflection Software, 1986.
- GRANT F.S., West G.F., Interpretation Theory in Applied Geophysics; McGraw-Hill, 1965.
- MOURA S.J., Aplicaciones del Método Sísmico de Prospección Geofísica en el estudio de Carreteras; Reporte de Laboratorio Nacional de Ingeniería Civil, Lisboa, 1978.
- MUSGRAVE A.W., Seismic Refraction Prospecting; Society of Exploration Geophysicists, 1967.
- SEISTRONIX, RAS-24 Remote Acquisition System, Operator's Manual v2.0, 2003.

## Refracción Sísmica

### Caracterización Sismo-Elástica y Estimación de Espesores



Figura 6. Colocación de geófonos en concreto..



Figura 7. Tendido de refracción con geófonos horizontales de 4.5 Hz



Figura 8. Brigada de adquisición de prospección sísmica .



Figura 9. Estudio de refracción sísmica para el desarrollo de una vialidad .

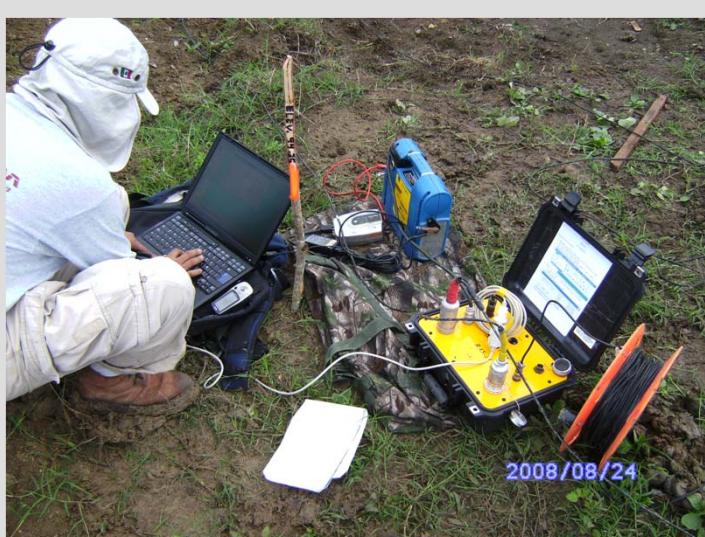


Figura 10. Sismógrafo Seistronix de 24 canales , adquisición de datos.



Figura 11. Tendido de refracción sísmica en taludes.



# Análisis de Ondas Superficiales Multicanal (MASW)

## Caracterización Sismo-Elástica y Estimación de Espesores

### Introducción

La técnica de Análisis Multicanal de Ondas Superficiales (MASW) (Park et al., 1999), es un método no destructivo que analiza las propiedades de dispersión de los tipos de ondas sísmicas superficiales (modos fundamentales de ondas Rayleigh), las cuales se propagan horizontalmente a lo largo de la superficie desde el punto de impacto a los receptores. La técnica MASW proporciona velocidades de ondas de corte ( $V_s$ ) con sus respectivos espesores en formatos 1-D, 2-D y 3-D. Los registros simultáneos con múltiples receptores a diferentes intervalos de distancias, desde una fuente impulsiva proporcionan un adecuado almacenamiento de datos para medir la velocidad de fase de las ondas de corte como se muestra en la figura 1.

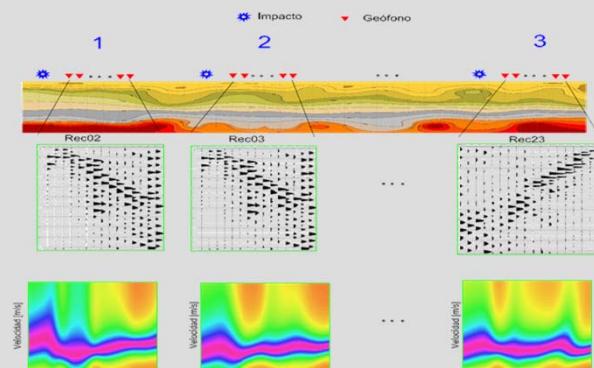


Figura 1. Obtención de un perfil de corte ( $V_s$ ) a partir de registros multicanales y el análisis de la curva de dispersión

### Sísmica de ondas superficiales

Los perfiles de velocidad de corte " $V_s$ ", se obtienen con registros convencionales de tendidos de refracción sísmica con la diferencia de utilizar geófonos verticales de 4.5 [Hz] (adecuados para registrar el modo fundamental de las ondas Rayleigh), además se realizan impactos frente a cada geófono para aumentar la resolución horizontal y definir con mayor precisión los espesores.



### Ventajas

- ✓ No es afectado por la cantidad de vibraciones ambientales generadas por ruido de tráfico y actividades humanas.
- ✓ Este método es más sensible a los cambios de las propiedades Geomecánicas y puede detectar inversiones de velocidades de onda de corte  $V_s$  a profundidad.

### Aplicaciones

- ✓ Caracterización litológica.
- ✓ Análisis de licuación de arenas.
- ✓ Control de compactación de suelos
- ✓ Estimación de los parámetros dinámicos de los materiales

### Referencias

- Park, C.B., Miller, R.D., and Xia, J., 1998b, *Ground roll as a tool to image near-surface anomaly: Technical Program with biographies*, SEG, 68th Annual Meeting, New Orleans, Louisiana, 874-877.  
Matthews, M.C., Hope, V.S., & Clayton, C.R.I., 1996, *The use of surface waves in the determination of ground stiffness profiles*, Proc. Inst. Civ. Engineers, Geotech. Engineering, 119: 84-95.

### Dispersión de las ondas superficiales

Las propiedades de dispersión de las ondas superficiales son representadas en imágenes (resultantes de las transformaciones de los registros multicanales) donde se representa un patrón de dispersión en la distribución de energía transformada. El principio fundamental del análisis de ondas superficiales (Matthews et al., 1996) se trata de que las ondas Rayleigh, viajen a una velocidad independiente de su longitud de onda en suelos uniformes y homogéneos, mientras que en sustratos estratificados donde la rigidez y la densidad son variables, la velocidad y la frecuencia se vuelven dependientes una de la otra

### Equipos

Ras-24 24 canales (Seisstronic ®)  
Geode 24 canales (Geometrics ®)  
Doremi 24 canales (SARA electrónica ®)

### Software de Inversión

Geopsy, Surfaceplus, Dinvver, incorporación de algoritmos académicos para la elaboración de las secciones de velocidad de corte  $V_s$ .

### Geófonos

4.5 [Hz] (verticales)

Figura 2. Tendido de Refracción sísmica, cuenta con 24 geófonos, sismógrafo RAS-24, marro y placa (dispositivo generador de impactos)

### Caso I: Determinación de velocidad de onda "S" para la unidad más competente

Este ejemplo es una aplicación para geotecnia donde se realiza la caracterización de la compacidad de los materiales a lo largo del eje de la cortina de una presa. Este método presenta una ventaja con respecto a los resultados de  $V_p$ , mostrando valores de  $V_s$  que presentan una inversión en los valores de velocidades a profundidad, identificando zonas de interés por su comportamiento geomecánico, como se puede observar en la sección a lo largo de la cortina donde existen variaciones de velocidades a profundidad que pueden afectar la estabilidad de la obra civil. Figura 3.

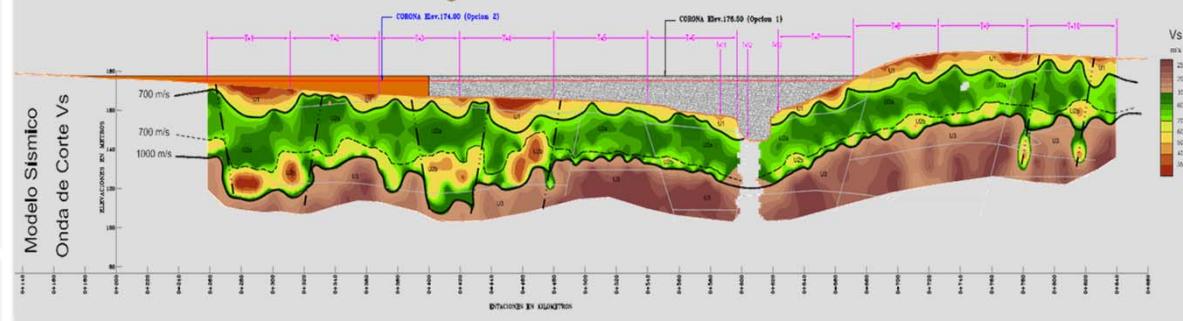


Figura 3. Sección Geosísmica de  $V_s$  a lo largo del eje

### Caso II: Caracterización elástico-dinámicas

Se estimó la distribución espacial, las propiedades elástico-dinámicas y los espesores de las capas del subsuelo a lo largo del área en la cual se implantarán nuevas estructuras civiles, ubicadas en una planta de extracción de cal. Los resultados comprenden tres unidades U1, U2, U3 presentando el contraste de velocidades a una profundidad de 5 a 6 m, y de 10 a 12 m. Figura 4.

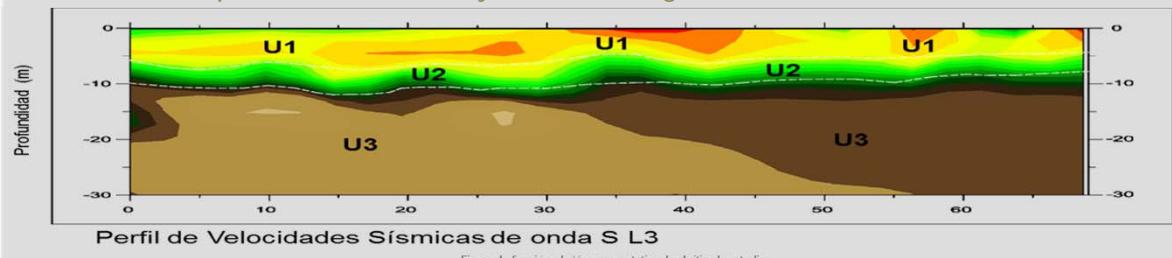


Figura 4. Sección de  $V_s$  representativa del sitio de estudio.

## Análisis de Ondas Superficiales Multicanal (MASW) Caracterización Sismo-Elástica y Estimación de Espesores



Figura 7. Estudio de refracción en la cimentación de infraestructura



Figura 8. Equipo de adquisición, Seistronix de 24 canales



Figura 9. Adquisición de datos de refracción mediante impactos.



Figura 10. Operador y equipo de adquisición Geode 24 canales



Figura 11. Tendido de refracción sísmica 12 canales con respuesta de 21Hz

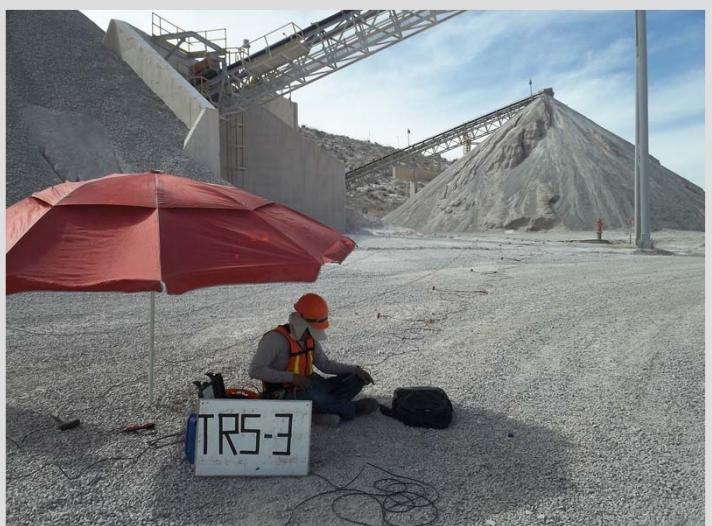


Figura 12. Estudio de refracción en la planta de Cal con 24 canales 4.5Hz



# Autocorrelación Espacial (SPAC)

## Caracterización Sismo-Elástica y Estimación de Espesores

### Introducción

Este método se ha incorporado a los estudios sísmicos el cual comenzó a desarrollarse en la década de los 90's. La naturaleza de este método aprovecha el ruido sísmico, llamado también microtremores, los cuales tienen gran potencial en zonas urbanas e industriales porque son áreas donde no se pueden usar fuentes de energía que afecten el confort de los y donde existen inversiones de velocidades que limitan la aplicación de métodos tradicionales como refracción y reflexión, el fin es obtener la onda Rayleigh registrando simultáneamente la componente vertical con múltiples receptores como se muestra en la figura 1.

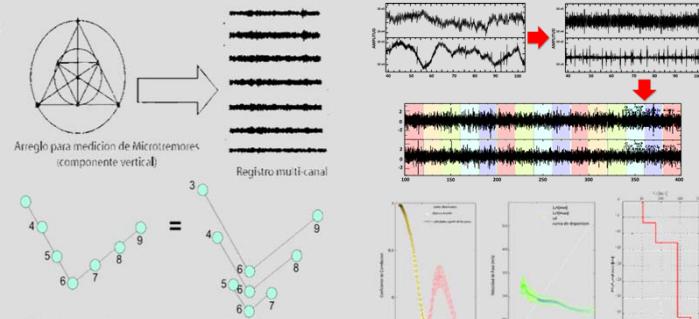


Figura 1. Arreglo clásico para el método SPAC con promedio azimuthal. Arreglo E-SPAC (Autocorrelación espacial extendida) en L con dos opciones dependiendo del número de estaciones.



Figura 3. Tendido lineal convencional con 24 geófonos de 4.5 Hz

### Caracterización elástico-dinámica mediante SPAC

Con la evolución de la capacidad de computo, se pueden manejar mayor cantidad de receptores, agrupándolos a lo largo de un tendido lineal para obtener mas detalle lateral con respecto a variaciones de velocidades símicas, esto nos permitirá obtener estructuras del subsuelo caracterizadas por su velocidad Vs. 1D, 2D y hasta 3D.

### Ventajas

- ✓ Práctico, especialmente para detección de las estructuras subterráneas poco profundas en zonas arcillosas.
- ✓ Estimación para Unidades Geosísmicas a mayor profundidad, al aumentar el tamaño de registro en tiempo y frecuencias bajas.
- ✓ Aplicable en zonas Urbanizadas.

### Aplicaciones

- ✓ Caracterización litológica.
- ✓ Evaluación de riesgo sísmico.
- ✓ Investigaciones a profundidades de centenares a miles de metros

### Referencias

- Herrmann, R. B. (1987). *Computer Programs in Seismology*, S. (7 Vols.). Louis University.
- Hitomi, M., Sumie, S., & Junpei, A. (2004). *A Method to Estimate Phase Velocities of Rayleigh Waves Using Microseisms Simultaneously Observed at Two Sites*. *Seismological Society of America*, 94, 961-976.
- Okada, H. (1998). *Microtremors as an exploration method: Geo-exploration Handbook*. *Boletín del Earthquake Investigation Committee*, 2, 1-6.
- Okada, H. (2003). *The Microtremor Survey Method*. *Geophysical monographs series*(12).
- Okada, H., Matsuhima, T., Moriya, T., & Sasatani, T. (1990). *An exploration technique using long-period microtremors for determination of deep geological structures under urbanized areas*. *Butsuri Tanshi*(43), 402-417.

### Procesamiento de ruido sísmico

La adecuación de los datos de ruido sísmico es fundamental para minimizar efectos en la correlación cruzada de ruido proveniente de fuentes asociadas a la industria, actividad humana e irregularidades en la respuesta instrumental refiriéndose a fuentes no estacionarias cercanas a los sensores, tales como remover la media, la tendencia lineal, normalización en el tiempo y un blanqueo espectral, como se muestra en la figura 2. Además se realiza el análisis de ventanas de registro largas que garantizan que se muestren adecuadamente ondas superficiales propagándose en todas direcciones, siempre que el requisito básico de la estacionalidad se ha cumplido.

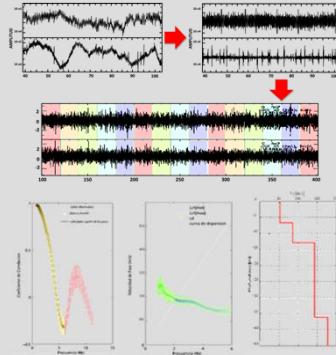


Figura 2. Procesamiento de los registros de ruido sísmico, para obtener la función de correlación, posteriormente la curva de dispersión y finalmente un perfil de velocidad de onda de corte.

### Geófonos

Los geófonos utilizados para este método aprovechan mejor el ruido sísmico de bajas frecuencias (ondas de periodo largo) con el cual se pueden estimar espesores a mayores profundidades. Los geófonos con los cuales se aplica la metodología SPAC en línea es de 4.5 [Hz] (verticales)

### Software de Inversión

Geopy, Programas de Herrmann, Macros en SAC, incorporación de algoritmos académicos para la elaboración de las secciones 2D y 3D.

### Equipos

Ras-24 24 canales (Seistrinsic ®)  
Geode 24 canales (Geometrics ®)  
Doremi 24 canales (SARA elettronica ®)

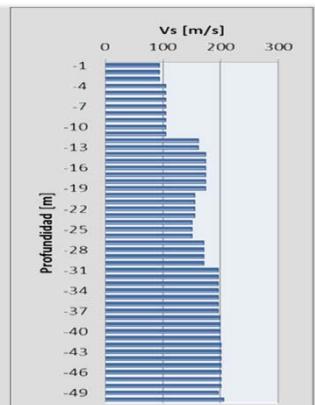


Figura 4. Perfiles de Vs representativos de la zona de interés

### Caso I: Determinación de las velocidades de onda "S" representativas de la zona de interés

El objetivo de este consistió en determinar las propiedades elástico-dinámicas representativas de este, así como los espesores de las capas del subsuelo a lo largo del área en la cual se implantarán nuevas estructuras civiles, ubicadas en la Ciudad de Villahermosa. Los resultados comprenden variaciones de velocidades de onda de corte y presentan contrastes a una profundidad de 9 a 12 m, y de 18 a 20 m. Figura 4.

### Caso II: Integración de métodos sísmicos para caracterizar el subsuelo en una obra civil

Al caracterizar el subsuelo en las inmediaciones de una obra civil al sureste de México, se aplicó métodos como SPAC y MASW, se obtuvo perfiles y secciones Geosísmicas de utilidad para el diseño estructural de esta.

La comparación entre estos métodos e información de un sondeo de penetración estándar se condensaron en secciones Geosísmicas presentando buena correlación entre los diferentes métodos y pruebas in situ. Los resultados presentan tres unidades U1, U2, U3 presentando el contraste de velocidades a una profundidad de 9 a 12 m, y de 18 a 25m. Figura 5.

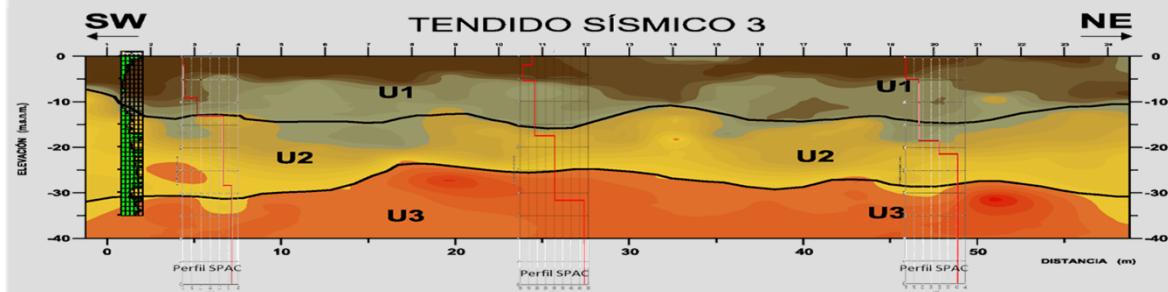


Figura 5. Sección Geosísmica con la proyección de los perfiles de SPAC en rojo

## Autocorrelación Espacial (SPAC)

### Caracterización Sismo-Elástica y Estimación de Espesores



Figura 6. Monitoreo de vibración ambiental en Taludes



Figura 7. Registro de vibración ambiental , arreglo lineal



Figura 8. Material para el método SPAC



Figura 9. Sismógrafo Geode de 24 canales de 4.5 Hz



Figura 11. Sismógrafo SARA de 24 canales de 4.5 Hz



Figura 12. Sismógrafo Seistrionix con 24 canales de 4.5 Hz, combinación de sismica pasiva y activa



# Prospección Gravimétrica

## Caracterización Geofísica-Geológica del Subsuelo

### Introducción

La gravimetría estudia las fuerzas o campos generados por cualquier cuerpo con masa.

Las concentraciones anómalas de masa, las cuales provocan aumento o disminución de la densidad, contrastan con el medio circundante y dependiendo de la sensibilidad del equipo estas pueden ser detectadas y evaluadas con precisión.

Los instrumentos de medición de la gravedad, llamados gravímetros, pueden medir diferencias muy finas en los valores de gravedad, del orden de 3 microgales

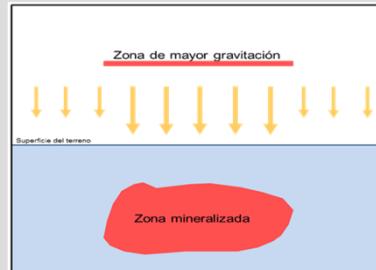


Figura 1. Cuerpos mineralizados aumentan la gravedad en una región determinada, debido a que las rocas de mayor densidad aumentan la aceleración.

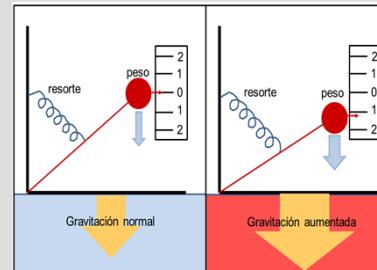


Figura 2. Principio básico de un gravímetro. Por encima de una zona de mayor gravitación, la "balanza" marca un valor elevado, debido a que el objeto sufre una mayor fuerza de atracción. El gravímetro es una "balanza" muy sensible con un peso definido que sufre las diferencias de gravedad.

### Gravímetro CG5

El gravímetro CG-5 es un sistema automatizado que mide el valor del campo gravitacional in situ y de forma puntual. Es de fácil manejo en campo y ofrece una gran productividad sin sacrificar la calidad de los datos.



Figura 3. Gravímetro CG5-AutoGrav.

### Ventajas

- ✓ Método pasivo que permite ser usado en cualquier condición geológica.
- ✓ Resolución a contrastes laterales de densidad.
- ✓ Caracterización de estructuras geológicas de diferentes tamaños.

### Aplicaciones

- ✓ Exploración de petróleo y gas.
- ✓ Exploración minera
- ✓ Mapeo geológico
- ✓ Ingeniería Civil
- ✓ Geotecnia
- ✓ Estudios geohidrológicos.
- ✓ Arqueología
- ✓ Mapeo de cavidades
- ✓ Vulcanología

### Caso I: Exploración Geohidrológica

Se utiliza el método de prospección gravimétrica para estudiar los cambios en la densidad de los materiales del subsuelo, mediante mediciones de las variaciones de la atracción de la gravedad en su componente vertical y asociarlos con la distribución de los diferentes materiales y con la presencia de fallas que pudieran delimitar el acuífero existente en la región.

En el mapa de anomalía residual de Bouguer se muestran en tonos azules los valores bajos de densidad que se asocian a materiales de relleno de la cuenca. Los cuales contrastan en gran medida con los tonos rojos que están ligados a valores altos de densidad, y por lo tanto a materiales de mayor compacidad que se asocian al basamento rocoso. De esta forma se pueden delimitar cuencas, para un mejor balance de los recursos geohidrológicos.

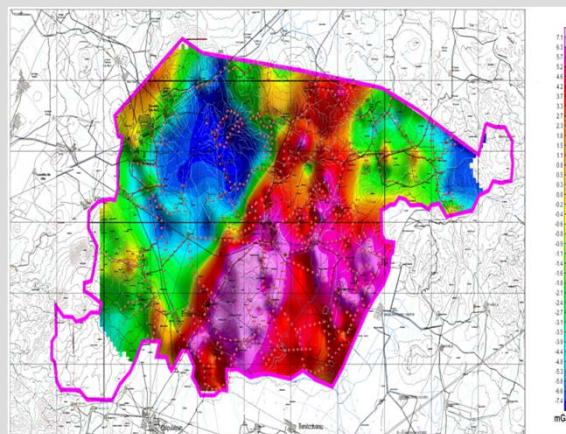


Figura 4. Mapa de residual de anomalía de Bouguer con fines geohidrológicos Acuíferos.

### Prospección Gravimétrica

La prospección gravimétrica es el método por el cual se analizan los cambios del campo gravitacional generados por los diferentes materiales de la Tierra, que al ser comparadas con la gravedad normal y después de aplicar las correcciones necesarias (mareas, deriva del instrumento, latitud, altura), dan lugar a anomalías gravimétricas.

Una correcta interpretación de las anomalías puede servir para detectar variaciones verticales y laterales de la densidad de las rocas, que puedan definir el comportamiento del subsuelo.

**Tipo de Sensor:** Cuarzo con anulación electroestática  
**Resolución:** 1 microGal  
**Desviación Estándar:** <5 microGal  
**Deriva Residual:** menos de 0.02 mGal/día  
**Compensación en la inclinación:** ±200 arc seg  
**Correcciones automáticas:** marea, inclinación del instrumento, temperatura, drift, terreno, ruido local, filtro de ruido sísmico.

**Precisión del GPS:** Estándar <15m; DGPS <3m  
**Control Remoto:** Recepción hasta 30m en línea recta  
**Temperatura de Operación:** -40°C a +45°C  
**Dimensiones:** 30 x 21 x 22 cm  
**Peso:** 8 Kg  
**Software de Interface:** SCTLITL, WINGLINK, GEOSOFT

### Caso II: Geotecnia

En lo referente a las aplicaciones en Geotecnia las mediciones deben ser de alta precisión por tratarse de objetivos de menor tamaño, después de obtener el mapa de anomalía de Bouguer, se realiza el modelado de perfiles gravimétricos, que consiste en definir un comportamiento similar a las anomalías gravimétricas observadas basados en un modelo inferido de profundidad y densidad, en términos de la geología superficial y a profundidad.

En la figura 5 se presenta una aplicación del método en proyectos geotécnicos

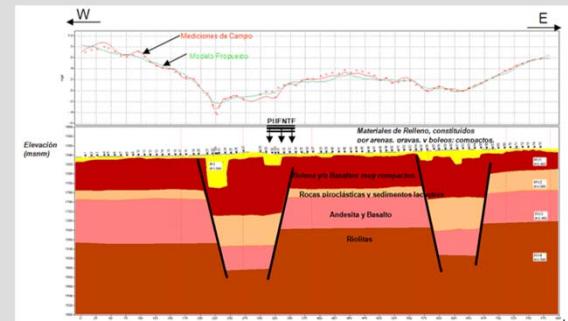


Figura 5. Perfil Gravimétrico para un proyecto geotécnico.

### Referencias

- Blakely, 1996. Potential Theory in Gravity and Magnetic Applications, Cambridge, United Kingdom.
- Caputo, Michele, 1967. The gravity field of the earth: From classical and modern methods, New York, USA.
- Chen, G.J., 2002. Analysis of pumping in multilayered and poro-elastic half space: Computers and Geotechnics, 31, 1-6.
- Cooper, H.H., Jacob, C.E., 1946. A generalized graphical method for evaluating formation constants and summing well logs. Geophysics 11, 37-63.
- Córdova, A., Díaz, J., Fernández, R.N., 1978. Studies of isotopic hydrology of the basin of Mexico: annotated bibliography and interpretation. Journal of Hydrology, 199, 346-376.
- Fetter, C.W., 1988. Applied Hydrogeology. Columbus Ohio, Merrill, 3a. Edición, 691 p.
- Freeze, R.A., Cherry, J.A., 1979. Groundwater. Englewood Cliffs, NJ, EE.UU., Prentice Hall, 604.
- Gogu, R.C., Carabin, G., Hellot, V., 2001. GIS-based hydrogeological databases and groundwater modelling. Hydrogeology Journal, 9, 555-569.
- Garland, George David, 1977. The earth's shape and gravity. Oxford.

## Prospección Gravimétrica

### Caracterización Geofísica-Geológica del Subsuelo



Figura 6. Adquisición gravimétrica en la República del Ecuador.



Figura 7. Base Gravimétrica en el Estado Plurinacional de Bolivia



Figura 9. Adquisición gravimétrica en la República de Kirguisa (Kirguistán)



Figura 8. Adquisición gravimétrica en la República de la India



Figura 10. Adquisición gravimétrica en Canadá.



# Prospección Magnetométrica

## Caracterización Geológica y Exploración Minera

### Introducción

El método magnético se basa en las propiedades naturales fundamentales de la Tierra debido a su estructura, la Tierra se comporta como un dinámico; posee un núcleo metálico (mezcla de hierro y níquel) que, en contacto con un manto interno viscoso en movimiento, genera un campo eléctrico que a su vez induce un campo magnético.

Los sensores utilizados en la prospección magnetométrica detectan anomalías o desviaciones del valor normal del campo geomagnético debido a la presencia de materiales ferromagnéticos, diamagnéticos y/o paramagnéticos ya que la mayoría de las rocas contiene pequeñas cantidades de óxidos de hierro.

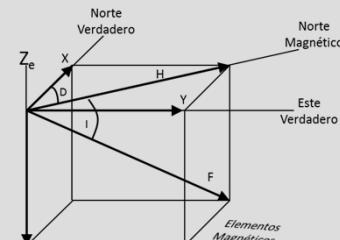


Figura 1. El campo magnético en un punto de la Tierra se puede descomponer en 7 componentes:  
 D – Declinación Magnética.  
 I – Inclinación Magnética.  
 Z – Componente Vertical del Campo Magnético.  
 X – Componente horizontal del Campo Magnético en la dirección del Norte Magnético.  
 Y – Componente horizontal del Campo Magnético en la dirección Este-Oeste.  
 F – Intensidad del Campo Magnético Terrestre, Campo Magnético Terrestre o Campo Total.  
 H – Componente del Campo Magnético Terrestre contenida en el plano XY.

### Susceptibilidad Magnética

La susceptibilidad magnética es el grado de magnetización de un material, en respuesta a un campo magnético. Depende del contenido porcentual en volumen de magnetita que es un mineral ferro-magnético de susceptibilidad relativamente alta. Es un mineral común en rocas ígneas y metamórficas y en menores cantidades en rocas sedimentarias.



Figura 2. Magnetita

### Materiales Ferromagnéticos

Los materiales se pueden clasificar magnéticamente, según el valor de su susceptibilidad magnética, en tres grupos principales: Diamagnéticos (valores muy bajos de susceptibilidad), Paramagnéticos ( $10^{-3}$  a  $10^{-5}$  unidades S.I.) y materiales Ferromagnéticos ( $10^2$  a  $10^5$  unidades S.I.). El hierro es el material ferromagnético típico de la corteza y juega un papel importante en el comportamiento del campo magnético terrestre.

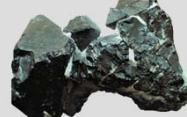


Figura 3. Roca con Hierro.

### Magnetómetros

Los magnetómetros son instrumentos que se utilizan para medir la fuerza y en algunos casos la dirección del campo magnético.

Los magnetómetros escalares miden la fuerza total del campo magnético mientras que los vectoriales tienen la capacidad de medir la componente del campo en una dirección particular.



Figura 4. Magnetómetro modelo ENVI-Scintrex Inc.

### Magnetómetro ENVI-Scintrex

Adquisición automatizada de datos

- Rango de Operación: 23,000 a 100,000 nT
- Resolución:  $\pm 0.1$  nT
- Sensibilidad: 0.1 @ 2 seg. muestras
- Ciclos de Grabación: 0.5, 1 ó 2 segundos
- Memoria: 28,000 lecturas
- Display: LCD 260 x 40
- Temperatura de Operación: -40°C + 65°C



Figura 5. Magnetómetro tipo Overhauser de GEM Systems.

### Magnetómetro Overhauser

Adquisición automatizada de datos

- Rango de Operación: 20,000 a 120,000 nT
- Resolución:  $\pm 0.1$  nT
- Sensibilidad: 0.022 @ 2 seg. muestras
- Ciclos de Grabación: 0.2, 0.5, 1, 2, 3 ó 5 seg.
- Memoria: 512 Mb
- Display: LCD 140 x 30
- Temperatura de Operación: -55°C + 50°C

### Ventajas

- ✓ Levantamiento de datos rápido y sencillo.
- ✓ Se pueden cubrir áreas grandes en tiempo relativamente rápidos.
- ✓ Alta sensibilidad.
- ✓ Sincronización con sistemas de posicionamiento global.

### Aplicaciones

- ✓ Exploración minera
- ✓ Mapeo Geológico
- ✓ Geotecnia
- ✓ Arqueología
- ✓ Geotermia

### Caso I: Minería

El método de prospección magnetométrica se aplicó a la exploración minera, con el objetivo principal de detectar zonas donde existe acumulación de Hierro. Una vez realizada la adquisición de datos en campo se procedió a efectuar las correcciones correspondientes y realizar los procesos de Reducción al Polo, donde se elimina el efecto de la inclinación del campo magnético y se logra obtener la posición más precisa de las estructuras y anomalías magnéticas.

El cálculo de la Señal Analítica, resalta las anomalías magnéticas producidas por las discontinuidades geológicas de mediana a corta longitud de onda. La Deconvolución de Euler, determina la profundidad de la fuente que origina la anomalía magnética.

La Figura 6 muestra la anomalía producida por un cuerpo cilíndrico, donde es claro un incremento al centro de la zona prospectada.

Figura 6. Mapa de Deconvolución de Euler sobreimpuesto en el mapa de Campo Magnético Total.

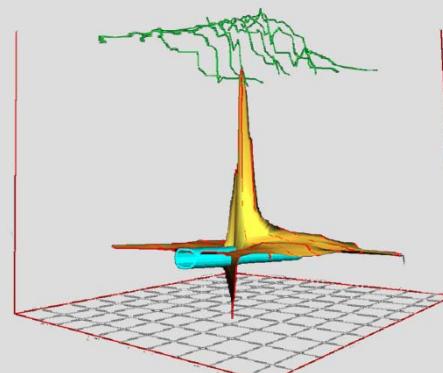


Figura 6. Modelo 3D construido con base en la información de Campo Magnético Total, Reducción al polo, Señal Analítica y Deconvolución de Euler.

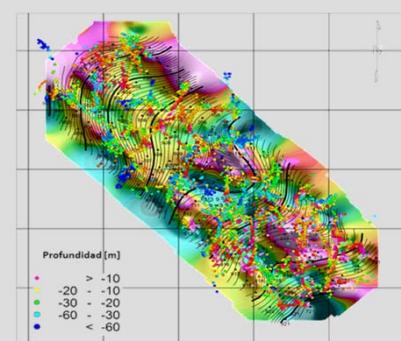


Figura 7. Mapa de Deconvolución de Euler sobreimpuesto en el mapa de Campo Magnético Total.

### Caso II: Exploración Minera

Se realizó un estudio de exploración magnetométrica para reconocer la respuesta magnética del sitio y continuar con trabajos sistemáticos de exploración para una mina de Hierro

El estudio magnetométrico terrestre en modo continuo es un método de alta densidad de datos, obtiene mediciones cada segundo, generando una cantidad considerable de información la cual es de gran utilidad y detalle.

Todos los procesos de la reducción de datos magnéticos se elaboraron con la ayuda software, como son: Emigma y QC Tools de Petros Eikon, Oasis Montaj de Geosof, Winglink Geosystem.

### Referencias

- Blakely, 1996. Potential Theory in Gravity and Magnetic Applications, Cambridge, United Kingdom.
- Garland, George David, 1977. The earth's shape and gravity, Oxford.
- Environmental Engineering Geophysics, Prem V. Sharma, Cambridge University, UK, 2003.
- Applied Geophysics Second Edition, W.M. Telford, L.P. Geldart, R.E. Sheriff, Cambridge University Press, United Kingdom 1990.
- David V. Fitterman, Mark T. Stewart, "Transient electromagnetic sounding for groundwater" Geophysics, Vol. 51, No. 4, April, 1986.
- THOMPSON, D.T., EULDPH: A new technique for making computer-assisted depth estimators from magnetic data, Geophysics, Vol. 47, No. 1 (1982).
- WINGLINK, User's Manual, Edition 4, © Gosoftware srl, Milan, Italia, 2001.
- GEOSOFT, User's Manual, Edition 2, © Geosoft Inc, USA, 2000.

# Prospección Magnetométrica

## Caracterización Geológica y Exploración Minera



Figura 9. Levantamiento Magnetométrico.



Figura 10. Magnetómetro EVNI-Scintrex .



Figura 11. Adquisición de datos Magnéticos con un magnetómetro ENVI-Scintrex



Figura 12. Levantamiento Magnético



Figura 13. Adquisición de datos en campo.



Figura 14. Magnetómetro Geometrics



# Sondeo Eléctrico Vertical

## Caracterización Geofísica y Monitoreo de Sitios Contaminados

### Introducción

El Sondeo Eléctrico Vertical, es una técnica geofísica empleada para determinar el valor de la resistividad del subsuelo, y establecer un modelo litológico estructural. A pesar que existen técnicas más modernas y precisas para la medición de la resistividad, el Sondeo Eléctrico Vertical sigue siendo de utilidad por su sencillez tanto en la operación en campo como en el procesamiento.

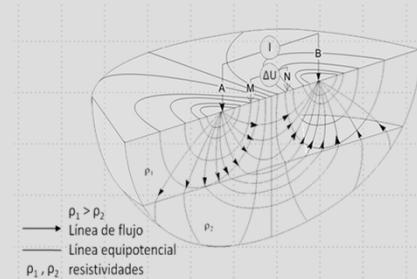


Figura 1. A través del dipolo (A,B) se inyecta una corriente (I). El potencial eléctrico se forma en función de la distribución de resistividades en el suelo. El voltaje (DV) se mide en el segundo dipolo (M, N).

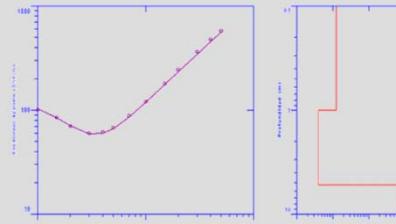


Figura 2. Los resultados de un Sondeo Eléctrico Vertical se representan en curvas, en donde el eje de abscisas corresponde con la abertura AB/2 y las ordenadas corresponden con los valores de resistividad aparente calculadas para cada punto. Una vez interpretando esa curva obtenemos un modelo litológico del suelo con espesores y resistividades de los diferentes estratos.



Figura 3a. Logística de campo para la implementación del Sondeo Eléctrico Vertical

### Resistivímetro

El equipo para mediciones geoelectrísticas, permite obtener valores de potencial eléctrico, así como la corriente inyectada al subsuelo.

El equipo funciona con un motor-generador o baterías, que permite investigar acuíferos someros a poca profundidad, o la composición geológica del suelo con fines de caracterización.

### Ventajas

- ✓ Sistemas de potencias reescalables.
- ✓ Control de calidad den tiempo real.
- ✓ Mediciones precisas y eliminación de ruido (polarización de los electrodos y corrientes telélicas)
- ✓ Profundidad de penetración controlada por el tamaño de dipolo.
- ✓ Se puede realizar en cualquier condición geológica.

### Aplicaciones

- ✓ Caracterización litológica.
- ✓ Determinar la presencia de zonas saturadas
- ✓ Localización de cuerpos conductores
- ✓ Estimación cualitativamente de la calidad de agua subterránea
- ✓ Zonificación de contaminantes
- ✓ Estudios de protecciones catódicas

### Caso I: Zonificación Geoelectrónica

La Figura 4 ilustra un perfil realizado a partir de Sondos Eléctricos Verticales, donde la finalidad es delimitar la zona con mejores características para albergar agua subterránea. La distribución de resistividades en el perfil muestra cambios litológicos en sentido vertical y horizontal; en la capa de cobertura presenta resistividades asociadas con materiales arenosos. Subyaciendo y al centro del perfil se observan valores resitivos entre 5 y 30 ohm·m, asociados con intercalaciones de materiales que corresponden al paquete granular y donde se estima una zona acuífera de poco aporte.

Los valores resitivos mayores de 30 ohm·m se asocian con roca fracturada a la que se le asocia una buena permeabilidad y capacidad de alojar agua subterránea que puede ser extraída por medio de pozos profundos.

### Referencias

- Auken E., Pellerin L. Christensen N. & Sørensen K. (2006). A survey of current trends in near-surface electrical and electromagnetic methods. Society of exploration geophysicist.
- Bolshakov D., Modin I., Pervago E., & Shevkin V. (1995). Anisotropy effects investigations by resistivity method in some inhomogeneous media. Geological faculty.

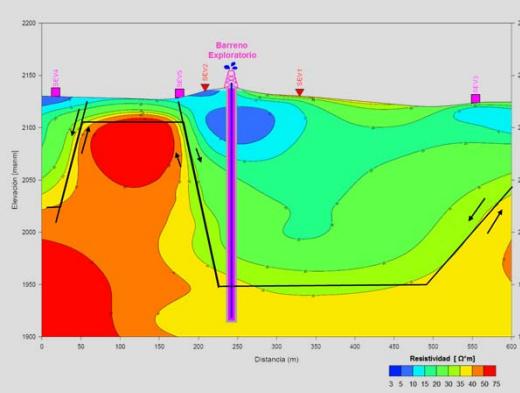


Figura 4. En la figura se aprecia una Sección Geoelectrónica, donde la zona de interés geohidrológico es aquella que presenta resistividades mayores a los 30 ohm·m.

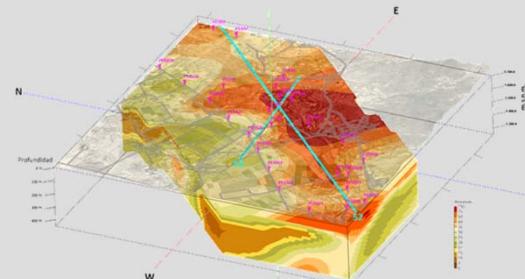


Figura 5. Modelo 3D del mapa de resistividad hasta una profundidad de 40m. Permite apreciar y definir la distribución electroestratigráfica en la zona y asociarla con estructuras geológicas presentes.

### Sondeo Eléctrico Vertical

Para la aplicación del método en campo, se distribuyen los electrodos con un orden definido, denominado dispositivo eléctrico. En la técnica Schlumberger, el arreglo consiste en cuatro electrodos alineados y simétricos respecto al centro de sondeo, utilizando la separación entre los electrodos de potencial, que es pequeña en relación con los electrodos de corriente (AB/5>MN>AB/20).

Para conocer los valores de resistividad a mayores profundidades, se incrementa la separación de los electrodos de potencial, y de forma escalonada los de corriente, para que la corriente eléctrica atraviese los estratos del suelo cada vez a mayor profundidad.



Figura 3b. Equipo de Resistividad para la realización de Tierras Físicas y SEV's.

### Caso II: Caracterización litológica del suelo

El método de Sondos Eléctricos Verticales fue utilizado para realizar un modelo tridimensional electroestratigráfico de la zona de estudio, donde se realizaron 25 Sondos Eléctricos Verticales, a fin de determinar la resistividad eléctrica del suelo para establecer un modelo litológico estructural.

El modelo de la Figura 5 muestra valores de resistividad hasta una profundidad de 40m asociados con materiales aren-arcillosos al poniente del sitio de estudio. Por el contrario en la zona oriental y centro, se muestran los valores resitivos mayores asociados con materiales de relleno y roca fracturada. Dichos materiales aunque pueden ser permeables, se consideran parcialmente drenados.

### Referencias

- Cataldi A., Zambrano F. y Rojas H. (2006). Aplicación de Métodos de Resistividad en Investigación Hidrológica.
- Custodio E. y Llamas R. (2001) Hidrología subterránea. Barcelona España
- Orellana E. (1982). Prospección geoelectrónica en corriente continua. Vol. 1. Madrid.
- Telford W., Geldart L., Sheriff R. (1990). Applied Geophysics. Cambridge University Press.

# Sondeo Eléctrico Vertical

## Caracterización Geofísica y Monitoreo de Sitios Contaminados



Figura 6. Adquisición de Sondeo Eléctrico vertical aplicado a la geohidrología



Figura 7. Caracterización litológica mediante SEV



Figura 8. Zonificación Geoeléctrica



Figura 9. Monitoreo de sitios contaminados



Figura 10. Adquisición de Sondeo Eléctrico Vertical con fines ambientales



Figura 11. Monitoreo de sitios contaminados



# Tomografía de Resistividad Eléctrica

## Caracterización Geofísica-Litológica Detallada del Subsuelo

### Introducción

El método de Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE) consiste en la inyección de corriente continua o de baja frecuencia en el terreno mediante un par de electrodos y los voltajes mediante otro par de electrodos.

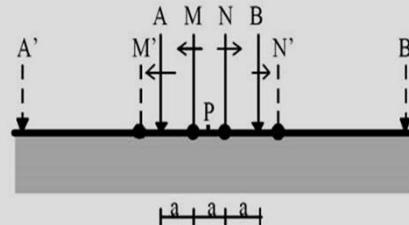


Figura 1. Se inyecta una corriente a través del dipolo (A,B). El potencial eléctrico se forma en función de la distribución de resistividades en el suelo y se mide en un segundo dipolo (M,N), para adquirir un punto. Se traslada para medir el siguiente punto y se incrementa la separación para incrementar la profundidad de investigación, hasta obtener el total de puntos del arreglo.

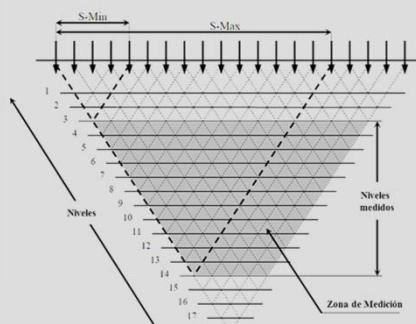


Figura 2. Representación de la zona de medición con el método de Tomografía de Resistividad Eléctrica.

La Tomografía Eléctrica tiene por objetivo específico determinar la distribución real de la resistividad del subsuelo a lo largo de un perfil de exploración a partir de los valores de resistividad aparente. El perfil resistivo se genera con un arreglo multielectrónico con el cual se obtienen datos de resistividad del subsuelo, los cuales son acotados de acuerdo a parámetros de campo establecidos, lo que permite de manera automática eliminar y repetir el dato en caso de exceder las tolerancias permisibles.

### Sistema de Tomografía

El arreglo multielectrónico se sincroniza de manera inteligente con el Sistema de Resistividad ARES G4®, fabricado por GF Instruments.



### Unidad de Control

Memoria	16MBit
Interface	RS232 / USB
Alimentación	12 V
Dimensiones	13 x 17 x 39 cm
Peso	3.5 Kg

### Transmisor

Potencia	300 a 850 W
Corriente	hasta 2.0 A
Voltaje	10 a 550 V (1100 V <sub>p-p</sub> )
Precisión	0.1%

### Receptor

Impedancia de entrada	20 MW
Rango de voltaje de entrada	±5 V
Filtrado de Frecuencias	50 o 60 Hz
Precisión	0.1%

### Arreglos Compatibles

Wenner-Schlumberger, Wenner Alpha / Beta / Gamma, Dipolo-Dipolo, Polo-Dipolo. Marcha atrás Polo-Dipolo, Polo-Polo, MGM, Ecuatorial Dipolo - Dipolo.

Figura 3. Unidad de Control ARES G4  
Tomografía de Resistividad Eléctrica.

### Software

RES2DINV, RES3DINV

### Ventajas

- ✓ Visualización in-situ de datos e imágenes 2D.
- ✓ Buen contraste de variaciones laterales.
- ✓ Excelente resolución en la parte somera hasta la profundidad de 50m.
- ✓ Complementa información geosísmica.

### Caso I: Caracterización Litológica.

Se presenta un caso donde se realizaron mediciones por el método de Tomografía de Resistividad Eléctrica, para un proyecto de desarrollo habitacional, donde se definieron zonas de mayor debilidad asociadas con fracturas y cavidades. Este proyecto involucró un programa de 31 líneas de entre 1000 y 1400m de longitud con un espaciamiento eléctrónico de 3 metros.

Los resultados apoyaron en la toma de decisiones desde una perspectiva geotécnica determinando la zona anómala como un material de granulometría media a gruesa asociado con tobas arenosas, cuyas cavidades y fracturamientos exigen mayor inversión en el diseño estructural de la zona habitacional.

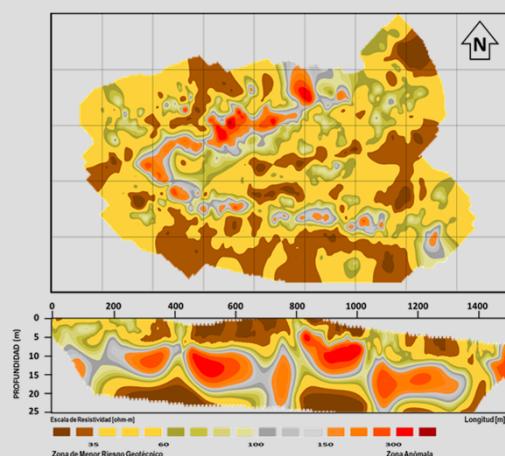


Figura 4. Mapa y perfil de resistividad donde es posible apreciar zonas anómalas asociadas con la presencia de cavidades y fracturamientos.

### Caso II: Evaluación de Riesgo Geológico.

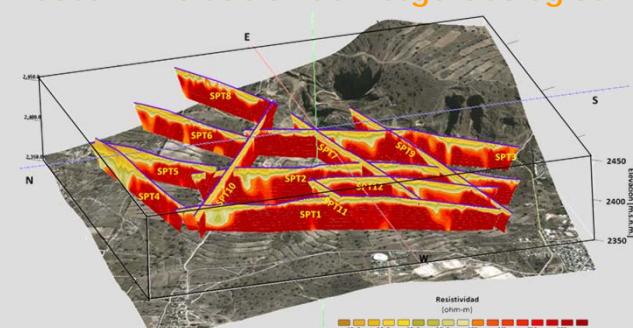


Figura 5. Perfiles de Resistividad, permiten apreciar diferentes características en los materiales del subsuelo, en especial zonas conformadas por materiales menos consolidados (tonos claros), los cuales implican zonas de riesgo para el desplante de obras civiles.

La aplicación del método de Tomografía de Resistividad Eléctrica en este proyecto ayudó a conocer la distribución de la resistividad en las capas del subsuelo, definir los tipos de roca que existen y delimitar las zonas de riesgo conformadas por materiales menos compactos o que presentan mayor alteración, lo que implica un riesgo para obras civiles.

La Figura 5, muestra perfiles de resistividad con valores mayores a 100 ohm·m fueron asociados con roca volcánica compacta sólida y competente para la edificación de obras civiles de mayores dimensiones y los cambios laterales en tonos claros que se aprecian en los perfiles, con valores resitivos de 30 a 100 ohm·m, asociados con materiales arenosos compactos y/o roca fracturada, donde se recomienda realizar Sondeos de Penetración Estándar (SPT), para correlacionarlos con resultados geofísicos y contribuir en el proyecto a realizar.

### Referencias

- Koefoed O. Geosounding Principles 1. Resistivity Sounding Measurements. Elsevier Science Publishers B.V. 1979.
- Lake, M.H. and Barker, R.D. 1995. Least-squares deconvolution of apparent resistivity pseudosections. Geophysics, 60, 1682-1690.
- Orellana, E. Prospección Geoeléctrica por corriente continua. Parainfo, Madrid España. 1982.

# Tomografía de Resistividad Eléctrica

## Caracterización Geofísica-Litológica Detallada del Subsuelo



Figura 6. Línea de adquisición de Tomografía Eléctrica en zona de ampliación de un Aeropuerto.



Figura 7. Aplicación del método de Tomografía Eléctrica en estudios de pasivos ambientales.



Figura 8. Estudios de Resistividad Eléctrica, en vialidades para detectar discontinuidades del subsuelo



Figura 9. Tomografía Eléctrica para caracterización de intrusión salina.



Figura 10. Detección de Cavidades en proyectos de evaluación de riesgos geológicos.



Figura 11. Tomografía de Resistividad Eléctrica en Desarrollos Hoteleros, Cancún Quintana Roo, México.



# Polarización Inducida

## Exploración Minera

### Introducción

El método de Polarización Inducida (IP) es comúnmente aplicado en la exploración minera. Consiste en medir la cargabilidad del terreno. Se inyecta una corriente eléctrica de alto voltaje en el terreno y al interrumpirse ésta, se estudia cómo queda cargado, y en cómo se produce el proceso de descarga eléctrica.

Desde hace décadas el método de la Polarización Inducida ha sido aplicado exitosamente en la exploración de yacimientos minerales.

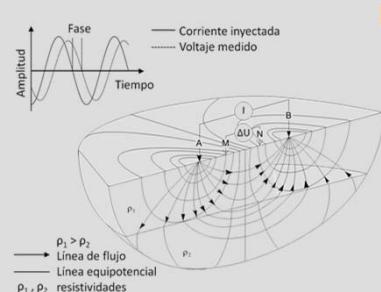


Figura 2. A través del dípolo (A,B) se inyecta una corriente alterna. El potencial eléctrico se forma en función de la distribución de resistividades en el suelo. En el segundo dípolo (M, N) se miden voltaje y fase (Gráfica: Knodel et al., 1997).

### Polarización Inducida (IP)

La Polarización Inducida (IP), es causada por una reacción de transferencia de electrones en una corriente inducida entre electrolitos y minerales metálicos. La corriente inyectada es interrumpida y la diferencia de potencial medida, no decae a cero instantáneamente. Este tiempo de decaimiento es del orden de segundos y las medidas se pueden realizar en el dominio del tiempo si la tensión se mide en función del tiempo. El método se aplica en la exploración de metales, aguas subterráneas y contaminantes.

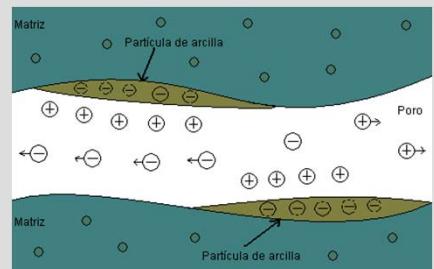


Figura 1. La polarización de membrana es causada por la impedancia de interface entre dos medios que resulta cuando una capa de difusión es lo suficientemente gruesa para bloquear el poro, de manera que hay una transferencia de iones de cierto tamaño y polaridad; reduciendo la movilidad de las cargas causando un almacenamiento que crea una "membrana" polarizada (Orellana 1974)

### Sistema de Tomografía

Empleamos el sistema de tomografía de resistividad GDD Instruments Inc.

#### Receptor Geofísico GRx8-32

Generador de señal cuadrada de transmisión - 24 canales para la adquisición de datos tomográficos. El cual puede visualizar valores de de cargabilidad, resistividad y permite supervisar el nivel de ruido y comprobar la forma de la onda de la tensión primaria.



Figura 3. Sistema GRx8-32

#### Transmisor Tx-II (5000 W-2400V-10A)

El Transmisor Tx-II, se utiliza para los sondeos de polarización inducida por el dominio del tiempo. Su ciclo de transmisión es de 2 segundos ON, 2 segundos OFF, sin embargo pueden usarse otros períodos de tiempo, como el usuario lo desee. Es robusto y puede operar en condiciones climáticas extremas (-40 C a 65 C). Se puede alimentar directamente desde una fuente de 240 VAC, como un generador portátil. El transmisor Tx-II transmite hasta 10A en suelos conductores o puede inyectar hasta 2400V en un suelo muy resistivo con una potencia total de 5000W.



Figura 4. Transmisor Tx-II

### Ventajas

- ✓ Buena respuesta en la prospección de sulfuros.
- ✓ Útil en la localización de menas metálicas.
- ✓ Apoya en la detección de depósitos de minerales profundos.

### Aplicaciones

- ✓ Prospección de yacimientos metálicos.
- ✓ Intrusión Salina.
- ✓ Detección de contactos geológicos.
- ✓ Detección de cuevas, cavidades y karst.

### Caso I: Minería

Se presenta un caso donde se hicieron mediciones de PI en su variante en tiempo. Se localizó zonas donde la cargabilidad está asociada a la presencia de materiales metálicos donde fluyen cargas eléctricas ante la presencia de un potencial eléctrico, los cuales son de gran interés para la exploración minera. Se utilizó un arreglo de tipo gradiente que permite un mapeo lateral. Con base en los resultados obtenidos se definió dos zonas con posible interés geológico-minero, una de ellas localizada al sur del mapa que muestra valores altos de cargabilidad y resistividades bajas así mismo una zona más al noreste como se aprecia en la figura 5.

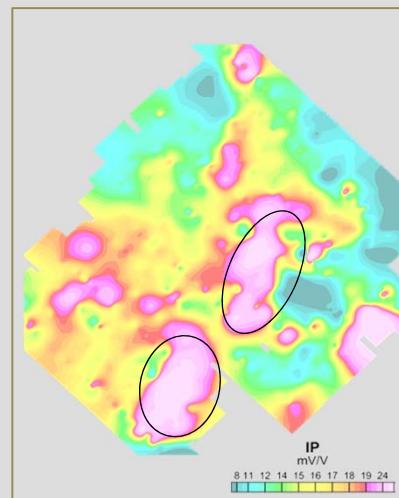
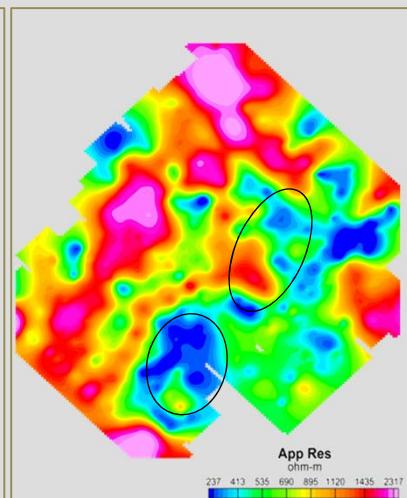


Figura 5. Mapas de Resistividad y Cargabilidad. Las zonas anómalias se muestran dentro de un círculo



### Referencias

- Butler, D., 2005. Near-Surface Geophysics. Society of Exploration Geophysics. Oklahoma, Estados Unidos.
- Kemna, A., Tomographic inversion of complex resistivity - Theory and application: Tesis de doctorado, Universidad de Bochum, 2000.
- Kemna, A., Blaney, A., Slater, L., Cross-hole IP Imaging for engineering and environmental applications. Geophysics 69, 2004.
- Orellana, E. 1972. Prospección Geofísica en Corriente Continua. Paralíptico, Madrid, España.
- Reynolds, J. 1997. An Introduction to Applied and Environmental Geophysics. Wiley Paperbacks, Reino Unido.
- Sherif, R., 2002. Encyclopedic Dictionary of Applied Geophysics. Society of Exploration Geophysicists.
- Sumer, J.S., 1976. Principes de Induced Polarization para Geophysical Exploration. Elsevier Scientific Publishing Company. Amsterdam, Países Bajos.
- Telford, W. et Al., 1990. Applied Geophysics. Cambridge University Press. Reino Unido.

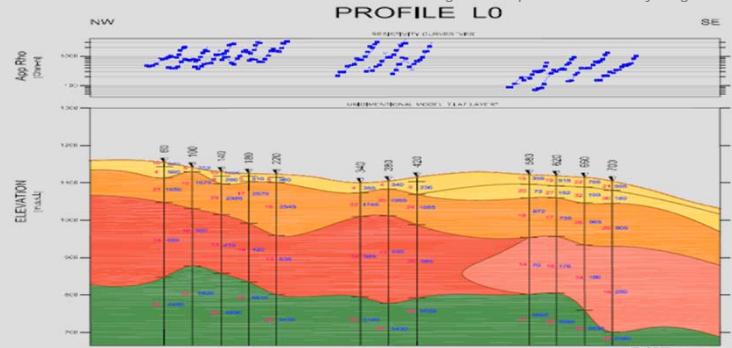


Figura 6. Perfiles de Sondeo Eléctrico Vertical con Resistividad Aparente y Cargabilidad

# Polarización Inducida

## Exploración Minera



Figura 7. Operador del receptor GRx8-32 de GDD Instruments Inc.



Figura 8. Transmisor TX-II con planta generadora de 8000W.



Figura 9. Materiales utilizados en los sondeos de Polarización Inducida



Figura 10. Instalación del electrodo impolarizable compuesto por sulfato de cobre



Figura 11. Brigada de adquisición IP.



Figura 12. Receptor GRx8-32 en operación sobre las líneas adquiridas de IP.



# Polarización Inducida Espectral

## Caracterización Geofísica y Monitoreo de Sitios Contaminados

### Introducción

Desde hace décadas el método de la Polarización Inducida ha sido aplicado exitosamente en la exploración de yacimientos minerales. Los componentes metálicos de las menas dan origen a un efecto IP marcado, manifestándose en altas cargabilidad.

En la actualidad el mismo efecto causado por elementos metálicos se está utilizando para caracterizar sitios contaminados por metales y monitorear trabajos de remediación. Para aplicaciones ambientales la Polarización Inducida Espectral es de particular utilidad.

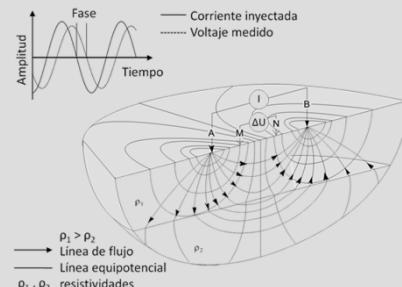


Figura 1. A través del dipolo (A,B) se inyecta una corriente alterna. El potencial eléctrico se forma en función de la distribución de resistividades en el suelo. En el segundo dipolo (M, N) se miden voltaje y fase (Gráfica: Knodel et al., 1997).



### Sistema de Tomografía

Empleamos el sistema de tomografía de resistividad compleja de Zonge International, Inc. (descrito en detalle en Daily et al., 1996).

#### Receptor Geofísico GDP32ii

Generador de señal cuadrada de transmisión - 8 canales para la adquisición de datos tomográficos - Rango de frecuencias: 0.016 a 1024 Hz - Mediciones de fase de alta precisión:  $\pm 0.5$  mrad.

### Ventajas

- ✓ Sensibilidad elevada de la fase a presencia de metales disueltos y precipitados.
- ✓ Fase y/o resistividad imaginaria que se correlaciona con diferentes tipos de contaminantes.
- ✓ Acceso a propiedades hidráulicas del suelo.
- ✓ Mayor resolución espacial que métodos directos.
- ✓ Aplicaciones en la superficie y cross-hole.
- ✓ Incluye estudio convencional de tomografía eléctrica.

### Aplicaciones ambientales

- ✓ Caracterización litológica.
- ✓ Caracterización hidrogeológica.
- ✓ Delineación de plumas contaminantes.
- ✓ Caracterización geoquímica de plumas contaminantes (correlación con datos de métodos directos).
- ✓ Monitoreo de migración de plumas.
- ✓ Monitoreo de tanques.
- ✓ Monitoreo in-situ de lixiviación.
- ✓ Monitoreo del funcionamiento de barreras activas para el tratamiento de aguas subterráneas contaminadas.

### Polarización Inducida Espectral

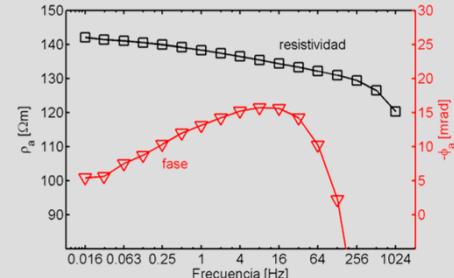


Figura 2. Espectros típicos de valor absoluto y fase de la resistividad. El valor absoluto se asocia con pérdidas óhmicas y caracteriza salinidad, saturación y porosidad. La fase a su vez se asocia con efectos capacitivos evocados por (1) metales y/o (2) efectos de polarización de la interfaz sólido-líquido.

La Polarización Inducida Espectral es un método geoeléctrico basado en la medición de la impedancia compleja del subsuelo. A través de las amplitudes de la corriente inyectada y el voltaje medido así como el desfase entre corriente y voltaje (véase Figura 1) se determinan el valor absoluto y la fase de la resistividad o bien la parte real y la imaginaria de la resistividad. Las mediciones se realizan típicamente con corrientes alternas y con frecuencias en el rango desde un milihertz a pocos kilohertz.

#### Multiplexor MUX-30

Adquisición automatizada de datos tomográficos con el software ZETA - Arreglo preferentemente dipolo-dipolo (todo tipo de arreglo posible)

- 30 (60, 90, etc.) electrodos de acero (también Cu-CuSO4).

#### Software de Inversión

Res2DInv, UBC, Enigma (comercial) - CRTomo (académico, colaboración con la Universidad de Bonn, Alemania).

### Caso I: Monitoreo de Remediaciόn

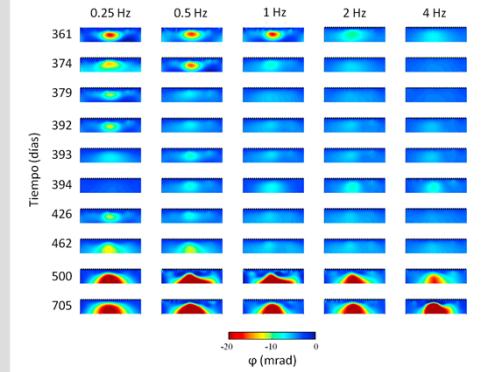


Figura 4. Imágenes de fase de un estudio de bioremediación. Se observan fases elevadas durante y después de los períodos de inyección (1<sup>ra</sup> inyección: día 361 a 426, fin de la 2<sup>da</sup> inyección: día 450). En este caso las fases altas se asocian con uranio precipitado (Gráfica: Modificada de Flores Orozco et al., 2011).

### Caso II: Caracterización de Hidrocarburos

Este ejemplo subraya el potencial del método para la caracterización de contaminaciones por hidrocarburos. El sitio estudiado por Kemna et al. (2004) presenta extensas contaminaciones de keroseno. La geología del sitio está caracterizada por una secuencia de sedimentos fluviales (Figura 5). Los hidrocarburos (LNAPL, concentraciones de ~1g/kg) se encuentran encima del nivel freático en una profundidad de 7 a 8 m. Figura 5 muestra la parte real y la parte imaginaria de la conductividad (inverso de la resistividad) así como la fase para 0.125 Hz. La fase muestra valores elevados sobre todo en la zona impactada por los hidrocarburos la cual no se llega a distinguir en las imágenes de conductividad (parte real y parte imaginaria).

#### Referencias

- W. Daily, A. Ramirez, K. Zonge, A unique data acquisition system for electrical resistance tomography. Proc. Symp. Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems, Environ. Eng. Geophys. Soc., 1996
- Flores Orozco, A., Williams, K.H., Long, P.E., Hubbard, S.S., Kemna, A., Using complex resistivity imaging to infer biogeochemical processes associated with bioremediation of a uranium-contaminated aquifer. Journal of Geophysical Research 111, 2011
- Kemna, A., Tomographic inversion of complex resistivity - Theory and application: Tesis de doctorado, Universidad de Bocum, 2000
- Kemna, A., Binely, A., Slater, L., Cross-hole IP imaging for engineering and environmental applications. Geophysics 69, 2004.

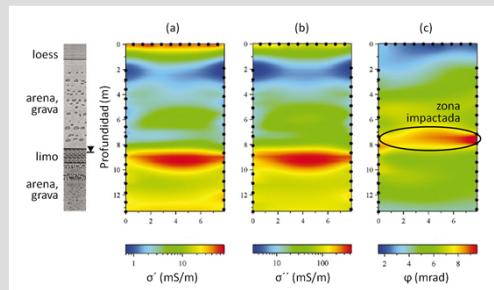


Figura 5. La parte real (a) así como la parte imaginaria (b) de la conductividad compleja están dominadas por la litología estratificada del sitio estudiado. La fase a su vez presenta fases significativamente elevadas en la región impactada por los hidrocarburos (Gráfica: Modificada de Kemna et al., 2004).

# Polarización Inducida Espectral

## Caracterización Geofísica y Monitoreo de Sitios Contaminados



Figura 6. Equipo de adquisición de Polarización Inducida en Fase (ZT-30, GDP32ii, MUX-30)



Figura 7. Brigada de trabajo para la toma de datos de SIP



Figura 8. Colocación de Electrodos conectados al MUX-30, con una separación de 3m.

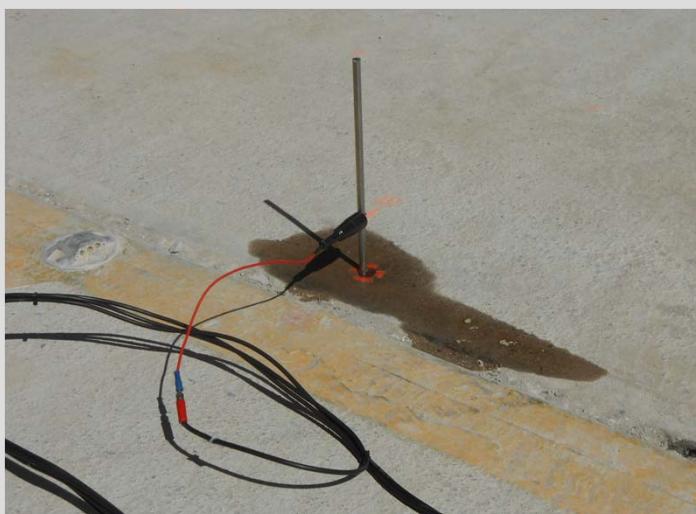


Figura 9. Electrodo.



Figura 10. Equipo Zonge para la toma de datos de SIP.



# Registro Geofísico de Pozos

## Caracterización Geológica

### Introducción

El registro geofísico de pozo, consiste en la obtención de una gráfica de las propiedades físicas de formaciones geológicas atravesadas por el pozo en función de la profundidad, para lo cual se utiliza una herramienta denominada sonda con varios sensores cuyas mediciones son generadas de manera continua dentro de la pared del pozo, permitiendo evaluar las condiciones de presencia de fluidos entrampados en las formaciones geológicas.

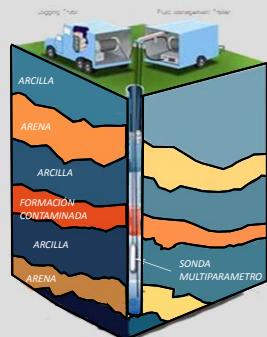


Figura 1. Adquisición Registro Geofísico de Pozo

### Sistema Mount Sopris

Este sistema puede configurarse con varios tipos de cables para registros, hasta 1000 metros.



Figura 3. Sistema 4Mxa-1000

#### Beneficios

- Alta resolución de profundidad óptica.
- Sistema de frenado dinámico electrónico.
- Freno de emergencia.
- Nivelación automática

#### Especificaciones Técnicas

- Peso 26.3 Kg
- Dimensiones de la Base 52.4x35.2 cm.

### Sonda multiparámetros 2PGA-1000

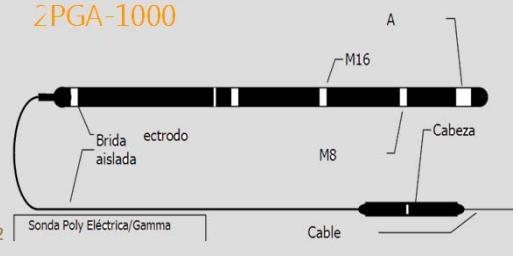


Figura 4. Sonda multiparámetros

#### Especificaciones Técnicas

- Dimensiones - 79.5 cm (31.3 in)
- Diámetro - 41mm (1.63 in)
- Peso - 3.2 kg
- Rango de presión - 13,790 kPa (2000PSI)
- Temperatura de operación 10 a 70 °C
- Rango de mediciones: 0 – 100 000 CPS gamma ± 1,500 mV SP 1 – 500 Ohms SPR
- Error de precisión – 1 %
- Resolución – 0.02 %

### Ventajas

- ✓ Determinación in-situ de propiedades físicas de las rocas.
- ✓ Apoya en la estimación de propiedades hidráulicas.
- ✓ Determinación en tiempo real de los registros en campo.
- ✓ Método directo.

### Aplicaciones

- ✓ Geohidrología
- ✓ Exploración Petrolera
- ✓ Evaluación de minerales radiactivos.
- ✓ Caracterización de pasivos ambientales.
- ✓ Evaluación de cementación.

### Caso I: Hidrogeología

Se determinan las características en el subsuelo del sitio perforado para el mejor aprovechamiento de los recursos hidráulicos del pozo.

El análisis de los parámetros medidos se realiza con el enfoque geohidrológico delimitando las zonas o intervalos con características de aporte de agua basándose en el corte litológico y permeabilidad cualitativa, contenido de material arcilloso (gamma natural) y temperatura.

La integración de las 9 curvas registradas indican la presencia de una zona con mayor potencial de contener agua, y se localiza la profundidad de saturación.



Figura 5. Perforación de pozo.

### Caso II: Exploración Petrolera

La determinación de la porosidad y el contenido de hidrocarburos es sin duda un aspecto muy importante en la evaluación de las unidades productoras. Sin embargo, se deben examinar otros factores para que la formación sea explotada de manera óptima. Así con los registros también es posible conocer la profundidad y espesor del yacimiento, la litología, el contenido de arcilla, la saturación de fluidos, la densidad de los hidrocarburos y la presión de las formaciones.

Los núcleos y registros geofísicos de pozo, son prácticamente la única fuente para la estimación casi-continua de propiedades petrofísicas tan importantes como la porosidad y la permeabilidad, así que la integración de estas dos fuentes de información es esencial en una interpretación confiable.

### Referencias

BASSIOUNI, Z.  
Theory, Measurement and Interpretation of Well Logs  
Tulsa, OK  
SPE Textbook Series 4, 1994

DEWAN, J.T.  
Essentials of Modern Openhole Log Interpretation  
PennWell Publishing Company  
Tulsa, OK, 1983



Figura 6. Visualización de un Registro Geofísico de Pozo.

# Registro Geofísico de Pozos

## Caracterización Geológica



Figura 9. Equipo Mount Sopris.



Figura 9. Operador en campo.



Figura 9. Operador en campo con sonda multiparamétrica y sistema de perforación.



Figura 9. Sistema de perforación.



Figura 9. Equipo Mount Sopris con sistema de perforación.

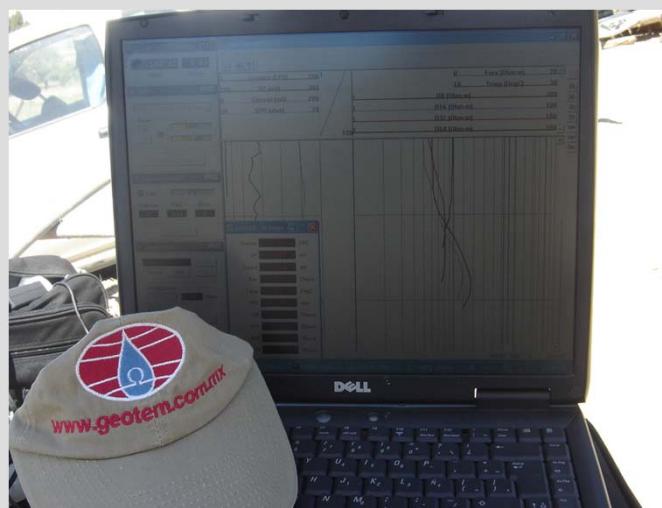


Figura 9. Registro Geofísico de Pozo .



# Espectrometría de Rayos Gamma

## Caracterización Geológica y Exploración Minera

### Introducción

La Espectrometría de rayos Gamma se encarga de medir los isótopos naturales o artificiales en las rocas.

Es una técnica con una gran variedad de aplicaciones: mapeo geológico, exploración minera, monitoreo ambiental, estudios de laboratorio.

Su fundamento teórico está en medir los conteos de rayos gama a diferentes niveles de energía y amplitudes; para así tener un espectro completo de los diferentes materiales que emiten radiactividad.

### Espectrómetros

Los espectrómetros son instrumentos que generan, analizan y registran espectros de isótopos. Los espectrómetros de radiación gamma están programados para medir la intensidad y las energías de los fotones y, por tanto, la abundancia de un radionúcleo en particular, es decir que determina y mide las características de las componentes de un espectro.

### Espectros de la Radiación Gamma

La radiación gamma es radiación electromagnética de alta frecuencia y energía, es decir de longitud de onda creciente. La radiación electromagnética es independiente de la materia para su propagación; sin embargo, la velocidad, intensidad y dirección de su flujo de energía se ven influidos por la presencia de la materia. Esta radiación se puede ordenar en un espectro que se extiende desde ondas de frecuencias muy elevadas (longitudes de onda pequeñas) hasta frecuencias muy bajas  $10^3$  (longitudes de onda altas). En la figura 1, se ubican los rayos gamma en el espectro electromagnético

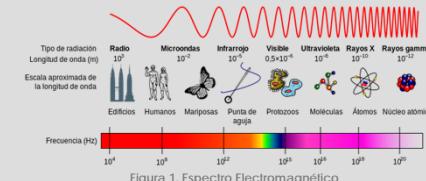


Figura 1. Espectro Electromagnético

**Espectrómetro Gamma Surveyor II**  
Espectrómetro de Rayos Gamma multicanal y medidor de tasas de dosis de radiación de 1024 canales, diseñado para la medición de isótopos artificiales en el suelo, pozos y laboratorios. Cubre un amplio rango de aplicaciones utilizando varias sondas y tipos de detectores.



Figura 3. Espectrómetro Gamma Surveyor II (GF Instruments)

### Modos de Medición

- Espectros y análisis
- Mediciones espetrales. determinación de concentraciones de K, U y Th (% ppm, ppm) y de la tasa de dosis (nGy/h o nSv/h) de acuerdo al IAEA.
- Vista espectral, contenido de energía e identificación de 19 isótopos conocidos.
- Tiempo de integración ajustable.
- Tasas de dosis
- Mediciones radiométricas precisas de los rayos gamma naturales (nGy/h o nSv/h).
- Histograma de las 64 lecturas previas.
- Tiempo de integración ajustable.

### Método de estimación de los componentes de una muestra.

Algunos conteos debidos a torio puro son grabados en las ventanas de menor energía de uranio y potasio debido al efecto de dispersión de Compton en el suelo, en el aire o en el detector. De manera similar, los conteos debidos a una fuente de uranio puro serán grabados en la ventana de menor energía del potasio.

La relación que existe entre los conteos en una ventana de baja energía y una de alta energía debidos a una fuente de uranio o torio puros se denomina coeficiente revelador o coeficiente espectral revelador. Estos coeficientes son únicos para cada sistema detector.

Dispersión de Compton		
Núcleo	$^{208}\text{Ti}$	$^{214}\text{Bi}$
Indicador	Th	U
Energía	2.62 MeV	1.76 MeV
		1.46 MeV

Figura 1. Las Flechas indican la conversión de rayos gamma de niveles de alta energía a niveles de menor energía

La radiactividad natural es el proceso particular que produce rayos gamma de interés geológico y las tres fuentes naturales más significantes son:

- El potasio (K): El proceso de decadimento radiactivo de K40 produce rayos gamma de sólo una energía.
- Uranio (U): U238 producen radiación gamma de varias energías cuando ellos decaen.
- Torio (Th). Th232 La serie del torio tiene 11 productos que producen un espectro gamma complejo, y siempre se encuentra en un estado de equilibrio.

### Especificaciones Técnicas

- Sensor de Yoduro de Sodio NaI (Tl) (volumen del sensor 4 litros.)
- 256/512/1024 Canales
- Resolución 8% a  $\text{Cs}^{137}$
- Calibración Automática usando radiación de picos naturales.
- Ampliamente Móvil.
- Exportación de datos a Binario, ASCII, Geosoft, CSV o formato XML.



Figura 4. Espectrómetro PGIS-256 (4.1 litros)

### Ventajas

- ✓ Mediciones y navegación sincronizados en tiempo real.
- ✓ Sensor de alta resolución.
- ✓ Extremadamente estable
- ✓ Análisis de elementos radiactivos in situ
- ✓ Rápida y sencilla adquisición de datos en campo

### Aplicaciones

- ✓ Exploración minera
- ✓ Mapeo Geológico
- ✓ Geotecnia
- ✓ Arqueología
- ✓ Geotermia
- ✓ Caracterización Ambiental
- ✓ Conteo de dosis radiactivas para el Sector Salud

### Caso I: Exploración Minera

En proyectos de exploración minera, donde las áreas a explorar son bastante amplias, es de gran utilidad realizar estudios de espectrometría de materiales para delimitar zonas anómalas y posteriormente estudiarlas mas a detalle. El objetivo fundamental de este proyecto es detectar la presencia de minerales radiactivos tipo Urano, cuya extracción es requerida para la industria energética.

En dicho proyecto se determinó el comportamiento radiactivo de las rocas y de la superficie, así como la forma del cuerpo mineralizado. Se definieron las condiciones de mineralización y se cuantificaron las concentraciones más importantes de minerales radiactivos. El estudio radiométrico se realizó con instrumentos de doble función (cintilómetro y espectrómetro) marca GF Instruments, modelo Gamma Surveyor II; los cuales tienen como función medir la radiactividad en cuentas por segundo (cps) y proporcionar en partes por millón (ppm) los elementos químicos como son Urano, Torio y Potasio este último representado en porcentaje.

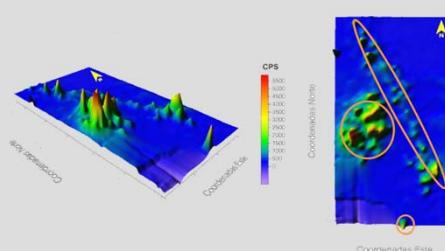


Figura 5. Análisis radiométrico del área de estudio.

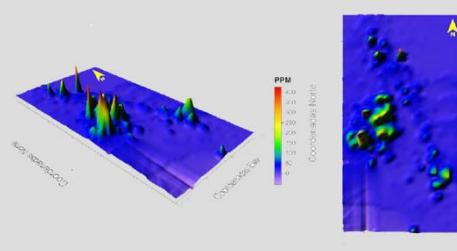


Figura 6. Altos y bajos radiométricos, donde están representadas las partes por millón de los minerales de uranio.

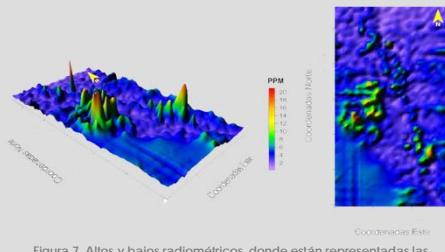


Figura 7. Altos y bajos radiométricos, donde están representadas las partes por millón de los minerales de Torio.

En la Figura 5 se observa la radiactividad medida con el espectrómetro, que da una cuenta de fondo de 200 a 500 cps aproximadamente; por lo tanto las zonas anómalas muestran valores que oscilan entre 1000 y 6000 cps. Sin embargo en pequeñas zonas donde el material de interés se encuentra aflorando las cuentas por segundo se elevan hasta 10000.

La Figura 6 muestra un mapa de la anomalía causada por el acumulamiento de Urano en PPM, la cual coincide con la anomalía causada por acumulamiento de Torio que se observa en la figura 7 y con el análisis radiométrico total del área de estudio. De esta forma se confirman las zonas que pueden ser de interés minero.

### Referencias

- Ball, T., S. Booth, E. Nickless y R. Smith (1979) Geochemical Prospecting for Barite and Celestite Using a Portable Radioisotope Fluorescence Analyser, Journal of Geochemical Exploration. 11: 277-284.
- Balely, 1996, Potential Theory in Gravity and Magnetic Applications, Cambridge, United Kingdom.
- Garland, George David, 1977, The earth's shape and gravity, Oxford.
- Environmental Engineering Geophysics, Prem V. Sharma, Cambridge University, UK, 2003.
- Applied Geophysics Second Edition, W.M. Telford, L.P. Geldart, R.E. Sheriff, Cambridge University Press, United Kingdom 1990.
- GEOSOFT, User's Manual, Edition 2, © Geosoft Inc, USA, 2000.

# Espectrometría de Rayos Gamma

## Caracterización Geológica y Exploración Minera



Figura 8. Espectrómetro Gamma Surveyor II tomando muestras.



Figura 9. Implementación del equipo Gamma Surveyor II en zonas urbanas.



Figura 10. Implementación en campo del Espectrómetro Gamma Surveyor II en conjunto con el magnetómetro ENVI-Scintrex



Figura 11. Espectrómetro PGIS-256



Figura 12. Toma de datos con el equipo Gamma Surveyor II



Figura 13. Implementación en campo Gamma Surveyor II



# Sistema de Posicionamiento Global (GPS)

## Ubicación Geológica, Geofísica y Obras Civiles

### Introducción

El sistema de posicionamiento global (GPS) es un método de navegación satelital que fue desarrollado por el departamento de defensa de los Estados Unidos de Norteamérica a finales de la década de los 60's. Inicialmente el GPS fue usado con fines militares para controlar barcos, aviones y vehículos terrestres; sin embargo su uso se extendió civilmente, previendo de un posicionamiento continuo en cualquier parte del mundo sin importar las condiciones climáticas.

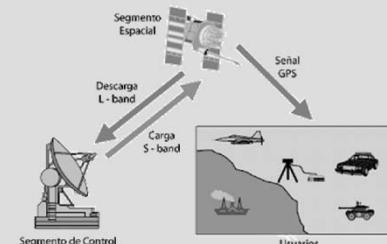


Figura 1. El sistema de posicionamiento consta de tres segmentos: espacial (satélite), control (estaciones) y usuarios.

### Segmentos del GPS

El sistema de posicionamiento consta de tres segmentos: espacial (satélite), control (estaciones) y usuarios, como se ilustra en la figura 1. El segmento espacial consiste en operar 24 satélites en órbita, cada uno transmite una señal que tiene varios componentes: frecuencia del portador, códigos digitales y mensaje de navegación.

El segmento de control se compone de una red mundial estaciones con una estación de control maestro que monitorea los satélites, para determinar su posición.

El segmento de usuarios es muy variado, ya que solo es necesario un receptor GPS conectado a una antena, puede recibir la señal GPS para determinar la posición en cualquier parte del mundo.

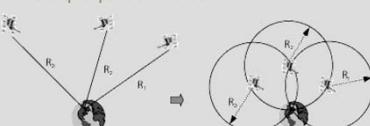


Figura 2. Posicionamiento del GPS

### GPS-RTK (Posición en Tiempo Real)

El método RTK se incorpora poco a poco a las actividades de registros hidrográficos, explotación minera, monitoreo de vehículos y topografía. El posicionamiento cinemático en tiempo real, liga la navegación satelital a un módem de radio.

Es un proceso en el cual la señal GPS envía correcciones en tiempo real desde un receptor de referencia en una ubicación conocida (Base) a uno o más receptores remotos Rover. El uso de un sistema GPS-RTK puede llegar a tener una precisión de hasta un centímetro, es una técnica empleada que aumenta la productividad.



Figura 3. Sistema GPS-RTK

### Sistema GPS

La adquisición de datos con GPS se hace con un receptor, el cual recibe la señal de los satélites. Existen diversas marcas y tipos; sin embargo todos usan el mismo principio físico y matemático.

El sistema empleado es el fabricado por MAGELLAN modelo Promark 500 y radio modem Pacific Crest.



Figura 4. Sistema de Adquisición de GPS.

### Especificaciones Técnicas Receptor

GPS	
Alimentación	9V DC
Temperatura de Operación	-20° - 50°C
Operación	RTK Base/Rover
Post-Proceso	
Dimensiones	22.0x18.8x8.4
GNSS	75 Canales
	GPS L1/L2
	GLONAS L1/L2
Resolución Tiempo Real	H<10mm; V<20mm
Resolución Post-Proceso	H<3mm; V<6mm



Figura 5. Receptor GNSS Promark 500, Consola (Controladora)

### Especificaciones Técnicas Receptor GPS

Alimentación	9 - 16V DC
Temperatura de Operación	-30° - 60°C
Frecuencia	410-430MHz 430-450MHz
Dimensiones	15.8x7.0x1.6
Transferencia de Datos	4800 - 9600 bps/GMSK
	9600 - 19200 bps/4LFSK



Figura 6. Radio Modem Pacific Crest

### Ventajas

- ✓ Tecnología GPS y GLONAS (mejor calidad de señal)
- ✓ Completamente Portátil
- ✓ Alta Resolución el Post-Proceso y en Modo Continuo
- ✓ No invasivo ni destructivo.

### Aplicaciones

- ✓ Cartografía y Topografía
- ✓ Nivelación de Brocales.
- ✓ Auxiliar en diversas áreas geofísicas: IP, SIP, GPR, Gravimetría, Magnetometría.
- ✓ Localización de fallas y fracturas.

### Caso I: Nivelación de Pozos

Se hizo un estudio de posicionamiento satelital, mediante el método GPS-RTK (Real Time Kinematic). La base se ubicó en un lugar de fácil acceso y con una buena elevación para garantizar que la señal del radio modem tuviera una buena cobertura así mismo se utilizaron dos GPS-Móviles o Rovers para la ubicación de brocales, como se muestra en la figura 7.



Figura 7 Nivelación de Brocales en el estado de Guanajuato.



Figura 8. Equipo Geofísico (Gravímetro) y receptor GPS

### Caso II: Exploración Geofísica

El GPS es una herramienta más para la Exploración Geofísica, por ejemplo: en la prospección Gravimétrica ayuda a obtener una buena elevación y localización de cada estación gravimétrica, que es muy útil para hacer correcciones por elevación y latitud.

Con la ayuda del GPS se efectúan los levantamientos gravimétricos utilizando el modo post-proceso, ya que puede obtener una mejor resolución tanto vertical como horizontal. La figura 8 ilustra la adquisición en campo, lo componen el gravímetro y un receptor GPS.

### Referencias

- Applied Geophysics Second Edition, W.M. Telford, L.P. Geldart, R.E. Sheriff, Cambridge University Press, United Kingdom 1990.
- Reynolds, M. John, 1998, An Introduction to Applied and Environmental Geophysics, John Wiley Sons.
- Sanderberg, C. H., 1958, Terrain Corrections for an Inclined Plane in Gravity Computations. Geophysics, 23, no. 4, 701-711.
- Segertrom, K. 1956, Estratigrafía y Tectónica del Cenozoico entre México D.F y Zimapán Hgo. Congreso Geológico Internacional México.
- Sharma V. Prem, 2002, Environmental and Engineering Geophysics. Cambridge University Press, UK.
- Daniels D. 2004, Ground Penetrating Radar, 2nd edition. IEE, London.
- Davis, J. L., and Annan, A. P 1989, Ground Penetrating Radar for High Resolution Mapping of Soil and Rock Stratigraphy. Geophysics Prosp. 37, 531 - 551.

# Sistema de Posicionamiento Global (GPS)

## Ubicación Geológica, Geofísica y Obras Civiles



Figura 9. Instalación de una Base GPS -RTK



Figura 10. Nivelación de Brocales



Figura 11. GPS Post-proceso, en la nivelación de Brocales



Figura 12. Base GPS con Radio PDL .



Figura 13. Posicionamiento de GPS



Figura 14. Posicionamiento de GPS



