



Organización Latinoamericana de Energía
Latin American Energy Organization
Organisation Latino-américaine d'Énergie
Organização Latino-Americana de Energia

EXPLORACION PETROLERA

OSCAR LEON
CONSULTOR

GEOLOGIA DEL PETROLEO: CARACTERISTICAS Y VALORACION DE LOS YACIMIENTOS HIDROCARBURIFEROS

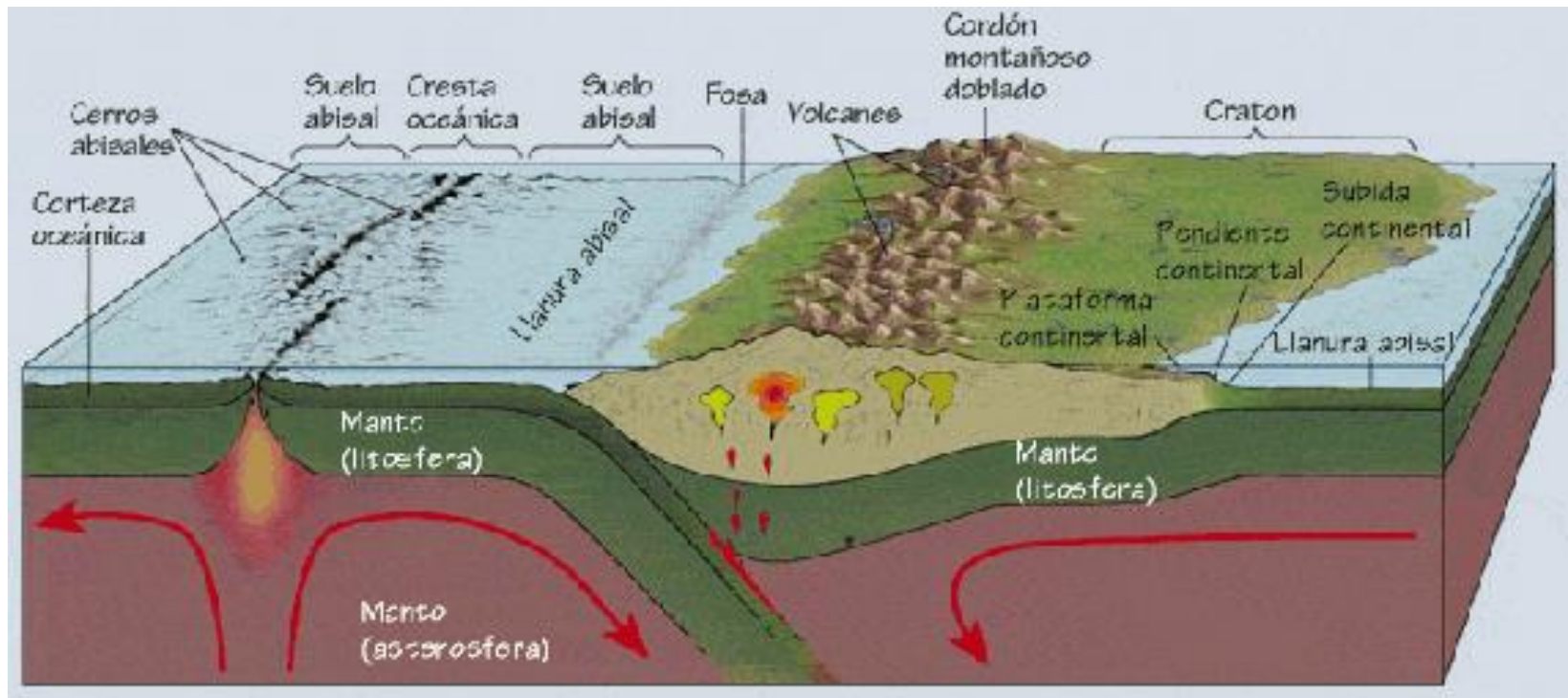
21 - ABRIL - 2014

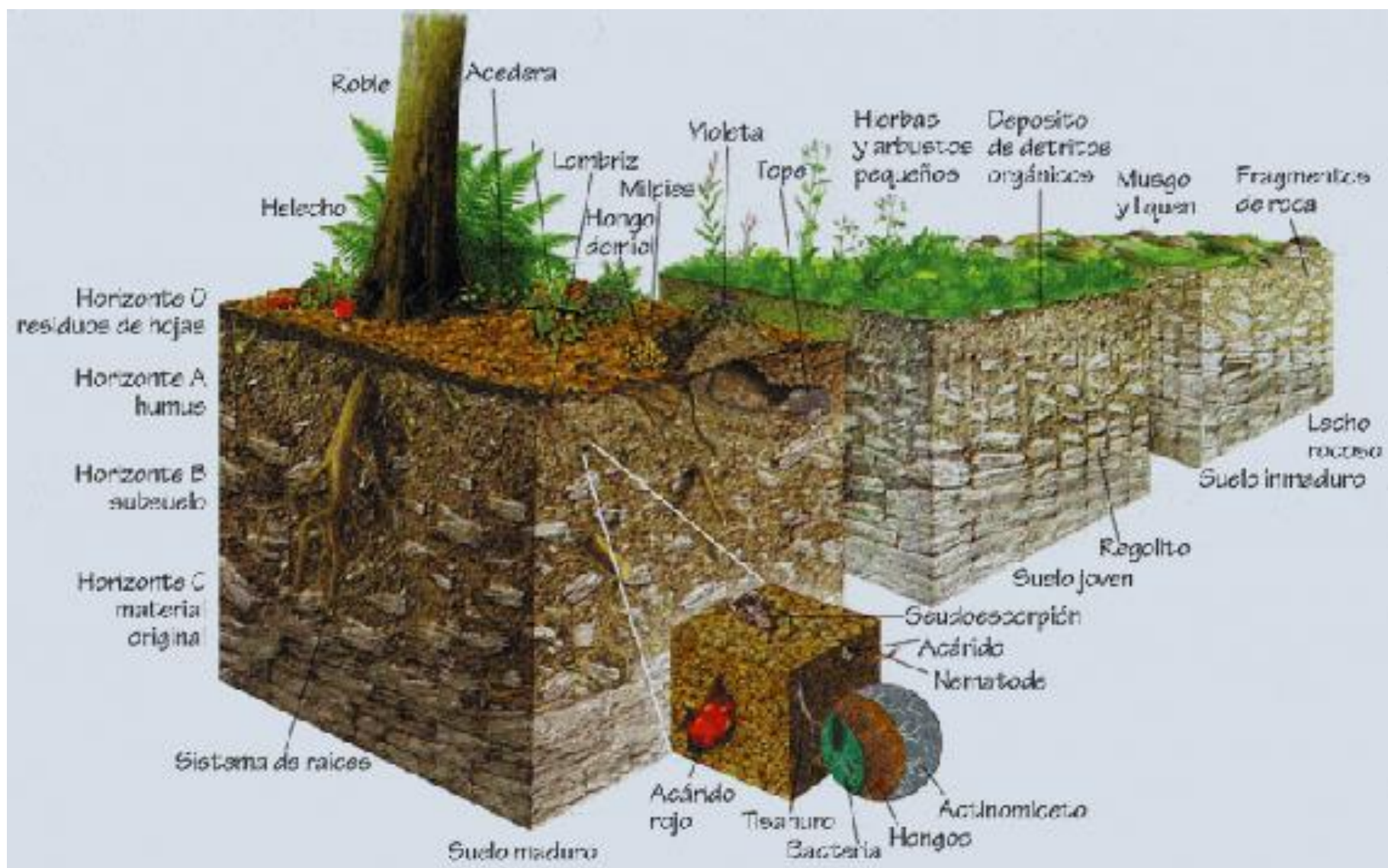
SANTA CRUZ, BOLIVIA

Exploración es el término utilizado en la industria petrolera para designar la búsqueda de petróleo o gas

Los métodos empleados son muy variados: desde el estudio geológico de las formaciones rocosas que están aflorando en superficie hasta la observación indirecta, a través de diversos instrumentos y técnicas de exploración

La geología superficial se refiere al material expuesto en la superficie de la tierra, la cual está generalmente compuesta de sedimentos granulares sueltos







Una de las herramientas más utilizadas en esta etapa son los mapas.

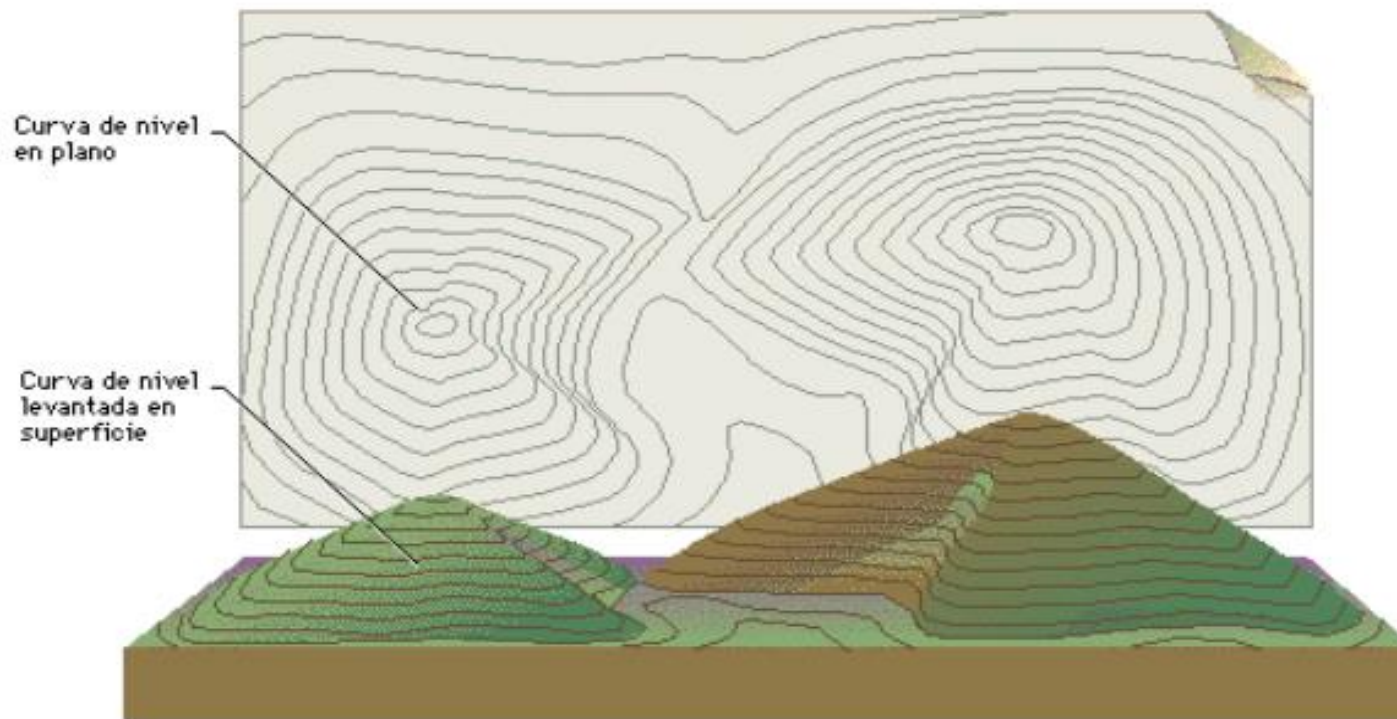
Hay mapas de afloramientos (que muestran las rocas que hay en la superficie), mapas topográficos y los mapas del subsuelo.

Estos últimos quizás sean los más importantes porque muestran la geometría y posición de una capa de roca en el subsuelo, y se generan con la ayuda de una técnica básica en la exploración de hidrocarburos: la sísmica de reflexión.

MAPA TOPOGRAFICO



El mapa topográfico es una representación de la superficie terrestre mediante curvas de nivel que tiene como finalidad mostrar las variaciones del relieve de la Tierra. Además de las curvas de nivel, suelen incluirse otras variables geográficas como la vegetación, los suelos, la red hidrográfica, las localidades..., todas ellas con su correspondiente color y símbolo.



Una **curva de nivel** es una línea dibujada en un mapa que une puntos que representan a los lugares que están a la misma altitud o altura sobre el nivel del mar. Las curvas de nivel son cerradas, equidistantes y no pueden cortarse entre ellas. Una de cada cuatro o cinco curvas se dibuja con un mayor grosor y se rotula su altitud correspondiente; son las llamadas curvas maestras y, entre ellas, se describen las curvas de nivel intermedias

La sísmica de reflexión consiste en provocar mediante una fuente de energía (con explosivos enterrados en el suelo –normalmente entre 3 y 9 m. de profundidad- o con camiones vibradores – éstos implican una importante reducción en el impacto ambiental-) un frente de ondas elásticas que viajan por el subsuelo y se reflejan en las interfases por los distintos estratos.

LA GEOFISICA

La Geofísica es la ciencia que estudia los fenómenos físicos que se producen en nuestro planeta, destacando entre estos, el electromagnetismo, la propagación de ondas mecánicas en la corteza terrestre y la gravedad. Esta ciencia puede definirse como la aplicación de la física y la geología al estudio de los materiales que componen la corteza terrestre y de los campos de fuerza que surgen de ella y ejercen su influencia hacia el exterior.

Dentro de la Geofísica aplicada destacan las prospecciones o exploraciones geofísicas, mediante las cuales esta ciencia investiga y define particulares formaciones geológicas y/o cuerpos mineralizados de interés práctico y aptos para la explotación industrial.

El campo de estudio de las prospecciones corresponde a los efectos producidos por rocas y minerales metálicos en áreas anómalas (desviadas del background), destacando entre estos: la fuerza de atracción gravitatoria, la desintegración radiactiva, las corrientes eléctricas espontáneas, la resistencia eléctrica de los suelos, la rapidez de las ondas sísmicas, etc.

La **prospección geofísica** es un conjunto de técnicas físicas y matemáticas, aplicadas a la exploración del subsuelo para la búsqueda y estudio de yacimientos de sustancias útiles (petróleo, aguas subterráneas, minerales, carbón, etc.), por medio de observaciones efectuadas en la superficie de la tierra. Algunos de los métodos utilizados en la exploración son:

Geofísicos:

Estudios sísmicos: Consisten en producir artificialmente ondas sísmicas con una explosión pequeña o el impacto sobre la superficie de un objeto de gran peso (a veces, portado por un camión especial para esta tarea). Estos estudios detectan muy bien la presencia de hidrocarburos.

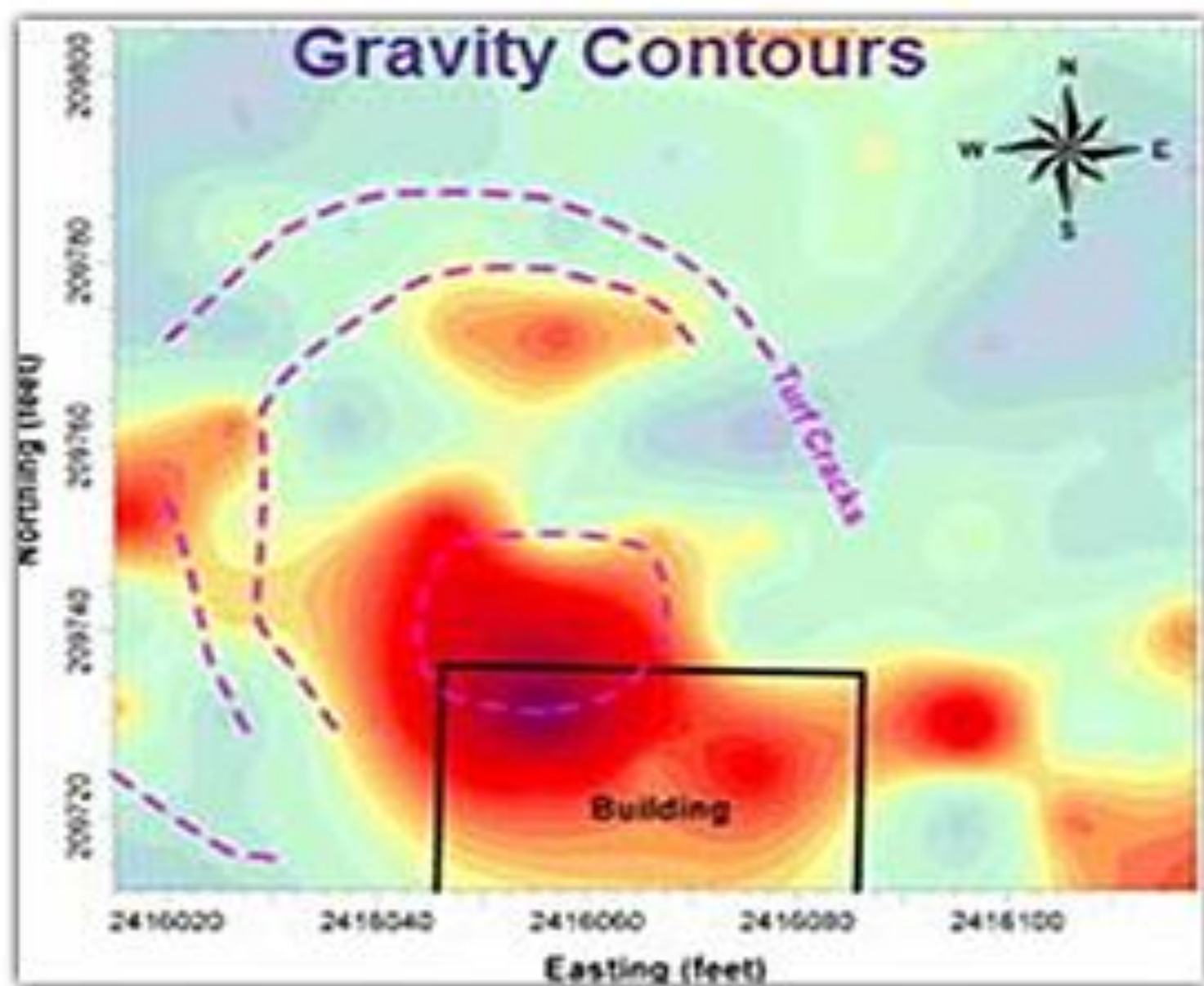
Estudios gravimétricos: Son aquellos que consisten en medir la intensidad de la fuerza gravitatoria de la Tierra, la cual puede cambiar cuando se está en presencia de grandes masas mineralizadas.

Estudios magnetométricos: Éstos se basan en medir variaciones en el campo magnético de la Tierra a fin de detectar minerales como la magnetita que alteran el campo magnético.

Estudios radiométricos: Consisten en efectuar mediciones de las radiaciones que se emiten desde el interior de la Tierra. Resulta apropiada para detectar la presencia de minerales como el "radio" o el "uranio".

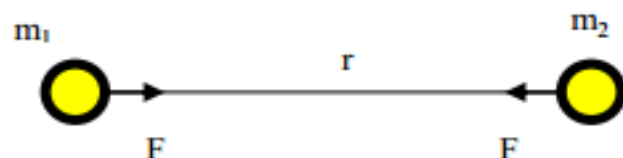
GRAVIMETRIA

- La gravimetría es un método que permite caracterizar el subsuelo a través de la distribución de la densidad de masa de los distintos materiales del subsuelo, haciendo mediciones del campo natural gravimétrico terrestre. Permite caracterizar el subsuelo desde algunos metros hasta decenas de kilómetros de profundidad. Dentro de las aplicaciones podemos mencionar:
 - Geometría de cuencas sedimentarias
 - Estudios en zonas arqueológicas
 - Evaluación de campos petroleros en apoyo a la exploración sísmica



FUNDAMENTO FÍSICO

La **Primera Ley de Newton** establece que existe una fuerza de atracción entre dos masas m_1 y m_2 separadas por una distancia r , representada por la siguiente relación de proporcionalidad:


$$F \propto \frac{m_1 m_2}{r^2} = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

Para la determinación del factor de proporcionalidad, Cavendish en el año 1798 ideó una balanza similar a la de la figura, y como podía medir las masas y distancias, además de conocer el coeficiente de torsión del hilo de suspensión y medir el ángulo de rotación, pudo calcular el coeficiente de proporcionalidad que es la conocida **Constante de Gravitación Universal (G)** que vale $6,67 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$.

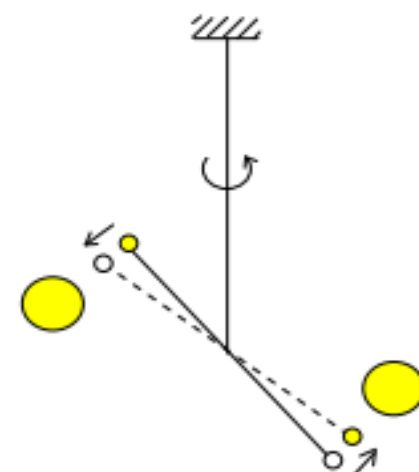
Si suponemos que la tierra es esférica e irrotacional con masa M , la atracción Newtoniana a una masa genérica m sobre su superficie será:

$$F = GmM/R^2 \quad \text{donde } R \text{ es el radio medio de la Tierra.}$$

La segunda ley de Newton establece que $F = ma$, y si definimos como g , aceleración de la gravedad, a la causada por la atracción de la masa de la tierra, entonces:

La segunda ley de Newton establece que $F = m.a$. Entonces definimos como g a la aceleración de la gravedad, causada por la atracción de la masa de la tierra:

$$F = m.g = G.m.M/R^2 \quad \text{y finalmente tendremos que}$$



$$g = G \frac{M}{R^2}$$

MEDICION DE LA GRAVEDAD

Absoluta:

La determinación del valor absoluto de la gravedad requiere de instrumentos sofisticados, difíciles de transportar y un tiempo considerable para efectuar la medición con un sinnúmero de cuidados.

El **péndulo** es uno de estos instrumentos. Una masa suspendida a una longitud L , oscila con un período T , y la gravedad es la fuerza recuperadora del sistema

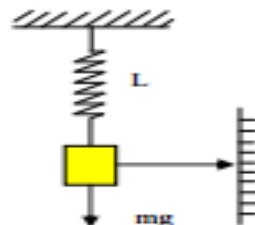
$$T = 2\pi\sqrt{L/g}$$

El método de **caída libre** que utiliza la conocida relación $z = \frac{1}{2}gt^2$, puede asegurar el 0,01 miligal cuando el tiempo y la distancia se miden electrónicamente. Para ello se arroja un cuerpo hacia arriba, pasando por dos marcas en subida y dos en bajada (z_1 y z_2) y se miden los correspondientes tiempos (t_1, t_2, t_3 y t_4). Entonces:

$$g = 8(z_2 - z_1) / ((t_4 - t_1)^2 - (t_3 - t_2)^2)$$

Relativa:

La determinación del valor relativo de la gravedad requiere de instrumentos de diseño más simple, prácticos y de fácil traslado, y son los que determinan la diferencia de gravedad entre dos estaciones.

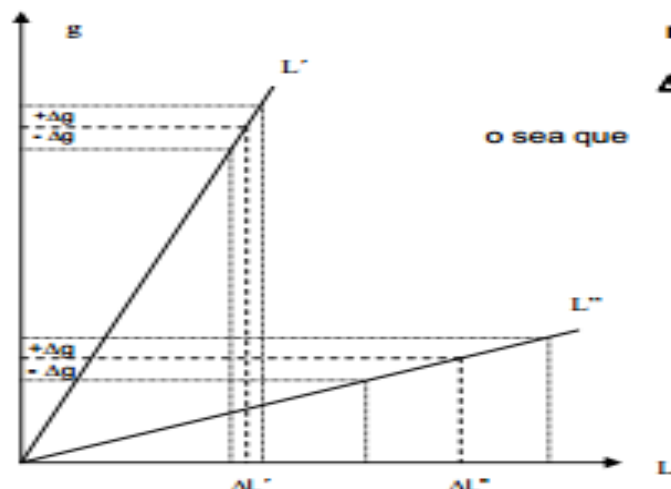


Un péndulo también podría ser usado para medir la diferencia de gravedad con lo que se obtendría 0,1mgal, pero no son muy prácticos para el campo.

El principio de medición relativa surge del equilibrio de fuerzas en una masa suspendida de un muelle donde

$$mg = k(L - L_0)$$

Entonces en dos lugares de distinta gravedad, el muelle tendrá distinta longitud:



$$mg_1 = k(L_1 - L_0) \text{ y } mg_2 = k(L_2 - L_0)$$

$$\Delta g = g_2 - g_1 = k/m(L_2 - L_0 - L_1 + L_0)$$

o sea que

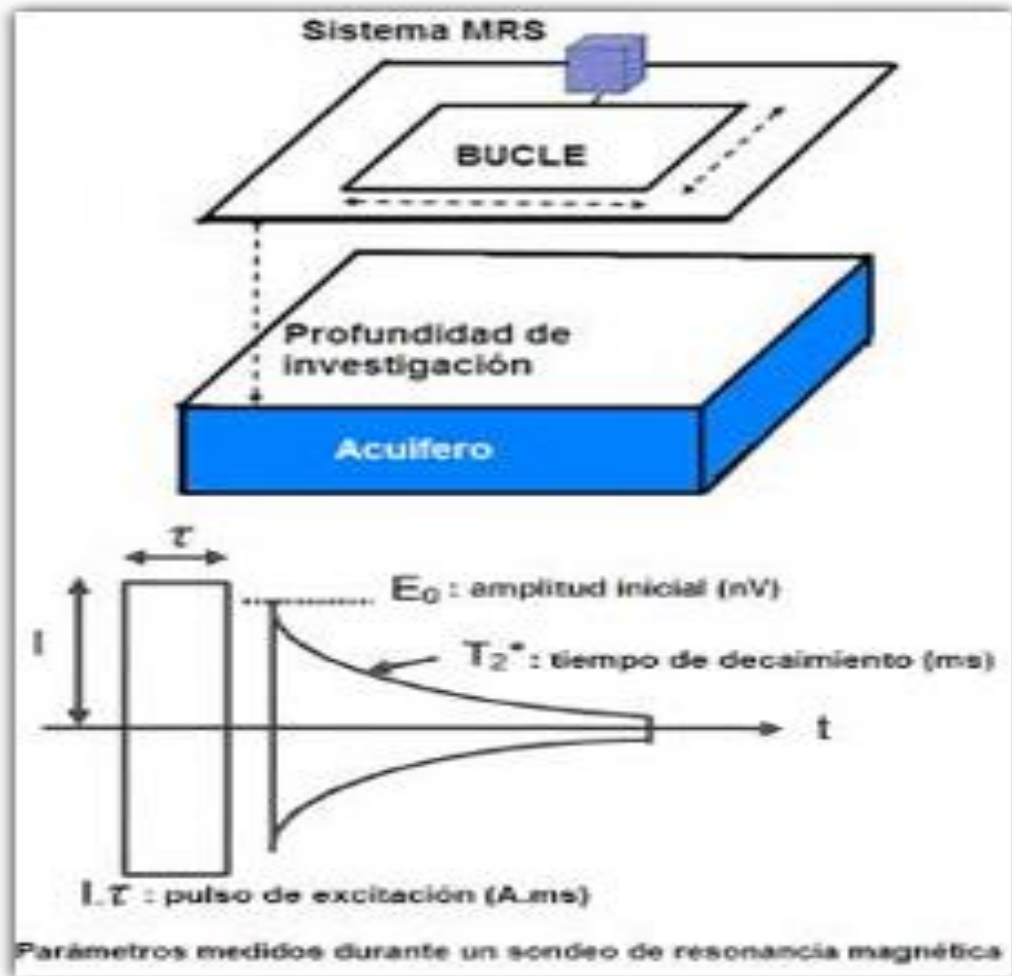
$$\Delta g = \Delta L \ k/m$$

Los instrumentos tipo dinamómetro se conocen como **gravímetros lineales**, porque cambiando la constante del sistema (k/m) puede obtenerse mayor sensibilidad, aunque siempre en forma proporcional o lineal, como puede apreciarse en la gráfica.

Este tipo de gravímetro tiene una gran limitación constructiva para obtener mayor sensibilidad, que a modo de ejemplo se analizará con un péndulo de período T y longitud L :

$$T = 2\pi\sqrt{L/g} \quad \text{ó} \quad T^2 = 4\pi^2 L/g$$

PROSPECCION POR RESONANCIA MAGNETICA



La técnica MRS (Magnetic Resonance Sounding), se utiliza fundamentalmente para la localización de aguas subterráneas.

Una potente señal EM (electromagnética) de alta frecuencia , igual a la frecuencia Larmor de excitación de los protones de Hidrógeno , es emitida por una antena de espiras de suficientes dimensiones (por ejemplo, espiras cuadradas de hasta 150m de lado) colocada sobre el terreno, con objeto de hacerla penetrar en el subsuelo a estudiar.

Parte de esta energía excita a los **protones de Hidrógeno** de las moléculas de agua presentes en el

terreno. Inmediatamente después, la liberación de dicha excitación genera una señal de relajación que se atenúa con el tiempo, según una determinada función.

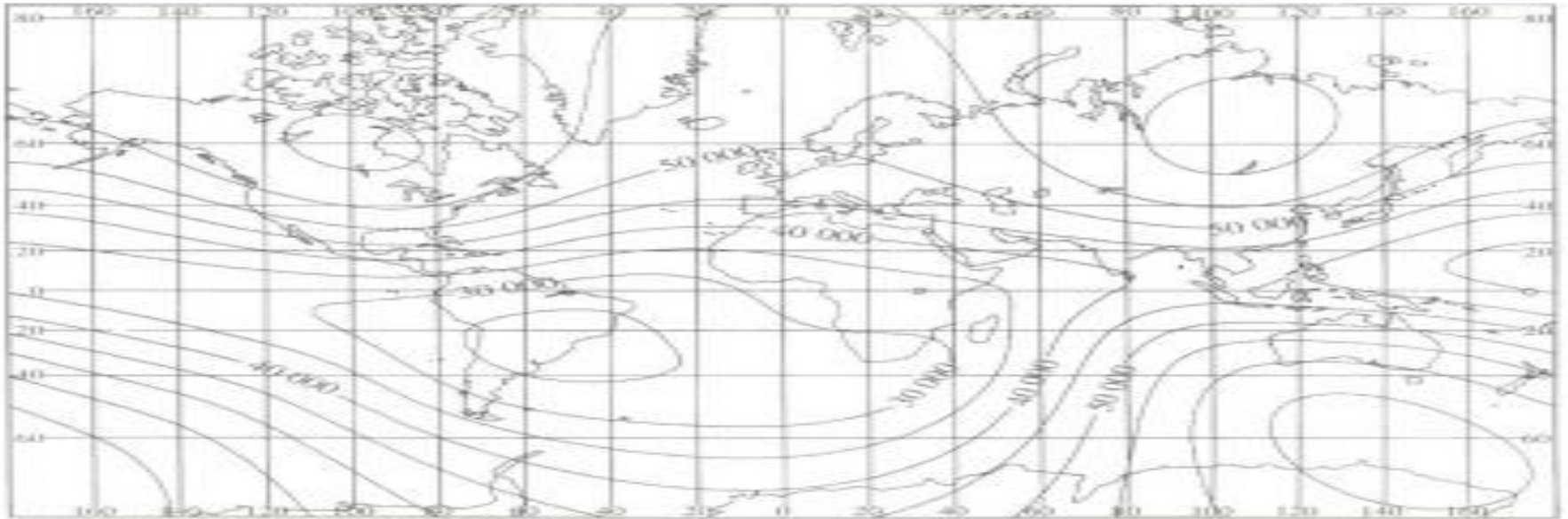
MAGNETOMETRIA

- La magnetometría es un método que permite caracterizar el subsuelo a través de la distribución de la susceptibilidad magnética de los distintos materiales del subsuelo directamente relacionada con el contenido de minerales con propiedades magnéticas, haciendo mediciones del campo natural magnetométrico terrestre. Permite caracterizar el subsuelo desde algunos metros hasta decenas de kilómetros de profundidad. Dentro de las aplicaciones podemos mencionar:
 - Investigación de depósitos minerales (magnéticos)
 - Estudios en zonas arqueológicas
 - Evaluación de campos petroleros en apoyo a la exploración sísmica.

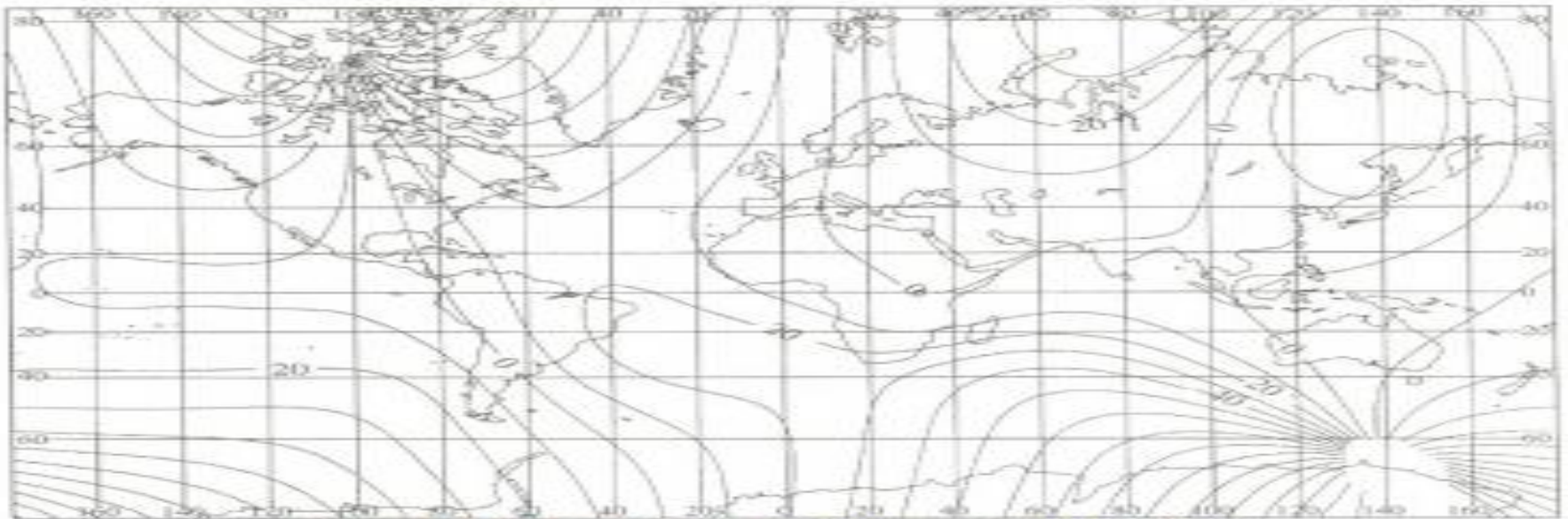
la Magnetometría se funda en que el campo magnético terrestre varía con la latitud, pero también varía en forma irregular debido a la diferente permeabilidad magnética de las distintas rocas de la corteza terrestre.

Un objetivo principal de levantamientos aerogravimétricos/magnetométricos es ganar una mejor comprensión de la geología regional a fin de limitar económicamente los estudios sísmicos tan costosos a las áreas más probables de una concesión petrolera.

Campo magnético terrestre actual



Mapa de intensidad total del campo geomagnético F en nT (IGRF-1995).



Mapa de la declinación magnética D en grados (IGRF-1995).

PROSPECCIÓN MAGNÉTICA

El cálculo e interpretación de las anomalías magnéticas es mucho más compleja que las gravimétricas. Esto se debe fundamentalmente a que todo cuerpo anómalo tiene dos polos de distinto signo, mientras que en gravedad podemos considerar que la atracción de masas equivale a solo un polo positivo o negativo, según la densidad sea mayor o menor que las masas circundantes. Además, la magnetización remanente que generalmente no es considerada, puede causar muchas veces un efecto muy significativo.

Antes de analizar las anomalías, debemos reconsiderar la **susceptibilidad de las rocas**. Aunque esta es adimensional, su valor se expresa en unidades electromagnéticas (uem) en el sistema cgs., solo para advertir que el sistema usado es el cgs y no el SI. Los valores de susceptibilidad usados pueden ser convertidos al SI con solo multiplicarlos por 4π .

Algunos minerales como la magnetita, ilmenita y pirrotita tienen alta susceptibilidad, siendo la primera la mayor. Por ello, la susceptibilidad de todas las rocas se mide como un porcentaje de magnetita. La verdadera susceptibilidad de la magnetita varía entre 0.1 y 1.0 uem, dependiendo del tamaño del grano, forma e impurezas, adoptándose como media $k=0.35$ uem. Una roca con un 1% de magnetita tendrá una susceptibilidad $k=0.003$, es decir $3 \cdot 10^{-3}$ uem. Los valores medios para diferentes tipos de roca son los siguientes:

Sedimentarias	$5 \cdot 10^{-5}$ uem	0.016% magnetita
Metamórficas	$3 \cdot 10^{-4}$ uem	0.100% „
Granitos y Riolitas	$5 \cdot 10^{-4}$ uem	0.160% „
Garbos y Basaltos	$6 \cdot 10^{-3}$ uem	0.200% „
Rocas Ultrabásicos	$12 \cdot 10^{-3}$ uem	4.000% „

Como dijimos, la **magnetización remanente I_r** no es tenida en cuenta para la interpretación de las mediciones. Esta, como se sabe, está presente en toda roca conservando la historia magnética, es decir, el magnetismo existente al momento de la formación de la roca. A veces suele tener un valor similar a la **magnetización inducida I_i** y hasta estar orientada en una dirección muy diferente.

En estos casos la magnetización total, suma de ambas, será muy distinta de la inducida que intentamos interpretar. En rocas basálticas la relación I_r/I_i suele ser a veces mayor que 10, en cambio para rocas graníticas es aproximadamente 1, en las metamórficas <1 y en las sedimentarias $<0,1$.

SISMICA

- Los métodos sísmicos son utilizados para medir velocidad de propagación de ondas en el subsuelo permitiendo caracterizar el subsuelo desde la superficie a centenas de metros. Dentro de las aplicaciones podemos mencionar:
 - Determinación de la profundidad a la roca sana
 - Caracterización del basamento rocoso
 - Determinación de la estratigrafía y geometría del subsuelo
 - Cálculo de parámetros elásticos del subsuelo a partir de las velocidades de onda (P y S).
 - Apoyo en la detección de agua subterránea
 - Evaluación de bancos de material (arena, grava, roca, etc.)
 - Las técnicas utilizadas para medir esta propiedad son:
 - Sísmica de refracción
 - Sísmica de Reflexión
 - Ruido sísmico (ondas superficiales)

GEOELECTRICOS

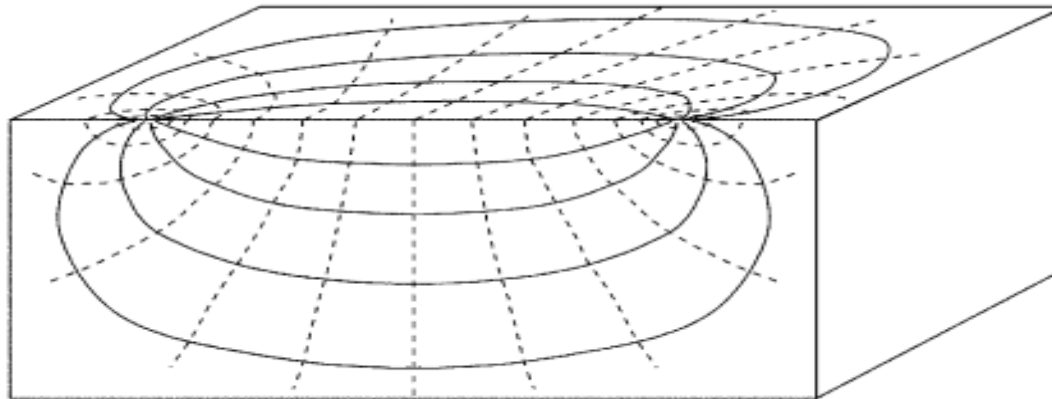
- Los métodos geoelectricos han sido utilizados en infinidad de aplicaciones y en la actualidad han tenido mucho éxito, permitiendo investigar la distribución de resistividades eléctricas o conductividades en el subsuelo desde unos pocos metros hasta decenas de kilómetros. Dentro de la gran cantidad de aplicaciones podemos mencionar:
 - Detección de agua subterránea (acuíferos y corrientes subterráneas)
 - Investigación de depósitos de minerales (metálicos y no metálicos)
 - Determinación de intrusión salina en acuíferos costeros.
 - Detección de cavidades y fracturas.
 - Detección de plumas contaminantes por hidrocarburos o lixiviados
 - Estudios para zonas arqueológicas
 - Determinación de la estratigrafía del subsuelo.
 - Evaluación de bancos de materia (arena y grava)
 - Determinación de la profundidad al nivel freático
 - Búsqueda de vapor de agua en campos geotérmicos
- Las técnicas utilizadas para medir esta propiedad son:
 - Geoelectricos por corriente continua (sondeos eléctricos verticales y tomografía eléctrica)
 - Transitorios electromagnéticos (TEM)
 - Bobinas electromagnéticas
 - Magnetoteluria (Fuente natural y artificial).

Sondeos eléctricos verticales

- Las técnicas geofísicas eléctricas o electromagnéticas que miden la resistividad de los materiales, o en algún caso su inverso, la Conductividad.
- Fundamentos de electricidad
 - Carga eléctrica, Campo eléctrico
 - Potencial
 - Diferencial de potencial
 - Unidad: Voltio

Superficie equipotencial

- Las técnicas geofísicas eléctricas o electromagnéticas que miden la resistividad de los materiales, o en algún caso su inverso, la Conductividad

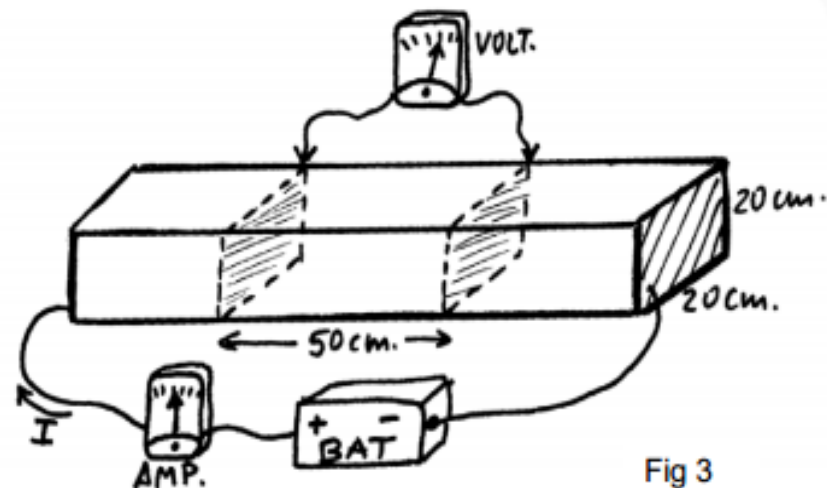


- Se aprecia que las líneas de fuerza (intensidad de campo) y las líneas equipotenciales son perpendiculares, como en cualquier red de flujo.

- Flujo eléctrico: Intensidad, Amperio
- Resistencia eléctrica: Resistividad, Ley de Ohm

Ejemplo.-

La figura 3 representa un bloque de arena cuya resistividad queremos medir. La sección es cuadrada de 20x20 cm. Hacemos pasar una corriente eléctrica que medimos con el amperímetro (5 mA). En dos puntos situados a una distancia de 50 cm. medimos una diferencia de potencial de 100 mV. Calcular la resistividad (ρ) de esa arena.



Solución:

Aplicamos (4): $R = 100 \text{ mV} / 5 \text{ mA} = 20 \Omega$

Esto quiere decir que la parte del bloque situada entre los dos polos del voltímetro ofrece una resistencia de 20 ohmios

Aplicamos (2) : $20 \Omega = \rho (0,5 \text{ m} / 0,04 \text{ m}^2)$

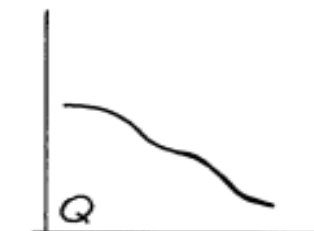
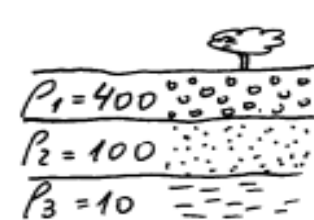
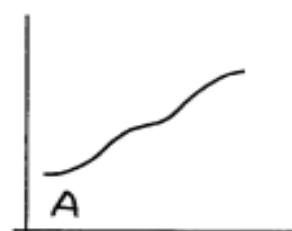
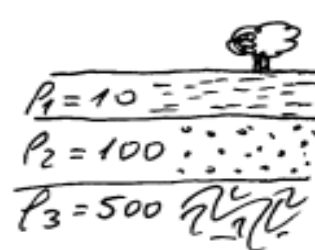
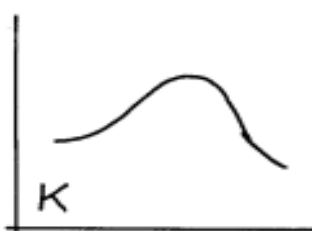
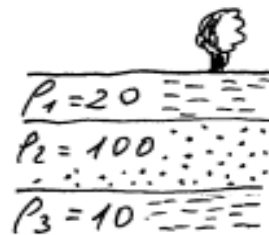
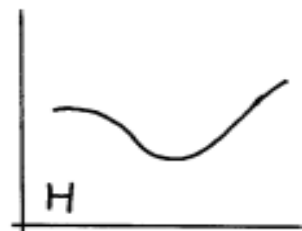
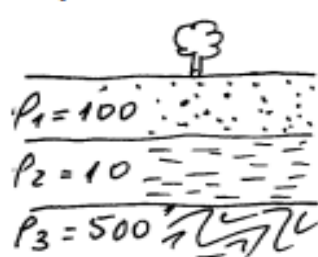
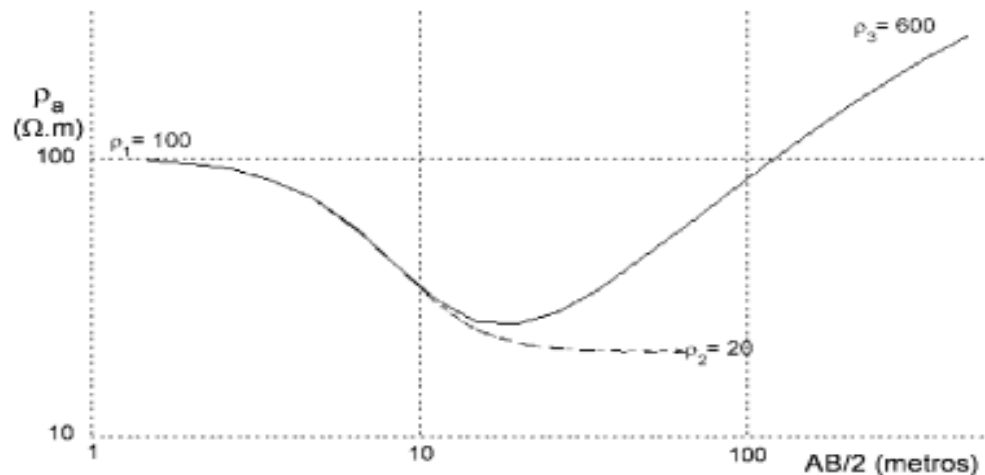
$$\rho = 16 \Omega \cdot \text{m}$$

Resistividad de lo materiales naturales

- Rocas Ígneas y metamórficas inalteradas: $> 1000 \Omega \text{ m}$
- Rocas Ígneas y metamórficas alteradas, o fuertemente diaclasadas: 100 a $1000 \Omega \text{ m}$
- Calizas y areniscas: 100 a más de $1000 \Omega \text{ m}$
- Arcillas: 1 a $10 \Omega \text{ m}$
- Limos: 10 a $100 \Omega \text{ m}$
- Arenas: 100 a $1000 \Omega \text{ m}$
- Gravas: 200 a más de $1000 \Omega \text{ m}$

Cortes de tres capas

Supongamos que bajo las dos capas del ejemplo anterior existe una tercera de mayor resistividad (600 $\Omega.m$). En ese caso, cuando la curva que vimos estuviera bajando desde 100 hacia 20, en algún momento comenzará a subir hacia 600. Esto será debido a que cuando el flujo eléctrico circule a suficiente profundidad, una parte comenzará a atravesar la formación más profunda de 600 $\Omega.m$, por lo que el valor medio que calculamos en superficie debe aumentar.



Cuando el subsuelo se compone de tres capas, se admiten cuatro posibilidades:

Tipo H.- La segunda es la menos resistiva de las tres, es decir: $\rho_1 > \rho_2 < \rho_3$.

Tipo K.- La segunda es la más resistiva de las tres, es decir: $\rho_1 < \rho_2 > \rho_3$.

Tipo A.- La resistividad va aumentando con la profundidad, es decir: $\rho_1 < \rho_2 < \rho_3$.

Tipo Q.- La resistividad va disminuyendo con la profundidad, es decir: $\rho_1 > \rho_2 > \rho_3$.

Método Magneto telúrico

Un método electromagnético utilizado para mapear la variación espacial de la resistividad terrestre mediante la medición de los campos eléctrico y magnético naturales en la superficie terrestre. Estos campos EM naturales son generados (con todas las frecuencias) en la atmósfera terrestre, principalmente por las caídas de rayos y las interacciones existentes entre el viento solar y la ionósfera. En el método MT más general, las componentes horizontales del campo eléctrico y las tres componentes del campo magnético se miden en la superficie. Las mediciones se utilizan para determinar las relaciones específicas entre las componentes del campo eléctrico y las componentes del campo magnético, denominadas impedancias tensoriales. Esta técnica fue introducida por el geofísico francés Louis Cagniard en la década de 1950 y ha sido utilizado para la exploración minera y el mapeo geofísico regional.

Método Magneto telúrico

Se emplea en exploración petrolera para el reconocimiento de cuencas sedimentarias a bajo costo y para la exploración en áreas en las que los levantamientos sísmicos son dificultosos debido a la severidad de la topografía o la presencia de rocas volcánicas de alta impedancia cerca de la superficie.

La resolución de los levantamientos MT es limitada por la naturaleza difusiva de la propagación EM en el subsuelo; usualmente, se encuentra en el orden de los cientos de metros a algunos kilómetros.

Pero el método MT permite explorar la Tierra hasta profundidades de varias decenas de kilómetros.

Método Sísmico

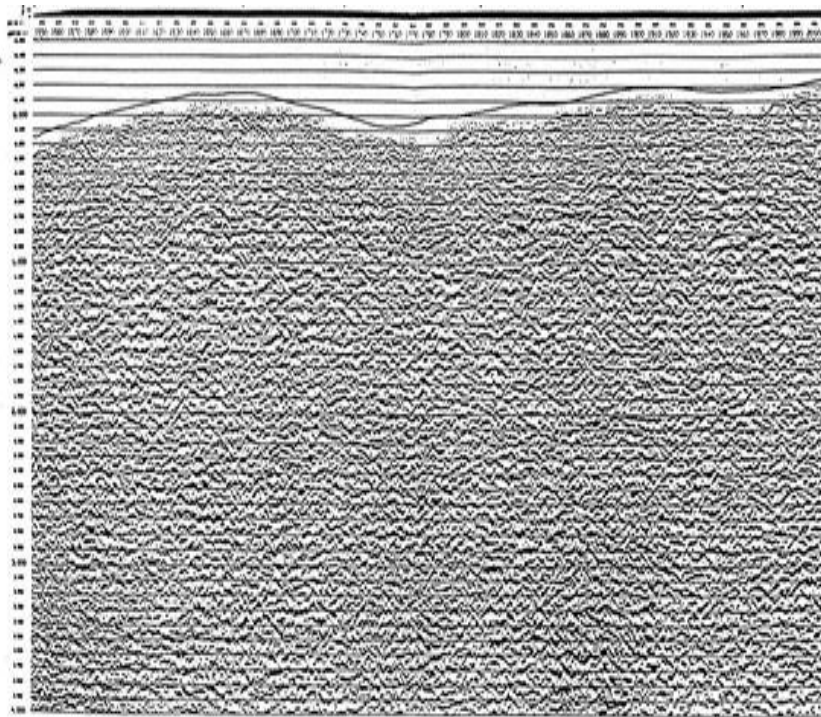
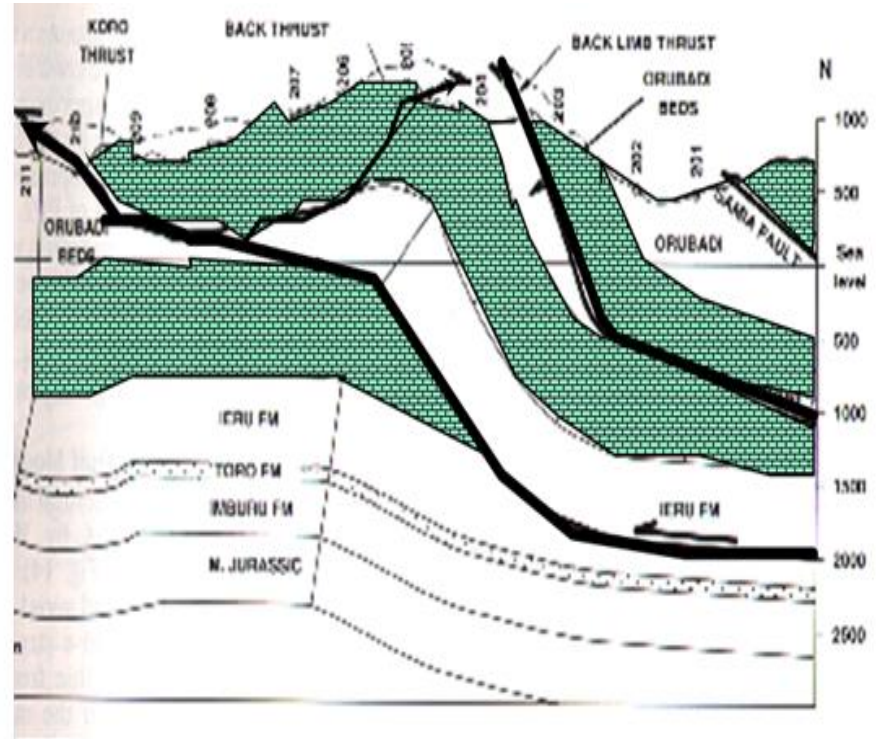
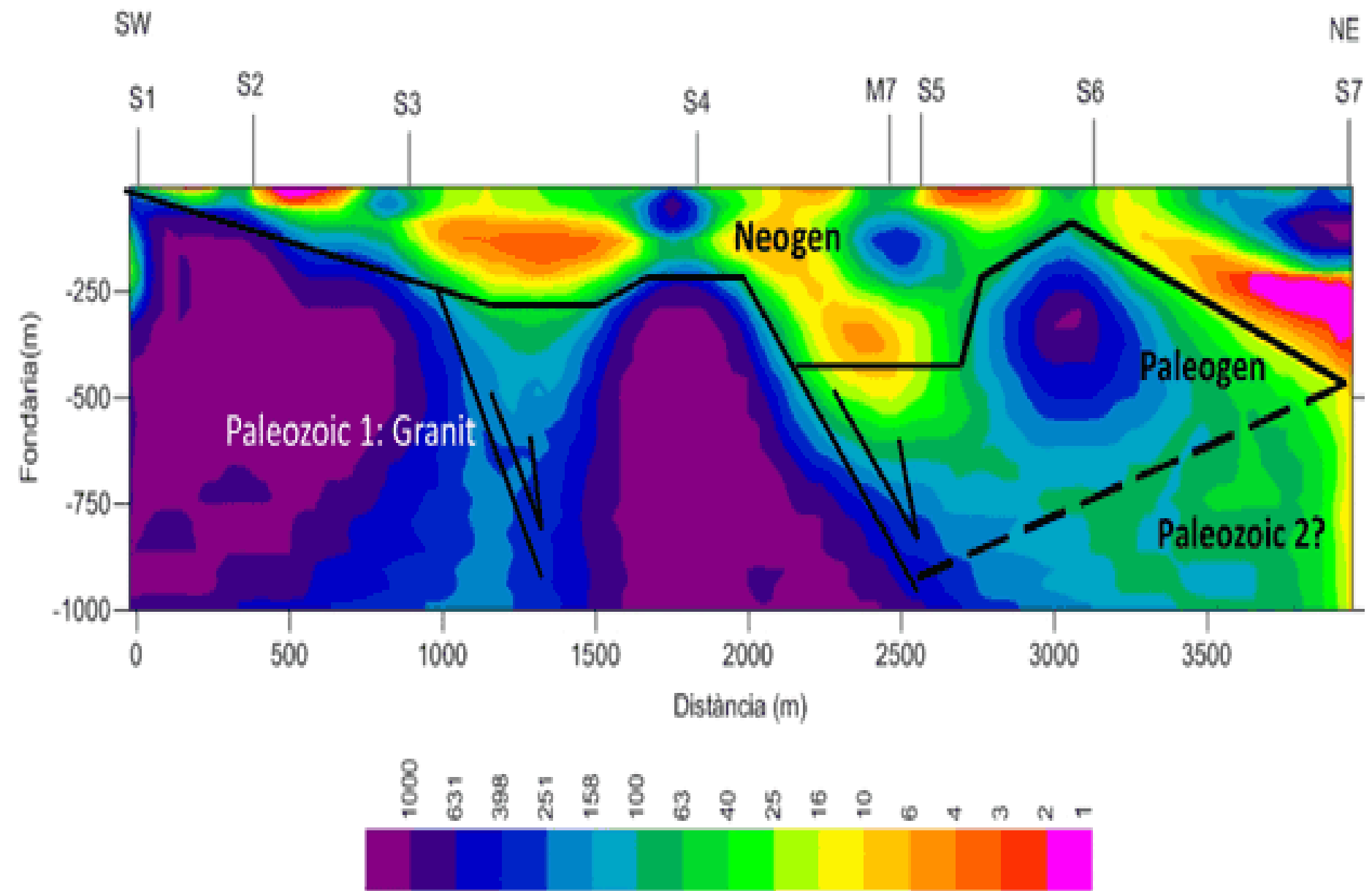


Figure 3. Seismic Data Along Profile A.

Método Magnetotelúrico



Una topografía abrupta y variaciones en los espesores de la capa de intemperismo en terrenos de overthrust pueden causar grandes estáticas que hacen imposible la adquisición de datos sísmicos de buena calidad. Sin embargo, esta geometría usualmente corresponde a capas de alta resistividad sobre capas de baja resistividad lo cual es favorable para el imaging estructural con el método Magnetotelúrico.



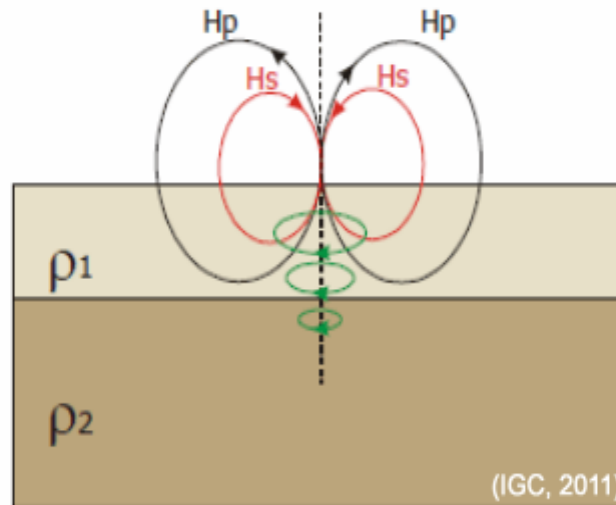
Resistivitat elèctrica (Ohm-m)

(IGC, 2011)

- El método magnetotelúrico (MT) es una técnica que consiste en medir desde la superficie las fluctuaciones temporales de los campos electromagnéticos naturales de la Tierra (tormentas eléctricas, corrientes ionosféricas) y determinar la distribución de la resistividad eléctrica en función de la frecuencia (periodo), es decir, en función de la profundidad (desde unos centenares de metros hasta unos centenares de kilómetros).

Metodología MT

- La energía externa, procedente principalmente de la actividad solar, es el campo electromagnético primario (H_p) que llega a la superficie de la Tierra. Parte de esta energía se refleja y la otra parte se transmite hacia su interior. La Tierra actúa como un medio conductor induciendo un campo eléctrico corrientes telúricas) que dan lugar a un campo magnético secundario (H_s):



Esquema simple sobre el funcionamiento de la inducción electromagnética: H_p , campo magnético primario i H_s , campo magnético secundario

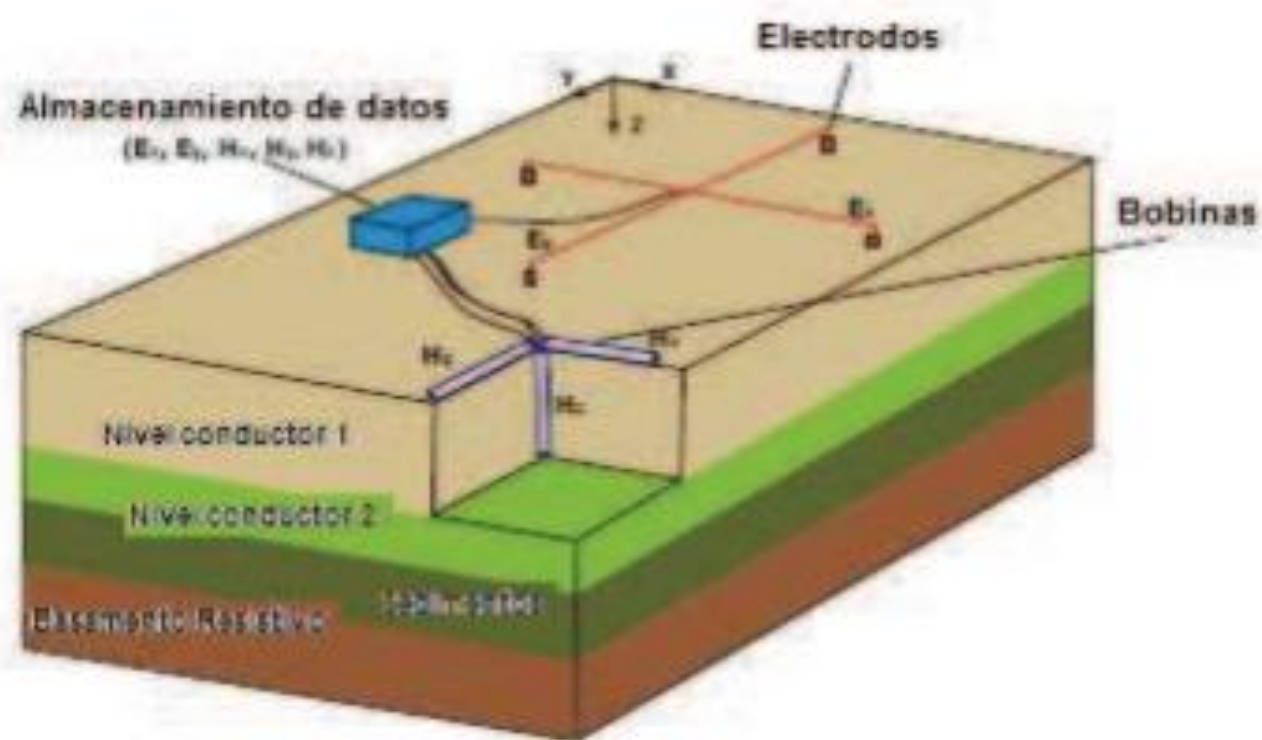


Figura 1. Modelo de implementación del equipo en campo (Gabàs, 2003).

La Geoquímica de superficie consiste en la detección de hidrocarburos acumulados en el subsuelo a través de la medición de los gases concentrados en muestras de suelo.

Su fundamento radica en el principio de que el gas acumulado en el subsuelo migra vertical y lateralmente hacia la superficie a través de las distintas capas de roca y también a través de fracturas

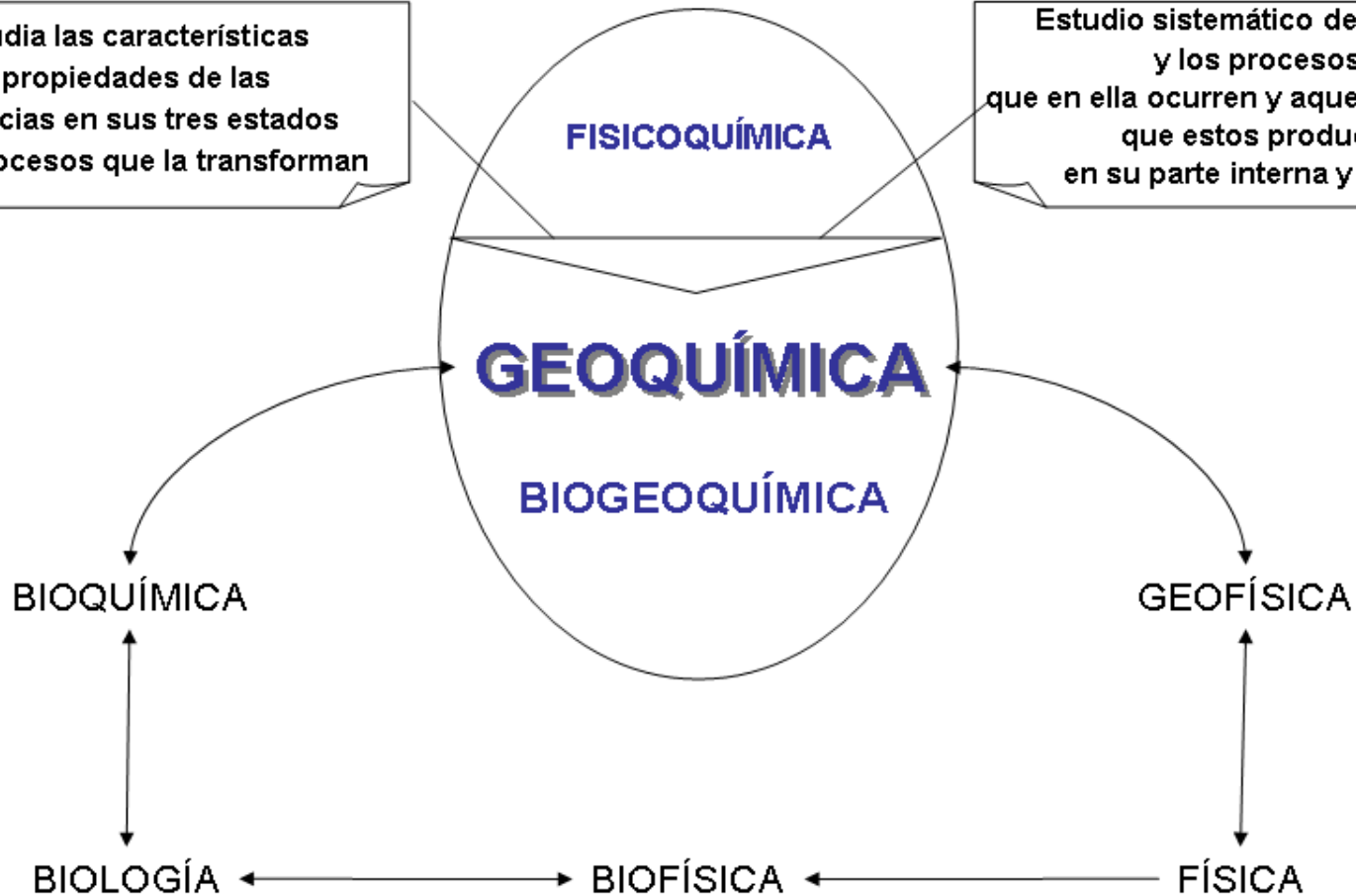
RELACIÓN CON OTRAS CIENCIAS

QUÍMICA

Estudia las características y propiedades de las sustancias en sus tres estados y los procesos que la transforman

GEOLOGÍA

Estudio sistemático de la Tierra y los procesos que en ella ocurren y aquellos cambios que estos producen en su parte interna y externa



En la actualidad, en algunas zonas o áreas de yacimientos, se recurre a la implementación y utilización de imágenes satelitales.

Dicha tecnología permite interpretar en detalle y rápidamente la estructura geológica del terreno, planificar el uso del suelo, y realizar una completa identificación de la hidrografía, de los caminos, diques y poblaciones, entre otras cosas.

El sistema, básicamente, permite la obtención de cartografía de alta precisión en diferentes escalas y combinaciones de bandas, a partir de composiciones de mapas.

La aplicación de tal tecnología permite evitar daños inútiles sobre el terreno, efectivizando al máximo el trazado de caminos y picadas de prospección sísmica

Perforación de pozos exploratorios