

Unidad 1: **Prospección Geofísica**

- 1.1 Rol de la Geofísica en la prospección. Su vinculación con la geología.
- 1.2 Clasificación de los métodos geofísicos de prospección.
- 1.3 Aspectos generales en la obtención y presentación de información geofísica.
- 1.4 Criterios de selección de método geofísico a utilizar.

GEOFÍSICA

El estudio de la tierra es el objeto final de la Geología, requiriendo el conocimiento de otras ciencias para explicarse las observaciones que realiza el geólogo sobre el terreno, de rocas y minerales que han tenido un proceso genético y uno posterior histórico, hasta alcanzar el estado actual que presentan al observador; por ejemplo, la barranca de erosión labrada por un río en una región montañosa muestra una serie de sedimentos yuxtapuestos cada uno compuesto de granos de distintos aspectos. Estos estratos, por otro lado, se presentan plegados y a veces interrumpidos bruscamente en su continuidad.

Este cuadro indica al geólogo que los distintos estratos han tenido una génesis particular, habiéndose generado en condiciones ambientales distintas: marino, continental, húmedo o seco; lo que se determina por la disposición de sus granos, por sus fósiles etc. , etc. También le inducen a pensar que por presentarse plegados o fracturados, han sufrido procesos tectónicos (movimientos), ya que la primitiva posición de los mismos, cuando se generan sus planos de yacencia, debían ser muy cercanos al plano horizontal. Aquí la Geología tendrá que valerse de otras ciencias para explicar satisfactoriamente todo lo ocurrido hasta el momento en que se realiza la observación: De la Biología, para explicar la vida orgánica habida durante su generación y testimoniada por fósiles; de la Química cuando entra en el análisis de los elementos inorgánicos que componen los estratos; de la Física para datar en sentido absoluto a las formaciones, o cuando indaga sobre las leyes y las fuerzas que provocaron el posterior pliegue de los estratos.

Por definición, **GEOFÍSICA** (etimológicamente, del griego, *naturaleza de la Tierra*) es la aplicación de los principios, leyes y prácticas de la Física a la solución de problemas relativos a la tierra y al estudio de fenómenos internos y externos a ella vinculados. La **GEOFÍSICA** es la ciencia que estudia los campos físicos vinculados a nuestro planeta. Es decir, que estudia la Tierra mediante métodos de la física, de carácter indirecto, a fin de conocer su evolución y características actuales (geofísica pura) y también como herramienta de prospección de recursos (geofísica aplicada). Pueden medirse directamente los campos físicos naturales (gravedad, magnetismo, radioactividad, geotermas, etc.) o generarse campos artificiales por emisión de electricidad, energía sísmica, etc., para así obtener mediciones más efectivas a los fines exploratorios.

Tempranamente en el proceso de subdivisión, fueron reconocidas cuatro ramas de la

ciencia: Química, Física, Geología y Biología; a estas a menudo se agregan la Astronomía y la Matemática. A causa de que esta última no trata con la materia directamente, no es a menudo incluida dentro de las ciencias físicas, y la Astronomía es a menudo tratada como una rama de la Física. Desde este punto de vista, la ciencia puede ser representada como un tetraedro y cada campo tiene un lugar de representación dentro del tetraedro.

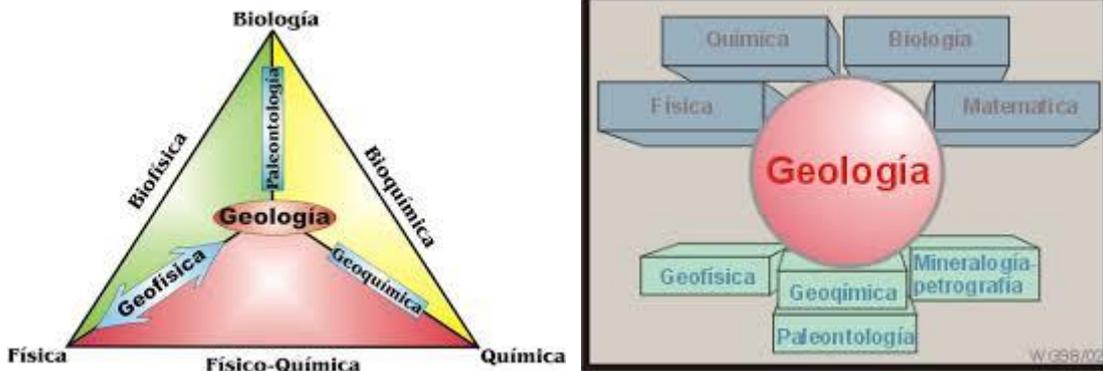


Figura 1: Interrelación entre la Geología y otras ciencias básicas y aplicadas.

Hasta que la ciencia comenzó a diversificarse, el investigador no estuvo tentado a enfatizar un aspecto sobre los demás. Así Sir Isaac Newton, quien a menudo es considerado como un físico, también contribuyó a lo que ahora se llama Geología, cuando propuso la teoría de la contracción para la generación de montañas. A medida que se incrementó el conocimiento, ciertos campos fueron investigados más a fondo que otros y comienzan a ser considerados como separados y distintos.

La clasificación de los conocimientos en temas individuales tendió a separar a los científicos y dejó áreas intermedias relativamente poco desarrolladas. Cuando este sobre-énfasis fue reconocido, se desarrollaron nuevos especialistas los que tratan con estos campos intermedios. La geofísica es uno de ellos. Hasta que los geólogos alcanzaron el punto en que comprendieron la tierra lo suficiente como para preparar y ensayar sus hipótesis por la experimentación, los físicos y químicos habían ya desarrollado las técnicas para hacer las mediciones necesarias; como resultado, las fronteras de la ciencia de la tierra en más rápido desarrollo son aquellas donde especialistas de otros campos están trabajando con los geólogos y la GEOFÍSICA es un ejemplo.

La GEOFÍSICA es el resultado de la necesidad de la Geología de nuevas herramientas. Dado que varias técnicas de experimentación fueron aplicadas a los problemas de la tierra, se desarrollaron áreas de investigación completamente nuevas. A causa de la relación de las viejas ciencias, Física y Geología, fue natural agrupar todas estas especialidades bajo un nombre general: GEOFÍSICA, aun cuando ellas fueran de diversa naturaleza. La prospección geofísica es el arte de buscar depósitos ocultos de

hidrocarburos (petróleo y gases), de cuerpos de agua, de restos arqueológicos enterrados o de minerales entre otros, efectuando mediciones físicas desde la superficie del terreno, mediciones que, de ordinario, suministran información acerca de las propiedades físicas de los materiales del interior de la Tierra. Esta información, interpretada de forma adecuada, puede utilizarse para determinar la distribución de los diferentes materiales en el interior de la tierra.

Los datos de los estudios geofísicos, para ser eficaces, deben expresarse en términos geológicos, y el valor que pueda concederse al modelo geológico así obtenido, mayor para unas técnicas que para otras, depende de la calidad de los datos y de la pericia con que son interpretados. Desde que por vez primera se aplicó la Geofísica a la exploración, se han producido continuos perfeccionamientos en los instrumentos y técnicas, así como en los métodos de interpretación, perfeccionamientos que han aprovechado los rápidos avances de nuestra tecnología. Los métodos geofísicos han ganado en eficacia, pero el incremento de sus posibilidades no ha guardado relación paralela con la creciente dificultad existente para encontrar nuevos depósitos de petróleo y de minerales, pues las fuentes más fáciles de localizar en cualquier momento han sido encontradas y explotadas de manera progresiva.

La *AMERICAN GEOPHYSICAL UNION* separa a la GEOFÍSICA en 8 subdivisiones: METEOROLOGÍA: La ciencia del aire, que estudia todos los acontecimientos relacionados con los fenómenos atmosféricos.

HIDROLOGÍA: Comprende los conocimientos e investigaciones relacionados con las aguas continentales, superficiales y subterráneas, como así también la Glaciología.

OCEANOGRAFÍA: Se ocupa de los océanos, considerando aspectos químicos, físicos y biológicos de los mismos.

VULCANOLOGÍA: Comprendiendo el estudio del vulcanismo, su génesis, evolución y consecuencias.

TECTONOFÍSICA: Que estudia la deformación de las rocas, tanto en estructuras sujetas a grandes movimientos, como en cualquier otro fenómeno diastrófico, superficial o profundo.

GEODESIA: Se ocupa de la medida y forma de la tierra, así como de su campo gravitatorio.

SISMOLOGÍA: Que comprende el análisis de los movimientos que afectan al planeta, provocados por terremotos u otros movimientos naturales o artificiales.

GEOMAGNETISMO: Estudia el campo magnético terrestre, sus causas y perturbaciones.

A la clasificación general de la unión de geofísicos americanos algunos investigadores comienzan a considerar como separado a cuatro ramas más.

GLACIOLOGÍA: que trata del agua en forma de hielo y que generalmente se la consideraba como formando parte de la Hidrología

GEOTERMIA: está muy relacionada con la Vulcanología, aunque es de concepto más

limitado. Estudia la temperatura de la Tierra y la acción de ella sobre los procesos físicos y químicos, así como la transmisión de calor.

GEOCOSMOGONIA: que trata del origen de la Tierra.

GEOCRONOLOGÍA: se ocupa de la cronología de los acontecimientos (de la historia).

Por su parte, la Unión Internacional de Geodesia y Geofísica (IUGG) propone las siguientes secciones:

- Geodesia
- Sismología y Física del interior de la Tierra
- Meteorología y Física de la atmósfera
- Geomagnetismo y Aeronomía
- Ciencias Físicas de los océanos
- Hidrología científica
- Volcanología y Química del interior de la Tierra

Cada una de estas especialidades han contribuido, y lo siguen haciendo, al mejor conocimiento de nuestro planeta, pero también ha creado disciplinas cuya aplicación a las actividades económicas de la humanidad, han contribuido a la creación del estado de evolución actual. Así la Sismología, cuyos comienzos fueron el estudio de los terremotos, determinó las leyes que rigen la aplicación de sus principios a la prospección sísmica, de trascendencia indiscutible en la exploración petrolera.

Si entendemos como ciencias aplicadas a las que utilizan los conocimientos de ciencias fundamentales para explicar el comportamiento de la materia en sus variadas formas naturales, la GEOFÍSICA es una de ellas. Lo que en términos generales aceptamos como geofísica es; dentro del marco de las ciencias de la Tierra, el estudio por medio de mediciones indirectas de la masa sólida del planeta que se encuentra por debajo de la delgada corteza que podemos estudiar directamente por medio de la observación de las rocas expuestas en superficie o de las muestras obtenidas de los pozos o perforaciones más profundas (campo de la Geología).

El principal objetivo de la GEOFÍSICA es la determinación de la estructura y composición del interior del planeta, como así también la historia de sus variaciones pasadas, presentes y futuras.

La Geofísica, ciencias básicas y ciencias afines

Una de las ramas más recientes de la ciencia aplicada, la Geofísica exploratoria, es en la actualidad un producto de varias disciplinas básicas tales como la Física, la Química y las Matemáticas. Las diversas técnicas de la prospección geofísica están basadas en varios principios físicos fundamentales, como son las leyes de la atracción gravitatoria y magnética, las cuales gobiernan en Óptica la refracción y la reflexión (tal como se aplican a la prospección sísmica), los elementos de la electricidad y la teoría

electromagnética.

Aunque estos principios son bastante simples, en general es difícil su aplicación al estudio de los materiales pétreos, que rara vez son homogéneos y que, con frecuencia, ofrecen propiedades físicas complejas.

Casi todos los métodos importantes de la prospección geofísica han sido desarrollados partiendo de las técnicas empleadas en un principio para el estudio, más o menos científico, de las características terrestres en gran escala. La prospección por gravedad se desarrolló después de que durante varias décadas habían sido llevadas a cabo mediciones con el péndulo para determinar la forma exacta de la Tierra, a base de las variaciones de la atracción gravitacional entre diferentes estaciones de observación. El método de refracción sísmica hace uso de los principios elaborados en los comienzos del siglo actual por los sismólogos de terremotos, que los pusieron a punto para desentrañar la estructura del interior de la Tierra. Los instrumentos magnéticos, que básicamente eran los mismos que los usados hoy en día para la prospección, hicieron posible levantar el mapa de algunos de los elementos magnéticos de la Tierra, en escala global, en tiempos tan antiguos como el siglo XVII.

Hoy en día, la actividad de la exploración geofísica ocupa un volumen mucho mayor que la investigación básica de la física de la Tierra. La dependencia de la prospección geofísica de la labor científica que la ha precedido ha evolucionado hasta convertirse en una fructífera interdependencia entre las dos, y muchos de los aparatos y técnicas desarrollados para la exploración de petróleo y minerales han sido empleados ventajosamente en estudios científicos relativos a la estructura de la corteza terrestre y de su interior. Asimismo, la capacitación del personal dedicado a trabajos de exploración ha aportado un incentivo económico y ayuda al creciente volumen de investigación geofísica en las universidades.

Lógicamente, la Geología y la Física son las ciencias más estrechamente vinculadas con la Geofísica. En menor grado, también la Geoquímica es una ciencia afín. Ahora bien, en su definición en sentido amplio están incluidas en la geofísica disciplinas a veces consideradas independientes, como Aeronomía, Meteorología, Oceanología, Hidrología u otras que se vinculan con la geología como Geodinámica y Tectonofísica. La Planetología y la Astrofísica pueden, a su vez, considerarse emparentadas o hasta todavía más amplias, inclusivas de la Geofísica.

En su definición en un sentido más restringido están comprendidas la Gravimetría (conectada con la Geodesia), la Magnetometría (con Geomagnetismo y Paleomagnetismo), la Goelectricidad, la Sismología y dos disciplinas también vinculadas con la geología: Radiometría (incluyendo Geocronología) y Geotermia (relacionada a la Vulcanología).

En todas ellas existen vertientes puras y prospectivas, a veces de difícil discernimiento, las cuales se comparan a continuación:

Geofísica Pura	Geofísica Aplicada
Gravimetría (con Geodesia)	Prospección gravimétrica
Magnetometría (Geo y Paleomagnetismo)	Prospección Magnetométrica
Geoelectricidad	Prospección Geoeléctrica
Radiometría (con Geocronología)	Prospección Radiométrica
Geotermia (con Vulcanología)	Prospección geotérmica
Sismología	Prospección Sísmica (Refracción y Reflexión)

HISTORIA DE LA GEOFÍSICA

En la antigua Grecia encontramos los primeros estudios rigurosos sobre la Tierra y el cielo, que aparecen también después en otras civilizaciones (Chinos, Mayas, etc.), destacándose Eratóstenes de Cirene quien a finales del siglo III a. C. calculó con escaso error el radio terrestre, así como la distancia de la Tierra al Sol y la inclinación del eje planetario.

El conocimiento de la Tierra se aceleró desde el Renacimiento. El término geofísica es empleado inicialmente por Julius Fröbel en 1834 y otros autores en años siguientes, pero aparece publicado por vez primera en Alemania gracias a Adolf Mühry en 1863: "Beitraege zur Geophysik und Klimatographie", y luego nuevamente en 1887 en el "Handbuch der Geophysik" de S. Günther. Si bien hubo algunas exploraciones geofísicas informales ya desde la alta Edad Media, el primer aparato específico de prospección geofísica data de 1879, el magnetómetro de los alemanes Thalen y Tiberg, con el que exitosamente buscaron yacimientos de hierro. Y la primera cátedra de geofísica se debe a Emil Wiechert, en 1898 en Göttingen, Alemania.

Desarrollo de la Geofísica

"Muchos de los contenidos científicos de la Geofísica son tan antiguos como la ciencia misma. Esto no es de extrañar, ya que la Tierra es el primer laboratorio en el que se realizan observaciones y al que se aplican las teorías científicas. Muchas de las disciplinas que componen hoy la Geofísica extienden sus raíces hasta los orígenes de las ciencias en la Antigüedad. Entre los antiguos griegos de los siglos III y IV a. de C., como, por ejemplo, Eratóstenes y Aristóteles, por sólo citar a dos, se encuentran ya cálculos geodésicos del tamaño de la Tierra y discusiones sobre el origen de los terremotos. La Geofísica moderna se desarrolla a la par de la ciencia en los siglos XVI Y XVII con Galileo, Gilbert, Newton, Halley, etc., y progresa juntamente con ella en los siglos XVIII y XIX. Sin embargo, el término «Geofísica», de acuerdo con W. Kertz, aparece por primera vez en 1863 en el tratado de Adolf Mühry Beitrage zur

Geophysik und Klimatographie. Georg van Neumayer, en 1871, define la Geofísica como el conocimiento de las relaciones físicas de la Tierra. En 1880, el profesor de Geografía de Königsberg Karl J. Zöppritz define más concretamente la Geofísica como aquella parte de las ciencias de la Tierra que trata del estudio de la actividad de las fuerzas físicas responsables del origen, evolución y estructura de la Tierra. La Geofísica para él llena un vacío existente en las ciencias de la Tierra que entonces constituían la Geografía y la Geología

“Antes de la generalización del término «Geofísica», los contenidos de esta ciencia se designaron con otros nombres. A. G. Werner, que procedía de la minería y geología, utiliza en 1755 el término «Geognosia», y mucho antes, en el siglo XVII, J. Zahn y A. Kircher utilizaron el de «Geoscópica». Alejandro von Humbolt, al que se le considera como uno de los padres de la Geofísica moderna y cuya influencia en esta ciencia fue muy grande, utilizó el término «Physikalische Geographie» (Geografía Física) y Franz Neumann el de «Physik der Erde» (Física de la Tierra). A finales del "siglo XVIII v principios del XIX, fuera del ámbito germano, en Francia, encontramos el uso del término «Theorie de la Terre» (Teoría de la Tierra) por De la Metherie y el de «Physique du Globe» (Física del Globo) por Saigey, término este último que sigue usándose en la actualidad. En Inglaterra, el profesor de Cambridge W. Hopkins introduce en 1838 el término "Physical Geology» (Geología Física) para designar la ciencia que trata de los aspectos fisicomatemáticos de la Geología

“Como resume Kertz, al final del siglo XIX, la Física había perdido el interés por la Tierra, para la Geología los métodos de la Geofísica le eran extraños y sus temas demasiado generales y algo parecido le sucedía a la Geografía. Esta situación justificaba el nacimiento de una ciencia separada con un nombre y contenido específico, la Geofísica. Esta ciencia queda consagrada definitivamente a finales del siglo XIX con el texto de S. Günther Handbuch der Geophysik, publicado en 1887, con la primera revista especializada creada en 1893 por G. Gerland, Beiträge zur Geophysik, y con la primera cátedra de Geofísica establecida en 1898 en la Universidad de Göttingen y que ocupó Emil Wiechert.

“La tendencia a unificar en una sola ciencia, a la que finalmente se dio el nombre de Geofísica, los aspectos fisicomatemáticos de los fenómenos relacionados con la Tierra encuentra desde sus principios el problema de establecer su relación con dos ciencias más antiguas, la Geografía y la Geología. Ya Günther en el prólogo de su obra se extiende en este sentido sobre el significado de la Geofísica y su carácter físico en contraste con el carácter más descriptivo de la Geografía y el limitado a los materiales directamente observables en la superficie de la Tierra y en pequeña escala de la Geología. Sin embargo, la separación entre Geología y Geofísica no es tan clara al principio, como lo demuestran la obra de E. Suess Das Anlitz der Erde, y M. Neumayr y E. Suess, Erdgeschichte que tratan igualmente temas de ambas ciencias.

“Otro problema es la relación entre la Geofísica y la Geodesia, ciencia con una larga

tradición y vinculada en muchos aspectos a la Astronomía. Sobre este asunto hay muchas opiniones, aunque se suele vincular a la Geofísica la parte de la Geodesia física y Gravimetría.

“Hemos visto que el inicio de la Geofísica como una ciencia independiente se realiza en la tradición alemana desde la Física y las Matemáticas y de una manera un tanto desligada de la Geología. Esta desconexión se agudiza en cierta manera durante la primera mitad del siglo XX, durante la cual las interrelaciones entre ambas disciplinas fueron escasas. Esta situación es algo distinta en Estados Unidos, al estar en muchas universidades la Geofísica integrada en un mismo departamento junto con la Geología. El contacto entre ambas disciplinas es, en efecto, muy necesario. La parte de la Geofísica que trata de la Tierra sólida necesita del conocimiento detallado de las capas superficiales que aporta la Geología, y su interpretación de la evolución temporal de las estructuras, y la Geología a su vez necesita de la Geofísica, si no quiere anclarse en una interpretación meramente cualitativa y descriptiva de los fenómenos geológicos. El geólogo, que estudia una región muy concreta, necesita relacionar sus observaciones con procesos tectónicos y estructuras más amplias y profundas cuya información le aporta la Geofísica. Afortunadamente, la tendencia actual es la de un acercamiento de ambas disciplinas, al acentuarse la matematización y el empleo de métodos físicos en el estudio de los problemas geológicos. Baste mencionar, entre otros, la determinación de las edades de estratos y fósiles por métodos radiactivos, el uso del magnetismo remanente de las rocas para determinar el movimiento relativo de bloques de la corteza terrestre y el empleo, cada vez más frecuente, de los métodos geofísicos al estudio de los estratos y formaciones geológicas. Por otra parte, al enfrentarse la Geofísica con problemas cada vez más concretos de la estructura y dinámica de la corteza terrestre, necesita para la interpretación de sus observaciones la información de los estudios geológicos, un gran impulso a esta cooperación interdisciplinaria se ha logrado con los proyectos internacionales Geodinámico y de la Litosfera en los que entre 1970 y 1990 se aunaron esfuerzos de todas las disciplinas de las ciencias de la tierra para abordar problemas relacionados con la estructura y dinámica de litosfera, corteza y manto superior de la Tierra. Es muy posible que con el tiempo la separación tan rígida entre Geofísica y Geología desaparezca en beneficio de unas ciencias de la Tierra unificadas, en las que las distintas metodologías científicas tengan su aplicación al estudio de los fenómenos relacionados con la Tierra.”

(texto extraído de Udías y Mezcúa, 1997, p. 19-22)

Fuerzas fundamentales de la Naturaleza

En la Figura 2 se sintetiza la fuerza relativa y el alcance de los cuatro campos de fuerza fundamentales del Universo. En el caso de la gravedad y el electromagnetismo (campos potenciales ambos), como es sabido, la fuerza disminuye en relación inversa

con el cuadrado de la distancia. Las fuerzas Nuclear Fuerte y Débil sólo actúan a escala del núcleo atómico: la primera mantiene unidos a los protones y neutrones (formados por quarks) contrarrestando al electromagnetismo, y la segunda es responsable de fenómenos como la desintegración beta, que actúa sobre los leptones (electrones, positrones, neutrinos).

Tras la unificación de las fuerzas electromagnética y nuclear débil, hecha por el paquistaní Abdul Salam y el estadounidense Steven Weinberg en 1964, muchos físicos han estado trabajando para hallar el vínculo entre éstas y la Nuclear Fuerte y, objetivo más complejo aún, el vínculo con la gravedad para unificar en una única gran teoría a toda la física del universo. Al momento del Gran Estallido o Big Bang, inicio del espacio-tiempo y de la entropía, se presume que todas las fuerzas estaban indiferenciadas. Teorías como la de las Supercuerdas con supersimetría intentan comprender estos conceptos fundamentales de toda la física.

En lo que a nosotros atañe, la geofísica se las arregla bien con las cuatro fuerzas principales disjuntas. De hecho, en algunos métodos estudiamos magnetismo y electricidad como fenómenos separados, o analizamos las perturbaciones sísmicas en forma separada de la gravedad, a la cual en última instancia se remite, o la radioactividad sin reparar en las fuerzas electromagnética y nuclear débil, y a la geotermia sin analizar que en esencia es también un fenómeno electromagnético.

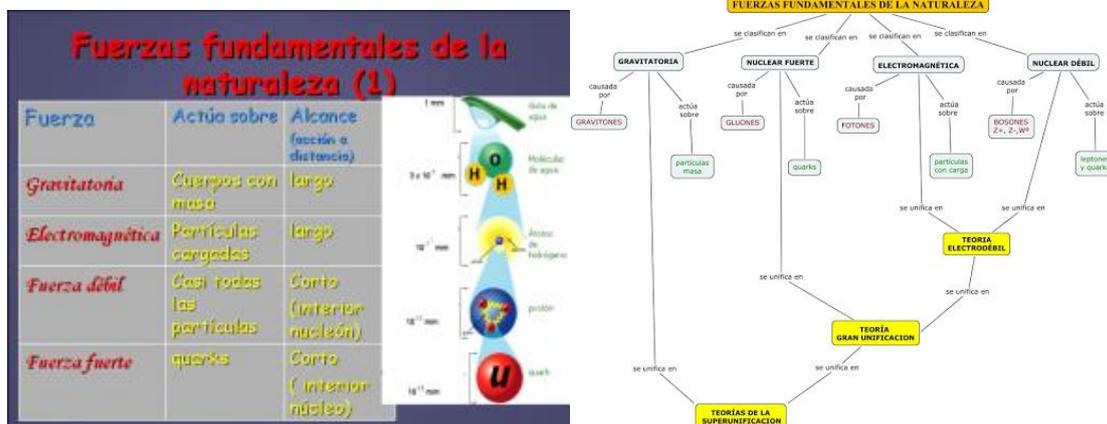


Figura 2: Fuerzas fundamentales de la Naturaleza y sus relaciones

Prospección Geofísica

La finalidad de las prospecciones geofísicas es detectar y localizar cuerpos y estructuras geológicas del subsuelo, y si es posible, determinar sus dimensiones y con frecuencia alguna de sus propiedades físicas. En trabajos de ingeniería la información acerca de la estructura interesa normalmente en función de su relación con el problema de construcción propuesto, pero también puede resultar interesante la determinación de las propiedades mecánicas del subsuelo. Por ejemplo, si una zona va a tener que soportar cargas importantes, será de gran utilidad el conocimiento de las

propiedades físicas (elásticas y plásticas) de los materiales del subsuelo.

En prospección, puede necesitarse el conocimiento de las estructuras por la conocida asociación de éstas con minerales de valor económico; un ejemplo típico de esto es la concentración de petróleo en anticlinales de rocas sedimentarias. El procedimiento en geofísica minera es sin embargo, algo diferente. Las minas de mineral con frecuencia presentan características que fácilmente se pueden medir y reconocer por técnicas geofísicas, pero suelen tener formas irregulares y encontrarse en rocas de estructuras complejas. El interés radica por lo tanto más en su detección y en la determinación de sus propiedades físicas que en la exacta interpretación cuantitativa.

Normalmente una prospección geofísica consiste en la ejecución de una serie de medidas sobre la superficie del terreno o en el aire paralelamente a ella pero a veces estas medidas se hacen a lo largo de un sondeo. En esencia las mediciones consisten en determinar las variaciones en el espacio o en el tiempo de uno o varios campos de fuerzas. El valor de estos campos viene determinado, entre otros factores, por la naturaleza de las estructuras del subsuelo y por lo hecho de que las propiedades físicas, o al menos una de ellas, de las rocas varía ampliamente de una zona a otra. Con frecuencia, las discontinuidades físicas corresponden a límites geológicos, por lo que numerosos problemas estructurales se reducen a la interpretación de los campos medidos en superficie en función de la firma de estas discontinuidades. Evidentemente, la mayor o menor facilidad de efectuar esta interpretación dependerá de la forma considerable del grado del contraste de las propiedades físicas de las rocas presentes en la estructura que se investiga, y la elección del método se hará en función de cuál sea la propiedad física que dentro de la estructura, ofrezca mayores contrastes. Sin embargo, no es éste el único factor que hay que considerar a la hora de elegir un método de prospección geofísica, ya que algunas técnicas se prestan más que otras a una interpretación cuantitativa, por lo que la elección del método puede hacerse más por la necesidad de una mayor precisión en la interpretación, aun cuando esto implique trabajar con magnitudes físicas que presenten menores contrastes entre sus valores.

Las propiedades de las rocas de las que se hace más uso en prospección geofísica son: densidad, susceptibilidad magnética, elasticidad y conductividad eléctrica. También se emplean aunque en menor proporción, otras propiedades como la radioactividad.

Toda masa ejerce un efecto gravitatorio, por lo que, lógicamente los cambios laterales en la densidad del subsuelo producirán variaciones pequeñas, pero a menudo detectables, de la gravedad medida en superficie. Del mismo modo muchas rocas son ligeramente magnéticas, con frecuencia tienen una imanación remanente y otra inducida por el campo magnético terrestre. Las diferencias en la intensidad de imanación de las rocas debida a diferencias de susceptibilidad, así como las variaciones en la dirección e intensidad de la imanación remanente, producen cambios en el campo magnético terrestre que pueden medirse en superficie. Por estos motivos,

resulta posible sacar conclusiones acerca de la estructura del subsuelo a partir del conocimiento de la variación espacial en superficie del campo gravitatorio o magnético.

Desgraciadamente los métodos gravimétrico y magnéticos de prospección tienen una importante limitación: en teoría existen un sin número de estructuras con capacidad de producir la misma respuesta en superficie. Sin embargo, en la práctica normalmente se dispone de alguna información geológica de la zona que combinada con los datos geofísicos, con frecuencia permite eliminar, al menos en parte, la indeterminación de la solución. Conviene señalar que en cualquiera de estos métodos, no es necesario conocer los valores absolutos de los campos magnético o gravimétrico, sino sólo la perturbación que en tales campos produce la estructura. Tal perturbación se conoce como anomalía.

Los métodos de prospección gravimétrico y magnético estudian campos de fuerzas naturales. Por su parte, los métodos sísmico y eléctrico (incluido el electromagnético), que estudian las propiedades elásticas y eléctricas de las rocas, necesitan de la introducción de energía en el terreno.

Como en estos métodos la energía hay que generarla artificialmente, es posible variar la distancia entre la fuente y el receptor, lo que se traduce en la posibilidad de interpretar las medidas de forma unívoca y más detallada que en los métodos de campo natural.

En los métodos eléctricos, la corriente continua o de baja frecuencia se introduce al terreno por medio de electrodos. En ellos se determina la forma e intensidad del campo del flujo de corriente en la superficie que depende, entre otras variables, de la distribución de resistividades en las rocas del subsuelo. Cuando se utiliza corriente continua, o alterna de baja frecuencia y ésta se aplica directamente al terreno, la medida consiste en esencia, en la determinación del gradiente del potencial, aunque, según el instrumento de medida empleado, puede presentarse como una resistencia. La energía eléctrica también puede introducirse al terreno por inducción, esto es, haciendo circular una corriente de frecuencia más elevada (de unos cuantos cientos o miles de ciclos por segundo) a través de una bobina que no está conectada directamente al terreno. En este método, llamado electromagnético, el campo de la bobina emisora puede sufrir alteraciones en amplitud, dirección o fase a causa de los conductores del subsuelo, y esta alteración se mide por medio de una bobina receptora y circuitos auxiliares.

De todos los métodos de prospección, el sísmico es el que hasta el momento se ha desarrollado más y el que mayor información puede suministrar. Como las rocas tienen propiedades elásticas y densidades diferentes unas a otras, las ondas elásticas se propagan con distintas velocidades a través de ellas y son reflejadas y refractadas en las interfaces que separan dos de ellas de distintas propiedades. Así, una onda elástica originada en la superficie por un impulso, tras reflejarse y refractarse en parte

regresa a la superficie, y a partir del conocimiento de su tiempo de llegada a gran número de puntos, pueda obtenerse una valiosa información acerca de la posición de las interfaces. Dos son las técnicas empleadas: una basada en el estudio de la onda reflejada y otra en el de la refractada.

La elección del método que se debe emplear en cada caso concreto normalmente no encierra mayores dificultades. En zonas de subsuelo estratificado, siempre que no sea de estructura muy compleja, los métodos sísmicos tienen una ventaja considerable con gran diferencia, la información que dan es más detallada, precisa e inequívoca que la suministrada por cualquier otro método. Sin embargo, en trabajos a pequeña escala y si las estructuras son sencillas, es preferible utilizar métodos eléctricos, ya que permiten determinar satisfactoriamente la forma del subsuelo, aunque no tan exactamente como empleando métodos sísmicos, y son más sencillos, quizás dos veces más rápidos y, consecuentemente, más económicos.

En minería, donde lo que se buscan son menas, con frecuencia las estructuras son demasiado complejas para emplear los métodos sísmicos de prospección. En estos casos, dado que las propiedades físicas de las menas difieren mucho de las del medio que las rodea, su detección se hace por métodos eléctricos, magnéticos e incluso gravimétricos. Con frecuencia su interpretación es sólo semi-cuantitativa como máximo, debido a que su forma es compleja y a que sus propiedades físicas varían notablemente de unos puntos a otros de la mena. A pesar de todo, a menudo se puede obtener información sobre su tamaño, forma y calidad.

En algunas ocasiones, un mismo problema se estudia por más de un método prospectivo. Así, por ejemplo, en investigaciones petroleras suelen hacerse estudios previos aeromagnéticos y gravimétricos de la zona, con objeto de acotar las zonas favorables que posteriormente se estudiarán por métodos sísmicos. Al mismo tiempo, la combinación de los resultados de la interpretación de dos métodos de prospección distintos referentes a una misma zona, permite eliminar falsas soluciones sin necesidad de efectuar una nueva investigación más detallada, o disminuye el margen de variabilidad de soluciones.

Una vez que se ha decidido el método o métodos que se va a emplear, se elige el equipo conveniente para el trabajo. A continuación debe considerarse el número de datos que debe tomarse para poder efectuar posteriormente una interpretación correcta. El número mínimo de medidas que tienen que efectuarse viene determinado por el objeto buscado en el trabajo y, hasta cierto punto por el presupuesto económico de que se disponga. Por ejemplo, el espaciado máximo entre estaciones válido en una prospección para detectar huecos de unos 15 m de ancho en la superficie de la roca firme, puede ser insuficiente para estudiarlos con detalle desde el punto de vista de la ingeniería. Otro problema fundamental que hay que considerar es el de los errores y el "ruido". Independientemente de los errores puramente instrumentales, cualquier medición está sometida al efecto de variaciones locales

pequeñas y circunstanciales de las propiedades del subsuelo (lo que constituye el llamado "ruido geológico"). Cuando este ruido no es despreciable respecto del valor observado de la anomalía, el espaciado de las estaciones debe ser menor si se quiere determinar la anomalía a partir de ellas. Con frecuencia, el ruido geológico es el que decide, más que los factores instrumentales, la posibilidad de detectar un objeto o estructura. Aun cuando el problema de este ruido no es de importancia decisiva, no puede despreciarse, y a causa de esto las interpretaciones basadas únicamente en medidas efectuadas a lo largo de perfiles con gran espaciado entre ellas, pueden ser muy poco fiables. Normalmente este espaciado se fija de forma que sea posible establecer la correlación entre las distintas estaciones, lo que permite eliminar la ambigüedad de la interpolación entre ellas.

Únicamente cuando la estructura geológica del subsuelo es sencilla es posible efectuar una interpretación exacta e inequívoca de las medidas geofísicas, pero aun en estos casos no se consigue siempre. Por ejemplo, un caso a primera vista sencillo, puede ser la determinación por métodos eléctricos de la profundidad a la que yace la roca firme bajo un recubrimiento de materiales no consolidados, problema que en principio parece reducirse a determinar la posición de la interfase que separa dos medios de diferente conductividad eléctrica. Sin embargo, el problema puede ser de muy difícil e inexacta resolución a causa de la falta de homogeneidad del recubrimiento, de, incluso, ligeras variaciones en su litología, del tamaño del grano y del grado de humedad, todos ellos factores capaces de originar marcados cambios en la conductividad. En estas condiciones el problema deja de ser la determinación de una sola interfase para convertirse en otro en el que existen muchas, algunas de las cuales no serán lateralmente indefinidas. Por este motivo, los métodos interpretativos basados en suposiciones previas acerca de la forma de la estructura carecen de valor y, en algunos casos, la complejidad de la estructura puede ser tal que imposibilite la obtención de la solución. Realmente, los recubrimientos no son totalmente homogéneos casi nunca, pero todos los métodos interpretativos tienen validez si las faltas de homogeneidad no son muy acusadas. La dificultad principal radica en darse cuenta, preferiblemente con anticipación o en una interpretación previa, de que lo que aparentemente es sencillo, es en realidad complejo. Cuando de antemano se conoce que las estructuras de una zona son muy complejas, la utilización de métodos geofísicos sólo puede justificarse por la imposibilidad de hacer perforaciones, y en estos casos se necesita gran cantidad de tiempo, trabajo y hasta dinero para obtener un estudio completo y detallado de la zona en cuestión.

Sin embargo, una investigación geofísica exhaustiva puede resultar rentable cuando se trata de buscar minerales útiles. Esto sucede, por ejemplo, en la prospección petrolera por métodos sísmicos, en la que se buscan estructuras situadas a gran profundidad (lo que elimina la posibilidad de hacer el estudio por medio de perforaciones, dado su enorme costo) y que con frecuencia se ve acompañado por el éxito. Las técnicas que se

utilizan para resolver este problema, están muy desarrolladas, por lo que normalmente puede obtenerse una información exacta e inequívoca.

La elección se hace más difícil cuando la geofísica se aplica a la resolución de problemas mineros, de ingeniería o búsqueda de agua subterránea a poca profundidad. En este tipo de problemas, no puede desecharse "a priori" la posibilidad de efectuar perforaciones, pues aunque son más costosas que los métodos geofísicos, suministran datos más seguros y exactos. En estas condiciones, el empleo de métodos geofísicos dependerá en gran parte de la complejidad de cada problema concreto.

Desafortunadamente, con frecuencia se recurre a los métodos geofísicos cuando las perforaciones fracasan a causa de la complejidad del problema, e investigaciones que podrían realizarse económicamente por métodos geofísicos con perforaciones de apoyo, resultan muy costosas por el empleo intenso de perforaciones.

La Anomalía

Es el concepto central de la geofísica prospectiva (del latín *prospicere*, examinar). De lo que se trata es de registrar, procesar y graficar la respuesta dada por distintos campos físicos en las áreas de potencial interés exploratorio o de desarrollo de recursos. Y entonces buscar los sectores de valores anómalos respecto al fondo regional e interpretarlos en términos geológicos a fin de determinar los sitios de interés. La geofísica, como toda observación humana de cualquier índole, sólo detecta discontinuidades, es decir cambios –técnicamente medibles–, de las propiedades físicas a través del espacio o del tiempo. Y también debe tenerse presente que no importan tanto los valores absolutos de lo que se mida, sino más bien las diferencias, o sea los valores relativos, respecto de zonas o tiempos cercanos (Absoluto es un gradiente geotérmico de $0,039^{\circ}/m$; relativo es que ese valor sea $0,007^{\circ}/m$ mayor que el de un área vecina).

La búsqueda de anomalías se hará, antes que nada, evaluando información previa de las potenciales áreas a prospectar en función de los objetivos planteados, para comenzar allí donde las condiciones geológicas y de factibilidad económica sean a priori más promisorias. Cuando se ha definido el área, se establece el mallado de mediciones, ya sea que tales mediciones se hagan a lo largo de trayectorias predefinidas (paralelas entre sí, o formando una cuadrícula, o cualquier otra figura que se considere oportuna) o bien si son puntos más o menos distantes ubicados según las facilidades geográficas de la zona. Usar una malla de muestreo numérico más fina o más gruesa –es decir, hacer mediciones más cercanas o más lejanas entre sí– dependerá indirectamente de la escala del trabajo –por cuestiones prácticas y de costos–, pero fundamentalmente dependerá del tamaño mínimo de las anomalías de interés. En otras palabras, la red es más cerrada o abierta según sea el tamaño de los peces que queremos capturar.

Tras el planeamiento inicial, se entra en la etapa de registro o adquisición (de adquirir, para buscar) de los datos de campo: posicionamiento y mediciones físicas que se hacen con los correspondientes receptores (equivalentes de la radio, la tele, etc.), para lo cual se hacen pruebas de campo previas a fin de optimizar los parámetros. Luego se pasa a la segunda etapa, de cálculos correctivos o reducciones que constituyen el procesamiento (de processus, adelante marchar, avanzar) necesario para homogeneizarlos, es decir hacerlos comparables, y poder entonces graficarlos. Para finalmente hacer la tercera etapa de interpretación (de interpretari, entre preciar, evaluar) en términos geológicos y eventualmente de recursos potencialmente explotables. Aquí es fundamental la traducción del lenguaje de la física al lenguaje concretamente aplicado.

Debe diferenciarse señal (de signum), los datos registrados que nos interesan, del ruido (de rugitus, al igual que rugido), algo fútil que suele interferir y hasta asustar, y que procuraremos evitar en la adquisición, suprimir o al menos reducir al aplicar las reducciones del procesamiento y, de persistir, al menos tenerlos en cuenta durante la interpretación para no caer en conclusiones erróneas.

Los datos pueden presentarse en forma de perfiles de pozo (también denominados diagráfias o testificación de pozo o sondeo –en inglés logs– que son datos esencialmente unidimensionales en el eje z ó 1D, salvo componentes de desviación horizontal del pozo), perfiles horizontales (conocidos como calicatas, en el eje x ó y , 1D), cortes (también llamados secciones verticales, tomografías o transectas, en este caso bidimensionales en x, z , o sea 2D), mapas (planos o secciones horizontales, que también son datos 2D pero llevados a una vista en planta x, y en lugar de vertical), o volúmenes de información (tridimensional ó 3D, en x, y, z , también denominados cubos aunque su forma poliédrica sea otra). Y también cualquiera de estas configuraciones incorporando la variable de cambio temporal (en inglés time-lapse), esencialmente allí donde se está explotando un recurso y los registros físicos se modifican en función de la disminución del mismo, por lo que en todos los casos se agrega la dimensión tiempo: por ejemplo un volumen (3D) pasa a un delta de volumen ($D3D = 4D$, con x, y, z, t).

Las curvas que unen puntos de igual valor de la magnitud física relevada se denominan isoanómalas, aunque no necesariamente estemos en presencia de una anomalía significativa. Y los perfiles o cortes o mapas o volúmenes son denominados genéricamente gráficas de anomalía gravimétrica, magnética, radiométrica, de velocidades sísmicas, etc. El área anómala en el mapa casi siempre es mayor que el área interesada por los emplazamientos geológicos profundos que la causan, dada su influencia lateral en la superficie.

La prospección geofísica suele hacerse sobre la superficie terrestre, pero también dentro de pozos, o puede ser marina (o lacustre o fluvial, desde barcos, lanchas, gomones, etc.), aérea (aviones, helicópteros, globos, drones) e incluso satelital,

dependiendo de las limitaciones inherentes a las magnitudes físicas a medir –por ejemplo, la radioactividad medida sobre el mar es casi nula o las ondas sísmicas pierden sus propiedades distintivas al entrar al aire– y también según sean las tecnologías disponibles y sus costos. Las modalidades aéreas, por caso, son más costosas, pero se tornan económicas cuando se debe relevar un área muy extensa.

El grado de resolución (detección de detalle o calidad de enfoque) varía con la escala y la profundidad y debe preverse lo mejor posible. Toda vez que interviene una función de onda (componente residual del campo de gravedad o magnético, ondas electromagnéticas, sísmicas, etc.) cuanto mayor es la frecuencia o el número de onda, mayor (o sea, mejor) es la resolución de la geología de pequeña escala. Pero lamentablemente las ondas de corto período (longitud de onda corta) se atenúan con la distancia y para ver eventos profundos hay que emplear ondas largas (de baja frecuencia o bajo número de onda) y resignarse a perder detalles.

Es muy importante tener en cuenta que distintas realidades del subsuelo pueden producir similares anomalías geofísicas: no existe correspondencia biunívoca entre anomalías geofísicas y modelos geológicos, es decir, no hay una función biyectiva entre ambos conjuntos, sino que ésta es de tipo sobreyectivo. A cada anomalía geofísica le puede corresponder más de un modelo geológico, usualmente muchos alternativos, lo cual hace indispensable la cuidadosa evaluación de todos los antecedentes geológicos, geoquímicos, de pozos, de otros métodos geofísicos, etc. Y recordar que la esencia del método científico es hallar el modelo que mejor ajusta con todos los datos disponibles, ¡no forzar los datos al modelo que mejor nos pinte!

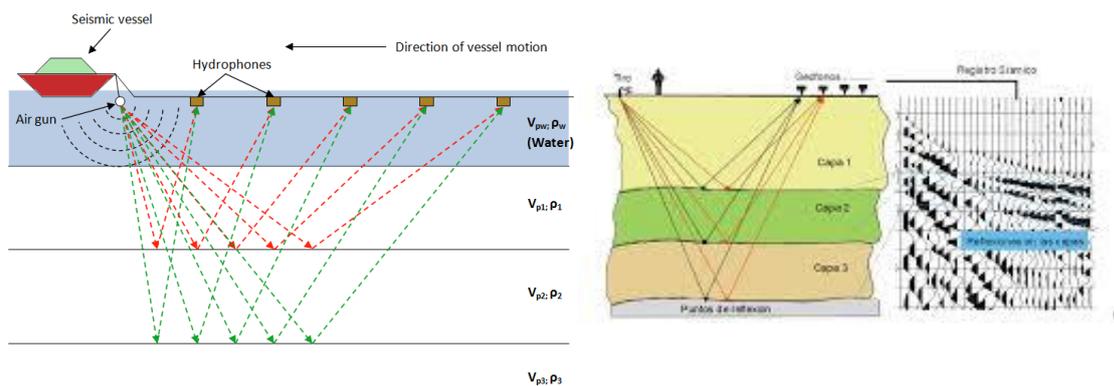
MÉTODOS DE PROSPECCIÓN GEOFÍSICA

Método de Reflexión Sísmica

Con esta técnica se llega a reconstruir la estructura del subsuelo haciendo uso de los tiempos requeridos por una perturbación sísmica engendrada en el suelo por una energía determinada (explosión de dinamita próxima o sobre la superficie, golpeadores, vibradores, cañones de aire, etc.) para volver a ésta después de ser reflejada en las formaciones mismas. Las reflexiones son registradas por instrumentos detectores (geófonos o hidrófonos) colocados sobre el suelo, cerca del punto de energía, que responden a los movimientos del suelo. Las variaciones en los tiempos de reflexión de un lugar a otro de la superficie indican, posiciones estructurales de las rocas del subsuelo. Las profundidades hasta las superficies reflectoras son determinadas a base de los tiempos, y la velocidad de la zona. La técnica de reflexión proporciona más información estructural y mejor que cualquier otro método geofísico, pero presenta la desventaja de que es más lenta y costosa que la mayoría de los restantes métodos. Además, son muchas las regiones donde las reflexiones sólo

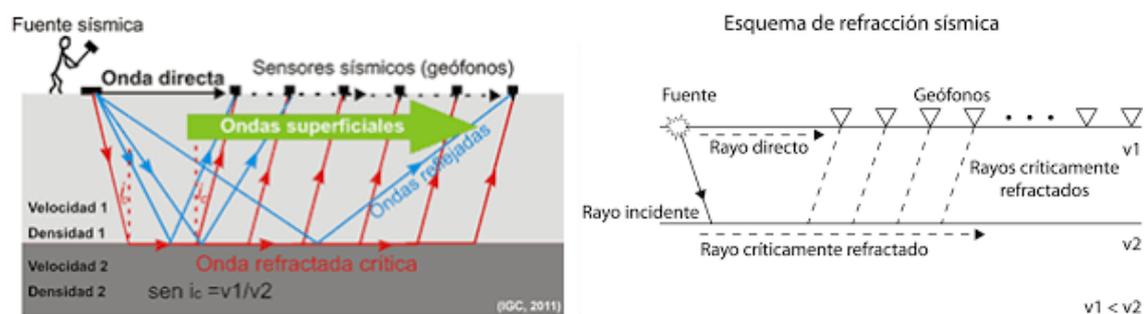
pueden obtenerse con grandes dificultades.

En la actualidad se encuentra en pleno apogeo la registración sísmica 3D y 4D (con parámetro en el tiempo), donde prácticamente no hay yacimiento de hidrocarburos en el mundo que no tenga una registración 3D. La registración 4D es más limitada y se la realiza en los yacimientos donde se encuentra avanzada su recuperación secundaria o terciaria. Comparando los parámetros sísmicos de una 3D con otra registración 3D a posteriori se puede observar el avance del vapor o el agua de inyección en una recuperación del yacimiento.



Método de Refracción Sísmica

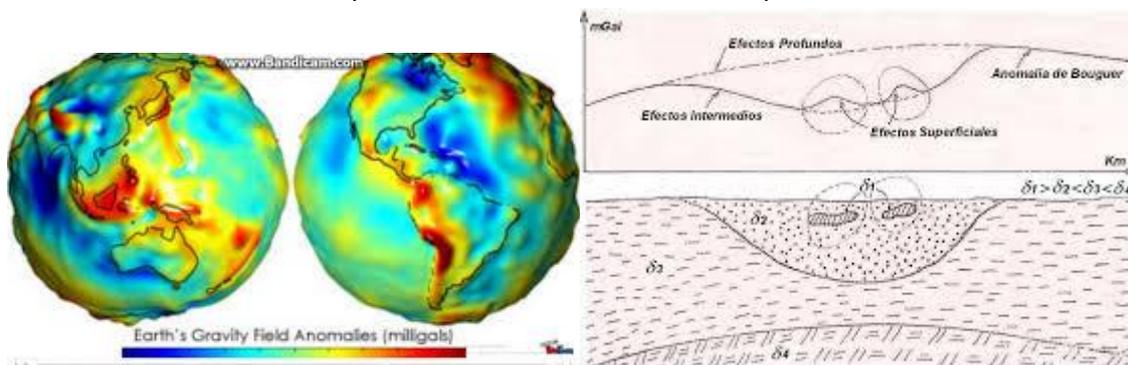
En este método los instrumentos detectores se disponen a cierta distancia del punto de explosión, que debería ser mayor en comparación con la profundidad a que se encuentre el horizonte objetivo. Las ondas explosivas recorren grandes distancias horizontales a través del suelo, hacen uso de una de las leyes de Snell, del ángulo crítico. El tiempo requerido para su desplazamiento informa acerca de la velocidad y profundidad de ciertas formaciones del subsuelo. El método de refracción proporciona datos de la velocidad en las capas refractantes que, con frecuencia, permiten al geólogo, luego de una interpretación identificarlas o especificar las velocidades y el espesor de las capas involucradas. Por lo general, este método hace posible cubrir una zona dada en menos tiempo que con el método de reflexión. Puede ser muy utilizado para la localización de capas bien consolidadas en la construcción de diques o puentes.



Método por Gravedad

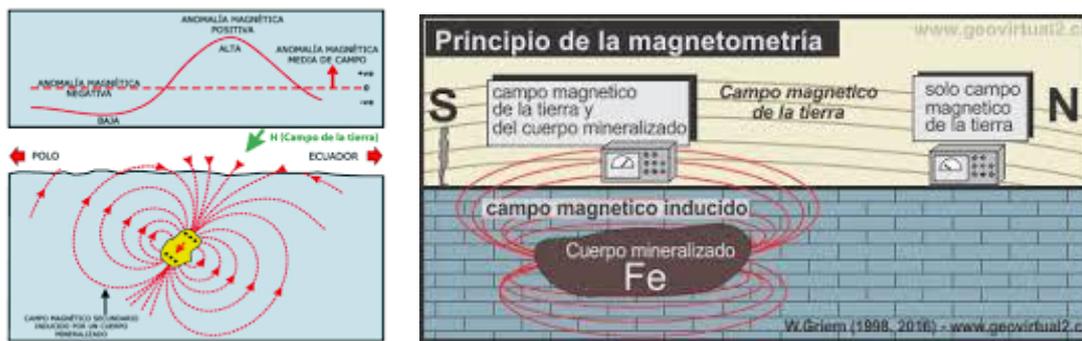
En la prospección por gravedad se miden las pequeñísimas variaciones que en la atracción gravitatoria ejercen las rocas emplazadas en los primeros kilómetros por debajo de la superficie del suelo. Los diferentes tipos de rocas tienen densidades

diferentes y las rocas más densas ejercen mayor atracción gravitacional. Si las rocas más densas están arqueadas hacia arriba, formando una elevación estructural, tal como un anticlinal el campo gravitatorio terrestre será mayor sobre el eje de la estructura que a lo largo de sus flancos. Por otra parte, un domo salino que es menos denso que las rocas en que está intruido puede ser descubierto gracias a los bajos valores de la gravedad que normalmente son registrados sobre el mismo. Las anomalías de la gravedad buscadas en la exploración petrolífera pueden representar tan sólo una millonésima, y hasta una diez millonésima, del campo total terrestre. Por esta razón, los instrumentos empleados han de ser extremadamente sensibles, y los gravímetros modernos permiten descubrir variaciones de la gravedad hasta de una cienmillonésima del campo terrestre. En la actualidad las lecturas de gravedad pueden realizarse mediante helicópteros o aviones con excelente precisión.



Método Magnético

La prospección magnética determina las variaciones del campo magnético terrestre atribuibles a cambios de estructura, o de la susceptibilidad magnética de algunas rocas próximas a la superficie. Las rocas sedimentarias presentan, en general, una susceptibilidad muy pequeña en comparación con las ígneas o metamórficas, y la mayoría de las exploraciones magnéticas están encaminadas a levantar el mapa de la estructura sobre o dentro del basamento o a descubrir directamente minerales magnéticos. El método magnético resultaba útil para la búsqueda de petróleo cuando la estructura de las capas sedimentarias petrolíferas estaban regidas por características topográficas tales como crestas o fallas sobre la superficie del basamento. Las anomalías magnéticas a partir de la parte superior del basamento pueden aportar información relativa a la estructura de las capas superiores. Sucede con frecuencia que resulta difícil distinguir las anomalías magnéticas debidas a la topografía del basamento de las que son consecuencia de cambios laterales en la composición de la roca del basamento, y esta ambigüedad limita la eficacia del método. La mayor parte de la prospección magnética se realiza en la actualidad con instrumentos montados en aviones.

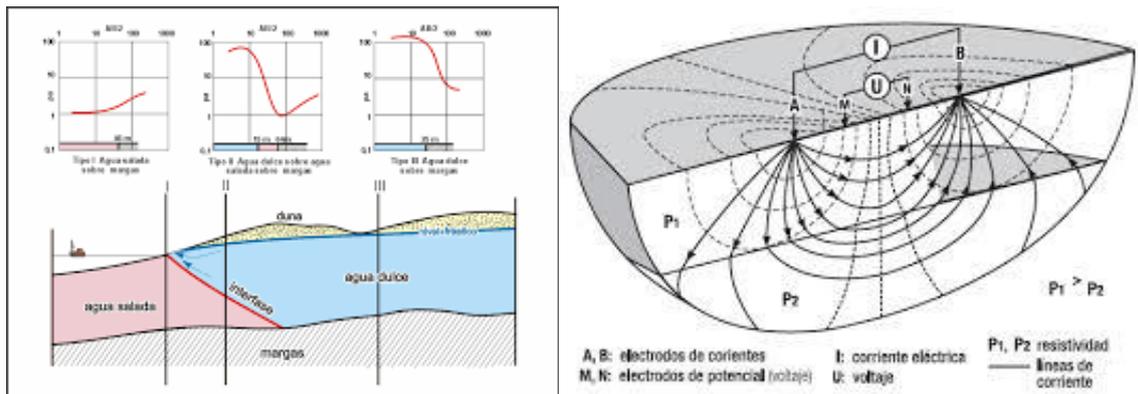


Métodos Eléctricos

Existen varias técnicas geofísicas destinadas a detectar anomalías en las propiedades eléctricas de las rocas, tales como la conductibilidad, auto-potencial y respuesta a la inducción. A base de estas anomalías puede resultar posible localizar minerales que ofrezcan características eléctricas distintivas, o levantar características estructurales asociadas a yacimientos de petróleo o de minerales. El método de resistividad se emplea para determinar variaciones laterales o verticales de la conductibilidad en el interior del suelo, y se utiliza con frecuencia para medir la profundidad a que se encuentra la roca firme en conexión con proyectos de ingeniería civil, dado que, normalmente, existe un gran contraste entre la conductibilidad de la roca firme y los materiales no consolidados que la cubren. El método de corrientes telúricas aprovecha como fuente las corrientes terrestres naturales en lugar de corrientes engendradas artificialmente e introducidas en el suelo.

El método auto-potencial se utiliza para detectar las presencias de ciertos minerales que reaccionan con electrólitos del suelo, engendrando potenciales electroquímicos. Una masa de sulfuros que aparezca más oxidada a poca profundidad que a gran profundidad engendrará potenciales de este tipo que pueden ser registrados por electrodos situados en la superficie.

Los métodos electromagnéticos detectan anomalías en las propiedades inductoras de las rocas del subsuelo. Se introduce en el suelo una corriente alterna, por lo general de alta frecuencia, y sobre la superficie o en el aire se miden la intensidad y el desfase de los potenciales inducidos por las rocas enterradas. Muchas menas de metales comunes engendran corrientes inducidas de intensidad muy superior a las de las rocas circundantes.



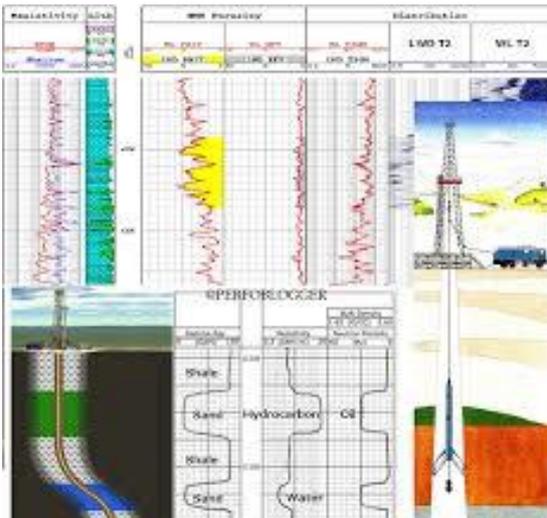
Prospección por radiactividad

La actual necesidad de encontrar primeras materias fisionables para ser usadas en los reactores nucleares ha determinado en la prospección del uranio un auge único en la historia de la exploración minera. La mayor parte de esta actividad ha implicado el empleo de instrumentos geofísicos, es decir, de detectores de radiaciones como los contadores Geiger o escintilómetros. El bajo costo de algunos de estos aparatos ha dado como resultado una labor geofísica, algo así como de fin de semana, una pequeña parte de la cual ha tenido éxito satisfactorio. Gran parte de la exploración del uranio ha sido realizada desde aviones, con empleo de escintilómetros especialmente adaptados para este uso. De todos los métodos geofísicos, los de radiactividad son los que tienen la menor penetración, puesto que dichas radiaciones son absorbidas por menos de noventa centímetros de tierra que cubre el material radiactivo.



Registro en pozos

Esta técnica geofísica, muy empleada, implica la exploración del suelo con instrumentos bajados a pozos cuyas lecturas son registradas en la superficie. Entre las propiedades de las rocas que son registradas de ordinario, figuran la resistividad eléctrica, auto-potencial, producción de rayos gamma (naturales y en respuesta al bombardeo con neutrones), densidad, susceptibilidad magnética y velocidad acústica. Los geólogos hacen más uso de varios de estos registros que de otros tipos de datos geofísicos.



BIBLIOGRAFÍA DE REFERENCIA

- ✓ Burger, H., 1992. Exploration geophysics of the shallow subsurface (p 1-6). Prentice-Hall.
- ✓ Cantos Figuerola, J., 1972. Tratado de geofísica aplicada (p 18-34). Librería de Ciencia e Industria.
- ✓ D'Alessandro, A., Bucalo, F., Coltelli, M. y Martorana, R., 2015. Drones: new technology for geophysics? Near Surface Geoscience Conference, 21st European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics.
- ✓ Griffiths, D. y King, R., 1972. Geofísica aplicada para ingenieros y geólogos (p 13-18). Editorial Paraninfo.
- ✓ Howell, B., 1962. Introducción a la geofísica (p 14-18). Ediciones Omega.
- ✓ Dobrin, M., 1976. Introduction to geophysical prospecting (p 1-24). McGraw-Hill.
- ✓ Sharma, P., 1976. Geophysical methods in geology (p 1-5). Elsevier Scientific and Publishing Co.
- ✓ Telford, W., Geldart, L., Sheriff, R. y Keys, D., 1976. Applied geophysics (p 1-6). Cambridge University Press.
- ✓ Udías, A. y Mezcuá, J., 1997. Fundamentos de geofísica (p 19-35). Alianza Editorial.