

INFORME FINAL DE PASANTIA ESP ENERGY GROUP
EL PETRÓLEO EN COLOMBIA: UNA NUEVA TECNOLOGÍA DE
EXPLORACIÓN DE HIDROCARBUROS
OIL AND GAS FINDER TECHNOLOGY

Presentado ante

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS
PROYECTO CURRICULAR DE LICENCIATURA EN FÍSICA



Por

Ingrid Lorena Salinas Gualtero

Para optar al Título de

Licenciada en Física

Bogotá

Colombia

2017

©,2017

Hecho el depósito de ley

Depósito Legal.....

INFORME FINAL DE PASANTIA ESP ENERGY GROUP
EL PETRÓLEO EN COLOMBIA: UNA NUEVA TECNOLOGÍA DE
EXPLORACIÓN DE HIDROCARBUROS
OIL AND GAS FINDER TECHNOLOGY

Por

Ingrid Lorena Salinas Gualtero

Para optar al Título de

Licenciada en Física

Director Académico

Fabio Omar Arcos.

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

FACULTAD DE CIENCIAS Y EDUCACIÓN

PROYECTO CURRICULAR DE LICENCIATURA EN FÍSICA

Bogotá

Colombia

2017

Salinas G., Ingrid

**EL PETRÓLEO EN COLOMBIA: UNA NUEVA TECNOLOGÍA DE
EXPLORACIÓN DE HIDROCARBUROS
OIL AND GAS FINDER TECHNOLOGY**

**Director Académico: Fabio Omar Arcos. Bogotá, Universidad Distrital Francisco
José de Caldas. Facultad de Ciencias y Educación. Proyecto Curricular de
Licenciatura en Física.**

Año 2017.

Palabras Claves: Exploración, hidrocarburos, tecnología, geofísica, aplicación, conocimientos, pasantía.

Resumen: La realización del proyecto de grado en la modalidad de pasantía, fue orientado a la aplicación de los conocimientos adquiridos en el programa de Licenciatura en Física de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, para el desarrollo y comprensión de un nuevo método geofísico aplicado en Colombia, tal como lo es la **Oil and Gas Finder Technology**¹, tuvo una duración de 20 semanas en las cuales se realizaron actividades de apoyo en el grupo de investigación de la empresa ESP ENERGY GROUP donde se desarrolló dicha pasantía, en este proceso se adquirieron nuevos conocimiento enfocados a la comprensión de métodos geofísicos y la exploración de hidrocarburos en Colombia, dentro de los aspectos físicos que subyacen en la explicación de dichos métodos geofísicos estudiados se encuentran, la Física de Ondas, el Electromagnetismo (métodos eléctricos), la óptica (sísmica de refracción y reflexión), la Mecánica clásica (gravimetría), además de algunos conceptos relacionados con el Procesamiento Digital de Señales y la Estadística, el desarrollo de esta pasantía se convirtió en el

¹ OFT

punto de partida de una carrera profesional, ya que se descubrió un campo de aplicación de los conocimientos adquiridos muy amplio y muy enriquecedor en la formación como profesional.

Dedicatoria

Gracias a Dios en primer lugar porque la fe que he creado hacia Ti y Tú presencia me han ayudado a salir adelante, en todos los momentos, en especial en los más difíciles, por permitirme vivir una vida tan llena de bendiciones, por darme el privilegio de contar con ángeles tan maravillosos que he tenido en mi vida, por darme la fortaleza de sacar adelante todas mis metas.

Gracias a mi madre biológica por darme la vida y aún más importante, por acompañarme en este proceso, fuiste un gran apoyo.

Gracias a mi madre de crianza por brindarme su apoyo espiritual y moral en todo momento, por enseñarme los valores que me hicieron una mujer integra y luchadora.

Gracias a mi padre por criarme y darme grandes enseñanzas que me hicieron una mejor persona cada día, por enseñarme el valor de la perseverancia, tú fuiste mi mayor motivo para alcanzar esta meta.

Gracias a mis hermanos de crianza que siempre fueron ejemplos de superación y que me han brindado su apoyo y amor incondicional.

Gracias a mi hermano materno, quien siempre me motivo para culminar este proyecto de vida, espero ser orgullo para él y poder acompañarlo y apoyarlo en el cumplimiento de sus sueños también.

Gracias a ti mi amor por tu apoyo incondicional, por estar siempre ahí en cada momento, este también es un triunfo tuyo, porque de tu mano alcance esta meta.

Agradecimientos

A mi tutor académico, el profesor Fabio Omar Arcos, que se preocupa como nadie más lo hace por sus estudiantes, por su guía y su paciencia. Gracias por el tiempo invertido en mí.

A todos los profesores del consejo Curricular de Licenciatura en Física, que hicieron parte de todo el proceso en mi formación como profesional.

A mis compañeros de estudio, por ser ellos también parte de mi formación académica, sin su ayuda y sus consejos hubiera sido más difícil sacar adelante esta carrera.

A mis jefes, el Ingeniero Mario Zamora y la Dra. Lyda Erazo, por darme la oportunidad de completar mi formación académica y dejarme pertenecer a una pequeña familia de gente excepcional. Gracias a todos los compañeros de Esp Energy Group por los momentos de risa, la ayuda y por supuesto el apoyo que me brindaron.

Gracias al Geólogo Mauricio Blanco, por su paciencia infinita y por compartir sus conocimientos sin importar el tiempo que perdiera ayudándome y guiándome hacia este momento. Gracias por creer en mí.

Al M.Sc en Geofísica Ricardo Ceballos que me enseñó con mucha dedicación parte de sus conocimientos sobre esta linda ciencia, gracias por compartir conmigo.

A mis amigas incondicionales, porque juntas hemos logrado acompañarnos en todo momento y de la mano de Dios vamos creciendo mutuamente en todos los sentidos.

A todos los que, de una forma u otra manera, han puesto algo de sí mismos en mí y me han hecho llegar hasta donde he llegado, que espero apenas sea el comienzo de una vida profesional llena de grandes logros.

Tabla de Contenido

1. Introducción.....	1
1.1. Justificación.....	2
1.2. Objetivos.....	3
1.2.1. Objetivo general.....	3
1.2.2. Objetivos específicos.....	3
2. Descripción de la Pasantía.....	4
2.1. Presentación de la Compañía.....	4
2.2. Actividades realizadas.....	4
3. Descripción Teórica de Métodos de Exploración deHidrocarburos.....	6
3.1. Exploración.....	6
3.1.1. Los Métodos Geológicos.....	6
3.1.2. Los Métodos Geofísicos.....	7
3.1.3. Geofísica.....	7
3.1.4. Clasificación de los Métodos Geofísicos.....	8
3.2. Sísmica.....	9
3.2.1. Principio de Huygens.....	11
3.2.2. Principio de Fermat.....	11
3.2.3. Ley de Reflexión de una onda.....	11
3.2.4. Ley de Snell.....	11
3.2.5. Principios del Registro Sísmico.....	12
3.2.6. Metodología de Adquisición Sísmica.....	12

3.2.7. Aplicaciones.....	13
3.3. Gravimetría.....	14
3.3.1. Atracción Terrestre.....	15
3.3.2. Instrumentos de Medida.....	16
3.3.3. Aplicaciones.....	18
3.4. Magnetometría.....	20
3.4.1. La Tierra como un Imán - Dipolo Magnético Terrestre.....	20
3.4.2. Componentes.....	22
3.4.3. Comportamiento Magnético de las Rocas.....	22
3.4.4. Instrumentos de Medida.....	23
3.4.5. Prospección Magnetometría.....	24
3.4.7. Aplicaciones.....	24
3.5. Geoelectromagnetismo.....	26
3.5.1 Electromagnetismo Terrestre.....	26
3.5.2 Instrumentos de Medida.....	26
3.5.3. Prospección Electromagnetica.....	27
3.5.4. Aplicaciones.....	28
3.6. Geotermología.....	29
3.6.1. Instrumentos de Medida.....	30
3.6.2. Prospección Geotérmica.....	30
3.7 Radiometría.....	31
3.7.1. Radioactividad en la Tierra.....	32
3.7.2. Instrumentos de Medida.....	32

3.7.3. Prospección Radiométrica.....	33
3.7.4. Aplicaciones.....	33
4. Tecnología para la Exploración de Hidrocarburos Oil And Gas Finder Technology (O.F.T).	33
4.1. Reseña histórica del método OFT.....	35
4.2. Principios físicos aplicados en el método OFT.....	36
5. Reflexión.....	42
6. Conclusiones.....	49
7. Bibliografía.....	50

Índice de Figuras

1. Métodos Geofísicos, imagen adaptada desde (ANH 2009)	9
2. Esquema del proceso de adquisición sísmica. Se observan los procesos de apertura de trócha, perforación, ubicación de geófonos y registro de ondas sísmicas, imagen adaptada desde (ANH 2009)	13
3. Variación en las mediciones gravitacionales, ante la presencia de un cuerpo en el subsuelo, imagen adaptada desde (ANH 2009).....	14
4. Diferentes modelos de gravímetros disponibles en el mercado, imagen adaptada desde (ANH 2009).....	16
5. Ejemplo de un mapa gravimétrico, imagen suministrada por el M.Sc en Geofísica Ricardo Ceballos Garzón.....	19
6. Mapa Gravimétrico de Colombia (Anomalía Total de Bourguer). Las tonalidades más azules corresponden a zonas con materiales de menor densidad, los colores más rojizos a zonas de mayor densidad, imagen adaptada desde (ANH 2009).....	19
7. Modelo de la Tierra como un Dipolo Magnético, imagen adaptada desde (ANH 2009).....	20
8. Componentes del campo magnético, imagen adaptada desde (ANH 2009).....	21
9. Mapa Magnetométrico de Colombia (Anomalías de Intensidad Magnética Total) Las tonalidades más azules corresponden a valores menos magnéticos, los colores más rojizos a rocas más magnéticas, imagen adaptada desde (ANH 2009).....	25
10. Instrumentos para mediciones geo electromagnéticas (Resistividad), imagen adaptada desde (ANH 2009)	27
11. Diagrama esquemático de la geometría y producto obtenido en un levantamiento Geo eléctrico. Los tonos más azules corresponden a zonas con menor resistividad, los colores más rojizos a zonas de mayor resistividad. (A): Corriente; (V): Voltaje, imagen adaptada desde (ANH 2009).....	28
12. Diagrama idealizado del comportamiento de flujo termal terrestre. Imagen adaptada de (ANH2009).....	30

13. Mediciones geofísicas satelitales detectando emisiones termales de la superficie terrestre, imagen adaptada desde (ANH 2009).....	31
14. Liberación de energía por parte de un átomo radioactivo, imagen adaptada desde (ANH 2009).....	32
15. Densidad de energía de la radiación de cuerpo negro en función de la longitud de onda para diferentes temperaturas, imagen adaptada de (Terán Pérez, 2013).....	37
16. Mapa de cuencas Sedimentarias de Colombia, imagen adaptada de (Eder Ordoñez, 2012).....	46
17. Tabla de Producción por cuenca y su participación en la producción Nacional, imagen adaptada de (Eder Ordoñez, 2012).....	46

1. Introducción

En el presente informe de pasantía, se muestran los resultados obtenidos en la empresa ESP ENERGY GROUP, ello como proyecto de grado para obtener el título de Licenciada en Física, en este sentido la pasantía permitiría además complementar la formación académica del programa cursado, teniendo una oportunidad de integración en el campo laboral. En el informe se expone de manera concreta las actividades asignadas y realizadas durante el periodo de la pasantía, que consistieron en hacer labores de asistencia técnica en el área de nuevas tecnologías y ser parte activa del grupo de investigación de la empresa en el proceso de desarrollo y entendimiento de un nuevo método de prospección llamado **OIL AND GAS FINDER TECHNOLOGY**, aplicando los conocimientos adquiridos durante el programa de Licenciatura en Física y algunas otros inherentes a la industria petrolera que fueron adquiridos en este proceso.

Otro de los aspectos más relevantes de esta pasantía es presentar a los estudiantes o egresados del programa de Licenciatura en Física una oportunidad en la industria petrolera como opción para la aplicación de sus conocimientos dado que la Física es el pilar en el desarrollo de los métodos de prospección Geofísica.

Es preciso resaltar que actualmente la industria petrolera necesita profesionales capacitados y con muy buenas bases teóricas en el área de la Física, para que puedan aplicar sus conocimientos y ayudar al desarrollo de herramientas que sirvan para la identificación de nuevos prospectos petroleros, lo cual interviene en el desarrollo social y empresarial de nuestro país, en este sentido se espera que esta pasantía se convierta en un primer paso para la reflexión sobre el currículo y posibles aplicaciones en diferentes campos relacionados con la industria petrolera.

1.1. Justificación

La aplicación de la geofísica permite la solución de problemas relacionados con la detección de yacimientos de hidrocarburos (petróleo y gas) y minerales (oro, cobre) presentes en el subsuelo. Los métodos geofísicos de prospección tienen en cuenta la variación en las propiedades físicas de los materiales que componen el subsuelo, tales como: densidad, conductividad eléctrica, susceptibilidad magnética, entre otros, lo cuáles son conocimientos adquiridos en el programa académico de Licenciatura en Física:

Teniendo en cuenta que el programa ofrece varias modalidades para la culminación de los estudios, las cuales son:

- Trabajo de grado.
- Pasantía.
- Seminario de investigación.

La idea fue entonces realizar un proyecto de grado en la modalidad de pasantía que cumpliera con los requisitos del plan de estudios del proyecto curricular de Licenciatura en Física con miras a obtener el título correspondiente. El aporte que se realizó como pasante en el estudio del método de prospección **OFT** cumple con los requerimientos que permiten la elaboración de tal proyecto, y cuyo resultado final es un documento estructurado desde el punto de vista pedagógico y didáctico que puede ser utilizado tanto en la industria petrolera como en el campo académico.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

Desarrollar la pasantía como modalidad de grado, integrando el grupo de Nuevas Tecnologías de la empresa ESP ENERGY GROUP, realizando un aporte desde la parte de los conocimientos Físicos adquiridos en la formación como profesional en el desarrollo de la tecnología **OFT**.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Estudiar los diferentes métodos de exploración empleados en la industria de los hidrocarburos en Colombia y su relación con los contenidos del programa de Licenciatura en Física.
- Relacionar los diferentes métodos de prospección Geofísica comúnmente aplicados en Colombia y compararlos con la tecnología **OFT**.
- Analizar las problemáticas en el grupo de investigación de la empresa **E.S.P ENERGY GROUP** con respecto al desarrollo e implementación de la tecnología **OFT**.
- Analizar cuáles son las variables físicas (densidad, porosidad, resistividad, Emisividad, etc.) que determinan la presencia de hidrocarburos mediante el uso de la tecnología **OFT**.

2. Descripción de la Pasantía

2.1. Presentación de la Compañía

ESP ENERGY GROUP es una compañía privada que presta sus servicios a la industria energética, cuenta con una amplia gama de servicios dentro de los cuales se encuentra utilizar nuevas tecnologías en exploración, toda la información correspondiente a la compañía puede encontrarse en (www.espcolombia.com).

2.2. Actividades realizadas

El horario establecido para la Pasantía fue de 9: 00 a.m. - 5: 00 pm, con una duración de veinte (20) semanas, completando así un total de 790 horas, en el anexo 1 se encuentra el formato de asistencia aprobado por la compañía y las actas de culminación de la pasantía aprobadas por los directores interno y externo.

Se realizaron actividades relacionadas con el estudio de los métodos geofísicos utilizados en la exploración petrolera, temáticas asignadas por el área de Geología y Nuevas Tecnologías de la empresa, además de actividades de asistencia técnica en el área comercial.

A continuación, se describen las funciones que se desarrollaron en el transcurso del proceso de la pasantía:

- Asistencia a reuniones: Se elaboraron actas de reuniones gerenciales y de clientes, y se realiza seguimiento a las inquietudes o actividades que quedan pendientes, como envío de información extra.
- Participación en congresos y conferencias: Se participó en el XV Congreso Colombiano Petróleo y Gas 2014, realizado en la ciudad de Bogotá, en la categoría de conferencista, dando explicaciones técnicas de los servicios prestados por la empresa, al

igual se asistió a conferencias de divulgación de información sobre la industria petrolera y métodos geofísicos, y a la convención de ingenieros de petróleos ACIPET realizada en Neiva del 2014.

- Recopilación de información: Se recopiló información sobre los métodos que se aplican en Colombia a través de artículos, libros, memorias de congresos, páginas web, etc... como herramienta para profundizar en el estudio de estos métodos que permitió la adquisición de un conocimiento amplio sobre la aplicación de cada método en la exploración petrolera en Colombia.
- Apoyo Técnico: Se realizó un apoyo técnico aplicando los conocimientos adquiridos desde la Física, al grupo de Investigaciones de Nuevas Tecnologías, indispensable en la comprensión de los Métodos Geofísicos..
- Participación en Reuniones: Se realizó un acompañamiento como asistente técnica desde la parte comercial, en la presentación de la herramienta a diferentes empresas del sector petrolero.

En la realización de esta pasantía se adquirieron una serie de compromisos académicos con el Consejo Curricular de licenciatura en Física, los cuales se cumplieron a satisfacción de los dos directores encargados de darle seguimiento y evaluar el cumplimiento de dichos compromisos, en este documento se presentan cada una los objetivos alcanzados en la formación como profesional, durante el desarrollo de esta pasantía.

Inicialmente se realiza una presentación amplia de todos los componentes teóricos que fueron la base del aporte realizado en la presente pasantía como profesional, con el fin de realizar un acercamiento a todos los lectores a la industria petrolera en Colombia, especialmente en la etapa exploratoria y así contextualizar de manera significativa a todas las personas que lean el

presente informe, de igual forma en el anexo 2 se amplía la información sobre los aspectos históricos del petróleo y su desarrollo a nivel mundial y en Colombia.

Se realizó un estudio de conceptos teóricos implícitos en cada uno de los métodos geofísicos que se han aplicado comúnmente en Colombia para la exploración de hidrocarburos con el objetivo de conocer más sobre este campo de la Geofísica, igualmente se tomaron algunas asesorías por parte de un Geofísico que fueron de gran ayuda en el entendimiento sobre el procesamiento que se realiza en cada uno de los métodos y algunos conceptos geológicos que no se tenían claros, pero que fueron de suma importancia para lograr un mayor comprensión sobre el objeto de estudio, de este mismo modo se pudo obtener un conocimiento amplio sobre la industria petrolera en Colombia aprendiendo en que parte del país se encuentra el mayor desarrollo petrolero y cómo ha evolucionado esta industria a través de la historia.

3. Descripción Teórica de Métodos de Exploración de Hidrocarburos

3.1. Exploración

La exploración se constituye en descubrir y localizar lugares en los cuales existan yacimientos de petróleo, no existe una metodología definida o un método que tenga precisión absoluta, más bien se realizan varias tareas previas en el estudio del subsuelo a explorar. Los métodos a utilizar dependen del área de estudio, se pueden clasificar en geológicos o geofísicos, más aún se puede hablar de un método integrado que involucre los dos.

3.1.1. Los Métodos Geológicos.

Un primer objetivo consiste en localizar una roca que se haya formado en un medio que permita las condiciones necesarias y suficientes para la existencia del petróleo, a saber,

suficientemente porosa y con la disposición estructural y estratigráfica adecuada para almacenar hidrocarburos. De manera posterior se busca una cuenca sedimentaria en donde haya materia orgánica enterrada hace más de 10Ma. En este orden de ideas se hacen estudios geológicos de la superficie, consistentes en la recolección de muestras de terreno, luego se perfora para estudiar los estratos y, finalmente, con todos los datos se construye el mapa geológico del área de estudio. Teniendo en cuenta los resultados de tales estudios es posible sugerir la presencia o no de rocas petrolíferas que permitan la prospección, ello depende de la profundidad a la que se encuentren, además de otros factores, una de las decisiones más riesgosas e importantes es la perforación de un pozo exploratorio.

3.1.2. Los métodos Geofísicos.

Cuando el terreno objeto de estudio no presenta las mismas condiciones en la superficie que en el subsuelo por ejemplo una zona montañosa o un desierto, se hace preciso realizar otro tipo de estudios que demuestren las propiedades y características del subsuelo, es en este tipo de métodos donde se emplea la Geofísica.

3.1.3. Geofísica.

¿Qué es la Geofísica?

Las Geociencias o Ciencias de la Tierra se enfocan en diferentes objetivos y métodos, aportando información integrada con miras al tener un conocimiento de nuestro planeta. Las Geociencias se constituyen en: Geografía, Geología, Geofísica, Geoquímica, Meteorología y Oceanografía entre otras. La Geofísica es una ciencia más reciente en comparación a la Geografía o la Geología, se obtiene información de magnitudes físicas como la velocidad de un campo de ondas generado en el subsuelo, o de propiedades inherentes al medio como la

densidad de las rocas o la susceptibilidad magnética, posterior a la obtención de los datos de campo, se procesan los datos adquiridos y luego son interpretados, en este sentido se busca obtener modelos lógicos y explicativos de una determinada zona de interés o del planeta en general. La Geofísica debe combinar información netamente cuantitativa con datos cualitativos para la construcción de modelos.

Los métodos geofísicos pueden considerarse como no invasivos, es decir que no afectan los ecosistemas de la zona de estudio. La toma de datos geofísicos, se efectúa en muy pocos segundos (por ejemplo la longitud de un registro sísmicos es del orden de los ms), el mayor gasto de tiempo se gasta en la disposición del personal y equipos.

3.1.4. Clasificación de los Métodos Geofísicos.

Los métodos geofísicos pueden ser clasificados dependiendo del objetivo de interés o de acuerdo con la propiedad física que se busca medir. En este orden de ideas las principales ramas de la Geofísica se clasifican así:

- Sismología
- Sísmica
- Gravimetría
- Magnetometría.
- Geo electromagnetismo
- Geo termología.
- Radiometría.

Los métodos geofísicos también se clasifican como activos y pasivos, en los activos se pueden encontrar los métodos sísmicos de reflexión o refracción donde se controla una fuente de energía que enterrada en la Tierra, al generarse el campo de ondas se mide la respuesta a esta excitación.

Los métodos pasivos se basan en la detección de las variaciones de los campos naturales inherentes al planeta, como por ejemplo cuando se realiza la medición del campo magnético y gravitatorio del planeta.

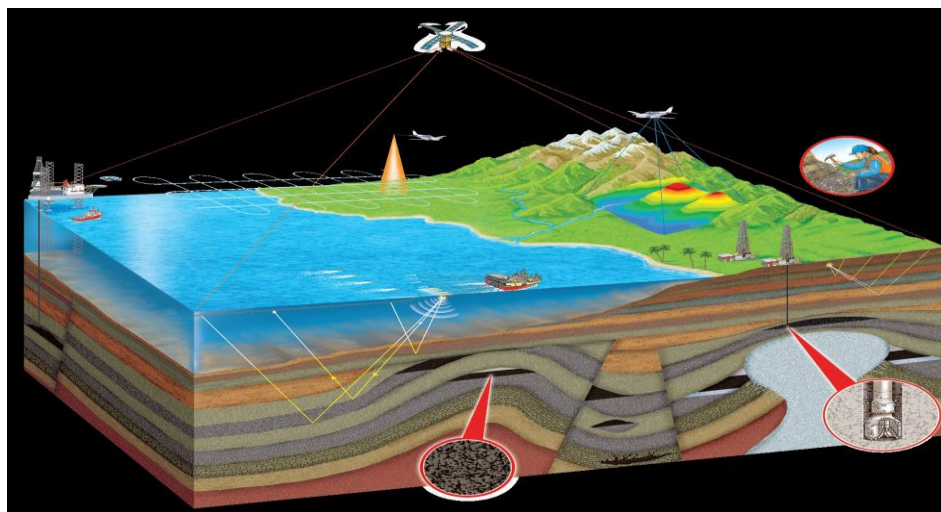


Figura 1. Métodos geofísicos. Imagen adaptada desde (AHN 2009).

3.2. Sísmica

El método sísmico se basa en la emisión y recepción de un campo de ondas sísmicas generadas en superficie por medio del uso de una fuente de energía. El campo de ondas se transmite hacia el interior de la Tierra en forma de ondas sísmicas, regresando a la superficie, después de ser reflejadas o refractadas por las discontinuidades o estratos en el subsuelo. La transmisión del campo de ondas se da en función de las características geo mecánicas o constantes elásticas del subsuelo entre los cuales se encuentran los contrastes de velocidad de

propagación, densidad del medio, etc. La sísmica se clasifica según el fenómeno físico experimentado por las ondas, a saber: sísmica de reflexión y sísmica de refracción. La sísmica de reflexión da cuenta del comportamiento de las ondas que han sido reflejadas por los estratos de la corteza, generando contrastes en las propiedades elásticas de los materiales, en forma general se habla de las constantes elásticas. Las ondas reflejadas son registradas con sensores llamados geófonos cuya configuración consiste de una bobina la cual registra un voltaje, relacionado este con la aceleración del subsuelo. La sísmica de reflexión se enfoca en objetivos de gran profundidad, en este sentido es la sísmica de reflexión la más adecuada en la prospección de hidrocarburos.

Con la sísmica de refracción, las ondas sísmicas van atravesando cada uno de los estratos del subsuelo para luego ser registradas por los geófonos, en este caso las ondas realizan un recorrido mayor por la horizontal en comparación de la vertical, la información obtenida da cuenta de áreas con mayor extensión y se logran obtener imágenes regionales de la corteza, pero con una profundidad de penetración más somera, su aplicación se da en estudios geotécnicos y de suelos, el método utiliza una mayor distancia fuente-receptor (offset), la idea es determinar la profundidad y velocidad de miembros de alta velocidad, tales como capas de carbonatos, evaporitas o rocas de basamento. Estas pruebas son muy útiles para establecer qué capas de baja velocidad existen y conocer en donde hay apreciables espesores de roca. Puede ser muy útil para identificar fallas y para determinar el límite de la capa meteorizada, los productos finales a obtener son el modelo de velocidades y tomografías, buscando relacionar las velocidades con las propiedades elásticas del medio, a continuación se explican algunos conceptos, principios, y leyes físicas necesarias para entender el comportamiento de las ondas sísmicas:

3.2.1. Principio de Huygens.

Existen diferentes formas de enunciar el principio de Huygens, en resumen, cada punto alcanzado por un frente de onda actúa como una nueva fuente de ondas que se expande en todas direcciones. (Frente de onda: Lugar geométrico que ocupa una deformación que se transmite en un medio, en un momento dado) (ANH 2009).

3.2.2. Principio de Fermat.

El principio de Fermat del tiempo mínimo se puede enunciar como: un rayo dado sigue de un punto a otro el camino que produce el tiempo mínimo en el recorrido. Este tiempo mínimo no necesariamente será una recta. (Rayo: trayectoria seguida por una deformación al transmitirse en un medio. No tiene realidad física) (ANH 2009).

3.2.3. Ley de Reflexión de una onda.

Se establece que el ángulo de incidencia de una onda es igual al ángulo de Reflexión de la misma. (ANH 2009)

$$\frac{\sin \theta_i}{\sin \theta_r} = \frac{v_i}{v_r} \quad 1.1$$

3.2.4. Ley de Snell.

El sin del ángulo de incidencia θ_i , es al sin del ángulo de refracción θ_r , como lo son sus respectivas velocidades. (ANH 2009).

3.2.5. Principios del Registro Sísmico

Se genera un campo de ondas como consecuencia de la activación de una fuente de energía. El campo de ondas viaja hacia el interior de la tierra, en este proceso interactúa con los diferentes

estratos, mediante el uso de las leyes físicas se pueden identificar los bordes, límites entre los objetivos de interés y diferentes propiedades físicas.

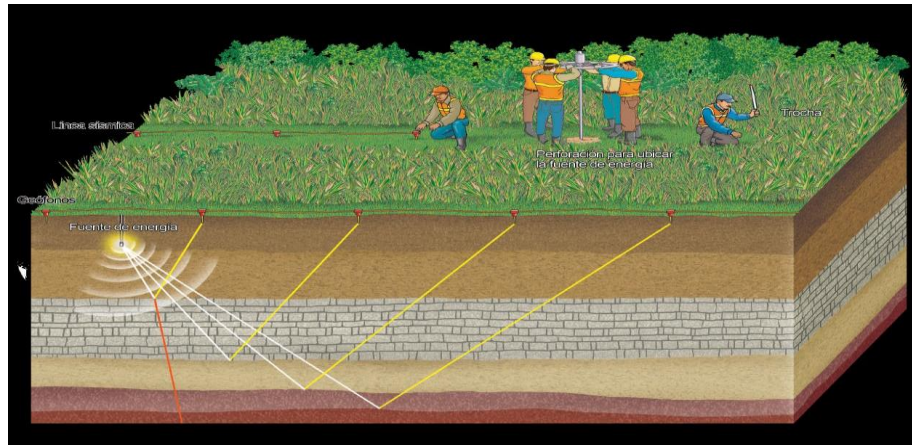


Figura 2: Esquema del proceso de adquisición sísmica. Se observan los procesos de apertura de trocha, perforación, ubicación de geófonos y registro de ondas sísmicas, imagen adaptada desde (AHN 2009).

3.2.6. Metodología de Adquisición Sísmica.

Para realizar un levantamiento sísmico se requiere de realizar un tendido de un cable con una serie de receptores llamados geófonos arreglados predeterminadamente en intervalos regulares en líneas rectas, tal como se observa en la gráfica 2.

Las ondas sísmicas se van generando a través de la línea ya generada, de tal forma que al encontrarse discontinuidades, estas causan cambios en la trayectoria de las ondas, las cuales son registradas por los geófonos, en la actualidad se utiliza un modelo que permite que un punto en el subsuelo sea registrado en múltiples ocasiones este es conocido como Punto Común en Profundidad PCP. Los datos obtenidos del proceso son registrados digitalmente para luego ser procesados y obtener el modelo final del subsuelo, la cual se denomina Sección, la cual es analizada por Geofísicos, los cuales hacen deducciones utilizando los siguientes criterios:

- La comprensión de las relaciones geológicas del sector estudiado.
- El conocimiento de las diferentes litologías presentes en el área.
- Las propiedades físicas de estas unidades de roca.

Relacionando esta información, se hacen interpretaciones acerca de la disposición, geometría, relaciones y contornos de las rocas del interior terrestre.

3.2.7. Aplicaciones.

El método sísmico es rápido, económico y de alta confiabilidad, por este motivo es el más aplicado actualmente en la exploración de hidrocarburos. Las características exploratorias más importantes de este método geofísico son (ANH 2009):

- Es un método indirecto para determinar la geometría y disposición de las rocas del subsuelo.
- Permite de manera indirecta pero muy fiable, dar cuenta de la profundidad de los estratos debido a su relación con las zonas de reflexión.
- Ofrece un buen nivel de detalle de las áreas de interés.
- Se complementa con la cartografía geológica.
- Permite delinear posibles entrapamientos de hidrocarburos.

En el anexo 3 se explica de manera detallada cada uno de los tipos de ondas analizadas en el procesamiento del método sísmico, se realiza la descripción del levantamiento de un registro sísmico y su metodología, al igual que se expone de manera amplia el procesamiento y la interpretación realizada en el estudio de un levantamiento sísmico.

3.3. Gravimetría

Este método surge de la aplicación directa de la Ley de Gravitación Universal de Newton, la cual relaciona la medida de la interacción entre los cuerpos (fuerza) como consecuencia de una propiedad inherente a los mismos, la masa, además tiene en cuenta la distancia de separación entre tales masas y su influencia en la interacción. Como consecuencia de tal ley, si en un área determinada se encuentran cambios en densidad ρ , estos se manifiestan como discontinuidades gravimétricas causadas por la variación de masas en la vecindad de la zona de interés. La magnitud y geometría de las anomalías dependerá de la densidad ρ , profundidad y extensión horizontal de los cuerpos presentes en las cercanías donde se realice la medición.

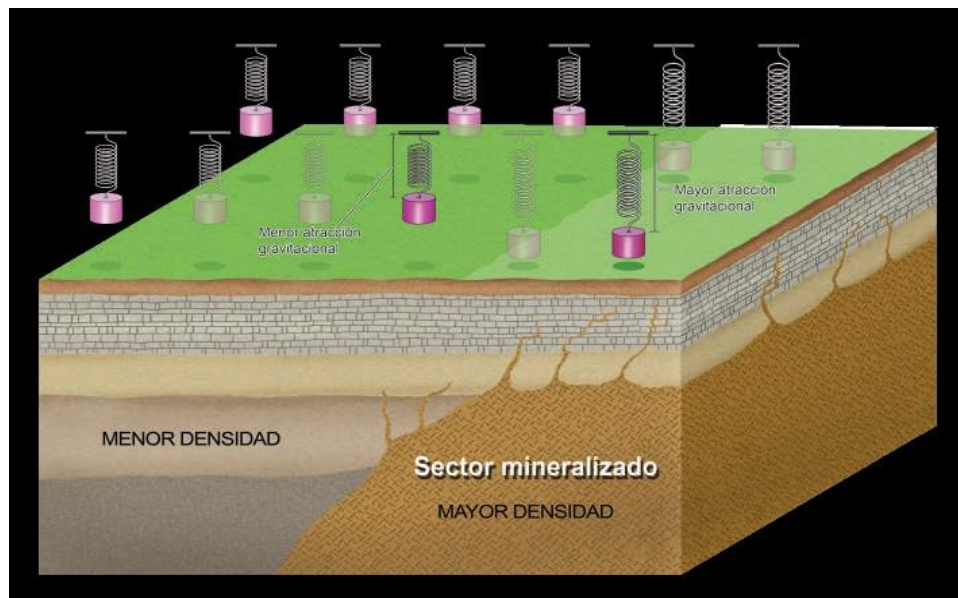


Figura 3: Variación en las mediciones gravitacionales, ante la presencia de un cuerpo en el subsuelo, imagen adaptada desde (ANH 2009).

A continuación se describen algunos conceptos físicos que amplían el entendimiento de este método geofísico:

3.3.1. Atracción Terrestre.

De acuerdo con la Ley de gravitación universal el planeta Tierra ejerce atracción sobre todos los cuerpos que se encuentran en superficie, y también sobre los que están ubicados en el espacio exterior como la Luna y los satélites artificiales, más aún la fuerza gravitacional no es la misma en todos los puntos de la Tierra. Si se considera una superficie con un nivel de referencia del mismo potencial gravitacional, comparable al nivel del mar, se obtiene una representación llamada geoide, en el que se pueden analizar las diferencias de la forma terrestre con respecto a las densidades y por lo tanto en la fuerza de atracción gravitacional. La unidad de medida de la gravedad es el gal, en honor a Galileo Galilei.

La magnitud en la fuerza de atracción del planeta Tierra tiene un valor promedio de 980 gales. Las anomalías de interés se están en un orden de magnitud de 0,001 a 0,01 gales, casi 0,000001 la gravedad de la Tierra. Como consecuencia se prefiere utilizar los miligales (mgals) como unidad de medida. Como el interior de la Tierra no es uniforme ni homogéneo, por el contrario es no homogéneo y anisotrópico, se busca conocer de manera indirecta cómo están distribuidas las rocas en el subsuelo realizando mediciones en los valores de gravedad y determinando los contrastes en la densidad ρ . Esta propiedad de las rocas es dependiente de las características microscópicas intrínsecas como la densidad ρ de sus constituyentes, el espacio poroso interno y el fluido ocupado por los poros. En caso de que la roca contenga agua o hidrocarburo en estado líquido, sólido o gaseoso la respuesta de la medición gravimétrica será diferente. En este orden de ideas es una herramienta muy útil para identificar rocas que potencialmente podrían contener petróleo pues se permite la discriminación en términos de la medida.

3.3.2. Instrumentos de Medida.

Los instrumentos empleados para la medición de la gravedad son llamados gravímetros. Estos son aparatos de alta sensibilidad y precisión en la determinación del valor de la atracción gravitacional en un punto dado.

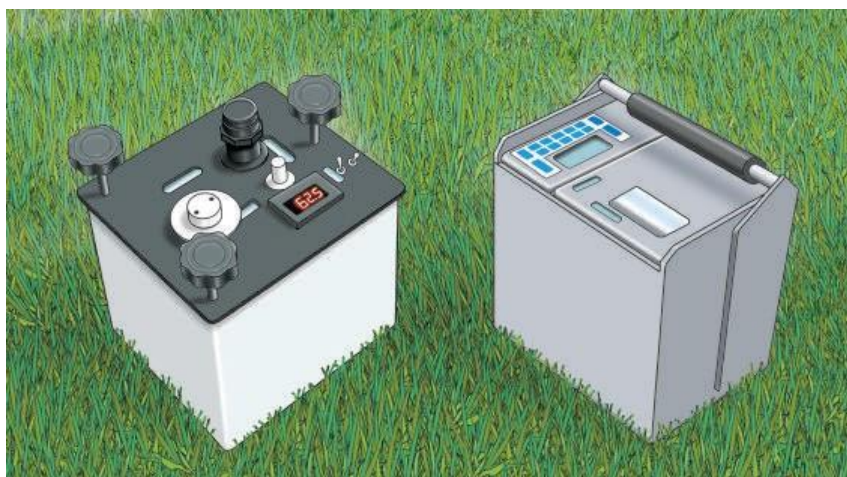


Figura 4: Diferentes modelos de gravímetros disponibles en el mercado, imagen adaptada desde (ANH 2009).

Los gravímetros se clasifican teniendo en cuenta la forma en la que se realiza la medición. El principio físico que da cuenta de su funcionamiento es el mismo: se busca calcular la variación de la fuerza de atracción que actúa sobre una masa en diferentes ubicaciones sobre la superficie. La variación en el valor obtenido no sólo se relaciona con la configuración de los cuerpos presentes en el subsuelo, también depende de las masas presentes en superficie, o en áreas vecinas al lugar donde se realiza la medición.

Los gravímetros son acondicionados para ser transportados en barcos y en aeronaves. Estos equipos permiten hacer levantamientos desde tierra, mar o aire. En un punto de la superficie terrestre existen múltiples afectaciones o anomalías gravitacionales como consecuencia de las

masas que se encuentran en los alrededores, en este sentido es necesario hacer correcciones para restringir la medida únicamente a los efectos locales de los cuerpos en el subsuelo.

En prospección gravimétrica se miden contrastes de densidad ρ entre cuerpos de roca. Para realizar una medición aproximada es necesario hacer correcciones que contrarresten o filtren los efectos de interferencia causados por cuerpos vecinos al punto donde se toma la medición. Los efectos, que pueden alterar la medición, son por ejemplo, la latitud, altura sobre el nivel del mar, los altos topográficos adyacentes e incluso la ausencia de masa (cavernas) donde hay depresiones o valles.

Los contrastes en densidad ρ medidos por este método, están relacionadas con fallas geológicas o variaciones litológicas laterales de las formaciones geológicas, de esta manera las mediciones gravimétricas se convierten en una herramienta muy importante para la exploración de hidrocarburos, algo que no se resalta en la gran mayoría de textos de Física general. Los levantamientos gravimétricos inician con una programación de líneas de levantamiento, o el diseño de una red de estaciones para toma de datos. En campo se realizan mediciones en cada uno de los puntos programados, se mide el valor de la aceleración gravitacional partiendo de estaciones de referencia cuyo valor de gravedad se conoce previamente. En el caso de que no exista este dato, se puede hacer el levantamiento referenciado a una estación escogida ya que se obtendrán valores relativos de medición entre estaciones. El método permite la adquisición desde el aire, en complemento a otros métodos análogos.

3.3.3. Aplicaciones.

- Gravimetría clásica, aplicada a la investigación geológica y minera.
- Micro gravimetría, aplicada a la gravimetría local, Geotecnia y obras civiles.
- Sismología, gravimetría de alta sensibilidad.
- Detección por exceso de masa: sulfuros masivos, diques, etc.
- Detección, por ausencia de masa de: carbón, depósito de sal, potasa, cavidades, huecos subterráneos, etc.
- Evaluación de depósitos masivos.
- Cartografía geológica regional: cuencas, grabens, etc.
- Morfología del basamento, estructuras.
- Modelamiento de cuencas sedimentarias con posible presencia de aguas subterráneas.

Este método ha sido el más utilizado en la historia de Colombia, obteniendo resultados muy positivos en la exploración de hidrocarburos, por este motivo es el método que más información geofísica ha podido aportar en el estudio y análisis de reservas de Minerales en el país, especialmente en petróleo y gas.

Se presenta a continuación la imagen de un mapa gravimétrico que se obtiene como resultado del procesamiento de los datos obtenidos, también se presenta el mapa gravimétrico de Colombia donde se puede observar una correspondencia de valores negativos con la zona Andina y positiva con las regiones oceánicas, como era de esperarse según la teoría de equilibrio isostático (ANH 2009).

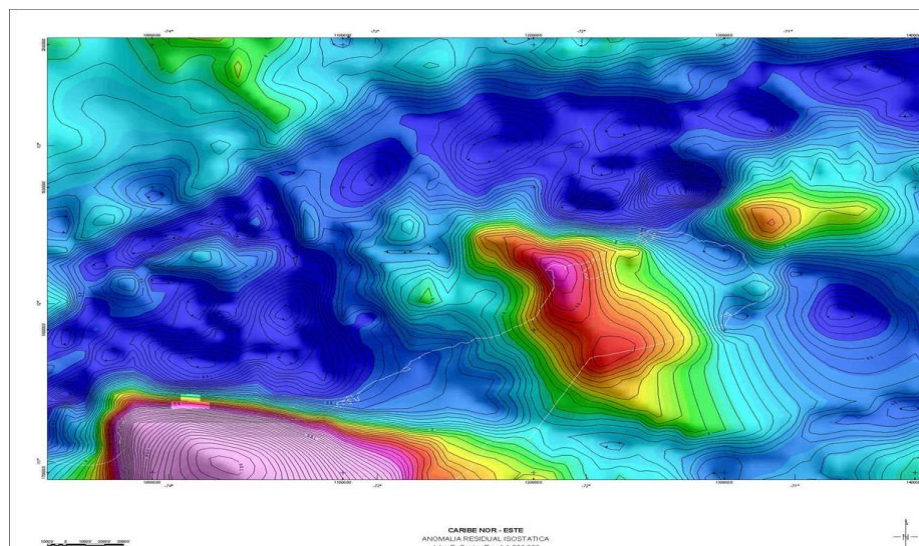


Figura 5: Ejemplo de un mapa gravimétrico, imagen suministrada por el M.Sc en Geofísica Ricardo Ceballos Garzón.

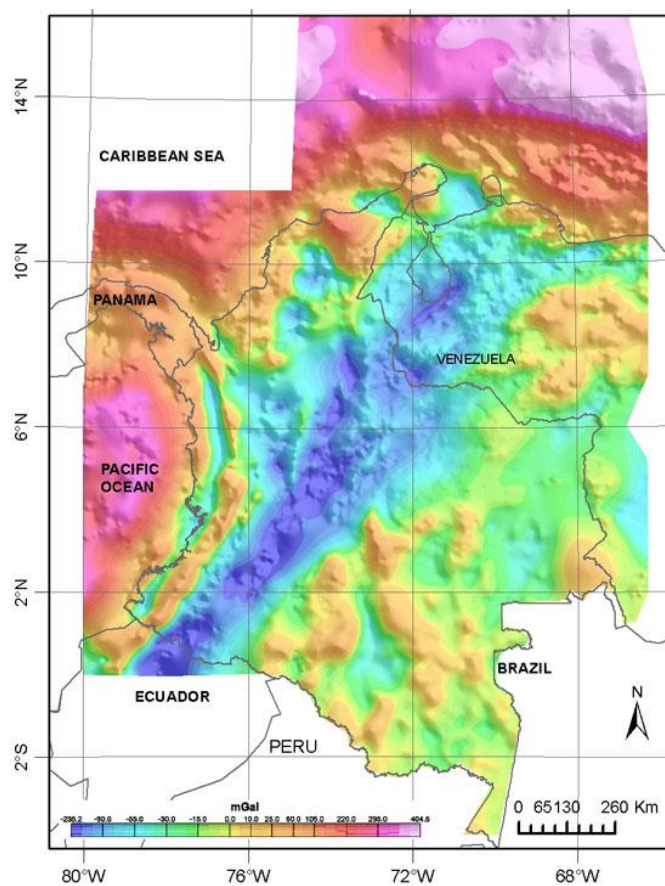


Figura 6: Mapa Gravimétrico de Colombia (Anomalía Total de Bourger). Las tonalidades más azules corresponden a zonas con materiales de menor densidad, los colores más rojos a zonas de mayor densidad, Imagen adaptada desde (ANH 2009)

3.4. Magnetometría

La magnetometría es empleada en las etapas iniciales de la exploración geofísica. El método se fundamenta en considerar la Tierra como un imán. La dirección del campo magnético terrestre depende de la localización de los polos magnéticos.

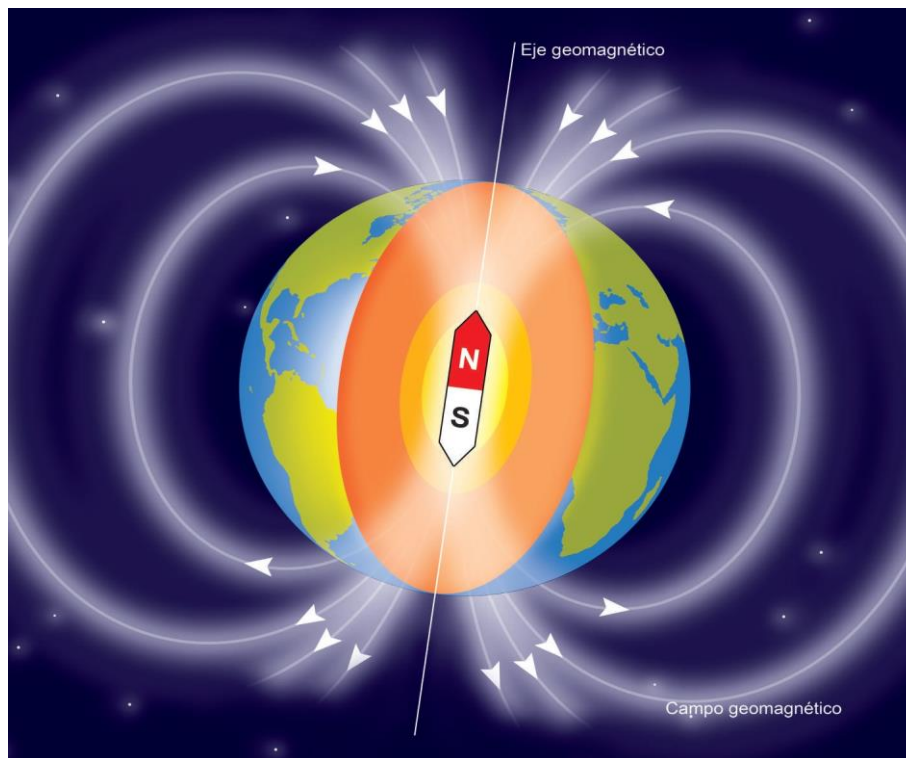


Figura 7: Modelo de la Tierra como un dipolo magnético, imagen adaptada desde (ANH 2009).

3.4.1. La Tierra como un Imán - Dipolo Magnético Terrestre .

El comportamiento magnético de la Tierra se manifiesta mediante la detección de esta atracción en cualquier punto de la superficie terrestre. La interpretación más aceptada hoy en día para explicar el comportamiento magnético de la Tierra es el efecto dinamo que lleva a la teoría de la dinamo terrestre, en este modelo la combinación de un núcleo interno sólido metálico, más un núcleo externo de carácter fluido, generan el campo magnético a causa de la rotación terrestre.

Se supone el modelo de un dipolo magnético ubicado en el centro del planeta y cuyas proyecciones hacia la superficie conforman los polos geomagnéticos. El eje del dipolo está inclinado con respecto al eje de rotación terrestre. El dipolo se dirige hacia el sur. En el hemisferio norte, cerca del polo norte geográfico, se ubica un polo sur magnético y en el hemisferio sur, cerca del polo sur geográfico, se ubica un polo norte magnético. Por convención se denomina polo norte magnético al polo alejado del polo norte geográfico, y polo sur magnético al polo alejado del polo sur geográfico. El campo magnético terrestre se descompone en componentes de intensidad horizontal y vertical, y un campo magnético total resultante. Los componentes aparecen en la figura presentada a continuación

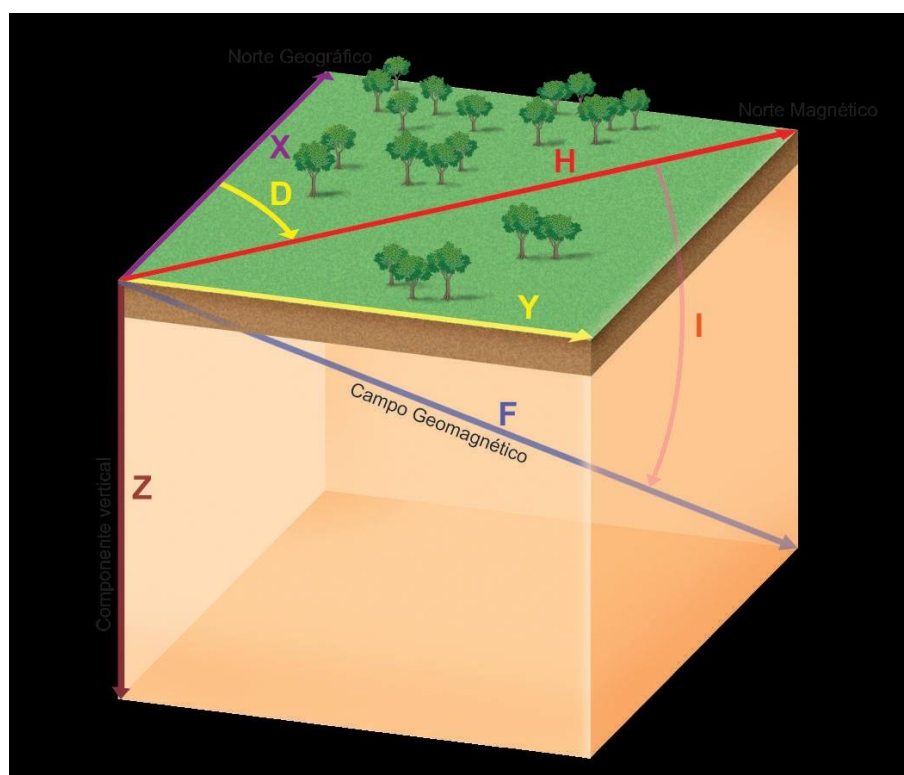


Figura 8: Componentes del campo magnético, imagen adaptada desde (ANH 2009)

3.4.2. Componentes.

El vector campo magnético $F^{\vec{}}$, puede descomponerse en una componente horizontal $H^{\vec{}}$, que forma un ángulo con el norte magnético, $D^{\vec{}}$ y un ángulo con el campo magnético total, o inclinación $I^{\vec{}}$. La inclinación magnética es la distancia medida en grados, entre un punto dado en superficie, y el ecuador terrestre. Esta es cero en el ecuador y 90° en los polos. La declinación magnética se define en términos del ángulo que se forma entre el norte geográfico y la componente horizontal del campo magnético total, es medida hacia el este, a partir del norte. Las rocas presentan una magnetización remanente y otra inducida, el remanente se relaciona con el campo geomagnético que existía en el momento de su formación (ANH 2009).

Para las rocas magmáticas, la dirección del campo magnético coincide con la dirección del campo geomagnético terrestre existente cuando estas rocas iniciaron el proceso de solidificación. Este tipo de magnetización se denomina termoremanente, lo mismo ocurre con rocas que se enfrían rápidamente. Las medidas tomadas en prospección magnetométría se basan principalmente en la magnetización inducida (ANH 2009).

3.4.3. Comportamiento Magnético de las Rocas.

Con respecto a la manera en que las sustancias actúan ante la acción de un campo magnético, las sustancias se pueden clasificar como:

- Sustancias diamagnéticas: Las cuales son difícilmente o nada magnetizables. Ejemplos: Bismuto, anhídrita, sal común.
- Sustancias paramagnéticas: Estas son fáciles de magnetizar. Ejemplos: Percloruro y sulfato de hierro, platino, aluminio.

- Sustancias ferromagnéticas: Son altamente magnetizables. Ejemplos: Hierro, acero, cobalto, magnetita, níquel.

Al realizar estudios magnetométricos, se buscan anomalías magnéticas, contrastes o diferencias en el comportamiento magnético de las rocas. Las anomalías se generan por variaciones en las propiedades físicas de las rocas debido a su susceptibilidad magnética y/o la magnetización remanente. Esta propiedad Física sólo existe a temperaturas inferiores a la temperatura de Curie (550°C). Los materiales que pueden generar estas anomalías se encuentran hasta unas profundidades máximas de 30 a 40 Km. (ANH 2009)

3.4.4. Instrumentos de Medida.

El instrumento que permite medir los contrastes de las susceptibilidades magnéticas se conoce como magnetómetro. En campo se utilizan generalmente dos magnetómetros como mínimo: uno base, y otro móvil. Se clasifican en:

- Magnetómetro de Precesión Protónica, basado en la resonancia magnética nuclear RMN. Mide la alineación de protones en un campo magnético y la frecuencia de precesión para realinearse con el campo terrestre (ANH 2009).
- Magnetómetro con célula de absorción, basado en la separación de líneas espectrales (absorción óptica) por la influencia de un campo magnético (ANH 2009).

También hay otras clases de magnetómetros protónicos de tipo nuclear, se fundamentan en el efecto de precesión protónica. Este efecto se explica a partir de los principios de la Mecánica Cuántica, utiliza una solución rica en protones e iones paramagnéticos. El magnetómetro debe estar lo más alejado posible de campos magnéticos distorsionantes. Dependiendo de la distancia en la que se encuentre el cuerpo con respecto al equipo será la medida obtenida. La anomalía de

cuerpos muy cercanos se marcará de manera neta, mientras que las anomalías medidas a considerables distancias serán más débiles y difusas (ANH 2009).

Es posible determinar la profundidad de los cuerpos magnéticos de acuerdo con lo marcada que se delinee la anomalía neta. Cuando estas son muy claras, indican rocas de basamento cercanas a la superficie; cuando los límites se ven más difusamente, se puede tratar de cuerpos aún más profundos. Dado el carácter magnético que se espera tenga el basamento, en contraste con el menos magnético de las rocas sedimentarias, es posible dar cuenta de la diferencia entre la profundidad del basamento y la superficie será rellenada con sedimentos. (ANH 2009).

3.4.5. Prospección Magnetométrica.

El hecho más importante en exploración es la suposición de que las rocas sedimentarias son no magnéticas, ya que tienen una susceptibilidad magnética muy pequeña en comparación con rocas del basamento. A partir de esta propiedad se puede inferir que las anomalías magnéticas evidencian ausencia de sedimentos. Los levantamientos magnéticos se utilizan para descartar áreas en las que no habría interés exploratorio en hidrocarburos, o para determinar espesores de la cobertura sedimentaria, al definir la profundidad de cuerpos con mayor susceptibilidad magnética (ANH 2009).

3.4.6. Aplicaciones.

Son métodos rápidos, económicos y de alta confiabilidad. Algunas aplicaciones son las siguientes:

- Desarrollo y exploración de depósitos minerales.
- Exploración de hidrocarburos, por medio de la localización del basamento y sus límites.
- Estudios geológicos regionales.

- Cartografía geológica Localización de objetos metálicos.
- Arqueología, principalmente cuando están involucrados objetos metálicos.

A continuación se muestra el mapa Magnetométrico de Colombia, con información recogida a lo largo de la historia del país por la Agencia Nacional de Hidrocarburos y Ecopetrol.

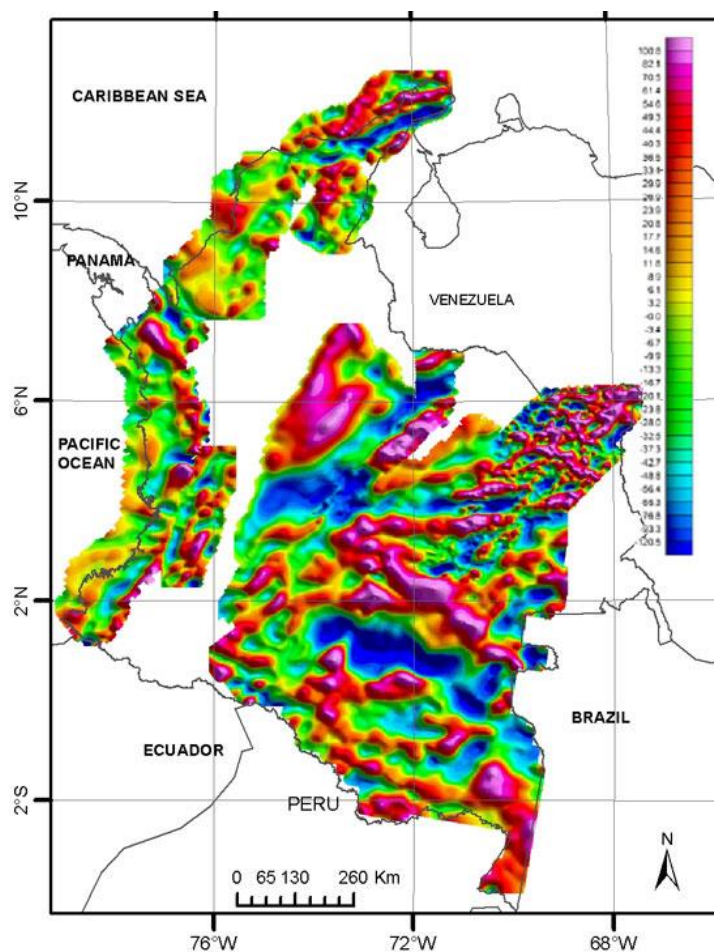


Figura 9: Mapa Magnetométrico de Colombia (Anomalías de Intensidad Magnética Total) Las tonalidades más azules corresponden a valores menos magnéticos, los colores más rojizos a rocas más magnéticas, imagen adaptada desde (ANH 2009).

3.5. Geoelectromagnetismo

El método pertenece al grupo de los procedimientos geofísicos activos, caracterizados por detectar el comportamiento de los materiales del subsuelo como respuesta a la aplicación de una señal artificial, en este caso particular un campo electromagnético, analizan la manera en que las rocas del subsuelo reaccionan ante dicha señal, se aprovecha la conductividad, que es la capacidad que tiene un material para transmitir la corriente eléctrica.

3.5.1 Electromagnetismo Terrestre.

Los métodos de exploración geoelectromagnéticos se fundamentan en la medición de la conductividad eléctrica, propiedad inherente a los materiales que da cuenta de la facilidad en la conducción de la corriente eléctrica. Los sedimentos y cuerpos de roca que conforman la corteza tienen una conductividad asociada, ya sea por la naturaleza intrínseca de los materiales, o por los fluidos que contienen y los iones transportados dentro del espacio intragranular. Esta propiedad es aprovechada para que, al inducir una corriente eléctrica hacia el interior de la Tierra, se mida la respuesta de esta al atravesar los diferentes estratos del subsuelo. En el caso de los hidrocarburos, se encuentren como líquidos o como gases, las mediciones de conductividad son muy bajas, lo cual implica una alta resistividad eléctrica ρ .

3.5.2. Instrumentos de Medida.

Existe una amplia gama de instrumentos que se utilizan para la aplicación de este método, pero todos miden la conductividad eléctrica de los materiales presentes en el subsuelo. De forma general se usan equipos que poseen un par de electrodos en sus extremos, y en un arreglo

geométrico específico se induce una corriente eléctrica, la cual es medida posteriormente por un receptor.



Figura 10: Instrumentos para mediciones geo electromagnéticas (Resistividad), imagen adaptada desde (ANH 2009)

3.5.3. Prospección Electromagnética.

El método usa campos magnéticos alternos para inducir corriente eléctrica cuya respuesta, una vez que ha interactuado con el terreno, es medida en superficie. La manera en que se comporta esta corriente eléctrica inducida, así como los campos generados en el subsuelo es lo que se interpreta a partir de la señal adquirida en un receptor.

La aplicación tradicional de este método ha sido en la exploración minera y en la búsqueda de depósitos de sulfuros masivos de alta conductividad. Los métodos aerotransportados pueden ser usados a gran escala para barrer grandes áreas y detectar múltiples objetivos de exploración. El método es utilizado ampliamente para cartografiar propiedades estructurales y litológicas, donde es posible caracterizar cuerpos debido a los contrastes en su comportamiento de conductividad eléctrica.

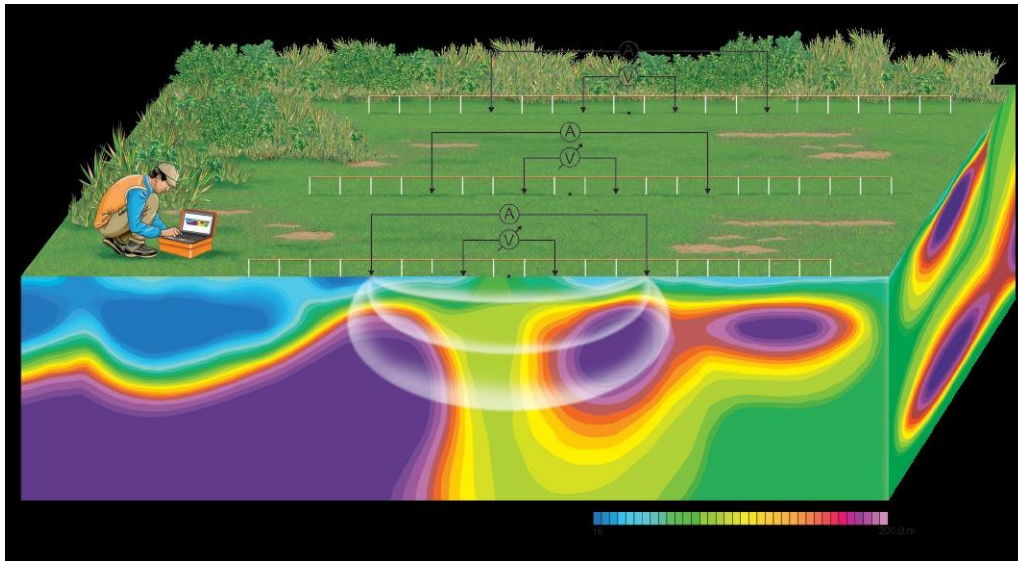


Figura 11: Diagrama esquemático de la geometría y producto obtenido en un levantamiento Geo eléctrico. Los tonos más azules corresponden a zonas con menor resistividad, los colores más rojizos a zonas de mayor resistividad. (A): Corriente; (V): Voltaje, imagen adaptada desde (ANH 2009).

3.5.4. Aplicaciones.

- Exploración de hidrocarburos (carbón, gas, petróleo).
- Estudios geológicos regionales (> 100 Km²).
- Desarrollo y exploración de depósitos minerales.
- Geotecnia e Ingeniería
- Hidrogeología.
- Detección de cavidades (cavernas).
- Lixiviados y plumas de contaminación.
- Localización de objetos metálicos

3.6 Geotermología

Otro método de prospección a un menos común es la prospección geotermal, donde se busca conocer el gradiente térmico de la corteza terrestre, relacionado con el uso de calor proveniente desde el interior de la Tierra.

Entre las técnicas utilizadas para estudios termales se encuentran aquellas que se hacen a profundidades someras, en pozos, o las que se efectúan a partir de medidas remotas, ya sea por medios aerotransportados o satelitales. Con los primeros se conoce el gradiente geotérmico y el uso de calor terrestre. Con los métodos aéreos se puede determinar la temperatura superficial de la Tierra y la inercia termal de los materiales, gracias a la radiación infrarroja emitida por la superficie terrestre (ANH 2009).

Algunos elementos terrestres que pueden afectar estas mediciones son la topografía, variaciones en la conductividad térmica, y fuentes intrínsecas endotérmicas o exotérmicas. Los métodos geotermales aprovechan la propiedad de la Tierra para conducir el calor. Esta característica se mide ya sea in situ, o determinando sus variaciones en la vertical. Al medir estas variaciones se puede establecer de qué manera el flujo de calor varía con respecto a la profundidad, es claro que la presión y la profundidad aumentan con la temperatura. La posibilidad de medir gradientes de temperatura es de gran importancia para definir y determinar las propiedades del subsuelo, es una aplicación directa de la ecuación de calor tridimensional, lo que es muy útil en la perforación de pozos exploratorios y de desarrollo en la industria de hidrocarburos, de recursos hídricos y de energía geotermal. La superficie terrestre también emite el calor que proviene del sol, esta energía puede ser discriminada en las diferentes longitudes de onda (espectro electromagnético). (ANH 2009)

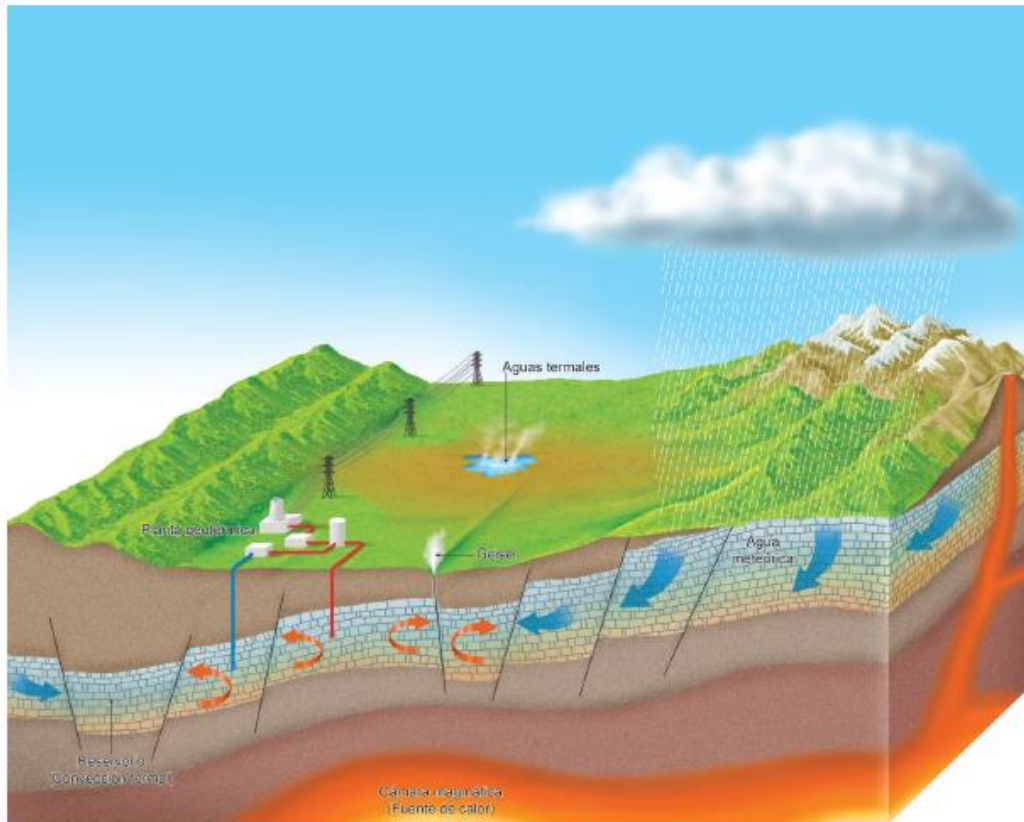


Figura 12: Diagrama idealizado del comportamiento de flujo termal terrestre. Imagen adaptada de (ANH 2009).

3.6.1. Instrumentos de Medida.

Los instrumentos utilizados son termómetros análogos o digitales que buscan encontrar los gradientes de temperatura, o el flujo de calor en un lugar específico de la Tierra (ANH 2009).

3.6.2 Prospección Geotérmica.

Las mediciones del flujo de calor se pueden concentrar o dispersarse ello como consecuencia de condiciones como influencias hidrológicas y topográficas, así como por la anómala conductividad termal.

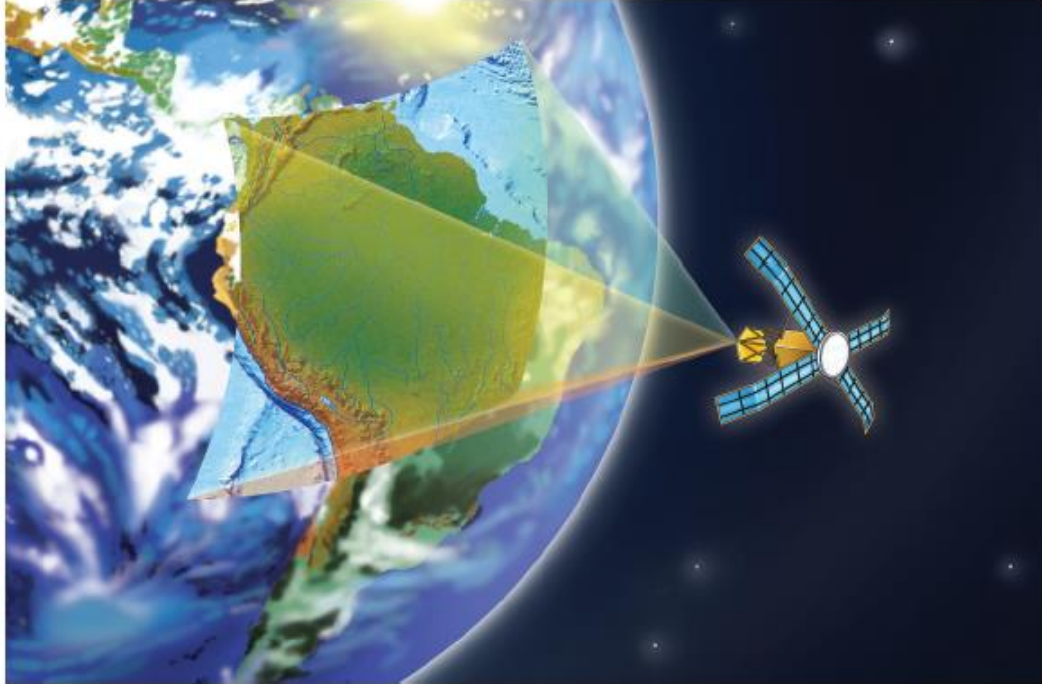


Figura 13: Mediciones geofísicas satelitales detectando emisiones termales de la superficie terrestre, imagen adaptada desde (ANH 2009).

3.7 Radiometría

Este tipo de prospección se fundamenta en la búsqueda de elementos radiactivos como Uranio U, Torio Th y Potasio K, se pueden detectar de manera independiente o con equipos que miden los tres agrupados. Estos elementos tienen la propiedad de emitir radiaciones bajas que pueden ser detectadas para conocer la proporción que de ellos contienen las rocas, conocido como datación.

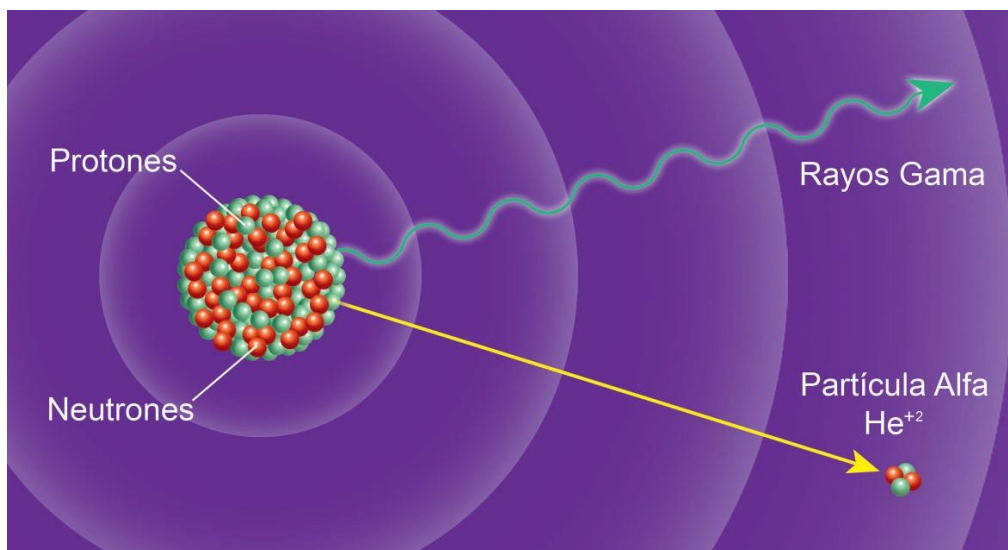


Figura 14: Liberación de energía por parte de un átomo radioactivo, imagen adaptada desde (ANH 2009).

3.7.1. Radioactividad en la Tierra.

En la naturaleza existen algunos elementos que se desintegran de manera espontánea, fenómeno de radiación espontánea, en cantidades mínimas, pero de manera constante. La radiación tiene su origen en núcleos de átomos de elementos radiactivos. Estos se componen de protones y neutrones, y cuando su número atómico es grande, su fuerte empaquetamiento los hace inestables. Como respuesta a esto, hay una liberación de energía que se refleja ya por la producción de destellos de luz, o por generación de iones.

3.7.2. Instrumentos de Medida.

Los equipos empleados para conocer estas radiaciones o las partículas emitidas por los átomos, miden la producción de iones, o los destellos de luz producidos (centelleos). Para el primer caso, el instrumento más conocido es el contador Geiger, en el segundo caso tenemos un centillómetro. También existen los gamma-espectrómetros, equipos con los que se mide el espectro de radiación de los elementos Uranio U, Torio Th) y Potasio K.

3.7.3. Prospección Radiométrica.

La exploración radiométrica es de carácter geofísico pero con un importante campo de aplicación geoquímica. Existen técnicas de superficie cuya penetración en el subsuelo es mínima. También se pueden hacer mediciones desde el aire, pero no a alturas superiores a 120 m, el flujo de radiación decrece de forma exponencial desde la fuente.

3.7.4. Aplicaciones.

Una de las aplicaciones más importantes de este método es la búsqueda de elementos radioactivos como el Uranio y el Torio, cuya importancia como generadores de energías alternativas. Otra aplicación es la detección de alteración de suelos residuales, ya que tanto las rocas ígneas como sedimentarias, contienen trazos de elementos radiactivos y es posible hacer una cartografía geológica por medio del contraste con estos elementos.

4. Tecnología Para La Exploración De Hidrocarburos Oil And Gas Finder Technology (OFT)

El desarrollo tecnológico y la necesidad de solucionar situaciones del medio físico o social han contribuido al crecimiento y diversificación de la Geofísica aplicada en Colombia, se han creado aparatos más sensibles, con los que es posible detectar objetivos económicamente importantes localizados a profundidades diversas como los satélites que observan la Tierra proporcionando información valiosa y detallada, siendo esta la finalidad del método OIL AND GAS FINDER TECHNOLOGY, tecnología geoelectrica desarrollada en Rusia para la exploración y prospección de reservas de gas y petróleo.

La técnica se basa en un estudio de la radiación electromagnética del medio de estudio. La OFT combina los métodos de Imagen Satelital, Establecimiento de campos electromagnéticos de corto impulso “Ececi” y el sondeo vertical con electro resonancia “Sver”.

Inicialmente se toma una imagen satelital espectrográfica que define zonas de interés mediante la interpretación, definiendo los depósitos de Anomalías Tipificadas que determinan la presencia de hidrocarburos (crudo y gas) y la diferencian de otros fluidos como agua delimitando cualitativamente la ubicación de las áreas de mayor interés exploratorio.

Luego se utiliza el método ECECI el cual se basa en el estudio del proceso de formación de un campo de cortos pulsos eléctricos.

Finalmente se aplica un método llamado SVÉR de detección por sondeos eléctricos verticales, está basado en el estudio de los procesos naturales de la polarización media y las características espectrales del campo eléctrico natural sobre un yacimiento.

Los métodos ECECI y SVÉR son métodos basados exclusivamente en los enfoques no clásicos (principios) de detección electromagnética. La OFT se dedica principalmente al estudio de la estructura de la capa superficial de las partículas cargadas, las zonas de la polarización en las interfaces de la geología y las irregularidades naturales de la sección de la radiación electromagnética de la Tierra.

Como enfoque no clásico ha permitido la creación de: a) un equipo de trabajo de pequeñas dimensiones, compacto y portátil (dos aparatos complejos que caben en una bolsa de equipaje) y de fácil mantenimiento, b) un método eficaz para la medición rápida sobre el terreno (a pie, con camioneta, avioneta, helicóptero, embarcación, etc.), c) una tecnología para solucionar una

amplia gama de tareas difíciles encampo y tareas técnicas relacionados con impacto ecológicos, hidrogeológicos de ingeniería y geofísicos.

La empresa ESP ENERGY GROUP ha querido implementar en Colombia este método, queriendo suplir las necesidades del mercado petrolero en el área de la exploración. En este sentido este trabajo de pasantía se enfocó en poder entender desde la parte Física los principios aplicados, para dar apoyo técnico al grupo de investigación de nuevas tecnologías de la empresa, para esto se realizaron algunas indagaciones en páginas web sobre la procedencia y su aplicación en el mundo, se presentan a continuación una pequeña reseña histórica y los principios físicos implícitos en la aplicación de este método de exploración.

En el anexo 4 se describen de manera más detallada las 3 fases del método Oil And Gas Finder Technology, la metodología que se utiliza para la adquisición de datos, y la interpretación de los resultados finales.

4.1. Reseña histórica del método OFT

La teledetección, principio de la OFT¹ remonta sus orígenes a la primera serie del LANDSAT lanzado en los años 70 constituyéndose en el primer satélite con dedicación exclusiva a la observación de la Tierra. Los desarrollos en este campo han llevado al ser humano a desarrollar equipos y herramientas cada vez más sofisticadas ampliando el entendimiento de sistemas bióticos y abióticos en el universo.

La carrera espacial entre Estados Unidos y la Antigua Unión Soviética trajo consigo un vertiginoso desarrollo tecnológico en ambos continentes que con el pasar de los años fue fortaleciendo diversos sectores entre ellos el militar, en donde el uso de sensores obligó a que los países replantearan los tradicionales conceptos en ataque, defensa y espionaje, llevando a Rusia a

consolidarse como potencia mundial. Después de la caída de la cortina de hierro muchos de los descubrimientos y avances durante la guerra salieron a la luz, pero el acceso a esta información fue posible hasta el siglo XXI gracias a la apertura digital que ofrecía la llegada de internet.

Un aspecto relevante en el posicionamiento de Rusia como potencia mundial fue la aplicación de las ciencias exactas y naturales, en sus sectores económicos, optimizando el uso de recursos y aumentando la eficiencia de sus procesos de exploración, producción y desarrollo, de aquí el sector energético fue el más beneficiado, pues la integración de técnicas y métodos fundamentados en el comportamiento de las ondas electromagnéticas ofrecían la posibilidad real de encontrar nuevos recursos en menor tiempo y con mayor precisión, sumado a la versatilidad y facilidades que ofrecían los métodos de percepción remota.

Esto marcó el inicio de una nueva era en la exploración de hidrocarburos, pues se empezó a considerar la prospección electromagnética como una herramienta de gran valor en la búsqueda de recursos, ofreciendo hoy por hoy la posibilidad de identificar y evaluar zonas en condiciones complejas sin que esto tenga influencia en la precisión y veracidad de los resultados.

4.2. Principios físicos aplicados en el método OFT

La ley de Planck establece que todo cuerpo sin importar su composición atómica emite energía siempre y cuando su temperatura se encuentre por encima del cero absoluto ($-273,15$ K), esta ley describe la radiación electromagnética emitida por un cuerpo negro en equilibrio térmico a una temperatura definida, expresada de la siguiente forma:

$$I(\nu, t) = \frac{2h\nu^3}{c^2 \exp\left(\frac{h\nu}{kT}\right) - 1}, \quad (4.1)$$

La expresión (4.1) se usa para calcular la radiancia espectral, que es la cantidad de energía emitida por un cuerpo negro en función de unidades de superficie, tiempo y ángulo sólido por unidad de frecuencia. Se llama poder emisivo de un cuerpo $E(\nu, T)$ a la cantidad de energía radiante emitida por la unidad de superficie y tiempo entre las frecuencias ν y $\nu + \Delta\nu$, tal que:

$$E(\nu, T) = 4\pi I(\nu, T) = \frac{8\pi h\nu^3}{c^2 \exp\left(\frac{h\nu}{kT}\right) - 1}. \quad (4.2)$$

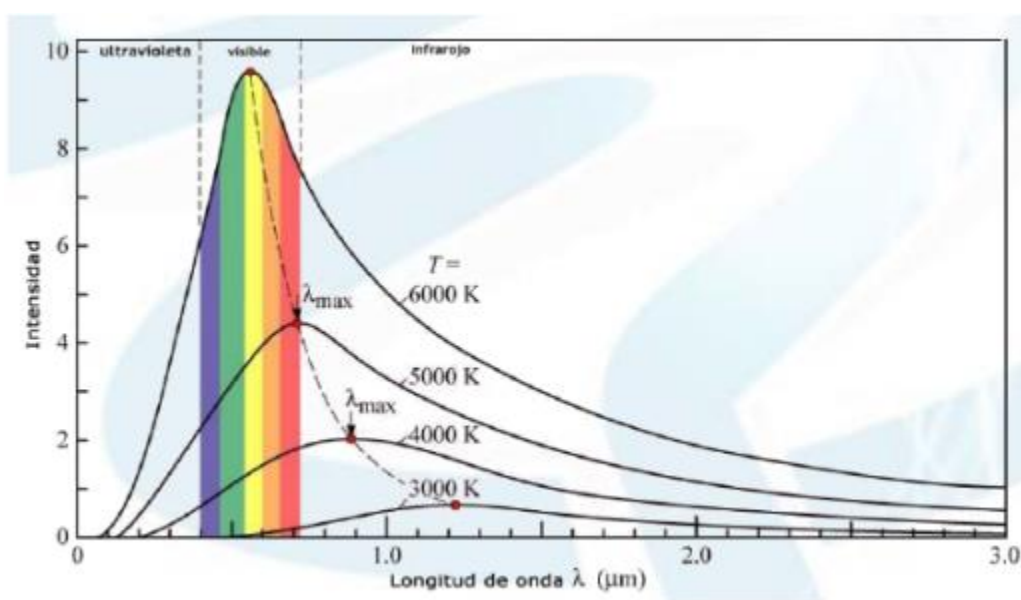


Figura 15: Densidad de energía de la radiación de cuerpo negro en función de la longitud de onda para diferentes temperaturas, imagen adaptada de (Terán Pérez, 2013)

La longitud de onda en la que se produce el máximo de emisión viene dada por la ley de Wien, por lo tanto a medida que la temperatura aumenta, el brillo de un cuerpo va sumando longitudes de onda entendiéndose como un incremento en la potencia de emisión de energía, la cual puede ser medida gracias a la ley de Stefan Boltzmann que resulta ser una integración de la distribución de Planck a lo largo de todo el espectro de frecuencias, esta ley establece que un

cuerpo negro emite radiación térmica con una potencia emisiva hemisférica total $\left(\frac{W}{m^2}\right)$, proporcional a la cuarta potencia de su temperatura:

$$E = \sigma T_e^4, \quad (4.3)$$

Donde T_e es la temperatura efectiva, es decir, la temperatura absoluta de la superficie y σ es la constante de Stefan Boltzmann $\left(\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}\right)$. La potencia emisiva de un cuerpo negro establece un límite superior para la potencia emitida por los cuerpos, en este sentido la potencia emisiva superficial de un objeto es menor que la de un cuerpo negro a la misma temperatura y está dada por:

$$E = \epsilon \sigma T_e^4, \quad (4.4)$$

Donde ϵ es una propiedad radiactiva de la superficie denominada emisividad, con valores en el intervalo $0 \leq \epsilon \leq 1$, esta propiedad es la relación emitida por una superficie y la emitida por un cuerpo negro a la misma temperatura. Esto depende en gran medida del material, ángulo, longitud de onda, y la temperatura de la superficie, características propias y específicas para cada tipo de depósito en el subsuelo.

En este orden de ideas se puede afirmar que todos los cuerpos independientemente de su localización en el globo terráqueo están en constante emisión de energía (firma espectral), característica que se encuentra condicionada a su vez a las propiedades fisicoquímicas del emisor y a los factores ambientales que interactúan con el mismo.

A partir de los anteriores conceptos es importante mencionar las diferencias entre la teledetección tradicional y el método de prospección satelital, puesto que el primero está basado

en la evaluación y descripción del comportamiento de una onda electromagnética que interactúa con cuerpos presentes en la superficie de la Tierra (Reflectancia), mientras que el segundo método integra diferentes técnicas especializadas en la caracterización e identificación de elementos en función de las propiedades electromagnéticas intrínsecas de los mismos (Emisividad), permitiendo a su vez la delimitación de áreas con presencia de algún elemento de interés aun cuando este se encuentre a varios kilómetros de profundidad en el subsuelo.

Así mismo es posible clasificar el método **OFT** como una herramienta de percepción remota no convencional, dado que el registro de información en películas satelitales analógicas permite abarcar un mayor rango del espectro electromagnético comparado con los sensores óptico electrónicos tradicionales, de igual forma, el procesamiento consiste en la identificación de nuevos compuestos producto de las reacciones fotoeléctricas que tienen lugar en la película una vez interactúan con la energía proveniente del área de interés, que para fines prácticos podría entenderse como el revelado de la imagen pero que implica la integración de diferentes técnicas tradicionales de avanzada.

Como se mencionó anteriormente los factores ambientales a los que se encuentra expuesto un elemento así como su propia composición atómica definen su firma espectral y de acuerdo a lo expresado por la ecuación de Stefan- Boltzmann, el comportamiento de la misma (firma espectral) obedece esencialmente a la relación entre emisividad y temperatura que a su vez son inversamente proporcionales a la longitud de onda con la que un cuerpo emite energía, es decir que el incremento en la temperatura condiciona la cantidad de ondas emitidas por unidad de tiempo, siendo la frecuencia dependiente de esta condición también.

Sin embargo aunque la caracterización de firmas espectrales hace parte integral del método, este proceso se lleva a cabo previamente a cada estudio y bajo calibración constante, usando

equipos de laboratorio que permiten identificar a nivel elemental y composicional la longitud de onda y la frecuencia a la que un cuerpo emite energía, siendo esta información necesaria para la selección del sensor de registro.

Por otra parte es importante destacar que el uso de películas analógicas propone una solución a la limitante de la gran mayoría de sensores óptico electrónicos que permiten registrar tan solo una estrecha región del espectro electromagnético, y todo es posible gracias a la descripción del efecto fotoeléctrico hecha por Albert Einstein en 1905 en el artículo Heurística de la generación y conversión de la luz, basando su formulación de la fotoelectricidad en una extensión del trabajo sobre los cuantos de Max Planck en donde Einstein explicaba que la emisión de electrones era producida por la absorción de fotones y solo era posible si las ondas que interactuaban con el metal poseían la frecuencia adecuada para generar una reacción, que en principio tendría características dadas por la onda incidente

Es así que en el proceso de foto emisión si un electrón absorbe una señal electromagnética con frecuencia superior a la frecuencia de corte, el electrón es expulsado del material, pero si por el contrario la energía de la onda es demasiado baja el electrón no puede ser expulsado y puede ser descrito así:

$$h\nu = h\nu_0 + \frac{mv_m^2}{2}$$

$$h\nu = \phi + E_k, \quad (4.5)$$

El cual da cuenta de la energía de un fotón absorbido, equivalente a la energía necesaria para liberar un electrón más la energía cinética del electrón emitido.

En (4.5) h es la constante de Planck, ν_0 es la frecuencia de corte o frecuencia mínima de los fotones para que tenga lugar el efecto fotoeléctrico, ϕ es la función de trabajo, o mínima energía necesaria para llevar un electrón del nivel de Fermi al exterior del material y E_k es la máxima energía cinética de los electrones.

Cuando la onda posee características apropiadas para generar una reacción fotoeléctrica se libera un fotoelectrón con velocidad y energía específicas, así mismo el espacio libre es ocupado por otro electrón que como consecuencia de la transición emite un fotón, que junto con los fotones de la onda incidente que no son absorbidos en el proceso, constituyen los subproductos de esta ecuación, sin embargo son las reacciones consecuentes las que hacen posible el registro, ya que los fotoelectrones interactúan con los demás átomos presentes en la película analógica provocando cambios físico químicos tan específicos que pueden asociarse de forma indirecta a las ondas que generaron en un principio el fotoelectrón.

Los nuevos elementos constituyen lo que se denomina como imagen latente, imperceptible a simple vista pero con información electromagnética del área en donde fue expuesta la película y que aplicando técnicas tradicionales como la orto rectificación puede proyectarse sobre el terreno con gran precisión aun cuando el sensor se encuentre a varios kilómetros de altura.

Una de las principales características a tener en cuenta durante la selección de películas es la frecuencia de corte de los elementos que la componen, la cual debe ser inferior a la frecuencia del elemento que se desea identificar, de igual forma el tamaño de grano, la densidad y el tiempo de exposición condicionan la calidad de la imagen, sin olvidar que a la energía emitida naturalmente por los cuerpos, se suma la energía exógena proveniente del sol, esto hace imposible cuantificar de manera exacta las señales que finalmente interactúan con la película,

pero que al realizar correcciones basadas en las condiciones ambientales e instrumentales involucradas durante la adquisición, reducen la incertidumbre antes del procesamiento en laboratorio en donde finalmente serán delimitadas las áreas con presencia del elemento.

5. Reflexión

El desarrollo de esta pasantía fue muy enriquecedor para la formación como profesional, ya que se pusieron en práctica muchos de los conocimientos adquiridos en el desarrollo de la licenciatura en Física, lo cual fue muy positivo en el sentido de conocer un campo de acción como profesional tan grande como lo es la Geofísica, que hasta el momento no era tan cercana pero en la cual se podía sin lugar a dudas poner en práctica los conocimientos adquiridos en el transcurso de la carrera, este paso por la empresa **ESP ENERGY GROUP** significó una gran experiencia permitiendo desarrollar conocimientos enfocados a la Geofísica y realizando un acercamiento a muchos aspectos importantes de la Industria Petrolera, sin duda esta industria es determinante para la economía del país, teniendo en cuenta que aporta **el 5% del PIB, el 25% de la inversión extranjera y el 40% de los ingresos por exportaciones**, es innegable la importancia de los hidrocarburos en el desarrollo del país y del mundo entero, en especial el petróleo, convirtiéndose este en la energía primaria más importante del mundo, prácticamente todas las actividades económicas, se sustentan en el petróleo como fuente energética, representando alrededor del 40% de las necesidades energéticas mundiales, muchos de los elementos y productos que utilizamos hoy en día, se derivan de este recurso no renovable, en primer lugar es una fuente de energía, gracias a la cual podemos utilizar nuestros vehículos y otros medios de transporte, pues tanto la gasolina como otros combustibles que se utilizan, se derivan de él, de hecho, nuestro mundo se detendría casi por completo sin petróleo, además,

muchos productos se elaboran a partir de él, como los fertilizantes agrícolas, los objetos y juguetes de plástico, algunos cosméticos, detergentes y la ropa de nylon.

Después de esta presentación de la importancia del petróleo que no es ajena a ningún ser humano, me enfoco nuevamente en la importancia de la Geofísica, como se mencionó el petróleo es un recurso no renovable, por lo tanto, existe la posibilidad de que se agote en un futuro, por esto la importancia de descubrir más reservas de este recurso ya que hasta el momento no existe ningún otro que lo pueda reemplazar de forma significativa, es aquí donde la ciencia de la Geofísica juega un papel fundamental en el desarrollo y aplicación de nuevos y ya existentes métodos de exploración que se puedan poner en práctica para el hallazgo de más reservas, por este motivo este campo se vuelve cada vez más importante y se convierte en una posibilidad para muchos profesionales de ciencias afines a la Geofísica para poner en práctica sus conocimientos y especializarse en cualquiera de los métodos exploratorios ya existentes o enfocarse en el desarrollo de nuevas tecnologías como la OFT, es de vital importancia el conocimiento de muchos conceptos físicos en el desarrollo de cada uno de estos métodos, como se pudo identificar en lo ya expuesto en este informe, temas de mecánica clásica, vibraciones y ondas, electromagnetismo, cuántica, ect. Son aplicados de forma amplia en una ciencia tan significativa para la humanidad como lo es la Geofísica.

El aporte realizado a la empresa ESP ENERGY GROUP fue de gran ayuda ya que, a través de las explicaciones dadas de algunos conceptos físicos que se evidenciaron en el proceso de entendimiento de la tecnología OFT durante el tiempo de la pasantía, se logró dar claridad a conceptos que para algunos de los profesionales de otras áreas que integran dicho grupo no les eran claros, adicional a esto la explicación en términos físicos de otros métodos de exploración

ayudaron a entender la correlación e integración que la OFT podría tener con estos, obteniendo como resultado una excelente labor dentro de la compañía.

Por otro lado, la realización de esta pasantía permitió conocer muchos aspectos de la industria petrolera, que eran totalmente ajenos y que de cierta manera enriquecieron la formación como profesional, dentro de estos conocimientos se encuentran muchos aspectos importantes en las etapas de la cadena de valor del petróleo, tales como la etapa exploratoria, seguida de la perforación, producción, refinación y finalmente su comercialización, aspectos que permitieron una gran motivación para el desarrollo profesional dentro de esta industria.

Teniendo en cuenta que la exploración es la primera etapa que se realiza en la búsqueda del petróleo y convirtiéndose esta en la necesidad más importante en estos momentos en Colombia, debido a la latente posibilidad de que se agoten las reservas ya existentes, ya que particularmente en el país, el potencial petrolífero se estima en unos 37.000 millones de barriles de petróleo equivalente, de los cuales hay probados solo 2.308 millones de barriles, estas reservas se encuentran distribuidas en 23 cuencas sedimentarias que abarcan un área de 1.036.400 km², y casi el 90% de esta área se encuentra disponible para adelantar trabajos exploratorios, se debe tener en cuenta que de esta área sedimentaria el 61% es área no explotada, por lo anterior se puede deducir que es bastante el trabajo que se tiene en la fase exploratoria en la industria petrolera en Colombia para todos aquellos profesionales involucrados con las ciencias afines al estudio de los recursos naturales que se encuentran en el subsuelo, como los Geólogos, Geofísicos, Geodésicos, etc...

En cuanto a las áreas más explotadas y que producen el petróleo en Colombia encontramos las siguientes cuencas:

- Cuenca de la Guajira
- Cuenca del Valle Inferior del Magdalena
- Cuenca del Valle Medio del Magdalena
- Cuenca del Valle Superior del Magdalena
- Cuenca del Caguán – Putumayo
- Cuenca del Catatumbo
- Cuenca Cordillera Oriental
- Cuenca de los Llanos Orientales

Según esta información se encuentra que, de las 23 cuencas sedimentarias existentes en Colombia, solo 7 son productoras de petróleo, según la Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH) existe 1 cuenca productora de Gas y 14 Cuencas que son no productoras, confirmando de esta manera que más del 60% del área sedimentaria en Colombia no se encuentra explotada, todos estos datos que se dan de manera muy general en este informe se presentan con el fin de crear conciencia de la necesidad que hay en el mercado de profesionales enfocados en este tipo de actividades.

A continuación, se presenta un mapa de Colombia donde se identifican las cuencas sedimentarias productoras en el país y una tabla donde se indica la producción de cada cuenca en términos de barriles de petróleo diario (BPD), para crear un entendimiento más claro de la información suministrada en este informe.

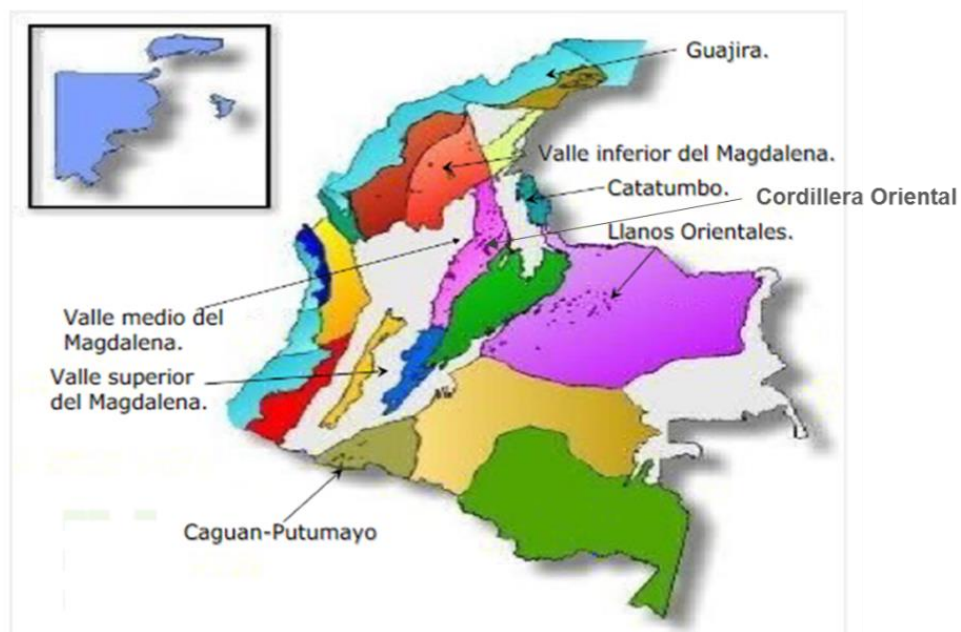


Figura 16. Mapa de cuencas Sedimentarias de Colombia, imagen adaptada de (Eder Ordoñez 2012)

PRODUCCIÓN POR CUENCA Y SU PARTICIPACIÓN EN LA PRODUCCIÓN TOTAL NACIONAL		
CUENCA	P.C (BPD)	P.P.N (%)
Caguán-Putumayo	24.000	3,75%
Catatumbo	3.283	0,51%
Cordillera Oriental	79	0,01%
Llanos Orientales	425.231	66,45%
Valle Inferior del Magdalena	458	0,07%
Valle Medio del Magdalena	98.687	15,42%
Valle Superior del Magdalena	88.149	13,78%
Total	639.887	100%

P.C: Producción por cuenca
P.P.N: Participación en la producción total nacional

Figura 17. Tabla de Producción por cuenca y su participación en la producción Nacional, imagen adaptada de (Eder Ordoñez 2012)

De la anterior información se puede deducir que la mayor parte de la producción del petróleo en Colombia proviene de la cuenca de los Llanos Orientales.

Adicionalmente otro aporte importante en la formación como profesional fue el hecho del relacionamiento comercial que también se realizó en la pasantía, ya que en varias ocasiones se hizo acompañamiento al Gerente de la empresa ESP ENERGY GROUP en la presentación de la tecnología dando soporte técnico en muchas compañías operadoras, las cuáles son las encargadas de explorar los campos existentes de gas y petróleo que se encuentran en Colombia, de tal modo que se permitiera la comprensión de las ventajas y características que este nuevo método de exploración y su aplicación en las actividades exploratorias, también se tuvo la oportunidad de asistir a algunos eventos importantes en la industria con el fin de presentar la Tecnología OFT y darla a conocer, dentro de estos eventos se encuentran:

- **LA FERIA OIL AND GAS** realizada en la ciudad de Bogotá en Corferias cada año, donde la labor fue dar asesoría y dar una explicación de los principios físicos a la gente que se acercaba al stand sobre este nuevo método geofísico llamado OIL AND GAS FINDER TECHNOLOGY.

- **LA CONVENCION DE INGENIEROS DE PETROLEOS** organizada por la asociación colombiana de petroleros que se realizó en la ciudad de Neiva, en donde la empresa ESP ENERGY GROUP recibió una invitación para realizar una conferencia en torno a la tecnología OIL AND GAS FINDER TECHNOLOGY, en esta conferencia se tuvo la oportunidad de brindar apoyo en la parte técnica al gerente de la compañía y director externo de la pasantía el ingeniero MARIO ZAMORA.

En esta labor tan interesante de relacionamiento y divulgación ante diversos escenarios de la industria petrolera se obtuvo un desarrollo en cuanto a la capacidad de dirigirme hacia un auditorio y poder explicar conceptos físicos, que hacen parte muy valiosa de la formación integral como Licenciada en Física, adicional a esto se adquirieron habilidades importantes en el

área comercial, que permitió crear un relacionamiento muy importante en esta industria tan importante.

Finalmente se realizó una práctica de Campo para la culminación integral de la pasantía, en esta práctica se contó con la asesoría de expertos geofísicos provenientes de Rusia, que son los encargados de manejar los equipos y de la toma de datos, el objetivo de este acompañamiento es que durante estos estudios se capacite al grupo de investigación de nuevas tecnologías de la empresa ESP ENERGY GROUP, en el levantamiento de datos y el procesamiento de los mismos, ya que aún no se cuenta con los equipos y los conocimientos suficientes para poder realizar un estudio de este tipo por si solos, esto contribuye de manera significativa al entendimiento de la tecnología OFT de manera práctica, además contribuye de manera real a adquirir otros conocimientos sobre aspectos del campo y a experimentar las situaciones que se viven en el desarrollo de este proceso como profesional.

La adquisición de datos se llevó a cabo en un campo petrolero del Departamento del Huila, tuvo una duración de 7 días aproximadamente, como resultado de ello se adjunta en el anexo 5 el informe realizado de dicho estudio y los resultados obtenidos.

6. Conclusiones

- Se puede asegurar que los objetivos propuestos en el proyecto de trabajo de grado se cumplieron en su totalidad, ya que se realizaron de la mejor manera implementando los conocimientos adquiridos en la formación como Licenciada en Física para el resultado exitoso de la pasantía.
- Se logró poner en práctica las habilidades y destrezas aprendidas durante el periodo educativo en el desarrollo de la pasantía.
- El proceso de la pasantía permitió la adquisición de nuevos conocimientos, ya que, la realización de nuevas actividades ajenas a los conocimientos adquiridos en el proceso educativo así lo exigieron.
- Este periodo en el que se realizó el trabajo de pasantía ha constituido una etapa de mutua cooperación con la empresa, de manera que se adquirieron muchos conocimientos como también se aportaron muchos otros en la realización de las actividades que se desarrollaron.
- La interacción con todo el grupo de trabajo de la empresa se convirtió en una experiencia grata, ya que permitió desarrollar las habilidades de interacción en el trabajo.
- Este trabajo es de carácter evaluativo, pero también constituye una contextualización con los métodos geofísicos, la cual brinda un aporte invaluable en el entendimiento de conceptos físicos y un acercamiento con el área de la exploración en la industria petrolera en Colombia.

7. Bibliografía

1. ANH (2009), Conceptos básicos de Geología y Geofísica. Recuperado de <http://www.anh.gov.co/Informacion-Geologica-y-Geofisica/Estudios-Integrados-y-Modelamientos/Paginas/CONCEPTOS-BASICOS-GEOLOGIA-Y-GEOFISICA.aspx>.
2. ESP ENERGY GROUP, Recuperado de <http://www.espcolombia.com/index.html>.
3. Terán Pérez, D.M., 2013, Introducción a la computación cuántica para ingenieros, Editorial Alfaomega, primera edición, 212 páginas.
4. Eder Ordoñez, 2012, Cuencas Sedimentarias en Colombia, Recuperado de <https://es.slideshare.net/macorca123/cuencas-sedimentarias-de-colombiadoc-1>.