

**APORTE AL G.I.G.B.A EN DETECCIÓN DE CONTAMINACIÓN EN ACUÍFEROS
DE ZONAS ALEDAÑAS AL PARQUE INDUSTRIAL II DEL ANILLO VIAL A
PARTIR DEL USO DE MÉTODOS GEOFÍSICOS**

Tania Vanessa Hernández Acevedo

Jorge Alberto Sequera Carreño

Trabajo de Grado para optar al título de Geólogo

Director

Juan Diego Colegial Gutiérrez

Geólogo PhD.

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físico-químicas

Escuela de Geología

Bucaramanga

2020

Dedicatoria

A Dios, por permitirme estar aquí, alcanzando este logro y haciendo sentir orgullosos a las personas que amo.

A mi mamá, por ser la mejor e incondicional, ha sentido cada uno de mis aciertos y desaciertos como suyos.

A mi papá, por querer y anhelar lo mejor para mi vida, fomentando en mí el deseo de superación y triunfo.

A mi novio, Juan Camilo, quién me llenó de amor y sueños, tomándome la mano para construir un proyecto de vida juntos.

A mi compañero de grado Jorge, quién se convirtió en el mejor amigo que la Geología me dio, una amistad sincera y ojalá eterna.

Y por último, al cielo.
TANIA HERNÁNDEZ

A Dios, por darme salud y permitirme alcanzar este sueño de convertirme en geólogo egresado de la Universidad Industrial de Santander.

A mis padres y hermanos especialmente, que con sus consejos, apoyo, esfuerzo y confianza, me dieron todo lo necesario para culminar esta carrera siendo orgullo de ellos.

A mi mejor amiga y compañera de grado Tania, a quien le deseo muchos más logros y alegría a lo largo de su vida, y con quien se forjó un vínculo de amistad muy fuerte y sincera, permitiéndome así desarrollar y terminar este proyecto de vida.

A mi pareja Lucia, quien me apoyó incondicionalmente durante mi etapa como estudiante universitario, convirtiéndose en un pilar importante para obtener el título profesional

A mis compañeros de carrera, con los que juntos pudimos superar los obstáculos en los diferentes semestres y alcanzar esta meta.

JORGE SEQUERA

Agradecimientos

Al grupo de investigación de geología básica y aplicada (GIGBA) por aceptarnos y permitirnos realizar la pasantía de investigación como trabajo de grado de nuestra carrera.

A nuestro director Juan Diego Colegial, por brindarnos su confianza y apoyo durante todo este proceso, animándonos a cumplir este maravilloso objetivo.

A cada una de las personas que hicieron parte de nuestro aprendizaje; administrativos, profesores y compañeros, los cuales aportaron a nuestra formación integral.

A nuestras familias que con su esfuerzo y apoyo nos brindaron las herramientas necesarias para obtener este logro en nuestras vidas y convertirnos en profesionales.

Tabla de contenido

Introducción	13
1. Planteamiento del problema.....	15
2. Justificación	16
3. Objetivos	17
3.1 Objetivo general.....	17
3.2 Objetivos específicos	17
4. Lugar de ejecución.....	18
5. Estado del arte.....	19
6.Marco teórico	24
6.1 Estratigrafía.....	24
6.2 Geofísica	31
7. Metodología	37
7.1 Consulta bibliográfica.....	37
7.2 Pre- campo	38
7.3 Campo	39
7.4 Análisis de datos	41
7.5 Elaboración del trabajo final.....	42
8. Resultados o productos esperados	42
9. Cronograma de actividades.....	43
10. Presupuesto	44

Referencias citadas..... 45

Lista de figuras

Figura 1. Localización zona de investigación.	18
Figura 2. Columna estratigráfica generalizada de la formación Bucaramanga	29
Figura 3. Mapa litológico zona de investigación.	30
Figura 4. Resistencia del material.	31
Figura 5. Geometrías especiales para electrodos de corriente y potencial para arreglos: a) Wenner, b) Schlumberger y c) Doble dipolo.	34
Figura 6. Esquema de arreglo de adquisición de MASW	35
Figura 7. Esquema metodológico del proyecto de investigación.	37

Lista de tablas

Tabla 1. Información general de la Pasantía de Investigación.	8
Tabla 2. Descripción formación Girón.	25
Tabla 3. Descripción de las facies características de un Río trezado.	28
Tabla 4. Valores de resistividades de diferentes materiales.	32
Tabla 5. Clasificación de materiales con velocidades de ondas de corte en los primeros 30 m.	36
Tabla 6. Cronograma de actividades propuestas.	43
Tabla 7. Presupuesto para ejecución total del proyecto.	44

Información general**Tabla 1.***Información general de la Pasantía de Investigación.*

TÍTULO DE LA PROPUESTA: Aporte al G.I.G.B.A en detección de contaminación en acuíferos de zonas aledañas al Parque Industrial II del Anillo Vial a partir del uso de métodos geofísicos.			
Nombre del estudiante:	1. Tania Vanessa Hernández Acevedo		
	Código: 2143692	Email: taniahdza06@gmail.com	Tel: 3008826209
	2. Jorge Alberto Sequera Carreño		
	Código: 2152334	Email: jorgesequera50@gmail.com	Tel: 3132289255
Nombre del grupo de investigación: GIGBA			
Línea de investigación desarrollada: Geología ambiental y amenazas geológicas (Contaminación de acuíferos)			
Profesor de Geología que dirigirá el trabajo: Juan Diego Colegial G.			
Profesional del grupo de investigación que servirá de tutor: Juan Diego Colegial G.			

Presentación general del grupo de investigación

Tomado de la página oficial del grupo de investigación geología básica y aplicada. (Gruplac)

“El grupo de Investigación en Geología Básica y Aplicada (GIGBA) se caracteriza por su trabajo interdisciplinario, generando nuevo conocimiento que contribuye al entendimiento de la formación y evolución de nuestro planeta, así como al mejoramiento de la calidad de vida de nuestra sociedad a partir de la búsqueda, exploración y explotación de yacimientos minerales y su aprovechamiento sostenible, lo cual va acompañado de la formación de estudiantes a nivel de pregrado y posgrado en programas de Geología y ciencias afines. Nuestro grupo capacita a jóvenes investigadores para su inserción al grupo, buscando captar su atención en formarse en un ambiente de trabajo adecuado para que continúen su formación investigativa a nivel de posgrado. Actualmente se cuenta con profesionales en diferentes disciplinas del saber que brindan su apoyo como colaboradores nacionales e internacionales, lo cual ha permitido una interacción más dinámica, apoyando la formación de nuestros estudiantes de pregrado y posgrado, la participación en eventos científicos, el desarrollo científico y tecnológico y la generación de un banco proyectos de investigación relacionados con nuestras líneas de investigación. Con el fin de fortalecer nuestra interacción nacional e internacional, los investigadores han llevado a cabo el intercambio de ideas y experiencias en torno al desarrollo de iniciativas de investigación básica enfocadas a fortalecer la investigación aplicada que permita la generación de conocimiento con aplicación directa a los problemas de la sociedad y el sector productivo. No obstante, durante los próximos años se espera mejorar esta interacción que permita nuestra proyección a nivel nacional e internacional, la formulación de iniciativas de investigación de alto impacto para su presentación a convocatorias con financiación interna y externa, así como el fortalecimiento de las líneas de investigación a través de la formación de recurso humano”

Resumen

Título: Aporte al G.I.G.B.A en detección de contaminación en acuíferos de zonas aledañas al parque industrial ii del anillo vial a partir del uso de métodos geofísicos *

Autor: Hernández Acevedo Tania Vanessa, Sequera Carreño Jorge Alberto **

Palabras clave: Contaminación, Acuíferos, TRE, MASW, Parque Industrial II.

Descripción:

El objetivo de esta pasantía, radica en hacer una contribución al conocimiento elaborando un plan de trabajo eficiente, es por esto que el aporte que hace el presente proyecto al grupo de investigación GIGBA, en la línea de geología ambiental, es motivar a resolver problemas ambientales con estrategias diferentes; Es importante resaltar que las fases de pre-campo, campo y análisis de datos mencionadas en la metodología propuesta del proyecto, no son desarrolladas por los autores de este trabajo de grado sino que es el GIGBA quien se encargará de ejecutarlo posteriormente.

El uso de la geofísica para el estudio de acuíferos contaminados no es habitual. Sin embargo, esta ciencia es una alternativa que otorga variedad de beneficios en el marco del estudio de la contaminación de dichas fuentes hídricas. La ventaja más relevante radica en la rapidez en la adquisición de datos, en comparación, por ejemplo, con estudios geoquímicos. Es por eso que la utilización de métodos geofísicos se propone como herramienta de adquisición de información y sensibilización social en el contexto del proyecto de investigación.

En este caso, la detección de posibles contaminantes en acuíferos empleando tomografía eléctrica (TRE), permite encontrar anomalías de resistividad en el terreno. Debido a que estas pueden interpretarse como diferentes materiales del subsuelo, es necesario utilizar otro método para realizar la correlación de los datos resistivos y litológicos, por consiguiente, el análisis multicanal de onda superficial (MASW) al encontrar la velocidad de la onda S, permite hacer una caracterización litológica subsuperficial disminuyendo la incertidumbre en las anomalías.

Finalmente, la propuesta “Aplicación de métodos de prospección geofísica para la detección de acuíferos frente a una posible contaminación en zonas aledañas al Parque Industrial II en el Anillo Vial” puede ser utilizada como un recurso para la identificación de acuíferos contaminados similares a los de la zona de investigación.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Geología. Director: Ph.D. Juan Diego Colegial Gutiérrez.

Abstract

Title: Contribution to the G.I.G.B.A in the detection of contamination in aquifers around the Industrial Park II of the Anillo Vial road, using geophysical methods. *

Authors: Hernández Acevedo Tania Vanessa, Sequera Carreño Jorge Alberto **

Keywords: Contamination, aquifers, ERT, MASW, Parque Industrial II

Description:

The main objective of this internship is to contribute to knowledge by designing a efficient workout plan. Therefore, the contribution made with this study to the GIGBA investigation group in areas related to environmental geology, looks forward to solving environmental issues with alternatives ways. It is important to highlight that pre- fieldwork, fieldwork and analysis mentioned in methodology aren't carried out in the present research. However, the GIGBA will carry it out later.

Implementation of geophysics to study contaminated aquifers is unusual. Nevertheless, this science is an alternative that offers benefits in this area. The main advantage is the rapid acquisition, compared to geochemical studies. Therefore, the implementation of geophysics acquisition is proposed as a tool of acquisition and social sensibilizarían in the scenario of the project.

In this specific case, detection of potencial environmental contaminants in aquifers by using TRE allows to find resistivity anomalies in the terrain. The anomalies could be interpreted as different underground materiales. It is needed to use another geophysics method, in order to correlate resistivity and lithological information. Therefore, the MASW allows to detect the wave S and characterise underground materials by minimising the anomalies uncertainties.

To summarise, the propuse "contribution to GIGBA by detecting contaminated aquifer areas in industrial areas of Bucaramanga could be used as a resource to identify contaminated aquifers in the zone.

* Bachelor thesis

**Faculty of Physico-chemical Engineering.School of Geology. Director: Ph.D. Juan Diego Colegial Gutierrez.

Impacto ambiental

La polución del aire y del agua es uno de los efectos que con mayor intensidad percibe la población en cuanto a contaminación ambiental. Las causas del deterioro ambiental son desmedidas, sin embargo todas son inherentes al ser humano.

A medida que se da el desarrollo industrial, el cambio climático y/o calentamiento global incrementa. Es fundamental que la industria tome conciencia en cuanto a la generación de residuos y al manejo de los mismos, debido a que es una de la más grandes problemáticas en materia ambiental.

El presente proyecto de investigación es responsable sobre el medio natural y la salud humana puesto que las actividades a realizar tienen efectos positivos a largo plazo, ya que los entes implicados pueden iniciar planes de remediación y mitigación para disminuir el impacto ambiental. Además, de tener como ventaja que los métodos a utilizar no son invasivos ni destructivos.

Hacer estudios para encontrar o descartar posibles fuentes de contaminación, permite la construcción de una sociedad más sensible al medio ambiente, lo cual genera un compromiso con las futuras generaciones.

Introducción

El área de estudio se caracteriza por ser una zona industrial localizada en el sector del Anillo Vial, próxima al Río de Oro, ubicado en Girón, municipio del departamento de Santander. Son varias las empresas que se encuentran ubicadas en el Parque Industrial II, las cuales forman distintos escenarios de polución que contribuyen al calentamiento global.

La contaminación ambiental se debe a la existencia de componentes nocivos en el medio ambiente, tales como químicos, biológicos o físicos, los cuales suponen un peligro para los seres vivos que lo habitan, incluyendo a los seres humanos (“*Cuidemos el Planeta*”, 2018). Dicha contaminación se origina mayoritariamente por causas derivadas de la actividad humana, como la explotación desmedida de los recursos naturales, la emisión de gases de efecto invernadero a la atmósfera, particular de empresas industriales, entre otros.

Además del efecto en el aire, los agentes contaminantes liberados en el suelo, pueden generar la contaminación de acuíferos. Dichas estructuras se encuentran ubicadas debajo de la superficie terrestre almacenando agua. En muchos países, la dependencia del agua subterránea para el desarrollo es generalizada, al igual que la amenaza a la que están expuestos estos cuerpos de agua a la contaminación (Foster *et al.*, 2002). Algunos de estos factores radican en fertilizantes químicos que utiliza la agricultura, los desechos de la actividad industrial y del petróleo.

Como una medida para la protección de la calidad de las aguas subterráneas, el Banco Mundial recomienda la elaboración de las cartografías de amenaza, vulnerabilidad y riesgo de los acuíferos (Foster *et al.*, 2002). Para conocer la amenaza de contaminación que sufre un acuífero es necesario la identificación y caracterización de las actividades potencialmente contaminantes. Para esto, lo mejor es obtener la información sobre cada actividad antropogénica (Hirata, 2002) con el objetivo de tomar medidas regulatorias para la preservación del agua subterránea.

Una herramienta que puede ser usada en este ámbito es la prospección geofísica ambiental, cuya aplicación de métodos geofísicos permite la investigación de zonas de difícil acceso, como el interior de la Tierra, aprovechando las propiedades físicas de los cuerpos rocosos (Manilla, 2003).

La tomografía eléctrica (TRE) y el análisis multicanal de ondas superficiales (MASW) son métodos a fines al medio ambiente, pues no son invasivos ni destructivos. Además, permiten disminuir el nivel de incertidumbre de los resultados al implementarse en conjunto. Sus mediciones de resistividades aparentes de los materiales del subsuelo y las velocidades de las ondas superficiales permiten obtener perfiles para conocer las litologías existentes en la zona de investigación, logrando la caracterización de vertederos y en este caso, la detección de anomalías y la posible existencia de contaminación.

1. Planteamiento del problema

La zona urbana de la capital del departamento y sus municipios aledaños, cuenta con un número considerable de ríos, entre ellos el Río de Oro. Según un informe en el 2018 del Área Metropolitana de Bucaramanga, la contaminación de dichas fuentes hídricas es del 85% (Gelvez, 2019).

El área de investigación se encuentra próxima al Río de Oro, adicionalmente es posible señalar que los factores que elevan el nivel de contaminación se deben al comportamiento industrial de la zona, lo cual conlleva a pensar el efecto ambiental que existe en los acuíferos. Es por esto que es necesario plantear si existen anomalías en los acuíferos de las zonas aledañas del Parque Industrial II, frente a una situación de contaminación inferida del agua subterránea.

2. Justificación

Los sucesos de contaminación ambiental que son originados por diferentes agentes físicos, químicos y biológicos cada vez son más concurrentes tanto a nivel local como global.

Entre las causas más representativas de contaminación se encuentra el desarrollo industrial, el cual caracteriza la zona de investigación, donde las emisiones de gases, derrames, la producción de desechos, vertidos incontrolables hacia las afueras de las ciudades y la explotación de recursos naturales, tienen una relación directa con la polución.

Los análisis de sedimentos activos y de agua, basados en las características geoquímicas son costosos, requieren mucho tiempo y trabajo (Zume et al., 2006) y han sido reemplazados gradualmente por métodos geofísicos, que no son invasivos, suelen ser más económicos y facilitan la adquisición rápida de datos (Reynolds, 1997). La aplicación de dichos métodos, en este caso, TRE y MASW, mediante el modelamiento de las propiedades eléctricas y elásticas del terreno, permiten una mayor definición vertical y longitudinalmente del contaminante (Friedman, 2005) lo cual proporciona la detección de anomalías.

El propósito de investigar la concentración de anomalías cumple un fin benéfico para la sociedad y el medio ambiente, además de representar posibilidades y desafíos para generar posteriormente planes de mitigación y remediación.

3. Objetivos

3.1 Objetivo general

Evaluar la existencia de contaminación en acuíferos de las áreas aledañas del Parque Industrial II en el Anillo Vial, mediante el uso de métodos geofísicos como TRE y MASW.

3.2 Objetivos específicos

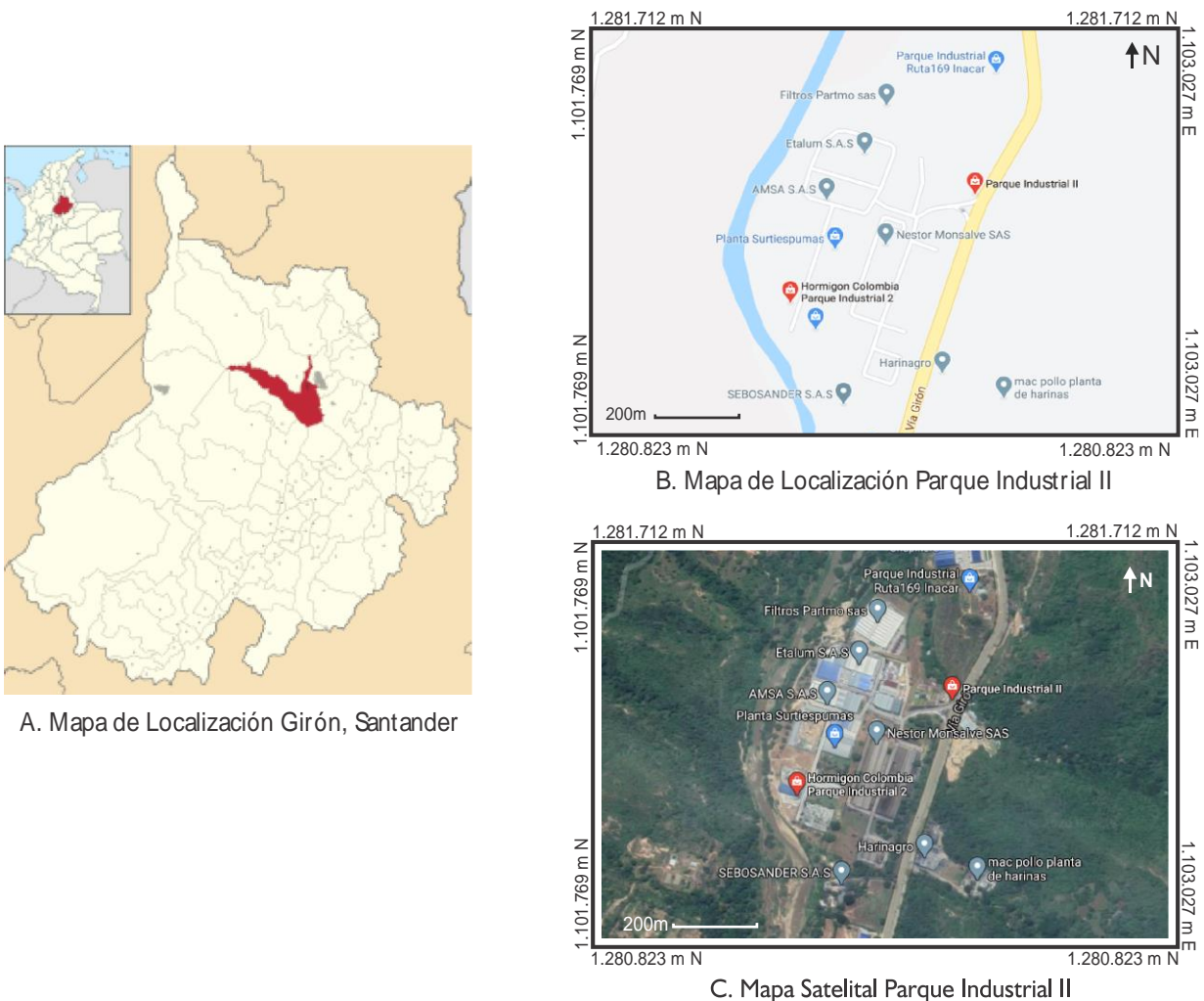
- Identificar anomalías de resistividad eléctricas del terreno (resistividad, permeabilidad o permitividad) a partir de la adquisición de tomografía eléctrica.
- Establecer la distribución litológica subsuperficial mediante variaciones de las velocidades de las ondas superficiales a partir del MASW.
- Interpretar un modelo geológico del subsuelo integrando la información geofísica adquirida e información geológica descrita por la CDMB (2005) acerca de las terrazas aluviales del Rio de Oro.

4. Lugar de ejecución

La selección de la zona de investigación se realiza a partir del concepto de contaminación industrial. Por este término se entiende a la emisión de sustancias nocivas, tóxicas o peligrosas, directa o indirectamente de las instalaciones o procesos industriales al medio natural.

Figura 1.

Localización zona de investigación.



NOTA: Las imágenes fueron tomadas de Google Earth, Google Maps y editadas en Corel.

La zona industrial de la región se encuentra localizada en un sector del Anillo Vial, ubicado en Girón, un municipio del departamento de Santander (Figura 1, sección A). El Parque Industrial II abarca un conjunto de empresas, entre ellas de materiales de construcción, una planta química, plástico y detergentes, como se muestra en la Figura 1, sección B. Además de encontrar el Río de Oro hacia el Oeste.

En la Figura 1, sección C, se observa la topografía del sector, lo cual hace posible el uso de los métodos escogidos para la investigación, debido a la cualidad del terreno casi plana.

5. Estado del arte

En este apartado se encuentran consultas de investigaciones relacionadas al tema de la implementación de métodos geofísicos (Geoeléctrica) para determinar la existencia de plumas de contaminación en acuíferos por lixiviación de diferentes fuentes y (Sísmica) para conocer la distribución litológica en el subsuelo. Los documentos referidos son tesis de pregrado realizadas en Colombia y artículos de nivel internacional.

Entre los antecedentes investigativos a nivel nacional, se encuentra la tesis de pregrado “Uso de tomografía de resistividad eléctrica para la determinación de las direcciones de flujo de la pluma de contaminantes generada en el vertedero “el Carrasco” realizada por Parra Sergio (2018), la cual se basó en el uso de métodos geoeléctricos (tomografías de resistividad con arreglo tipo dipolo-dipolo) con el fin de sugerir una dirección de flujo de lixiviados generados en el relleno sanitario de la ciudad de Bucaramanga y a su vez definir valores de resistividad representativos de los 100 m más someros del miembro Órganos de la formación Bucaramanga sobre la cual está ubicado el vertedero de residuos sólidos; los hallazgos del presente estudio muestran una pluma de

contaminación de geometría semicircular debido a las anomalías de resistividad que se registraron en las transectas hechas en cercanías de la fuente de lixiviados, además de establecer valores resistivos para las diferentes litologías que se encuentran en el miembro órganos. Así mismo el autor recomienda la realización de trabajos geoambientales en los ríos aledaños al vertedero (Río de Oro y Río Frio) debido a la alta permeabilidad que presenta la geología del sector.

Igualmente en el departamento de Boyacá de Colombia, los estudiantes Marín H. Engine D. y Avendaño H. Fabio D. de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, desarrollaron en el 2017 el trabajo “Prospección geofísica ambiental aplicada a la detección de plumas contaminantes debidas a la infiltración de lixiviados en un relleno sanitario, bajo la adaptación de sondeos eléctricos verticales de resistividad y polarización inducida, para obtener tomografías geoeléctricas profundas y modelos 3D”, en donde los objetivos de la investigación era detectar infiltraciones de lixiviados provenientes del relleno sanitario de Chiquinquirá a partir de tomografías geoeléctricas, así como también caracterizar la litología en el subsuelo de la formación Areniscas de Chiquinquirá. Este trabajo además de permitir apreciar la utilidad que posee la implementación de métodos geofísicos eléctricos en aspectos ambientales, aporta información vital para entender el comportamiento de los flujos contaminantes del vertedero en el subsuelo y su interacción con la geología local mediante modelos 3D de resistividad y cargabilidad.

Análogamente, está la tesis titulada “Evaluación Hidrogeológica del Relleno Sanitario de Río Azul” del programa de posgrado en geología con énfasis en hidrogeología y manejo del recurso hídrico de la Universidad de Costa Rica, el cual es desarrollado por Jorge Suárez y Héctor Zúñiga, quienes identificaron las zonas con mayores potenciales de almacenamiento de lixiviados a través de 25 sondeos eléctricos verticales, alcanzando una profundidad de hasta 65m. De manera que la implementación de la geolétrica logra determinar los espesores y la distribución de los materiales

de cobertura, desechos saturados con lixiviados y la profundidad del techo del basamento. El modelo geofísico planteado consta de cuatro capas: la primera corresponde a una cobertura de material compactado ($20 \Omega\text{m} - 54 \Omega\text{m}$); la segunda capa contiene desechos no saturados ($11 \Omega\text{m} - 18 \Omega\text{m}$); la tercera ($1 \Omega\text{m} - 5,4 \Omega\text{m}$) es de desechos saturados con lixiviados y la última ($49 \Omega\text{m} - 360 \Omega\text{m}$) correspondiendo al basamento sobre el cual se instaló el relleno sanitario.

Del mismo modo Alejandrina Castro, Diana Acevedo-Berruecos, Javier Urbietta, Rosario Iturbe, Omar Delgado-Rodríguez, de la Universidad Nacional Autónoma de México y el Instituto Mexicano del Petróleo, en su estudio “Caracterización geoquímica y geoelectrica de un sitio contaminado por hidrocarburos en el estado de Puebla, México” aplican dos métodos, el primero de ellos es directo, el cual consiste en un muestreo de suelo y análisis químico mientras que el segundo método es indirecto y corresponde a la tomografía eléctrica. El producto obtenido de los perfiles de TRE muestra una posible delimitación del contaminante, en correspondencia con el análisis granulométrico realizado en las muestras de suelo, indicando la existencia de un suelo arenoso de alta permeabilidad. A pesar de que la ubicación y longitud de los perfiles de TRE en ambas etapas estuvieron afectadas por la accesibilidad al sitio, los resultados revelan notoriamente anomalías de alta resistividad asociadas a la presencia de una cobertura resistiva que incluye contaminación reciente por hidrocarburos.

Por otra parte, el departamento de Geología de la Universidad de Ibadan en Nigeria, publicaron en 2017, un estudio denominado “Integrated electromagnetic (EM) and Electrical Resistivity Tomography (TRE) geophysical studies of environmental impact of Awotan dumpsite in Ibadan, southwestern Nigeria” realizado por Olawale Olakunle Osinowo, Michael Oluseyi Falufosi y Eniola Oluwatosin Omiyale, quienes investigaron el nivel de contaminación causada por la

descomposición de los desechos a través de métodos electromagnéticos (EM) y tomografía eléctrica (TRE).

A partir de nueve perfiles en los que EM tenía un diseño en el cual los intervalos de estación se encontraban a 5m y la separación de bobinas a 10, 20 y 40m y TRE con una configuración dipolo-dipolo la separación de los electrodos era de 2m, obtuvieron las mediciones de resistividad aparente, las cuales permitían reflejar características tales como mineralogía, porosidad, permeabilidad, temperatura, química de fluidos en poros y grado de saturación de la zona de estudio. La compaginación de ambos métodos sugiere la importancia de integrar técnicas de investigación de resistividad electromagnética y eléctrica para estudios ambientales siendo fundamental para seleccionar la ubicación apropiada del vertedero con la capacidad de retener los contaminantes generados y así prevenir la contaminación ambiental.

En un estudio realizado en el 2006 por Joseph T. Zume, Aondover Tarhule, y Scott Christenson, nombrado como “Subsurface Imaging of an Abandoned Solid Waste Landfill Site in Norman, Oklahoma” representa una pluma de lixiviados que emana de un antiguo vertedero municipal cerca de la ciudad de Norman, Oklahoma, el cual se descarga en un acuífero aluvial subyacente. En este trabajo se utilizaron técnicas de imágenes subsuperficiales, tomografía de resistividad eléctrica y registro de conductividad eléctrica (CE), métodos usados para detectar y mapear la posición de la pluma de lixiviados. Las zonas que presentaron anomalías fueron delimitadas con dichos métodos, que se correlacionaron con la ocurrencia de la pluma detectada por los análisis de química del agua de los pozos de monitoreo multinivel. La conductancia específica, un indicador potencial de contaminación por lixiviados, varió representativamente en zonas contaminadas y no contaminadas.

En el estudio de “evaluación de la resolución del método de análisis de dispersión de ondas superficiales MASW (multichannel analysis of surface waves) en suelos residuales” realizado por Serna (2017) para la obtención del título de pregrado de la facultad de minas en la universidad Nacional de Colombia, se realizaron diferentes arreglos en la toma de adquisición de datos del método MASW con el fin de conocer la influencia que tenían en la resolución de los perfiles sísmicos del subsuelo con capas de suelo residual de espesores considerables, desarrollando metodologías que permitan mejorar el uso de esta herramienta geofísica en la determinación de la distribución vertical de cada capa y sus respectivos espesores.

Así mismo, la aplicación de este método en España Cuevas (2013), en la investigación “Aplicación del método MASW para estudios sobre microzonificación sísmica en la ciudad de Lorca-España” mediante perfiles sísmicos del área se reconocieron propiedades del subsuelo (V_s) y su distribución espacial en el terreno, generando una mejor caracterización que permitía tomar en cuenta nuevos parámetros en la actuación ante riesgos sísmicos de edificios ya construidos y en la planificación del riesgo sísmico para nuevas zonas urbanizables, con el fin de disminuir de los peligros que amenazan a la comunidad en Lorca.

Finalmente, ambos métodos (TRE y MASW) han sido implementados de manera conjunta en Perú, en el trabajo de grado de Huarca (2018) “Aplicación de tomografía geoelectrica, refracción sísmica y masw en investigaciones geotécnicas en la localidad de patashuaylla – urubamba“, tenía como objetivo evaluar las condiciones y características geofísicas y geotécnicas del suelo donde se realizarían construcciones importantes a partir de la adquisición sísmica, y con la cual se pudo diferenciar los materiales que se encontraban debajo de la superficie otorgando una información más precisa y con menos incertidumbre para la toma de decisiones. Mientras en Italia la unión de estos métodos geofísicos de fácil acceso y bajo costo en el proyecto de grado “Caracterización

geofísica de un sistema arginal e aplicaciones geotecnicas” (Peloso 2013), permitieron obtener mucha información en poco tiempo, e identificando los materiales que componen el terraplén donde se encuentra la localidad de San Mauretto, la estructura del suelo en el mismo sitio y respondiendo a la pregunta de cómo este reaccionaria ante un evento de inundación.

Los trabajos anteriormente mencionados abren un campo de posibilidades de usos y generan metodologías eficientes aplicables en los proyectos de investigación que se requiera obtener una información de la subsuperficie de buena calidad a un costo económico y de tiempo bajo. Así mismo, estas herramientas al adquirir mediciones indirectas de bajo impacto ambiental poseen un alto valor de importancia en el conocimiento y solución de problemáticas sociales.

6. Marco teórico

6.1 Estratigrafía

La zona de estudio presenta distintas litologías (Figura 3) pertenecientes a la formación Girón (Jg), formación Bucaramanga y depósitos aluviales recientes del Río de Oro (terrazas aluviales principalmente) compuestos de cantos redondeados, guijos y gravas polimicticos embebidos en matriz arenosa desde media fina hasta areno limosa.

La unidad litológica más antigua es la formación Girón, de ambiente de sedimentación continental, la cual es un conjunto de areniscas conglomeráticas, conglomerado gris amarillento a pardo rojizo, masivos lenticulares y limolitas pardas rojiza; además caracterizada por presentar capas competentes de conglomerados y de areniscas cuarzo feldespáticas de colores crema verdoso, con predominio del color rojo intercaladas con lodolitas violetas masivas y su posición

estratigráfica sobre la Formación Bocas le asignó una edad al conjunto de Pensilvaniano Superior y no más joven que el Pérmico (CDMB 2005). En la zona oeste en el área de estudio la Formación Girón debido a la falla del Suárez genera escarpes fuertes y laderas con diversas pendientes, en donde dicha formación se encuentra cubierta por depósitos cuaternarios principalmente por flujo de detritos o escombros.

La formación Girón descrita por Cediel (1968) de 4650 m de espesor fue dividida en 7 facies, constituidas principalmente por areniscas de grano grueso, areniscas conglomeráticas, capas de hasta un metro de espesor rojas de limolita y arcillolita y capas conglomeráticas contienen guijos de cuarzo y de calizas hasta de 4 centímetros de diámetro (Edu, 2017), distribuidas como se de base a techo de la siguiente manera.

Tabla 2.

Descripción formación Girón.

Conjunto	Espesor		Descripción
		(m)	
A (base)	610	Arenisca arcósicas de grano grueso a conglomeráticas gris clara en capas gruesas con estratificación cruzada (95%) y lentes de lutitas gris azulado (5%).	
B	590	Areniscas gris azulosas claras (60%) de grano medio a grueso y capas de limolitas y arcillolitas rojizas a violeta grisáceo (40%) interestratificadas.	
C	430	Areniscas arcósicas duras gris verdosas a gris oliva claro de grano medio a grueso con niveles conglomeráticos cuarzosos	

D	650	Capas rojas de limolitas y areniscas arcillosas (60%) y areniscas arcólicas gris verdosas (40%) interestratificadas.
E	1040	Areniscas de grano medio y limolitas gris verdosas oscura (base) a gris amarillento. Restos de material carbonáceo y plantas
F	250	Areniscas gris verdosas conglomeráticas con guijos de cuarzo (70%) y capas rojas de limolitas y arcillolitas (30%)
G (tope)	1080	Capas de areniscas de grano grueso a conglomerados cuarzosos, secuencia granodecreciente con colores gris verdoso (base), gris amarillento y amarillo grisáceo (techo)

NOTA: Tabla de Cediel (1968) tomado del Informe geología y geomorfología sector norte de Bucaramanga para la Alcaldía de Bucaramanga en la Elaboración de estudios básicos urbanos, arquitectónicos y paisajísticos y acompañamiento social de algunos proyectos estratégicos en el municipio de Bucaramanga de E.D.U. (2017)

Por otro lado, la formación Bucaramanga se encuentra dividida de base a tope en 4 miembros (Órganos, Finos, Gravosos y Limos rojos) los cuales serán descritos posteriormente, siendo el miembro más inferior (Órganos) el único aflorante en el sector. De Porta (1958) describe dicha formación como un depósito sedimentario aluvial de edad Cuaternario, morfogenéticamente definido como un abanico aluvial, con un control tectónico en activo durante su depositación y cuyo espesor de la formación aumenta del oriente a occidente con un valor promedio cercano a los 250 m (CDMB, 2005), en un área de entre 60 a 80km². El abanico limita con el Macizo de Santander al NE, al NW y W con el cerro de Palonegro y el Río de Oro, y al Sur con la Mesa de Ruitoque (CDMB, 2010).

⇒ Miembro limos rojos: definido por Julivert (1963). Constituido por arenas arcillosas a gravosas y limos de colores rojizos, amarillentos y naranjas. Se caracteriza por la presencia esporádica de bloques angulares de arenisca, algunas veces embebidos dentro de limos

rojos (Lima, 2015 en Parra, 2018). Este miembro al ser el superior se encuentra altamente erodado por lo que los espesores de pocos metros varían a lo largo del abanico.

- ⇒ Miembro gravoso: según Niño y Vargas (1992), este miembro cuenta con un espesor entre 8 y 30 m, presentando niveles gravosos, gravo arenosos y gravo lodosos matriz soportados, en donde los cantos son de 15 cm de diámetro promedio y bloques de roca principalmente, subangulares a subredondeados, embebidos en una matriz areno-arcillo limosa, color pardo rojizo, rojizo y ocre pálido (CDMB, 2010).
- ⇒ Miembros finos: Este miembro de 15-30 m (Lima 2015) está conformado principalmente por arcillas y limos de color gris claro a verde, con estratificación plano-paralela; en algunos sectores se encuentran niveles areno-limosos, de un color amarillo a pardo. El espesor varía ampliamente en diferentes partes del área de Bucaramanga, infrayaciendo al miembro gravoso. (CDMB, 2010).
- ⇒ Miembro órganos: Mancera y Salamanca en 1994, lo definieron como el miembro con mayor espesor en la formación Bucaramanga de aproximadamente 180 m o más, además el ambiente de depositación se caracteriza como “procesos fluviales y transporte fluvial (Lima y Medina, 2015) o abanico aluvial, fluvial y fluvial-playa (Niño, 2015)” (Moreno, 2018) y cuya litología “corresponde a una serie monótona de niveles polimícticos de fragmentos gruesos, de aspecto conglomerático, en alternancia con capas y lentes limo arenosos, con variaciones laterales y verticales en composición y textura” (Bueno y Solarte, 1994).

Este miembro se puede dividir entre dos unidades, en donde la unidad inferior es “constituida por niveles arcillosos, arcillo arenosos y limo arcillosos de color amarillento y verdosos, compactos, de consistencia firme con algunas interposiciones de lentes conglomeráticos” (CDMB,

2005), mientras la unidad superior posee la litología típica de este miembro, ya que está “constituido principalmente por niveles conglomeráticos de areniscas y lodolitas en matriz arcillo – limosa con interposiciones de lentes arcillosos, rojizos y anaranjados” (CDMB, 2005).

En este último miembro se presentan facies características de un Río trenzado según la clasificación de Miall (1977) y en el cual se ha definido como un “depósito de río trenzado con dirección SE – NW (Franco y Ramírez, 2017) o como un abanico aluvial desembocado del frente montañoso al oriente el cual corresponde al Macizo de Santander, controlado por la falla Bucaramanga-Santa Martha asociado en su mayor parte del Río Surató” (Parra, 2018).

Tabla 3.

Descripción de las facies características de un Río trenzado.

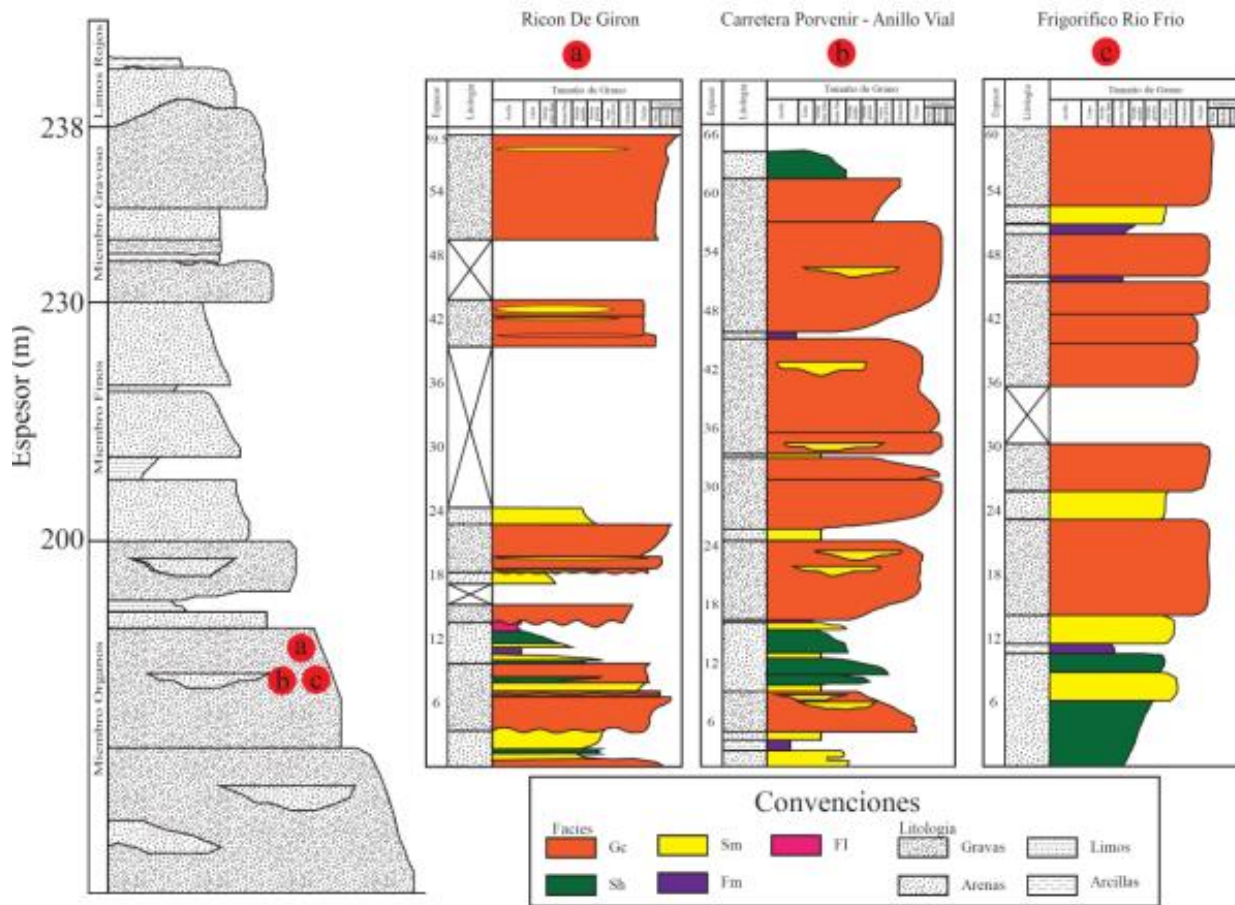
Facies según Miall (1977)	Descripción
Gc	Grava arenosa clastosoportada, clastos subredondeados a muy bien redondeados, matriz arenosa a areno arcillosa.
Sh	Niveles de arena, Arena lodosa o arena ligeramente Gravosa masiva.
Sm	Arena lodosa, localmente gravosa con laminación plano-paralela continua o difusa.
Fm	Limo, arcilla y lodo masivo.
Fl	Arcilla con laminación muy fina cruzada, ripples y plano-paralela.

NOTA: Imagen de Miall (1977) tomada de Uso de tomografía de resistividad eléctrica para la determinación de las direcciones de flujo de la pluma de contaminantes generada en el vertedero “el Carrasco” de Parra (2018).

La figura 2 muestra la columna estratigráfica de la formación Bucaramanga y se puede evidenciar la secuencia de los miembros, además de diferenciar la columna estratigráfica del miembro Órganos en la zona Rincón de Girón (Franco y Ramírez, 2017), en la carretera Porvenir – Anillo vial (Ramírez y Hernández, 2018) y en la zona frigorífico Río Frio (Solano, 2016).

Figura 2.

Columna estratigráfica generalizada de la formación Bucaramanga.



NOTA: Para convenciones referirse a la tabla 1. Imagen editada de M. Julivert (1963) tomada de Uso de tomografía de resistividad eléctrica para la determinación de las direcciones de flujo de la pluma de contaminantes generada en el vertedero “el Carrasco” de Parra (2018).

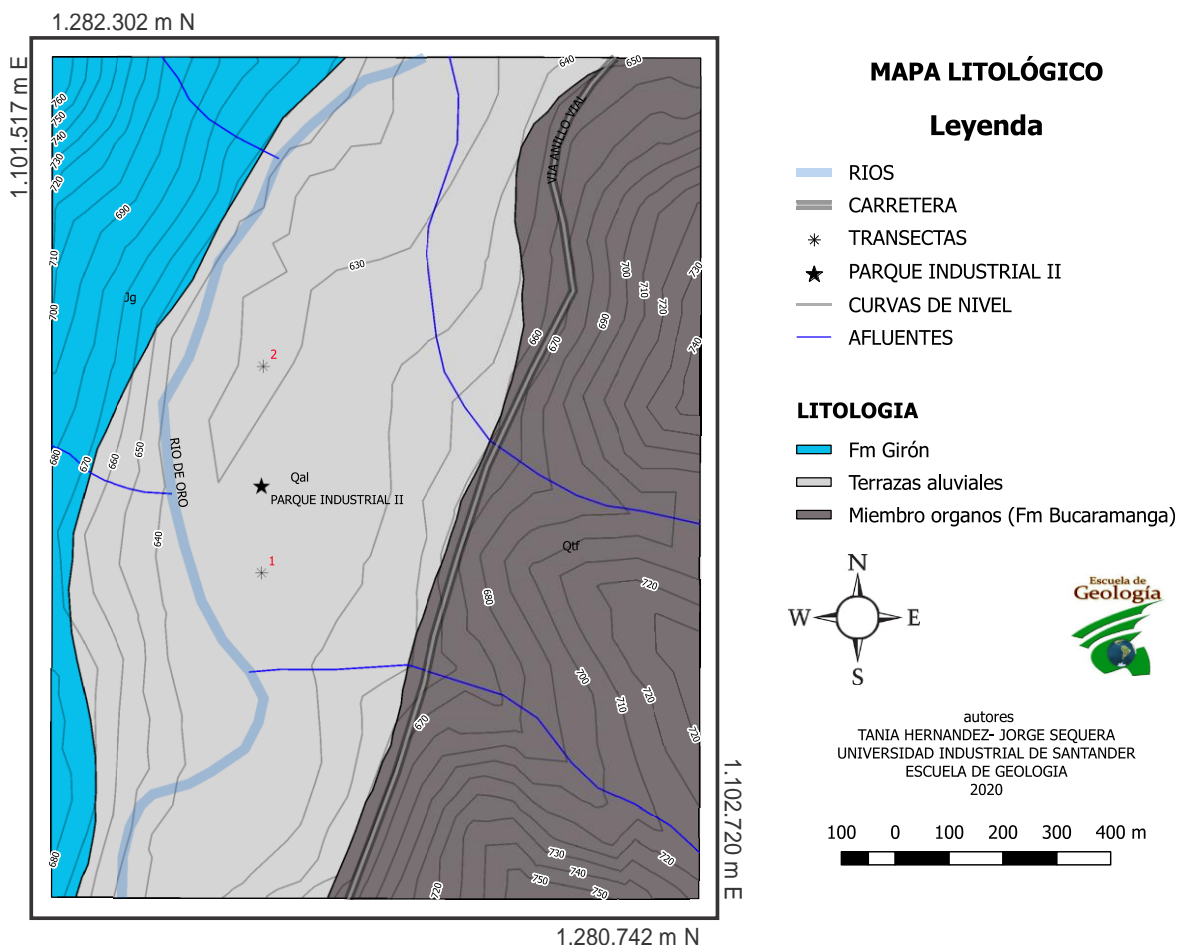
Por otro lado, se encuentran en las cercanías del Rio de Oro según la CDMB (2005), los depósitos recientes aluviales (cantos, guijos y gravas polimícticos en matriz arenosa fina y lodosa, los cantos son redondeados y de alta esfericidad), terrazas aluviales medias y bajas, en donde las primeras están constituidas por guijos y cantos redondeados de variada litología en matriz areno limoso gris clara. Las terrazas bajas corresponden a depósitos de cantos y guijos subredondeados

a redondeados de areniscas cuarzosas, duras y guijos ígneo-metamórficos embebidos en una matriz arenosa media a fina y lodosa.

Las terrazas aluviales medias son más frecuentes en las márgenes actuales del río de Oro, principalmente en la margen izquierda, en sectores de Carrizal y vía Palenque – Café Madrid. Mientras las terrazas bajas se encuentran localizados principalmente en las márgenes del Río de Oro, en dos niveles difíciles de diferenciar con alturas de 1 a 5 metros sobre el nivel actual del río. (CDMB 2005).

Figura 3.

Mapa litológico zona de investigación.



NOTA: la Información topográfica tomada de Google Earth e información litológica de la plancha 109 (SGC).

6.2 Geofísica

6.2.1 Tomografía eléctrica (TRE)

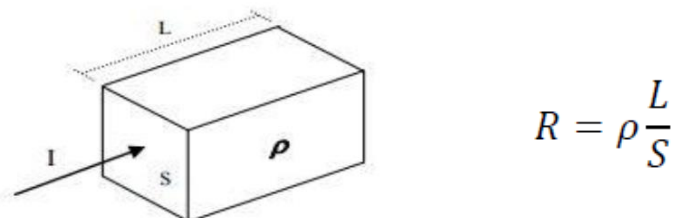
La geoelectrica es una rama de la geofísica, la cual utiliza principios fundamentales de la física con el fin de conocer el comportamiento de los componentes que conforman el planeta, en este caso la interacción de la corriente eléctrica con las rocas o sedimentos (Auge, 2008). Este tipo método geofísico “estudia a partir de mediciones efectuadas en la superficie del terreno, la distribución en profundidad de alguna magnitud electromagnética” (Orellana, 1972 en Parra, 2018). Basándose en la ley de Ohm, la cual establece que la diferencia de potencial (V) entre los extremos de un conductor determinado es proporcional a la intensidad de la corriente (I) que circula por medio, tomando la resistencia eléctrica como factor de proporcionalidad.

$$V = I * R$$

Así mismo, la resistividad es la propiedad física que ejerce oposición al paso de la corriente, atenuando o frenando el libre flujo de las cargas eléctricas o electrones y depende directamente del coeficiente de proporcionalidad ρ también llamado *Resistividad* del material, además de la longitud L y de la sección transversal del mismo S (Herrera y Avendaño, 2017), tal y como se muestra en la Figura 4.

Figura 4.

Resistencia del material.



Nota: Imagen tomada Prospección geofísica ambiental aplicada a la detección de plumas contaminantes debidas a la infiltración de lixiviados en un relleno sanitario, bajo la adaptación de sondeos eléctricos verticales de resistividad y polarización inducida, para obtener tomografías geoelectricas profundas y modelos 3D de Herrera y Avendaño (2017)

Diferentes estudios se han dedicado a conocer las variaciones de resistividad que poseen los distintos materiales a diversas condiciones generando una serie de valores típicos para ellos. Las anomalías de resistividad resultan cuando existen contrastes de estos valores, en rangos más altos o bajos de los valores patrón definidos.

El análisis de estas anomalías, acompañado de observaciones directas permitirá definir su origen. Debido a que los valores de resistividad de un material geológico se presentan en rangos amplios, tal como se muestra en tabla 4 y depende de la conductividad electrónica, debida al movimiento de electrones en la masa del geomaterial, o/y la conductividad electrolítica, debida al movimiento de iones en los fluidos que llenan los intersticios del geomaterial (Arias, 2012).

La conductividad electrolítica depende de la porosidad y de su saturación total o parcial por electrolitos, por lo que sus valores en geo-materiales son muy variables. Es por esta razón que diferentes grados de humedad y salinidad, para un mismo terreno, tendrían resistividades diferentes. (Anaya, 2012 en Herrera y Avendaño, 2017).

Tabla 4.

Valores de resistividades de diferentes materiales.

MATERIAL	RESISTIVIDAD (Ω m)
Basamento. Roca sana con diaclasas espaciadas	>10000
Basamento. Roca fracturada	1500-5000
Basamento. Roca fracturada saturada en agua corriente	100-2000
Basamento. Roca fracturada saturada en agua salada	1-100
Gruss no saturado	500-1000
Gruss saturado	40-60
Saprolito no saturado	200-500
Saprolito saturado	40-100
Gravas no saturadas	500-2000
Gravas saturadas	300-500
Arenas no saturadas	400-700
Arenas saturadas	100-200
Limos no saturados	100-200
Limos saturados	20-100

Limos saturados con agua salada	5-15
Arcillas no saturadas	20-40
Arcillas saturadas	5-20

NOTA: tabla de resistividad de diferentes materiales tomada de Relaciones geoelectricas en la exploracion geotecnica Arias (2012).

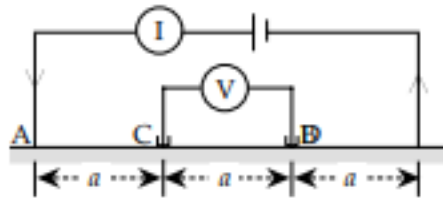
La técnica de tomografía de resistividad eléctrica (TRE) consiste en la medición de la diferencia de potencial en el subsuelo cuando se transmite una corriente eléctrica al subsuelo por medio de dos electrodos de corriente, con el fin de obtener datos de resistividad aparente (Omolayo, 2014; en Parra, 2018) con un dispositivo determinado (tomógrafo), una separación constante entre electrodos y variaciones de la distancia entre pares de electrodos emisor receptor. El resultado permite generar información de resistividades que cuyas variaciones pueden interpretarse como diferentes materiales del subsuelo (Calixto 2017).

Existen diversos tipos de arreglos para la adquisición de datos de resistividad y de los cuales Wenner, Schlumberger y doble dipolo son los más usados. Las diferencias que existen entre estos arreglos se deben a la distribución espacial de los electrodos de corriente y voltaje (figura 5), los cuales afectan el nivel de detalle de la tomografía ya sea en la resolución horizontal o vertical. Tal como se ha mencionado, los electrodos se sitúan a una distancia “a” y se hacen variaciones de esta distancia “n” veces, lo cual influenciara en la profundidad de penetración de la corriente eléctrica.

Figura 5.

Geometrías especiales para electrodos de corriente y potencial para arreglos: a) Wenner, b) Schlumberger y c) Doble dipolo.

(a) Wenner

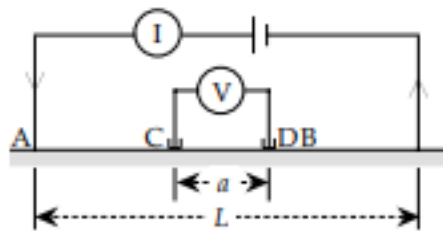


$$r_{AC} = a \quad r_{AD} = 2a$$

$$r_{CB} = 2a \quad r_{DB} = a$$

$$\rho_a = 2\pi \frac{V}{I} a$$

(b) Schlumberger

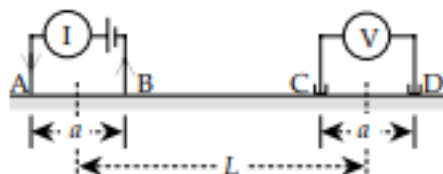


$$r_{AC} = (L - a)/2 \quad r_{AD} = r_{CB}$$

$$r_{CB} = (L + a)/2 \quad r_{DB} = r_{AC}$$

$$\rho_a = \frac{\pi}{4} \frac{V}{I} \frac{(L^2 - a^2)}{a}$$

(c) Double-dipole



$$r_{AC} = L \quad r_{AD} = L + a$$

$$r_{CB} = L - a \quad r_{DB} = L$$

$$\rho_a = \pi \frac{V}{I} \frac{L(L^2 - a^2)}{a^2}$$

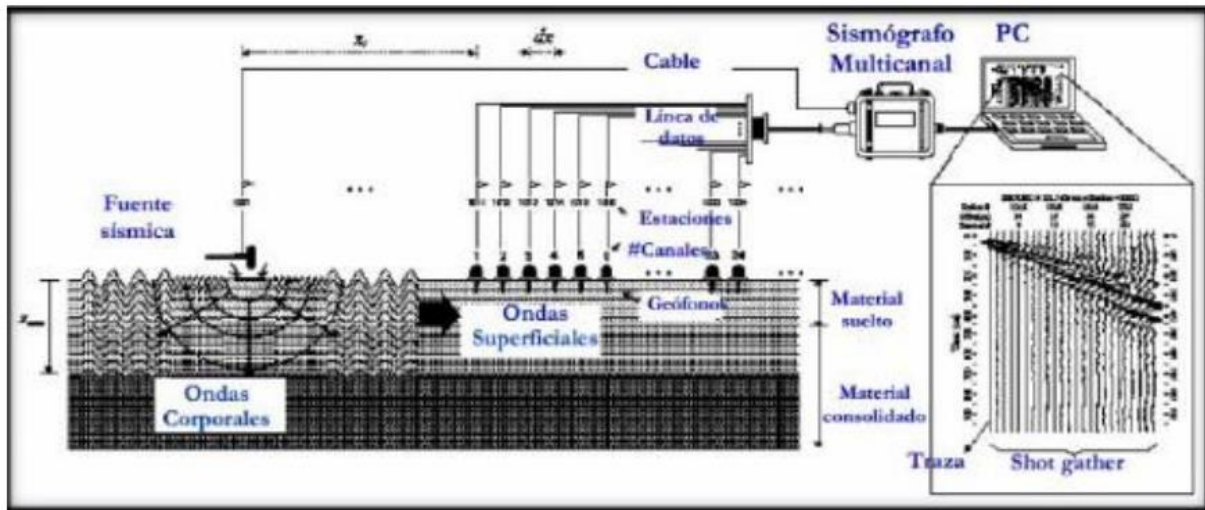
NOTA: Imagen tomada de Fundamentals of geophysics de Lowrie (2007).

6.2.2 Análisis multicanal de onda superficial (MASW)

La técnica de Análisis Multicanal de Ondas Superficiales (MASW) es un método que analiza las propiedades elásticas que definen la propagación de las ondas sísmicas superficiales (Vs), principalmente las Ondas de Rayleigh, las cuales se propagan horizontalmente en la interface subsuelo-superficie, desde la fuente emisora hasta los geófonos receptores.

Figura 6.

Esquema de arreglo de adquisición de MASW.



Nota: Imagen tomada de Efecto en la curva de dispersión a través del método MASW, al realizar variaciones en el peso de la fuente activa y el tipo placa de Rivas(2016).

Es un método de onda superficial en el que las vibraciones generadas en la superficie del suelo por varias fuentes, como un martillo y una placa, disparos, agitadores electromecánicos y/o excavadores, se propagan a través del suelo y se graban utilizando un arreglo determinado de geófonos (Park *et al.*, 1999). Los registros recopilados se analizan para obtener un perfil de velocidad de onda cortante del subsuelo definiendo sus propiedades y la distribución espacial de los materiales mediante la comparación de los valores obtenidos con los valores teóricos (Tabla 5). Posteriormente, la velocidad de la onda de corte se puede utilizar con éxito para estimar el módulo de corte, que se puede utilizar para diferentes tipos de análisis en la rama de la geotecnia principalmente. Durante las últimas décadas, MASW se ha utilizado como método complementario para investigaciones sísmicas convencionales debido a que es un método relativamente rápido, no destructivo y capaz de proporcionar un perfil continuo de parámetros elásticos, destacando las heterogeneidades geométricas dentro de los sustratos presentes en el suelo (Park *et al.*, 1999; Taipodia *et al.*, 2018).

Tabla 5.

Clasificación de materiales con velocidades de ondas de corte en los primeros 30 m.

TIPO DE SUELO	CLASIFICACIÓN	V s30 (m/s)
A	ROCA DURA	>1500
B	ROCA	760-1500
C	SUELO DENSO O ROCA SUAVE	360-760
D	SUELO DURO	180-760
E	SUELO SUAVE	<180
F	SUELO ESPECIALES	

NOTA: Imagen de (NERPH: National Earthquake Hazard Reduction Program) tomada de Una aproximación a la regionalización sísmica del estado de Nuevo León, basada en velocidades de propagación de ondas de corte y geología (Arrieta 2011).

Los resultados de una investigación utilizando el método de MASW dependen de la elección de los parámetros de adquisición de los datos, la frecuencia de muestreo y la longitud de la muestra, el espaciado entre receptores y la energía de impacto de la fuente activa, junto con los parámetros de preprocesamiento de datos, como el silenciamiento y el filtrado (Dziewonski *et al.*, 1969; Ivanov *et al.*, 2005; Morlet, 1983; Sauvin *et al.*, 2016; Taipodia *et al.*, 2018)

El filtrado de frecuencia ayuda a reducir el ruido en la señal, asegurando una alta relación señal / ruido (SNR) en la imagen de dispersión. El silenciamiento ayuda a eliminar las alteraciones de las marcas de tiempo de las señales recolectadas, lo que a su vez reduce el ruido asociado con modos más altos o frecuencias más altas. Una elección adecuada de los parámetros de preprocesamiento y adquisición de datos de MASW, aumentan la precisión de los resultados (Taipodia *et al.*, 2018).

7. Metodología

El desarrollo de este proyecto consiste en las siguientes etapas consecutivas:

Figura 7.

Esquema metodológico del proyecto de investigación.



7.1 Consulta bibliográfica

En una etapa inicial es pertinente adquirir toda la información para plantear el tema de investigación (Detección de contaminación en acuíferos mediante métodos geofísicos). Así mismo, se recopilan precedentes de estudios nacionales y/o internacionales realizados con éxito y en donde la aplicación de la geofísica ha sido viable en problemáticas semejantes al tema de investigación seleccionado.

A partir de la literatura encontrada se procede a generar el planteamiento del problema (Existencia de anomalías en los acuíferos del área de investigación) y proponer las respectivas hipótesis teniendo en cuenta la delimitación de la zona de estudio (Parque Industrial 2 del Anillo Vial), el marco geológico y los métodos geofísicos (Tomografía eléctrica y MASW) con los que se tomarán los datos.

Finalmente se organiza la información de mayor utilidad para el desarrollo del proyecto, con el fin de generar la siguiente fase metodológica (pre-campo) con las herramientas necesarias que garanticen la eficiencia del tiempo y la planeación adecuada, anticipando los posibles problemas o desafíos que se presenten.

7.2 Pre- campo

En esta etapa se empieza a adquirir un control en las actividades a realizar. Es importante como primera instancia determinar los lugares relativamente planos, por medio de herramientas topográficas y satelitales (DEM), en los que se adquirirán los perfiles geofísicos con el fin de obtener datos de buena calidad que permitan registrar las posibles anomalías de resistividad y características del acuífero. Así mismo, se busca que el terreno plano sea de una longitud considerablemente mayor al doble de profundidad a la que se desea llegar.

Por otro lado, el proyecto busca la unificación de los dos métodos geofísicos (TRE y MASW) con el fin de que los pseudo perfiles adquiridos por ambos métodos se complementen mutuamente, para así generar un modelo con el más bajo nivel de incertidumbre posible, por tal motivo, la ubicación y la longitud de las transectas deben ser útiles para los dos métodos con el fin de disminuir el error provocado por factores que alteren las mediciones.

Por consiguiente, se definen cuatro transectas que deben realizarse con cada uno de los métodos geofísicos escogidos, ubicadas dos aguas arriba y dos aguas abajo del Parque Industrial II (Figura 3), con el fin de conocer la variación en las mediciones; la orientación entre el par de transectas será cruzada con lo cual se tendrá una imagen con tres dimensiones espaciales de la distribución del acuífero y sus propiedades eléctricas en la zona estudiada.

Con base a la literatura colectada en la fase anterior se procede a escoger el mejor arreglo geofísico en la tomografía de resistividad eléctrica para la toma de datos de resistividades, definiendo la configuración DIPOLO-DIPOLO, como el diseño que provee un buen equilibrio entre profundidad de investigación y resolución de las variaciones laterales (Bhattacharya y Sen, 1981) adecuado para reconstrucción de estructuras verticales dentro del suelo. (Peloso, 2013).

Además se definen parámetros fundamentales en la adquisición de estos datos como espaciamiento entre electrodos, los cuales serán distribuidos a lo largo de la transecta y definirán la resolución que tendrán los datos para la generación del pseudo perfil de resistividades. También se realiza inventario del equipo de Tomógrafo Flash Res 64, el cual cuenta con 64 electrodos, cables de 5 metros de espaciamiento entre electrodos, batería y demás accesorios necesario para la adquisición de datos, esto con el fin de garantizar las herramientas con las que se van a trabajar.

Para el método de MASW, se da uso del equipo Sismógrafo ABEM Terraloc Pro 2 con 48 canales, geófonos de 4.5 Hz y cables con máximo espaciamiento entre canales de 12.5m, definiendo datos de entrada como espaciamiento de geófonos ($>5m$), distancia entre la fuente y el primer geófono (offset) adecuados y duración de grabación suficiente para adquirir todo el tren de olas (Peloso, 2013), los cual definirán la calidad de resolución de la pseudo sección.

De igual forma, en esta fase se realizarán cálculos de los valores de resistividad y velocidades de cizalla esperados a partir de la configuración de modelos directos e independientes materiales que se esperarían encontrar en la zona y su distribución espacial en el subsuelo con datos teóricos de resistividad eléctrica para TRE (Parra, 2018) y Velocidades de cizalla para MASW.

Como fase de pre-campo, es necesario realizar una prueba de los equipos en el terreno con el fin de verificar el correcto funcionamiento de los mismos y finalmente, una primera ida a campo sirve para el reconocimiento del área, la verificación de las condiciones del terreno, solicitud del respectivo permiso a las empresas para el trabajo de campo y la socialización con la comunidad cercana a la zona de estudio sobre del trabajo a desarrollar.

7.3 Campo

En esta etapa se dirige el equipo de trabajo con todas las herramientas necesarias hacia la zona de estudio para realizar la adquisición de datos en las transectas previamente seleccionadas para

TRE y MASW. Cabe aclarar que se aplica un método a la vez, por lo que el día contara con dos jornadas en la misma transecta (jornada de la mañana TRE, jornada de tarde MASW), esto con el fin de garantizar que ambos métodos tendrán similares condiciones de adquisición.

Para el método de tomografía de resistividad eléctrica se ubica el punto de partida en el terreno mediante el GPS, se señala el rumbo de la transecta (datos necesarios para repetir la misma trayectoria con el otro método), se dispone de un cinta métrica, con la que se mide la longitud total de la transecta y el espaciamiento de los electrodos de acuerdo al arreglo que se ha definido en la fase anterior. Finalmente, cuando se verifica la adecuada disposición de los elementos involucrados se da inicio a la adquisición de los datos de resistividad en el subsuelo.

En cuanto al MASW se repite la transecta como se ha mencionado con anterioridad, realizando el arreglo con los parámetros determinados en pre campo en la superficie de área de estudio para registrar los desplazamientos de las partículas del suelo inducidas por las ondas Rayleigh que se propagan, y las velocidades de fase correspondientes a las frecuencias de las ondas de propagación se delinear para desarrollar su interrelación, comúnmente conocida como la curva de dispersión, generando su respectiva imagen (Park et al., 1998, 2001, 2004; Xia et al., 2009). Adicionalmente se registra tanto vibración ambiental (microtremores) como vibración superficial inducida (impactos, vehículos en circulación, etc.) con frecuencias de onda generalmente superiores a 4.5 Hz (Serna, 2015).

Este proceso se realiza por cuatro días en los que se adquieren los datos de las transectas definidas, teniendo en cuenta que al final de las jornadas se realizan dos tareas obligatorias: 1) verificar que el equipo ha guardado de forma correcta la información y 2) extraer del equipo la información recolectada en el día, evitando su pérdida.

7.4 Análisis de datos

En esta etapa se dispone a analizar los datos e interpretar los resultados obtenidos de TRE y MASW en sus respectivos perfiles y/o pseudosecciones 2D según las metodologías consultados en distintos trabajos.

Para el método TRE, el procesamiento de datos se hace mediante el software *ZZresinvV46.exe*, en el cual se realiza un chequeo de datos y su posterior inversión para generar el archivo que será visualizado en el programa *Surfer*, en donde se le asignan los colores a las diferentes categorías (resistividades) para una mejor interpretación visual del pseudo perfil en 2D de la transecta (Parra, 2018). Posteriormente, la imagen es comparada con los modelos teóricos que se realizaron para determinar en qué zonas del perfil se encuentran anomalías de resistividad, las cuales podrían considerarse como evidencia de presencia de contaminantes en el acuífero, ya que una alta concentración de iones disueltas en agua produce una resistencia baja al paso de la corriente eléctrica (Lenntech).

En MASW, el procesamiento de los datos adquiridos se realiza mediante el software *Reflex.exe*, comenzando con una estimación inicial del modelo de velocidad de onda cortante, suponiendo una curva de dispersión generada teóricamente, y que luego se optimiza hacia los datos experimentales a través de un enfoque iterativo adaptativo; durante las iteraciones, el modelo de velocidad de corte se actualiza continuamente, y el modelo finalmente obtenido se considera el modelo de velocidad de corte definitivo (Ganji et al., 1998; Nazarian et al., 1983; Xia et al., 1999). Por tanto, es notorio que la precisión del modelo de velocidad de onda cortante, obtenida del análisis de inversión, dependa en gran medida de la calidad de la curva de dispersión extraída, regida por la misma resolución de la imagen de dispersión.

El fin de esta fase se da cuando se presentan los ocho perfiles del subsuelo (cuatro de TRE y cuatro de MASW) y se da inicio a la interpretación por parte del personal geofísico, para identificar las características del acuífero, analizar las anomalías y generar el modelo de la zona integrando los datos geofísicos y geológicos dando el veredicto final a la hipótesis planteada.

7.5 Elaboración del trabajo final

Finalmente, la información y los resultados obtenidos a lo largo del desarrollo de las cuatro etapas anteriores son recopilados y estructurados en un informe técnico, incluyendo las conclusiones logradas durante la ejecución de este trabajo de investigación que dan respuesta al planteamiento del problema.

Es indispensable en esta etapa tener presente un marco normativo referente a la contaminación. Además, de presentar los anexos respectivos como aportes a la geología, para que dichos datos sean utilizados a futuro y las entidades correspondientes puedan generar planes de mitigación y remediación.

8. Resultados o productos esperados

Al culminar el presente proyecto de investigación se esperan tener perfiles bidimensionales de anomalías de resistividad a partir de la tomografía eléctrica y perfiles de MASW para la distribución litológica subsuperficial mediante variaciones de las velocidades de ondas S. La finalidad de estos resultados es poder interpretar y generar un modelo geológico del subsuelo, integrando la geofísica con información geológica existente y así encontrar o descartar la contaminación de los acuíferos del área de investigación.

9. Cronograma de actividades

La siguiente tabla muestra las actividades a desarrollar en el proyecto con duración de tres meses. Es importante recalcar que la etapa de consulta bibliográfica y parte de pre-campo (delimitación de la zona, elección del arreglo geofísico y localización de las transectas) ya ha sido realizada por los autores del presente trabajo de grado.

Tabla 6.

Cronograma de actividades propuestas.

ACTIVIDADES	SEMANAS											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
CONSULTA BIBLIOGRÁFICA												
<i>Recopilación de información</i>	■											
<i>Organización y clasificación</i>	■	■										
<i>Selección del tema</i>		■										
<i>Pregunta de investigación</i>		■										
<i>Hipótesis</i>		■										
PRE-CAMPO												
<i>Delimitación de la zona de estudio</i>			■	■								
<i>Elección del arreglo geofísico</i>			■	■								
<i>Localización de transectas</i>			■	■								
<i>Prueba del equipo (TRE y MASW)</i>				■	■							
<i>Reconocimiento del área de estudio</i>				■	■							
<i>Socialización del proyecto con la comunidad</i>				■	■							
CAMPO												
<i>Caracterización geológica</i>							■					
<i>Toma de datos TRE</i>							■					
<i>Toma de datos MASW</i>								■				
ANÁLISIS DE DATOS												
<i>Interpretación datos TRE</i>									■			
<i>Interpretación datos MASW</i>									■			
<i>Procesamiento de datos</i>										■	■	
<i>Detección de anomalías</i>											■	■
<i>Resultados</i>											■	■
ELABORACIÓN DEL INFORME												
<i>Redacción y digitalización</i>										■	■	■

10. Presupuesto

La siguiente tabla corresponde al presupuesto del proyecto de investigación con duración de tres meses.

Tabla 7.

Presupuesto para ejecución total del proyecto.

RECURSO	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	VALOR (cop)			TOTAL
			Horas	Días	Unidad	
Humano						
<i>Geólogo</i>	Conocimiento en geofísica y habilidades con las TIC y SIG	2			\$5.000.000	\$10.000.000
<i>Jornaleros</i>	Capacidad de transportar los equipos	3		4	\$45.000	\$540.000
Material						
<i>Tomógrafo</i>	Equipo utilizado para adquisición de datos TRE	1		5*	\$480.000	\$2.400.000
<i>Sismógrafo</i>	Equipo utilizado para adquisición de datos MASW	1		5*	\$400.000	\$2.000.000
<i>Vehículo</i>	Transporte para mover los equipos respectivos	2		5**	\$40.000	\$480.000
Digital						
<i>Bibliografía</i>	Material de consulta de información		\$4500		\$4.000	\$2.000.000
<i>Software ZZresinvV46</i>	Procesamiento de datos para TRE	1				***
<i>Software Reflex</i>	Procesamiento de datos para MASW	1				***
Total del proyecto:						\$17.420.000

NOTA:

* Son cuatro días de campo y un día de prueba de equipo.

** Son cuatro días de campo donde se necesitan ambos vehículos, para los otros dos días basta uno solo, puesto que corresponden a los días de reconocimiento de la zona y a la socialización del proyecto con la comunidad.

*** El valor de los respectivos softwares para el procesamiento de datos TRE y MASW va incluido en el valor del equipo.

Referencias citadas

- Arias Daniel (2012). Relaciones geoelectricas en la exploracion geotecnica. Boletín de ciencias de la tierra. Vol. 31, 39-50. Universidad Nacional, Medellín*
- Arrieta (2011) Una aproximación a la regionalización sísmica del estado de Nuevo León, basada en velocidades de propagación de ondas de corte y geología. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana Vol. 63, n 2*
- Auge, M. (2008). Métodos Geoeléctricos para la Prospección de agua Subterránea. Universidad de Buenos Aires.*
- Calixto N. Leidy J. (2017). Métodos geofísicos para la búsqueda de aguas subterráneas y rediseño de un pozo de extracción para la empresa transavella, en la ciudad de Sogamoso, Boyacá. Trabajo de grado, Universidad pedagógica y tecnológica de Colombia, Sogamoso.*
- Careaga (2016) Efecto de los errores en el posicionamiento de los geófonos en ensayos MASW. Proyecto de Título presentado en conformidad a los requisitos para obtener el Título de Ingeniero Civil. Universidad del Bío-bío, Chile.*
- Castro Alejandrina, D. A.-B. (2013). Caracterización geoquímica y geoeléctrica de un sitio contaminado por hidrocarburos en el estado de Puebla, México. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, Vol 65, p 405-418*
- CDMB (2005). Documento de Diagnóstico Amenazas de Inundación y Erosión en el Río de Oro. Vol. 1: geología y geotecnia*
- CDMB (2010). Plan general para el control de la erosión 2010-2035.*

Contreras M. Juan C.; Osma D. Alvaro S.(2018). Caracterización del Segmento Órganos Inferior en el Miembro Órganos (Formación Bucaramanga) en el Norte De Bucaramanga. Trabajo de grado, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga.

Cuevas (2013). Aplicación del método MASW para estudios sobre microzonificación sísmica en la ciudad de Lorca-España. Jornadas de introducción a la investigación de la UPCT, N° 6, 2013, págs. 43-45

Cuidemos el planeta (2018). "Contaminantes". (Consulta: 25 de agosto del 2020) Disponible en: <https://cuidemoselplaneta.org/contaminacion-ambienta/>

Empresa de desarrollo urbano (EDU) (2017) Informe geología y geomorfología sector norte de Bucaramanga para la Alcaldía de Bucaramanga en la Elaboración de estudios básicos urbanos, arquitectónicos y paisajísticos y acompañamiento social de algunos proyectos estratégicos en el municipio de Bucaramanga

Fetter, W. C. (1988) Applied hydrogeology. Longman Higher Education.

Foster, S., Hirata, R., Gomes, D., D'elia, M., & Paris, M. (2002). Groundwater Quality Protection: a Guide for Water Service Companies, Municipal Authorities and Environmental Agencies (130 pp.). Washington, DC: The World Bank.

Friedman, S.P., 2005. Soil properties influencing apparent electrical conductivity. Comput. Electron. Agric. 46, 45e70

Gelvez, Y. (2019) Causas y consecuencias de la contaminación de fuentes hídricas. (Consulta: 25 de agosto del 2020) Disponible en: <https://unabradio.com/causas-y-consecuencias-de-la-contaminacion-de-fuentes-hidricas/>

Hirata, R. (2002). Carga contaminante y peligros a las aguas subterráneas. Revista Latino-Americana de Hidrogeología, 3, 81-90.

Huarca N(2018) “Aplicación de tomografía geoelectrica, refracción sísmica y masw en investigaciones geotécnicas en la localidad de patashuaylla – urubamba”. Universidad nacional de San Agustín de Arequipa

Lima, M., & Medina, J. (2015). *Evolución climática registrada y estratigráfica del miembro órganos de la formación Bucaramanga (Tesis para optar al título de Geólogo. Escuela de Geología,UIS, Bucaramanga).*

Lowrie, W. (2007). *Fundamentals of geophysics. New York: Cambridge university press*

Manilla, A. (2003) *Geofísica aplicada en los proyectos básicos de ingeniería civil. Publicación técnica No 229.*

Herrera. Engie D. & Avendaño H Fabio D(2017). *Prospección geofísica ambiental aplicada a la detección de plumas contaminantes debidas a la infiltración de lixiviados en un relleno sanitario, bajo la adaptación de sondeos eléctricos verticales de resistividad y polarización inducida, para obtener tomografías geoelectricas profundas y modelos 3D. Trabajo de grado, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogota*

Navarro(2018) *Aplicación del método masw para la caracterización sísmica del suelo en zona urbana.trabajo para la obtención de titulo. Universidad Politécnica de Cartagena*

Olawale Olakunle Osinowo, Michael Oluseyi Falufosi, Eniola Oluwatosin Omiyale (2017) *Integrated electromagnetic (EM) and Electrical Resistivity Tomography (ERT) geophysical studies of environmental impact of Awotan dumpsite in Ibadan, southwestern Nigeria. Department of Geology, University of Ibadan, Ibadan, Nigeria. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2017.12.026>*

- Paneque, A., Gallo, M., Nuñez, E. (2016). Contaminación ambiental, su influencia en el ser humano, en especial: el sistema reproductor femenino. Revista Universidad y Sociedad. Versión On-line ISSN 2218-3620*
- Parra S. Sergio A.(2018) Uso de tomografía de resistividad eléctrica para la determinación de las direcciones de flujo de la pluma de contaminantes generada en el vertedero “el Carrasco”. Trabajo de grado. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga.*
- Pellicer E (2015) Caracterización mediante tomografía eléctrica del deslizamiento de toleo (Oviedo). Trabajo para obtención de título de magister. Universidad de Oviedo*
- Peloso E (2013) Caratterizzazione geofisica di un sistema arginale e applicazioni geotecniche. Trabajo para obtención de título magister. Università degli studi di padova*
- Plata (2015) Estudio sedimentológico del miembro órganos en la formación Bucaramanga, hacia el escarpe occidental en las estribaciones del municipio de girón. Trabajo de Grado para Optar al título de Geólogo. Universidad Industrial de Santander*
- Ramos N. Juan S; Ramos Q. Juan F. (2017). Identificación de Puntos de extracción de Agua Subterránea en la Media Guajira a partir de Parámetros Geo eléctricos. Trabajo de grado. Universidad de la Salle, Bogotá.*
- Reynolds, J. M. (1997). An Introduction to Applied and Environmental Geophysics. Chichester: John Wiley and Sons Ltd. 796p.*
- Rivas (2016) Efecto en la curva de dispersión a través del método MASW, al realizar variaciones en el peso de la fuente activa y el tipo placa. Proyecto de grado para título de ingeniero civil, Universidad del bio-bio, chile.*
- Schmidt (2011) Clasificación de suelos basada en el cálculo de razones espectrales en sitios donde se ubican estaciones acelerográficas de américa central. Casos de el salvador, Nicaragua y costa rica*

Serna A (2015) Evaluación de la resolución del método de análisis de dispersión de ondas superficiales MASW (multichannel analysis of surface waves) en suelos residuales. Tesis de investigación. Universidad nacional de Colombia.

Sherriff, R. E. (1989). Geophysical methods. Englewood cliff: Prentice hall

Suárez Jorge, H. Z. (2013). Detección de capas de desechos con métodos geoeléctricos: caso relleno sanitario río azul, costa rica. Revista Geológica de América Central, 129-139

Suarez (2017) Optimización de parámetros para la adquisición de datos medidos in situ por medio del método de análisis multicanal de ondas superficiales (masw). Trabajo para obtención de título. Universidad Técnica Federico Santa María

Zume, J. T., Tarhule, A., & Christenson, S. (2006). Subsurface Imaging of an Abandoned Solid Waste Landfill Site in Norman, Oklahoma. Groundwater Monitoring and Remediation, 26, 62-69. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1745-6592.2006.00066.x>