

FLUJO DE PLUMA DE LIXIVIADOS EN EL MIEMBRO ÓRGANOS

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”

Sergio Andrés Parra Saavedra

Trabajo de Grado para Optar el título de Geólogo

Director

Roció del Pilar Bernal Olaya

PhD. Geología

Codirector

Juan Diego Colegial Gutiérrez

PhD. Geología

José David Sanabria Gómez

PhD. Física

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas

Escuela de Geología

Bucaramanga

2019

Dedicatoria

Dedico el esfuerzo y pasión plasmados en este proyecto a mi madre Ana María Saavedra Jurado y a mi Padre Juan Manuel Parra Covaria, ya que de ellos aprendí la dedicación y disciplina para cumplir mis metas con la mejor disposición, también a mi hermano que me acompañó en mi proceso universitario.

Agradecimientos

Mi mas sincero agradecimiento a la profesora ROCIO DEL PILAR BERNAL OLAYA, quien me guio y acompañó en cada proceso de este proyecto de investigación.

A mis codirectores JOSE DAVID SANABRIA y JUAN DIEGO COLEGIAL, ya que fueron de gran ayuda para la realización del proyecto.

Al Semillero de Geofísica de la Universidad Industrial de Santander el cual brido apoyo logístico para la realización de este proyecto.

Al señor Hermógenes Abril por permitirnos realizar el trabajo de campo en sus predios ubicados en el municipio de Girón.

Al programa de Maestría en Geofísica de la Escuela de Física de la Universidad Industrial de Santander, por prestarnos el equipo necesario para la realización de este proyecto.

Al señor Rafael Sánchez por su colaboración en las campanas de campo.

Al cuerpo docente de la escuela de Geología por compartir su conocimiento a través de mi proceso de formación.

Y finalmente a mi Familia y a Daniela Marín por el apoyo emocional que me brindaron a través de este proceso de aprendizaje, que hizo posible la realización de este proyecto.

Tabla de contenido

Introducción	13
1. Objetivos	18
1.1. Objetivo General	18
1.2. Objetivos Específicos	18
2. Generalidades	19
2.1. Localización	19
2.2. Antecedentes	20
2.3. Marco geológico e hidrogeológico	22
2.3.1. Estratigrafía.	23
2.3.2. Hidrogeología.....	26
2.4. Tomografía de resistividad eléctrica (ERT)	28
3. Metodología.....	29
3.1. Consulta bibliográfica.	29
3.2. Precampo	30
3.2.1. Análisis del área de estudio	30
3.2.2. Cálculos preliminares.	30
3.3. Planeación de las campañas de campo	33
3.4. Trabajo de campo	33
3.5. Trabajo de oficina.....	35
3.5.1. Procesamiento de datos.	35
3.5.2. Interpretación de datos.	38
3.5.3. Elaboración del informe final.....	38
4. Resultados y discusión	38
4.1. Tomografías de resistividad eléctrica 2D	38
4.1.1. ERT-1 Rincón de Girón.	39
4.1.2. ERT-2 Vía Porvenir – Anillo Vial	41
4.1.3. ERT-3 Frigorífico Río Frio	43
4.2. Dirección de Flujo de la pluma contaminante.....	45
5. Conclusiones	48
6. Recomendaciones	49
Referencias bibliográficas	50

Lista de Tablas

Tabla 1. Litofacies en ríos trenzados y descripción.....	25
Tabla 2. Características litológicas, eléctricas y permeabilidades de las facies descritas en el miembro órganos de la formación Bucaramanga.....	27
Tabla 3. Valores típicos de resistividad eléctrica para diferentes litologías.....	28

Lista de Figuras

Figura 1. Localización de la zona de estudio	19
Figura 2. Distribución espacial de la pluma de lixiviados en el vertedero de residuos de Ampong Jawa, Banda Aceh, Indonesia.....	21
Figura 3. Mapa geológico de la zona de estudio.....	22
Figura 4. Columna estratigráfica generalizada de la formación Bucaramanga y columnas estratigráficas en zonas aledañas a las transectas ERT.....	24
Figura 5. Corte esquemático de las facies características en depósitos de ríos trenzados	26
Figura 6. Metodología del proyecto de investigación.....	29
Figura 7. Modelo real de resistividad y resultado predicho de inversión de una sección donde no hay contaminación.....	31
Figura 8. Modelos de resistividad real y resultado predicho de la inversión para dos secciones contaminadas	32
Figura 9. a) Equipo <i>FlashRES-UNIVERSAL64/96</i> utilizado para la adquisición de datos de ERT. b) esquema de conexión del equipo con el cable que conecta los electrodos.....	34
Figura 10. Captura de pantalla, selección de los parámetros de adquisición del software <i>FlashRES-Universal: Resistivity/IP meter</i>	34
Figura 11. Metodología usada para la inversión de los datos.....	36
Figura 12. Tomografía de resistividad eléctrica 2D ERT-1, con la delimitación de las diferentes zonas geoelectricas.....	40
Figura 13. sección interpretada con las litologías asignadas a las diferentes zonas geoelectricas de la ERT-1.....	40

FLUJO DE PLUMA DE LIXIVIADOS EN EL MIEMBRO ÓRGANOS

Figura 14. Tomografía de resistividad eléctrica 2D ERT-2, con la delimitación de las diferentes zonas geoelectricas.....	42
Figura 15. sección interpretada con las litologías asignadas a las diferentes zonas geoelectricas de la ERT-2.....	42
Figura 16. Tomografía de resistividad eléctrica 2D ERT-3, con la delimitación de las diferentes zonas geoelectricas.....	44
Figura 17. sección interpretada con las litologías asignadas a las diferentes zonas geoelectricas de la ERT-3.....	44
Figura 18. Imagen satelital del Rio Congo, rio trezado de la actualidad.....	46
Figura 19. Mapa geológico del área de estudio en donde se sugiere la posible dirección de flujo de la pluma de lixivados de forma radial a partir del vertedero de residuos sólidos “el Carrasco” ...	47

Lista de apéndices

Los apéndices están adjuntos en el CD y puede visualizarlos en base de datos de la biblioteca UIS

1. Anotaciones de campo

RESUMEN

TITULO: 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” *

AUTOR: SERGIO ANDRES PARRA SAAVEDRA **

Palabras clave: Lixiviados, Tomografía de resistividad eléctrica (ERT), Resistividad eléctrica, Vertedero de residuos sólidos, Elementos deposicionales.

El vertedero de residuos sólidos del área metropolitana de Bucaramanga “El Carrasco”, ha estado en funcionamiento por 40 años, en los que no se han tratado adecuadamente los lixiviados generados por las basuras que se depositan en este. El vertedero se ubica estratigráficamente sobre el miembro Órganos de la formación Bucaramanga, donde predomina las facies de gravas, la cual tiene alta permeabilidad hidráulica, $5.37 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ (Klingbeil et al., 1999). Esto ha facilitado la infiltración de los lixiviados generados en el vertedero en el acuífero profundo de Bucaramanga generando una pluma contaminante. En esta investigación se realizaron tres tomografías de resistividad eléctrica (ERT), con el fin de sugerir la dirección de flujo de la pluma contaminante generada en el vertedero “El Carrasco”. A partir de la observación y modelamiento directo de tomografías de resistividad eléctrica se identificaron anomalías de baja resistividad (0-10 Ohm-m) las cuales pueden corresponder a fluidos contaminados con lixiviados, según el gradiente piezométrico, estudios previos de los elementos deposicionales en el miembro Órganos que faciliten el flujo de la pluma contaminante, y principalmente comparaciones hechas con modelos directos de resistividad. Se determinó que el flujo de la pluma contaminante posiblemente es de forma radial, ya que, aunque la pluma de lixiviados seguiría la dirección natural de flujo del acuífero profundo de Bucaramanga (E-W), la presencia de los cuerpos de grava predominantes en el miembro Órganos correspondientes con barras longitudinales y rellenos de canal en un depósito de río trenzado, facilitan el flujo de la pluma en el sentido SE-NW (Franco y Ramírez, 2017), dirección de flujo del río que genero los depósitos originalmente.

*Trabajo de Grado

**Facultad de Ingenierías Físicoquímicas, Escuela de Geología UIS. Director: Rocio Del Pilar Bernal Olaya, PhD. Geología.

ABSTRACT

TITLE: FLOW DIRECTION DETERMINATION OF THE CONTAMINATION PLUME IN “EL CARRASCO” DUMP YARD USING ELECTRICAL RESISTIVITY TOMOGRAPHY*

AUTHOR: SERGIO ANDRES PARRA SAAVEDRA**

Key Words: Leaching fluids, Electrical Resistivity Tomography (ERT), Electrical Resistivity, Solid waste dump yard, Depositional elements.

“El Carrasco” a solid waste dump yard located in the metropolitan area of Bucaramanga, has been operating for over 40 years in which the leaching elements generated by the solid waste haven’t been properly taken care of. The dump yard is stratigraphically located on top of the Organos member of Bucaramanga formation, where gravel facies prevail, it has a high hydraulic permeability of $5.37 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ (Klingbeil et al., 1999). This particularity caused the solid waste leaching fluids to percolate into the Deep aquifer of Bucaramanga generating a contamination plume. In this investigation three electrical resistivity tomographies (ERT) have been made in order suggest this contamination plume flow direction generated at “El Carrasco” dump yard. Parting from observation and forward modeling of the electrical resistivity tomographies made low resistivity anomalies (0-10 Ohm-m) have been identified which can correspond to those contaminating leaching fluids, according to the hydraulic head, previous studies of the depositional elements of the Organos member ease the flow of the contamination plume. Comparisons made with resistivity forward modelling have been used to determine the possible radial flow of this contamination plume, even if the natural direction flow of the Deep aquifer of Bucaramanga is E-W, the presence of gravel material in the Organos member in longitudinal bars and channel fillings in a braided-type river ease the contamination plume flow in the SE-NW direction (Franco y Ramírez, 2017), which was the original river direction generating those deposits.

* Bachelor thesis

** Faculty of Physico-Chemical Engineering. Geology Department. Director: Rocio del Pilar Bernal Olaya, PhD geologist.

Introducción

Según la Sociedad Americana de Ingenieros Civiles (ASCE), los rellenos sanitarios son una “técnica para la disposición de la basura en el suelo sin causar perjuicio al medio ambiente y sin causar molestia o peligro para la salud y seguridad pública” (Meléndez, 2004 en Noguera y Olivero, 2010), en donde se generan dos subproductos, a partir de la descomposición de los residuos; los líquidos percolados, denominados lixiviados y el biogas, generado a partir de la descomposición anaerobia de los residuos (Noguera y Olivero, 2010).

Uno de los problemas más importantes en el manejo de los rellenos sanitarios es, la recolección y tratamiento de los lixiviados, ya que, por su alto contenido de materia orgánica, nitrógeno, fósforo, agentes patógenos e igualmente de sustancias toxicas como metales pesados, es considerado uno de los líquidos más contaminantes que se conozca (Giraldo, 2001).

Para estudiar la posible infiltración de lixiviados en el subsuelo, se usan principalmente métodos geofísicos ya que estos permiten medir las propiedades físicas de las rocas, consiguiendo determinar la distribución espacial de plumas contaminantes en el subsuelo. También, determinar las rutas y dirección de flujo de estas, sin necesidad de realizar algún tipo de perforación la cual podría generar nuevas rutas para que los lixiviados alcancen zonas donde naturalmente no llegarían.

Esta investigación tiene como objetivo, sugerir la dirección preferencial de flujo de la pluma de lixiviados generados en el vertedero “El Carrasco” y definir valores de resistividad representativos de los 100 m más someros del miembro Órganos de la formación Bucaramanga, a partir de la medición de resistividad eléctrica en el subsuelo a lo largo de tres transectas. En esta investigación tomaremos ventaja del contraste de composición química de la pluma de lixiviados, que según Niño (2016) presenta las siguientes concentraciones de metales pesados originados en el vertedero

FLUJO DE PLUMA DE LIXIVIADOS EN EL MIEMBRO ÓRGANOS

“El Carrasco”: Cromo: <0.1 mg/L, Cadmio: <0.05 mg/L, Arsénico: $0.5 - 4.2$ mg/L; y la composición del agua de formación del miembro Órganos que como todo acuífero de agua fresca tendrá fluidos sin el enriquecimiento en minerales pesados y materia orgánica. Este contraste químico genera variación en las propiedades físicas que mediremos con el uso de herramientas geofísicas.

Planteamiento del problema

El vertedero de residuos sólidos de Bucaramanga “El Carrasco” ha estado activo desde 1978, hasta hoy, sin embargo, sólo desde el año 1993 tiene un plan para el manejo y tratamiento adecuado de lixiviados. Actualmente, se estima que en El Carrasco se depositan 800 toneladas diarias de residuos sólidos provenientes del área metropolitana de Bucaramanga y 13 municipios de Santander (Environmental Justice Atlas, 2014), los cuales generan una gran cantidad de lixiviados. A pesar de que la empresa encargada del vertedero tiene un sistema de tratamiento para estos, las tuberías presentan fisuras y rompimientos, generando derrames de lixiviados en el subsuelo. Además, la deficiente compactación diaria de las celdas de disposición de basuras genera un importante volumen de lixiviados (Contreras, 2012), que se infiltra en el subsuelo, creando una pluma de contaminación en el miembro basal de la formación Bucaramanga, (miembro Órganos, sensu stricto Hubach (1952)), en donde está ubicado el acuífero profundo de Bucaramanga.

Niño (2016) determinó la posible existencia de contaminación por lixiviados en el acuífero profundo de Bucaramanga, proponiendo una dirección de flujo de la pluma en sentido E – W, a partir del gradiente piezométrico medido en varios pozos perforados. Esta dirección de flujo no ha sido medida ni comprobada en campo.

En contraste, a partir de la revisión de análogos de depósitos de ríos trenzados (Klingbeil et al., 1999), se sugiere que el flujo de la pluma puede darse en dirección SW-NE, considerando que el miembro Órganos, está compuesto por depósitos de grava depositado por estos ríos, cuya dirección de flujo era SW-NE (Franco y Ramírez, 2017). En este caso la variación de permeabilidad en las estructuras y elementos deposicionales afectarían la dirección preferencial de flujo. Un estudio

FLUJO DE PLUMA DE LIXIVIADOS EN EL MIEMBRO ÓRGANOS

detallado de estos elementos deposicionales se haría necesario para determinar tal efecto (Huggenberger y Regli, 2006).

Para la realización de esta investigación se plantean como hipótesis contrastantes, que el flujo de lixiviados producidos en el vertedero de residuos sólidos “El Carrasco” tiene una dirección NW, siguiendo el flujo natural del acuífero profundo de Bucaramanga, controlado por el gradiente piezométrico; o si por el contrario la dirección preferencial de flujo se ve afectado por las propiedades litológicas del miembro Órganos en el área de estudio.

Justificación

El vertedero de residuos sólidos “El Carrasco”, ha funcionado por 40 años, desde 1978, durante los cuales ha generado gran cantidad de lixiviados que se han infiltrado en el subsuelo, ya que: 1) hasta el año 1993, este funcionó sin tener algún plan para el manejo y tratamiento adecuado de los lixiviados, 2) se han implementado planes para el manejo de lixiviados, que han resultado ineficientes, comprobado por Contreras (2012) a partir de diferentes visitas al vertedero. Sus estudios han establecido la ocurrencia de la infiltración de un gran volumen de lixiviados generados en el vertedero que continua en la actualidad. Al ser el miembro Órganos el reservorio del acuífero profundo de Bucaramanga, se hace fundamental hacer un buen manejo de los lixiviados, ya que estos pueden llegar a contaminar aguas subterráneas y aguas superficiales, haciéndolas tóxicas para el consumo humano (Giraldo, 2001).

Esta investigación es de gran importancia ya que se comprobará la existencia de una pluma contaminante, en el miembro Órganos de la formación Bucaramanga producto de los lixiviados producidos en dicho vertedero. Se determinará la dirección preferencial de flujo de la pluma de contaminantes, a partir de la descripción y compilación de las propiedades litológicas y físicas del miembro Órganos en el área de interés, además de la medición del contraste de resistividad en diferentes puntos del acuífero, con el uso Tomografías de Resistividad Eléctrica (ERT).

Con los resultados se espera crear una línea base de valores de resistividad en el acuífero con pluma y sin pluma de contaminación, y sugerir una dirección de flujo en el acuífero que sea útil para que las diferentes entidades ambientales y/o académicas de la región, puedan elaborar futuros planes de mitigación y prevención de contaminación en zonas del acuífero profundo de Bucaramanga, en donde aún no se ha tenido en cuenta el riesgo de contaminación por lixiviados.

1. Objetivos

1.1. Objetivo General

Sugerir la dirección preferencial de flujo de la pluma de lixiviados generados en el vertedero “El Carrasco” y definir valores de resistividad representativos de los 100 m más someros del miembro Órganos, a partir de la medición de resistividad eléctrica en el subsuelo en tres transectas sobre el miembro Órganos de la formación Bucaramanga.

1.2. Objetivos Específicos

- Modelar la respuesta teórica de anomalía de resistividad de las diferentes litofacies pertenecientes al miembro Órganos y de la pluma de lixiviados en el área de estudio a partir de revisión bibliográfica y descripciones hechas en campo.
- Determinar los valores de resistividad típicos para las litologías presentes en el miembro Órganos, con y sin la presencia de lixiviados a partir de tres perfiles de resistividad eléctrica 2D.
- Sugerir las estructuras sedimentarias y características geológicas dentro del miembro Órganos, que facilitan el flujo de la pluma, al crear caminos para el flujo de la pluma contaminante, mediante la caracterización de las litofacies y elementos deposicionales con diferentes propiedades geofísicas.

2. Generalidades

2.1. Localización

La zona de estudio corresponde a las zonas aledañas al vertedero de residuos sólidos el “Carrasco”, cartografiada geológicamente dentro del cuadrángulo H12 Bucaramanga, a escala 1:100000 INGEOMINAS, (2001), entre las coordenadas 1100000.937848 m E - 1106000.301929 m E y 1275453.233024 m N - 1271696.324118 m N, origen central. Esta zona se ubica entre el municipio de Bucaramanga y Girón, en el departamento de Santander, limitada al Norte por la vía Bucaramanga – Girón, al Sur por la vereda Carrizal, al Oeste por el centro urbano del Girón y al Este por el barrio El Provenir (Figura 1).

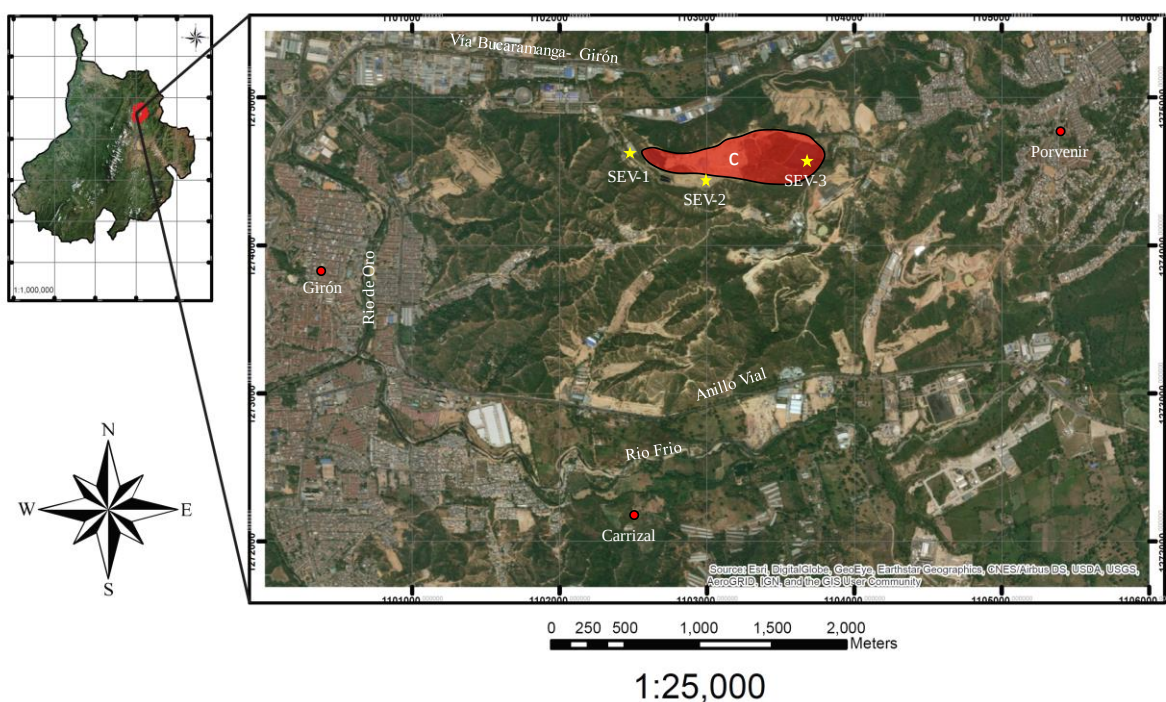


Figura 1. Localización de la zona de estudio, con la ubicación de los sondeos eléctricos verticales (SEV) realizados por Niño (2016). a) Imagen satelital del departamento de Santander. b) Imagen satelital del área de estudio. c) Ubicación del vertedero de residuos sólidos “El Carrasco”. Imagen tomada de Google Earth.

2.2. Antecedentes

El manejo de lixiviados producidos en el vertedero de residuos sólidos “El Carrasco” presenta falencias catalogadas por Contreras (2012), de la siguiente manera:

- La deficiencia en el sellado de las celdas lo cual permite que se infiltren aguas meteóricas dentro del vertedero, generando así un incremento en el volumen de lixiviados.
- Brotes de lixiviados en celdas activas y clausuradas, debido a fallas técnicas en el diseño de los filtros de captación de lixiviados.
- Rupturas en tuberías que conducen los lixiviados, generando derrames de lixiviados que se infiltran en el subsuelo.

Estos problemas en el manejo de los lixiviados han generado una pluma de contaminación. Niño (2016) realizó un estudio, en el cual se hicieron 3 sondeos eléctricos verticales (SEV), dos de estos sobre las celdas de depósito y el último a 800 m al occidente del vertedero (SEV-1, SEV-2 y SEV-3) (Figura 1), con los cuales se identificó una anomalía de resistividades bajas, correspondientes a zonas completamente saturadas de lixiviados, a profundidades de 08.00 m hasta 62.00 m en el SEV-1 y por debajo de los 14.30 m de profundidad en el SEV-2 (Figura 1). También sugiere, que las propiedades hidráulicas del miembro Órganos pueden permitir que estos lixiviados alcancen el acuífero profundo de Bucaramanga.

Problemas de este tipo se han abordado en diferentes partes del mundo, como el caso tratado por Syukri y Saad (2013), en donde se delimitó la distribución espacial de la pluma de lixiviados generados por el vertedero de residuos de Ampong Jawa, Banda Aceh, Indonesia. Para este caso los autores decidieron usar herramientas geofísicas como 2-D Electrical Resistivity Imaging (2-DERI), también conocido como Tomografía de Resistividad Eléctrica, a partir de la cual se identificaron anomalías de resistividad baja <1 ohm-m, para establecer las zonas en donde está

FLUJO DE PLUMA DE LIXIVIADOS EN EL MIEMBRO ÓRGANOS

presente la pluma contaminante, y hacer una correlación entre todas las imágenes, para determinar los caminos de flujo de la pluma contaminante y la distribución espacial de esta (Figura 2).

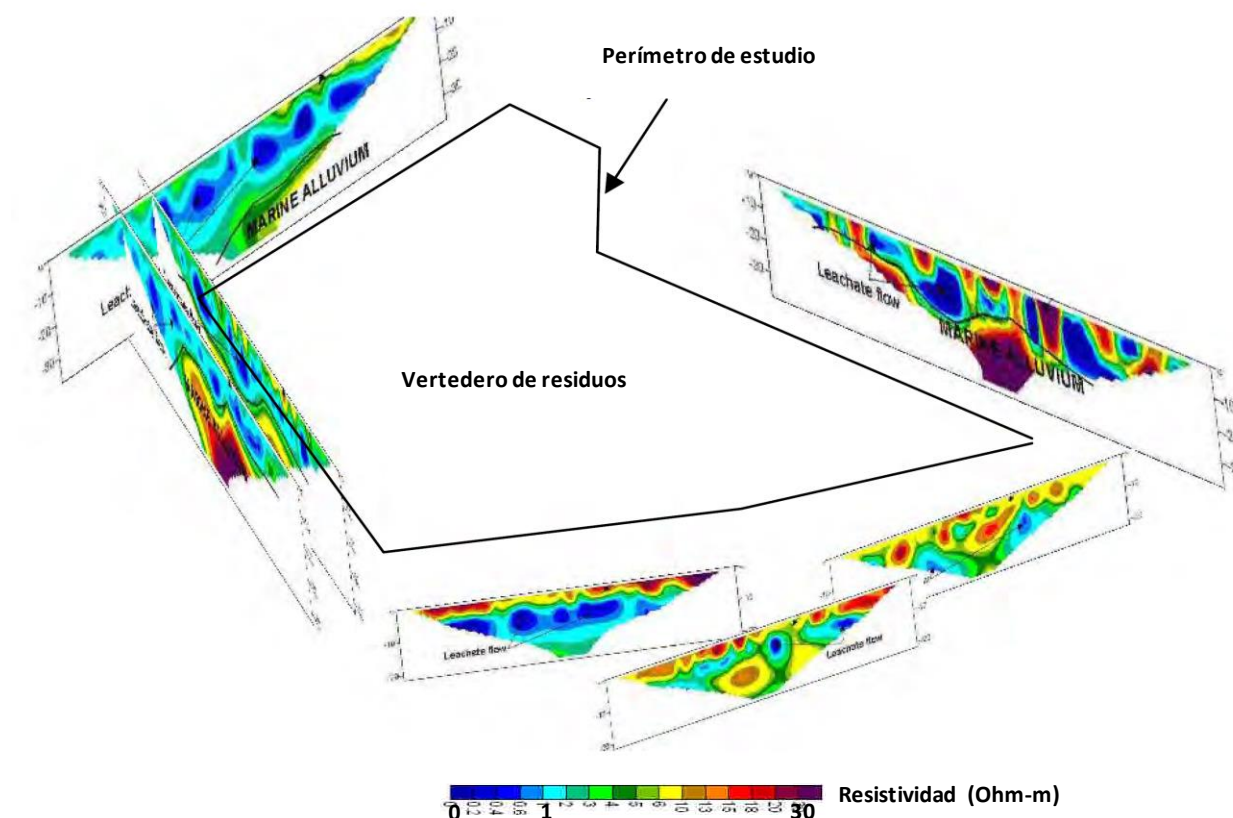


Figura 2. Distribución espacial de la pluma de lixiviados en el vertedero de residuos de Ampong Jawa, Banda Aceh, Indonesia, tomada y editada de Syukri M y Saad R (2013), los rótulos con *Leach* indican las zonas donde el lixiviado ha sido interpretado.

Igualmente, Omolayo (2014), usó tomografías de resistividad eléctrica para delimitar la pluma de lixiviados generada por un antiguo vertedero de residuos sólidos en Ibadan Nigeria.

A partir del análisis de las propiedades hidro-estratigráficas de las unidades se pueden sugerir posibles direcciones de flujo del acuífero, dependiendo de la distribución de facies, característica que puede predecirse si se define un modelo de deposición de la unidad de estudio (Klingbeil et al., 1999). En este caso, la existencia de una pluma de contaminante se usa para definir propiedades hidráulicas de las unidades estudiadas, definición que ayudará a entender cómo puede ocurrir la

FLUJO DE PLUMA DE LIXIVIADOS EN EL MIEMBRO ÓRGANOS

contaminación y si puede o no evitarse una vez ocurra la infiltración de lixiviados (MacFarlane et al., 1983).

2.3 Marco geológico e hidrogeológico

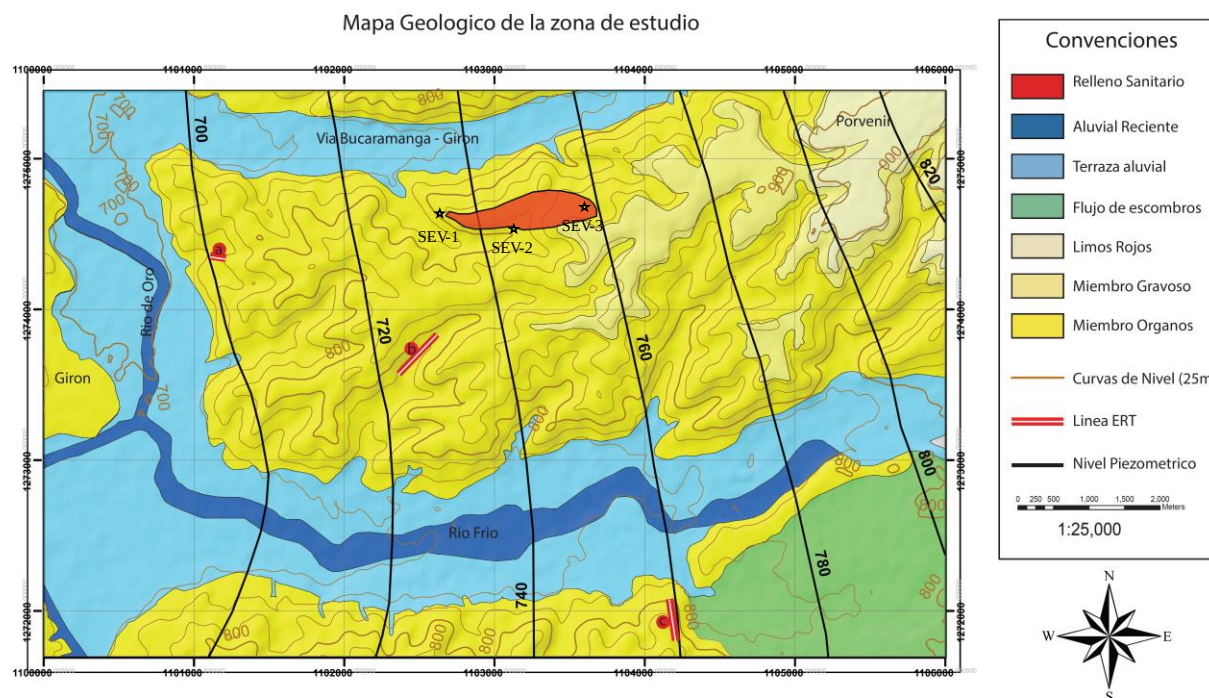


Figura 3. Mapa geológico de la zona de estudio, en el cual se presentan las isolíneas del nivel piezométrico en el acuífero profundo de Bucaramanga, tomadas de Rodríguez (2011) y la localización de las líneas de Tomografía de resistividad eléctrica adquiridas en esta investigación (círculos rojos con líneas adyacentes). La dirección de las líneas rojas muestra la dirección de la adquisición. Ubicación de los sondeos eléctricos verticales (SEV-1, SEV-2 y SEV-3) realizados por Niño (2016). Tomado y editado de INGEOMINAS, (2001)

En la zona de estudio afloran rocas del miembro Limos Rojos, Gravoso, y Órganos –unidad en la que se ubica el vertedero “El Carrasco”, además de Terrazas aluviales, Flujo de Escombros y Depósitos Aluviales recientes. El Rio de Oro y el Rio Frio limitan la zona posible de contaminación por lixiviados (Figura 3).

2.3.1 Estratigrafía. A continuación, se presentará una descripción de los miembros de la formación Bucaramanga, de base a tope correspondientemente.

- Miembro Órganos: Definido por Hubach (1952). Aflora en las laderas y escarpes de la parte occidental de la Meseta de Bucaramanga y el Área Metropolitana, en los alrededores del municipio de Girón, anillo vial, en las estribaciones de la parte norte de la mesa de Ruitoque y en los cortes de la carretera que comunica la población de Girón con la ciudad de Bucaramanga (INGEOMINAS, 2001) (Figuras 1 y 3).

En términos generales está conformado por depósitos de gravas, guijas y guijarros de moderados a mal seleccionados, muy bien redondeados, clasto soportados con baja a alta bioturbación y matriz arenosa a areno lodosa mal seleccionada con un espesor se 200m aproximadamente. Estos depósitos se encuentran interdigitados con capas de espesor variable (3 - 10m) de arenas a arcilla con geometría tabular o lenticular (Franco y Ramírez, 2017), (Figura 4).

- Miembro Finos: definido por Hubach (1952). Ubicado estratigráficamente entre el miembro Órganos y el nivel superior miembro Gravoso, en contacto neto plano paralelo con estos, es una capa lenticular muy extensa, con un espesor promedio que varía entre los 15-30 m, el cual corresponde a una alternancia de litologías arcillosas, limo-arenosas y areno-limosas (Lima, 2015). (Figura 4).
- Miembro Gravoso: definido por Julivert (1958), formado principalmente por niveles gravosos, gravo-arenosos y gravo-lodosos. Los cantos son en su mayoría de tamaño grava, subangulares a subredondeados, en matriz areno-arcillo-limosa, con un espesor que varía entre 8 y 30m. Suprayace al miembro finos con un contacto

FLUJO DE PLUMA DE LIXIVIADOS EN EL MIEMBRO ÓRGANOS

erosivo (Lima, 2015). Aflora en un sector del barrio Porvenir, lejano de la zona estudiada con las tomografías (Figuras 3 y 4).

- 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). Esta unidad aflora en un área limitada hacia el occidente del área de estudio, en cercanías del barrio el Porvenir (Figuras 3 y 4).

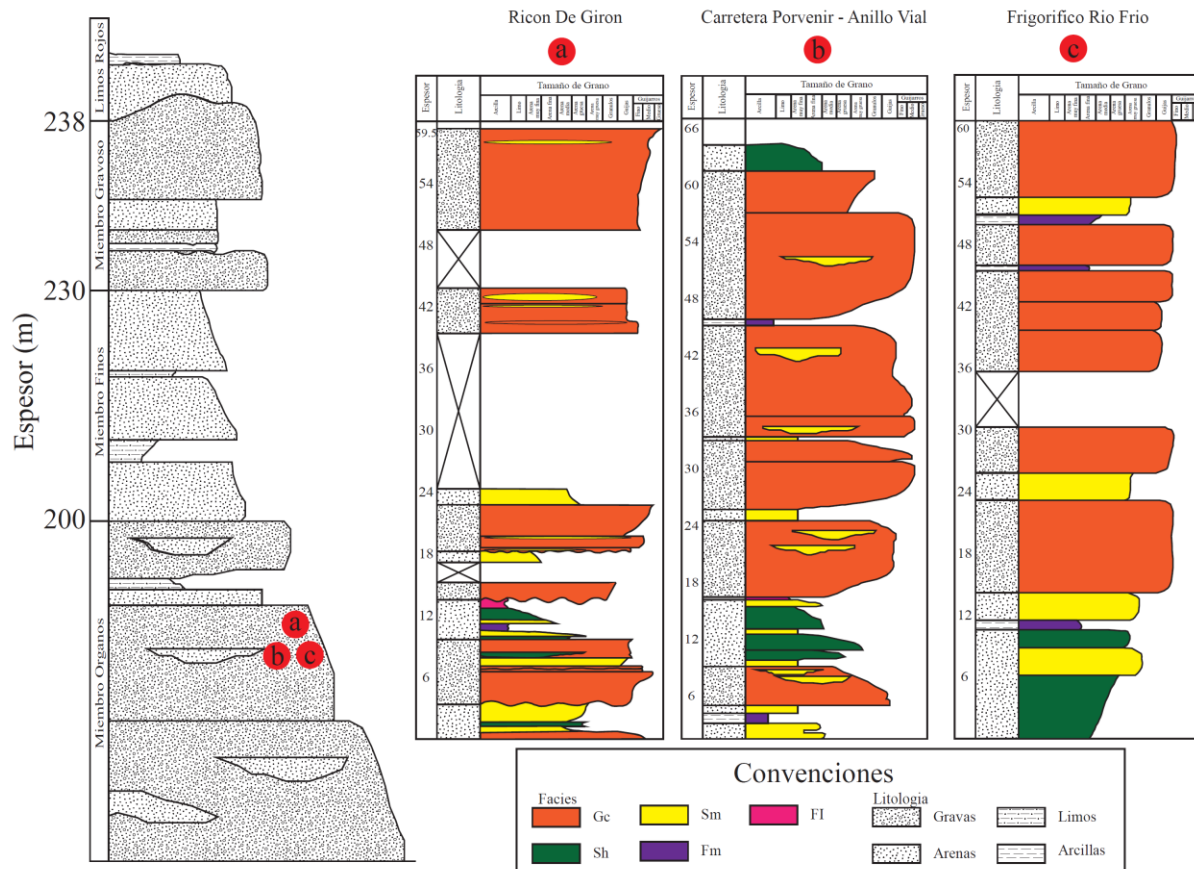


Figura 4. Columna estratigráfica generalizada de la formación Bucaramanga tomada y editada de M. Julivert (1963). Nótese que las convenciones aparecen explicadas en la tabla 1. (a) Columna estratigráfica del miembro Órganos en la zona Rincón de Girón, tomado y editado de Franco y

FLUJO DE PLUMA DE LIXIVIADOS EN EL MIEMBRO ÓRGANOS

Ramírez, (2017). (b) Columna estratigrafía del miembro Órganos en la carretera Porvenir – Anillo vial, tomado y editado de Ramírez y Hernández, (2018). (c) Columna estratigráfica del miembro órganos en la zona frigorífico Rio Frio, tomada y editada de Solano, (2016).

2.3.1.1 Clasificación de facies. Las diferentes facies del Miembro Órganos se han clasificado teniendo como referencia los estudios previos, que han analizado la textura y las estructuras sedimentarias del depósito, siguiendo la metodología de clasificación de facies en ríos trezados de Miall, (1977), (Tabla 1 y Figura 4). El miembro Órganos se ha definido como un depósito de río trezado 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

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.
FI	Arcilla con laminación muy fina cruzada, ripples y plano-paralela.

parte al Rio Surata, (De porta, 1958; CDMB, 2010)

Tabla 1. *Litofacies en ríos trezados y descripción*

Correlación litofacies-elementos deposicionales

Según Franco y Ramírez, (2017), el miembro Órganos es un depósito generado en un ambiente de río trezado con dirección de flujo SW/NW por lo tanto los elementos deposicionales corresponden a los característicos de este ambiente.

Las facies Gc corresponden a depósitos de barras longitudinales y rellenos de canal (Miall, 1977), la facies Sm y Sh corresponden a depósitos arenosos de acreción lateral producto de flujos

FLUJO DE PLUMA DE LIXIVIADOS EN EL MIEMBRO ÓRGANOS

turbulentos que transportan clastos de granulometría tamaño arena y a rellenos de canal abandonado (Miall, 1977), y las facies FI y Fm corresponden a depósitos de la llanura de inundación (Miall, 1997).

Usando análogos definido en Miall, (1985), la distribución de estas facies en un espesor de 100m, en una longitud de 36m, escala a la cual se realizará la adquisición de tomografía de resistividad eléctrica se vería como la Figura 5.

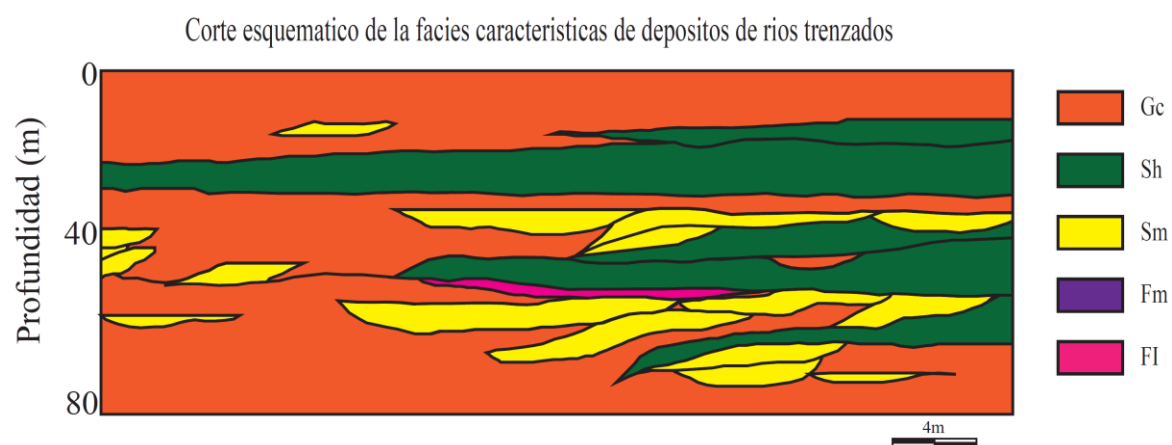


Figura 5. Corte esquemático de las facies características en depósitos de ríos trezados tomado y editado de Miall, 1985

2.3.2 Hidrogeología. Rodríguez, (2011) identificó dos unidades hidrogeológicas en la formación Bucaramanga, a partir de 126 puntos de captación de aguas subterránea, clasificando estas dos unidades como acuífero superficial y acuífero profundo.

- Acuífero Superficial: Ubicado estratigráficamente en el miembro Gravoso de la formación Bucaramanga, determinado a partir de 70 puntos de captación de aguas subterráneas que intervienen este miembro, (Rodríguez, 2011).
- Acuífero Profundo: Ubicado estratigráficamente en la parte superior del miembro Órganos de la formación Bucaramanga, en donde se observan resistividades eléctricas entre los 40 – 520 ohm-m que podrían representar los niveles saturados. El espesor del

FLUJO DE PLUMA DE LIXIVIADOS EN EL MIEMBRO ÓRGANOS

acuífero varía entre los 120 y 170 m, (Bermúdez y Vásquez, 2004 en Rodríguez, 2011).

Este acuífero se determinó a partir de los datos geofísicos de Bermúdez y Vásquez, (2004) y 14 puntos de captación de aguas subterráneas (Rodríguez, 2011), a partir de los cuales se realizó el mapa de isopiezas para el acuífero profundo de Bucaramanga el cual hace parte de la zona de estudio de esta investigación (ver Figura 3).

Klingbeli, (1999) sugiere unos valores de permeabilidad hidráulica horizontal y vertical, para las diferentes facies presentes en depósitos de ríos trenzados (Tabla 2), en donde se observa altos valores de permeabilidad hidráulica en la facies de gravas, que es la que predomina en este tipo de depósitos, como en el miembro Órganos de la formación Bucaramanga (Figura 4).

Facies según Miall (1977)	Descripción	Zona geo eléctrica	Resistividad (ohm-m)	Correlacion hidrogeologica	Elemento deposicional según miall, (1977)	Kh (m/s) según Klingbeli, (1999)	Kv (m/s) según Klingbeli, (1999)
Gc	Grava arenosa clastosoportada, clastos subredondeados a muy bien redondeados, matriz arenosa a areno arcillosa.	I	150-400	Gravas saturadas	barras longitudinales y rellenos de canal	5.37×10^{-4}	2.99×10^{-4}
Sh	Niveles de arena, Arena lodosa o arena ligeramente gravosa masiva.	II	30-150	Arenas saturadas	depósitos de arenosos de acreción lateral producto de flujos turbulentos que transportan clastos de granulometría tamaño arena y a rellenos de canal abandonado	1.10×10^{-3}	1.10×10^{-3}
Sm	Arena lodosa, localmente gravosa con laminación plano-paralela continua o difusa.	II	30-150	Arenas saturadas	depósitos de arenosos de acreción lateral producto de flujos turbulentos que transportan clastos de granulometría tamaño arena y a rellenos de canal abandonado	1.10×10^{-3}	1.10×10^{-3}
Fm	Limo, arcilla y lodo masivo.	III	0-30	Limos saturados	depósitos de la llanura de inundación	$10^{-6} - 10^{-8}$	$10^{-6} - 10^{-8}$
FI	Arcilla con laminación muy fina cruzada, ripples y plano-paralela.	III	0-30	Arcillas saturadas	depósitos de la llanura de inundación	$> 10^{-8}$	$10^{-6} - 10^{-8}$

Tabla 2. Características litológicas, eléctricas y permeabilidades de las facies descritas en el miembro órganos de la formación Bucaramanga.

2.4 Tomografía de resistividad eléctrica (ERT)

La tomografía de resistividad eléctrica (ERT) es un método geofísico con diferentes aplicaciones en estudios geotécnicos y estudios ambientales. El método geoeléctrico consiente, en la medición de la diferencia de potencial en el subsuelo cuando se trasmite una corriente eléctrica al subsuelo por medio de dos electrodos de corriente, con el fin de obtener datos de resistividad aparente (Omolayo, 2014). La tomografía de resistividad eléctrica permite la medición de la diferencia de potencial en 64 electrodos simultáneamente a lo largo de una transecta que puede llegar a medir 320m. La adquisición de una tomografía de resistividad eléctrica se realiza instalando los electrodos en el suelo de forma recta, los cuales se conectan a la consola por medio de dos cables especiales para esto. Posteriormente se conecta la consola un computador con el software de adquisición, desde el cual se pueden modificar los parámetros de adquisición de la tomografía de resistividad eléctrica para finalmente iniciar la adquisición de datos. Usando este método siempre se observará un contraste entre una pluma de lixiviados y las rocas circundantes (Brenstone et al., 2000 en Omolayo, 2014). La tabla 3 presenta la relación los valores de resistividad y las diferentes litologías.

Litología	Resistividad (Ohm-m)
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
Arcillas no saturadas	20-40
Arcillas saturadas	10-20

Tabla 3. Valores típicos de resistividad eléctrica para diferentes litologías

Nota: tomado de Arias et al., (2012).

3 Metodología

El proyecto de investigación se desarrolló llevando a cabo la siguiente metodología la cual se dividió en 4 etapas (Figura 6).

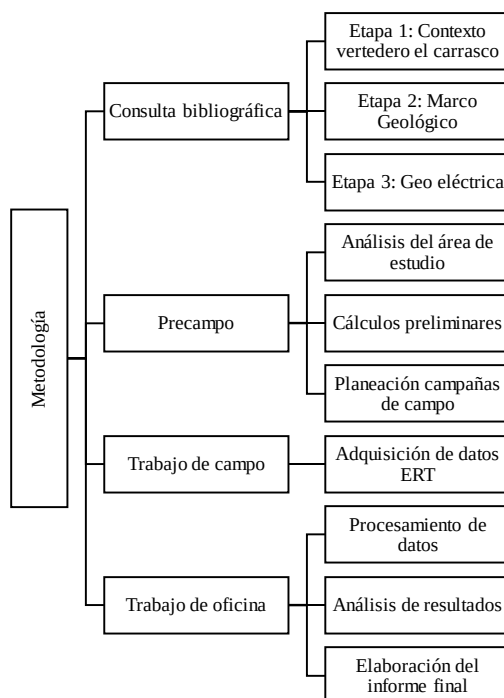


Figura 6. Metodología del proyecto de investigación.

3.1. Consulta bibliográfica.

Se realizó una consulta bibliográfica en tres etapas en la cual se reunió la mayor información con respecto al vertedero de residuos sólidos “El Carrasco”, el marco geológico de la zona de estudio y la teoría del método geo eléctrico y la herramienta ERT, con el fin de plantear el problema de investigación, sugerir la hipótesis de este trabajo y subsecuentemente determinar la metodología y herramientas adecuadas para abordar el problema.

3.2. Precampo

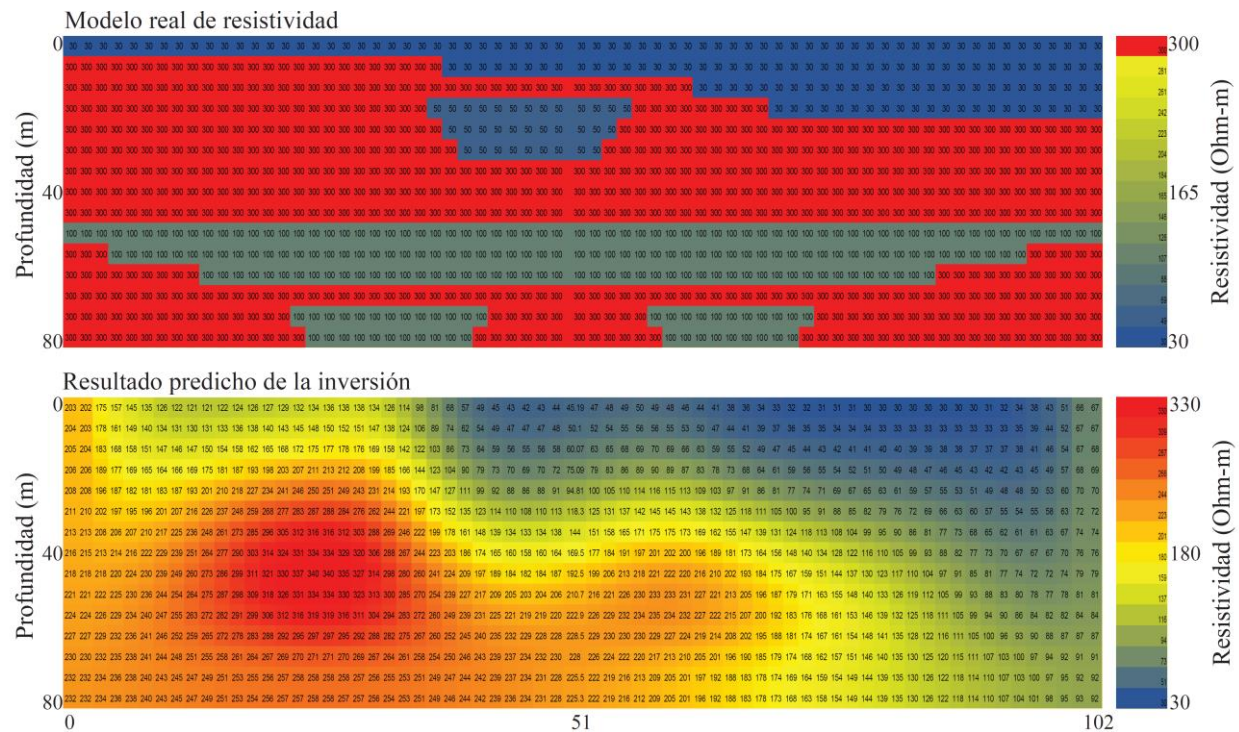
Esta fase corresponde a las actividades que se realizaron para planear las diferentes salidas de campo que se realizaron, la cual se dividió en tres etapas.

3.2.1. Análisis del área de estudio. En esta etapa se observó el área de estudio mediante el uso de la herramienta Google Earth (ver Figura1), con el fin de determinar las posibles zonas en donde se podrían adquirir las transectas de ERT. Los lugares ideales permitían adquirir transectas con la mayor longitud en un terreno relativamente plano, y estarían cerca a posibles afloramientos en donde se pudiera hacer una descripción litológica para correlacionarla con los datos geofísicos que se obtendrían posteriormente.

3.2.2. Cálculos preliminares. Se realizaron cálculos preliminares con el fin de determinar la distancia máxima a la que pudo haber avanzado la pluma de contaminación teniendo en cuenta datos teóricos de conductividad hidráulica, para las diferentes facies del miembro Órganos, los datos del nivel piezométrico en el acuífero profundo de Bucaramanga y la ley de Darcy. En estos cálculos la contaminación ya habría alcanzado el Río de Oro, aproximadamente a 2000m en dirección E-W. Para elegir un punto de medición contaminado y otro sin contaminación lixivados debía entonces elegirse un punto al Este del vertedero, y otros en una zona separada hidrológicamente del vertedero.

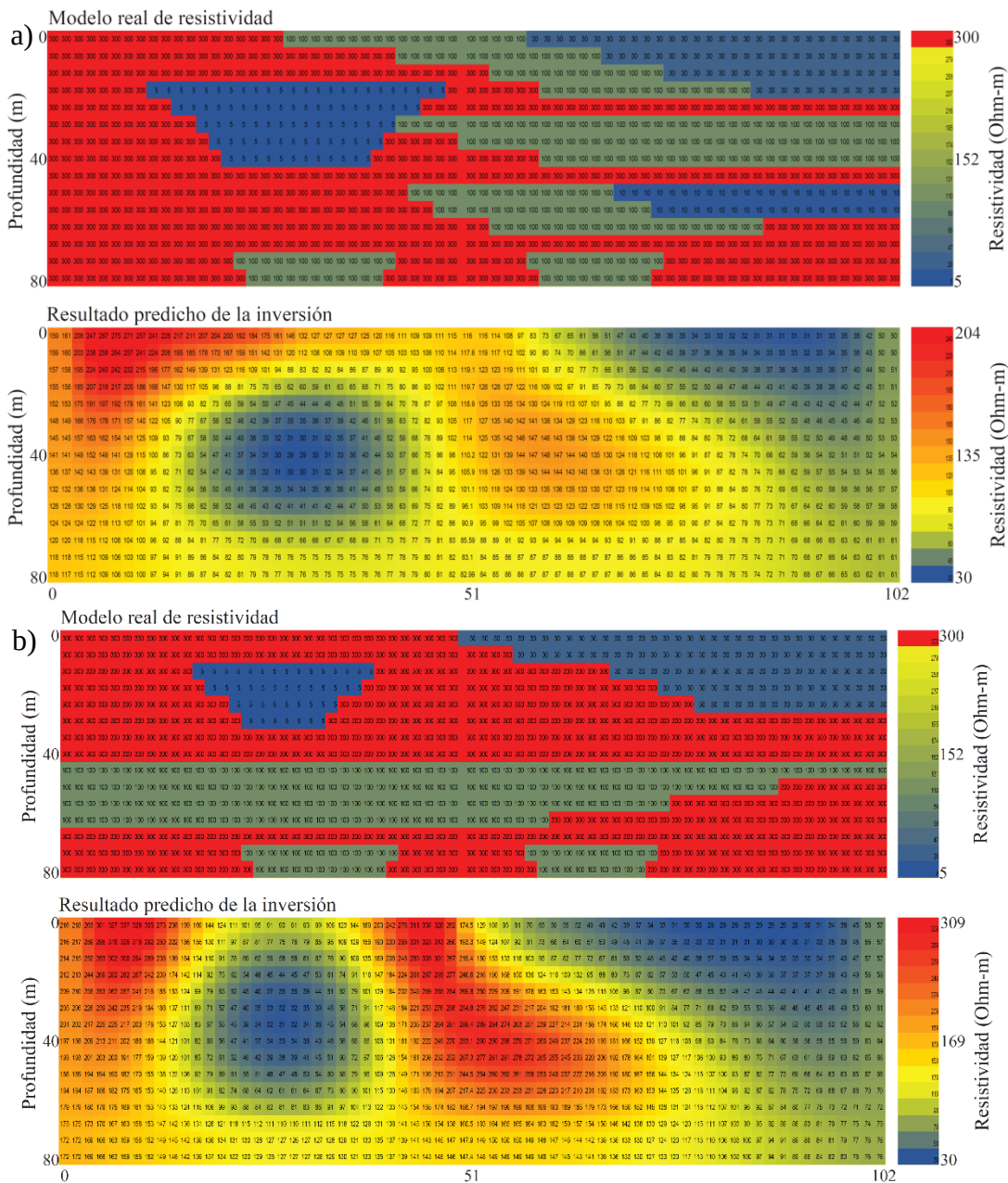
FLUJO DE PLUMA DE LIXIVIADOS EN EL MIEMBRO ÓRGANOS

Adicionalmente, se realizaron cálculos de los valores de resistividad esperados a partir de la configuración de modelos directos de resistividad que tenían en cuenta la distribución de las facies típicas del miembro Órganos (Figura 5) y datos teóricos de resistividad eléctrica para estas facies (Tabla 3). Estos modelos nos permiten conocer a priori la respuesta de la tomografía de resistividad a los cambios litológicos esperados en el miembro Órganos sin contaminación (Figura 7) y con contaminación (Figura 8). Para la realización de esos modelos se usó el software desarrollado por el U.S Geological Survey, *The Scenario Evaluator for Electrical Resistivity (SEER) survey desing tool* creado por Terry et al., (2017). A partir de estos perfiles se observó que la resolución de la tomografía no es suficiente para modelar exactamente la geometría de los diferentes cuerpos de roca en el subsuelo, ya que el resultado muestra solo las tendencias de resistividad en el subsuelo sin tener mucho detalle en la geometría.



FLUJO DE PLUMA DE LIXIVIADOS EN EL MIEMBRO ÓRGANOS

Figura 7. Modelo real de resistividad y resultado predicho de inversión de una sección donde no hay contaminación. Los valores de resistividad y su distribución para el modelo fueron definidos a partir del corte que muestra las facies típicas en depósitos de ríos trenzados (Figura 5) y sus valores teóricos de resistividad (Tabla2). Los valores de resistividad de 300 ohm-m corresponden a gravas saturadas, resistividad de 100 ohm-m a arenas, resistividad de 50 ohm-m a arenas limosas y resistividad de 30 ohm-m a limos o arenas arcillosas



FLUJO DE PLUMA DE LIXIVIADOS EN EL MIEMBRO ÓRGANOS

Figura 8. Modelos de resistividad real y resultado predicho de la inversión para dos secciones contaminadas en donde los valores de resistividad de 300 ohm-m corresponden a gravas saturadas, resistividades de 100 ohm-m a arenas saturadas, resistividades de 30 ohm-m a limos o arenas arcillosas y resistividades de 5 ohm-m corresponde a zonas saturadas con lixiviados.

3.3. Planeación de las campañas de campo

En esta etapa se determinó el cronograma de las campañas de campo, la longitud y ubicación de las transectas de ERT. Para esto se realizaron dos salidas precampo de reconocimiento del área y verificación de las condiciones del terreno en las zonas previamente seleccionadas con el análisis de la imagen satelital. También, luego de hacer una investigación sobre los tipos de arreglo de adquisición, y hacer una lista de sus fortalezas y debilidades para definir variaciones de resistividad horizontales que nos permiten definir la presencia de una pluma de lixiviados, se escogió el arreglo dipolo-dipolo con separación entre los electrodos de 4m en las transectas ERT-1 y ERT3 y de 5m para la transecta ERT-2, debido a que este arreglo provee un buen equilibrio entre profundidad de investigación y resolución de las variaciones laterales, (Bhattacharya y Sen, 1981).

3.4. Trabajo de campo

En esta etapa se realizó la adquisición de las transectas de ERT, en las zonas previamente seleccionadas. Las sesiones de campo incluían en primera estancia medir la longitud de la transecta con una cinta métrica, para marcar sobre el suelo las posiciones de los electrodos cuyo espaciamento ya se había definido con anterioridad en la fase de precampo. Posteriormente se instalaron los electrodos en sus respectivas posiciones. Seguido a esto se procedió a la instalación del equipo para la adquisición de los datos, en este proyecto se usó el equipo *FlashRES-UNIVERSAL64/96* (Figura 9), el cual fue prestado por el programa de maestría en geofísica de la Escuela de Física de la UIS.

FLUJO DE PLUMA DE LIXIVIADOS EN EL MIEMBRO ÓRGANOS

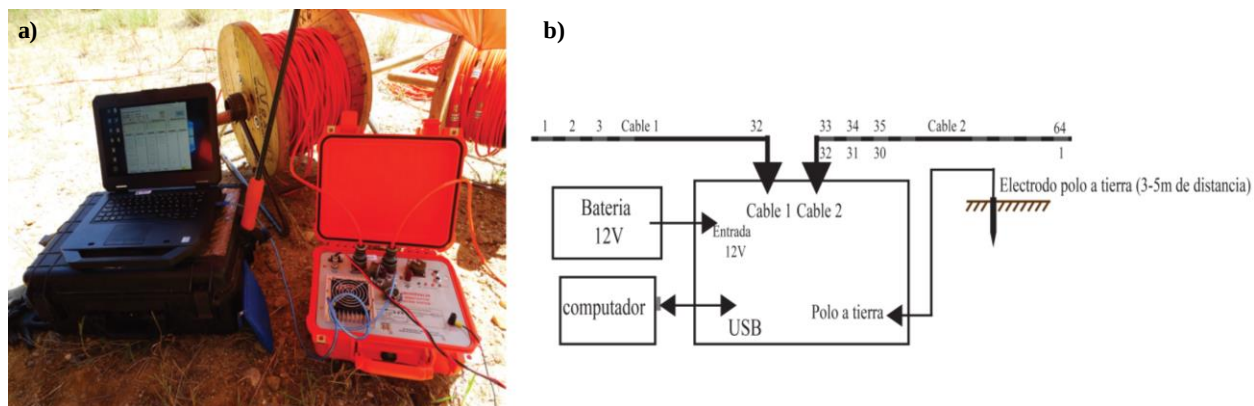


Figura 9. a) Equipo *FlashRES-UNIVERSAL64/96* utilizado para la adquisición de datos de ERT, este equipo consta de, una consola, dos carretes de cable para conectar los electrodos, una batería de 12 voltios y un computador. b) Esquema de conexión del equipo con el cable que conecta los electrodos.

A continuación, se establecieron los parámetros de adquisición en el software de adquisición *FlashRES-Universal: Resistivity/IP meter*, en donde se determina la longitud de la transecta a adquirir, el espaciamiento entre electrodos, el total de electrodos que se van a usar y el tipo de arreglo de adquisición (Figura 10).

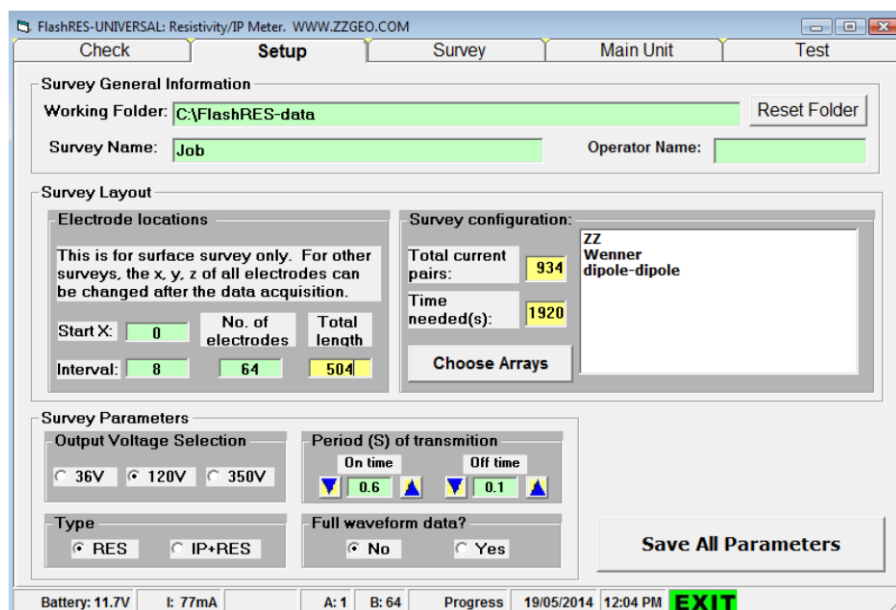


Figura 10. Captura de pantalla, selección de los parámetros de adquisición del software *FlashRES-Universal: Resistivity/IP meter*, tomada del manual de usuario del equipo *FlashRES-UNIVERSAL64/96 The Full-channel Free Configuration Resistivity/IP Exploration System*.

La longitud de la transecta ERT-1 fue de 164m. En esta transecta se usó 42 electrodos con un espaciamiento entre ellos de 4m (Figura 12). La transecta ERT-2 se adquirió a lo largo de 315m, usando 64 electrodos con un espaciamiento entre estos de 5m (Figura 14). Por último, la transecta ERT-3 fue ubicada en una zona en donde no se espera contaminación, se adquirió con una longitud de 252m, usando 64 electrodos con un espaciamiento de 4m (Figura 16). Todas las transectas se realizaron con el arreglo dipolo-dipolo.

3.5. Trabajo de oficina

Esta es la fase final del proyecto que corresponde al procesamiento, inversión e interpretación de los datos adquiridos. El análisis de los resultados generados nos permitirá comprobar si la hipótesis de este proyecto se cumple.

3.5.1. Procesamiento de datos. Para el procesamiento de los datos se usaron los siguientes software: *ZZ-Rdatacheck.exe* y *ZZRESINV.exe*, desarrollados por el fabricante del equipo *FlashRES-UNIVERSAL64/96*. Con el fin de obtener los mejores resultados se siguió la metodología sugerida por el manual de usuario del equipo, presentada a continuación (Figura 11).

FLUJO DE PLUMA DE LIXIVIADOS EN EL MIEMBRO ÓRGANOS

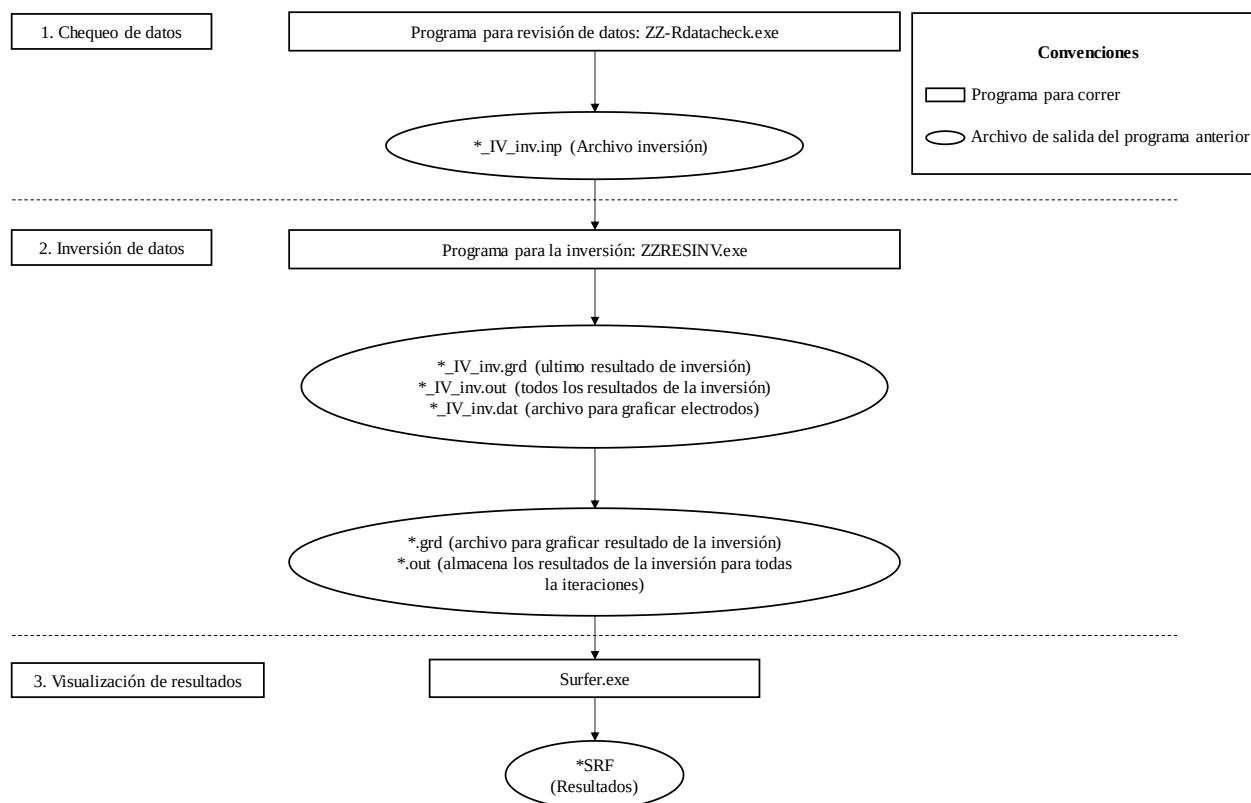


Figura 11. Metodología usada para la inversión de los datos, tomada del manual de usuario del equipo *FlashRES-UNIVERSAL64/96 The Full-channel Free Configuration Resistivity/IP Exploration System*.

3.5.1.1. Chequeo de datos. En esta etapa se hace la verificación de los datos crudos adquiridos por el equipo de adquisición de datos. La calidad de dato se cuantifica con respecto a la cantidad de ruido que exista durante la adquisición. En este proyecto se usaron los datos con calidad (Q) menor o igual a 10, lo que asegura que la inversión se realizara con la información más confiable. Al final de este proceso se genera un archivo que será el input para la inversión.

3.5.1.2. Inversión de datos. En este paso del procesamiento se realiza la inversión de los datos, la cual es definida por Menke, (1989) como “un conjunto de técnicas matemáticas y estadísticas que permiten obtener información útil del mundo

físico a partir de inferencias logradas a través de observaciones. La finalidad es encontrar un modelo que obtenga una respuesta similar a los valores reales medidos, bajo ciertas restricciones”. Este proceso se realizó usando el software de inversión *ZZRESINV.exe* que contiene el algoritmo de inversión que realiza diferentes iteraciones de arreglos de distribución y espesores de resistividades reales, hasta que la anomalía generada se ajuste a las mediciones de resistividad aparente. El resultado con menor error al comparar lo calculado con lo medido se archiva en **_IV_inv.grd* el cual contiene los resultados de la última inversión. El proceso también es documentado en el archivo **_IV_inv.out* el cual contiene los resultados de cada una de las iteraciones realizadas por el software.

El archivo inicial para realizar la inversión resulta del paso anterior e incluye el voltaje (V) medido en los electrodos, la intensidad de corriente (Amp), la ubicación y espaciamiento entre electrodos y los parámetros de inversión (número de inversiones, tamaño de la grilla de iteración, resistividades máximas permitidas y diferencia con el valor medido aceptable) definidos a partir de las recomendaciones incluidas en el manual de usuario del equipo.

Visualización de los resultados

Este paso se realiza para poder visualizar los resultados obtenidos luego de la inversión de una forma gráfica (Figuras 12, 14 y 16). El resultado, es una sección 2D de los datos de resistividad real en el subsuelo, se dibuja en Surfer®, a partir del archivo **_IV_inv.grd*. La sección se muestra como un mapa de contornos, al que se puede agregar colores. Por convención el color azul oscuro a negro representa los valores más bajos de resistividad y el color rojo los valores más altos de resistividad mostrados en las tomografías de resistividad eléctrica 2D.

3.5.2. Interpretación de datos. La interpretación se realiza observando detalladamente las tomografías de resistividad eléctrica 2D resultantes (Figuras 12, 14 y 16), comparando la tendencia de resistividad con el corte esquemático de las facies de un depósito de río trenzado (Figura 5), y con los modelos directos de resistividad (Figuras 7, 8 y 9) y los valores típicos de resistividad para las diferentes litologías (Tabla 3). En la interpretación se delimitaron las diferentes litofacies presentes en las tomografías que podrían correlacionarse con los elementos deposicionales del miembro Órganos en las secciones adquiridas, y las zonas correspondientes a posible contaminación por lixiviados dependiendo del caso.

3.5.3. Elaboración del informe final. En esta etapa se compilo toda la información obtenida en la interpretación de los resultados obtenidos para la elaboración del libro el cual debe ser entregado a la Escuela de Geología.

4. Resultados y discusión

4.1. Tomografías de resistividad eléctrica 2D

Teniendo en cuenta que siempre en una sección de resistividad 2D se observa el claro contraste entre una zona saturada por lixiviados y las rocas circundantes (Brenstone et, Al., 2000 en Omolayo, 2014), y que la pluma de lixiviados disminuye la resistividad de una forma drástica al contener diferentes partículas que aumentan la conductividad eléctrica del agua por lo tanto de la roca saturada con este tipo de fluido (Acworth, 2006); y partiendo de que la distribución de facies cuyo contenido de arcilla y saturación de agua genera una distribución de resistividades variable

FLUJO DE PLUMA DE LIXIVIADOS EN EL MIEMBRO ÓRGANOS

lateral y verticalmente, se interpretaron las anomalías obtenidas en las tomografías eléctricas adquiridas (Figuras 12, 14 y 16).

4.1.1. ERT-1 Rincón de Girón. Esta transecta, localizada en la parte NW de la zona de estudio, aproximadamente a 1300m al SW del vertedero de residuos sólidos “El Carrasco” (Figura 1 y 3), alcanzó una profundidad de investigación de 80m, y midió resistividades entre 0 y 300 ohm-m clasificadas en tres diferentes zonas geoeléctricas. Según la escala gráfica estas zonas tienen los siguientes intervalos de resistividad: zona I, 150 – 300 ohm-m (verde limón a blanco), zona II, 30 – 100 ohm-m (azul rey a verde oscuro) y zona III, 0 – 30 ohm-m (negro a azul oscuro) (Figura 12).

En la sección ERT-1, las anomalías de la zona III pueden corresponder a limos o lodos saturados, o a zonas contaminadas por lixiviados debido a sus bajos valores de resistividad eléctrica. En nuestra interpretación la zona III que aparece a profundidades más someras, corresponde con anomalías correlacionables con limos saturados, según anotaciones de campo (ANEXO 1). En cambio, el cuerpo lenticular de muy baja resistividad (zona III) de 25m de espesor, que se encuentra embebido en un cuerpo altamente resistivo (zona I), correlaciona según el modelo directo mostrado en la Figura 8a, con la presencia de un cuerpo de roca saturado en fluidos contaminados por lixiviados (Figura 13).

La zona geoeléctrica I, la cual es la más predominante en la sección, se interpreta como un cuerpo de gravas saturadas, mientras que la zona geo-eléctrica II, cuya geometría es lenticular, se interpreta como lentes de arena saturados de agua al comparar su resistividad con los modelos directos de la Figura 8 (Figura 13).

FLUJO DE PLUMA DE LIXIVIADOS EN EL MIEMBRO ÓRGANOS

ERT-1 "Rincón de Girón"

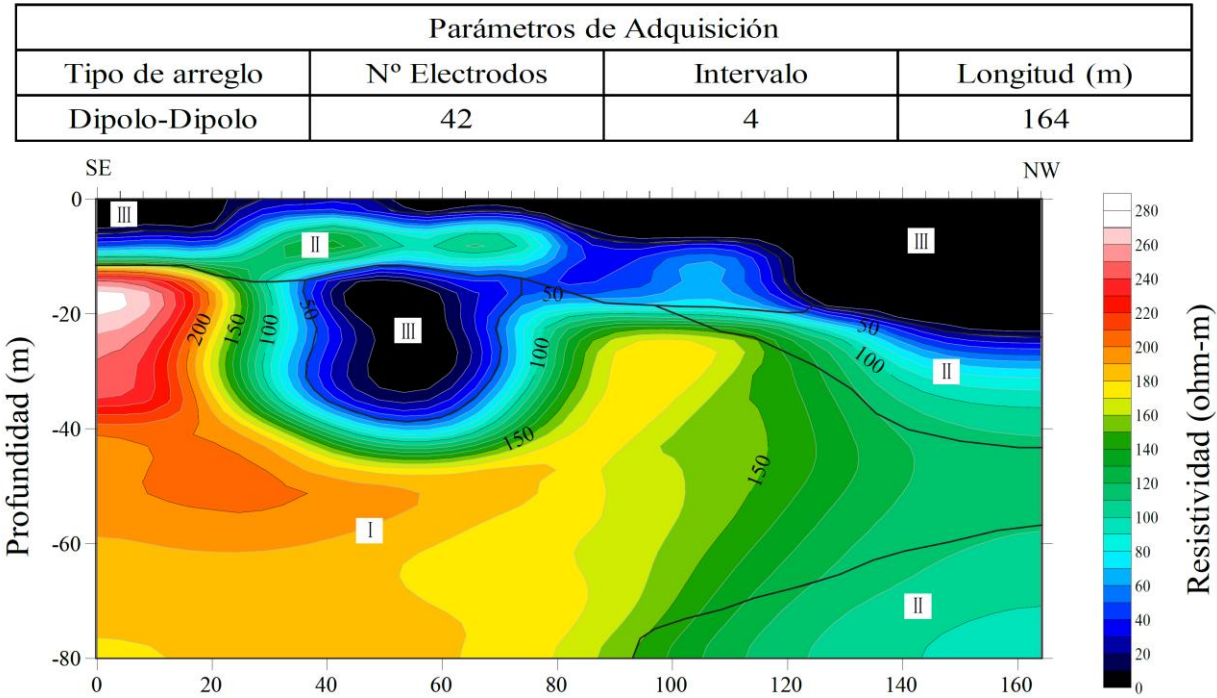


Figura 12. Tomografía de resistividad eléctrica 2D ERT-1, con la delimitación de las diferentes zonas geoelectricas.

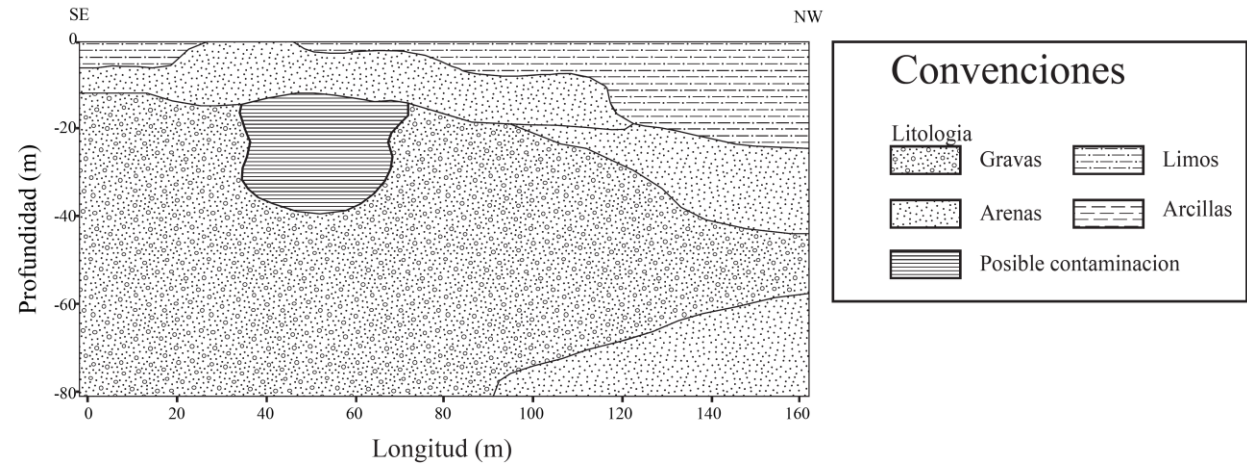


Figura 13. sección interpretada con las litologías asignadas a las diferentes zonas geo eléctricas de las ERT-1.

FLUJO DE PLUMA DE LIXIVIADOS EN EL MIEMBRO ÓRGANOS

Teniendo en cuenta la interpretación litológica de la tomografía de resistividad y las zonas geo eléctricas, las resistividades observadas pueden correlacionarse con las facies descritas en el miembro Órganos por Franco y Ramírez, (2017). de la siguiente forma; la zona I se correlaciona con la litofacies Gc, la zona II se correlaciona con las litofacies Sh y Sm y la zona III se correlaciona con las litofacies Fm y FI (Figuras 5 y 13).

4.1.2. ERT-2 Vía Porvenir – Anillo Vial. Localizada en la parte central de la zona de estudio, aproximadamente a 1000m al SW del vertedero de residuos sólidos “El Carrasco” (Figura 1), esta transecta alcanzó una profundidad de investigación de 100m. En ella se observan resistividades entre 0 y 380 ohm-m, clasificadas en tres diferentes zonas geo eléctricas las cuales según la escala gráfica tienen los siguientes intervalos de resistividad: zona I, 150 – 380 ohm-m (azul verdoso a blanco), zona II, 30 – 150 ohm-m (azul oscuro a azul aguamarina) y zona III, 0 – 30 ohm-m (negro a azul oscuro) (Figura 14).

En esta sección de resistividad eléctrica también se puede observar una anomalía importante en forma lenticular, de muy baja resistividad (zona III) embebida en un cuerpo altamente resistivo (zona I). Al igual que la transecta anterior, y comparando los resultados de la inversión con el modelo directo presentado en la Figura 8 esta geometría y valores de resistividades sugiere la presencia de un cuerpo de roca saturado en fluidos contaminados por lixiviados. En esta transecta el lente de baja resistividad está rodeado de valores altos de resistividad, la zona geo eléctrica I, definida como un cuerpo de gravas saturadas a partir de la comparación del modelo invertido y el modelo directo. En contraste, las geometrías lenticulares identificadas en la zona geoelectrica II se interpretan como lentes de arenas saturados. Finalmente, las anomalías someras clasificadas como

FLUJO DE PLUMA DE LIXIVIADOS EN EL MIEMBRO ÓRGANOS

zona geo eléctrica III, pueden corresponder a limos saturados o a un nivel somero de rocas saturadas en fluidos contaminados por lixiviados (Figura 15).

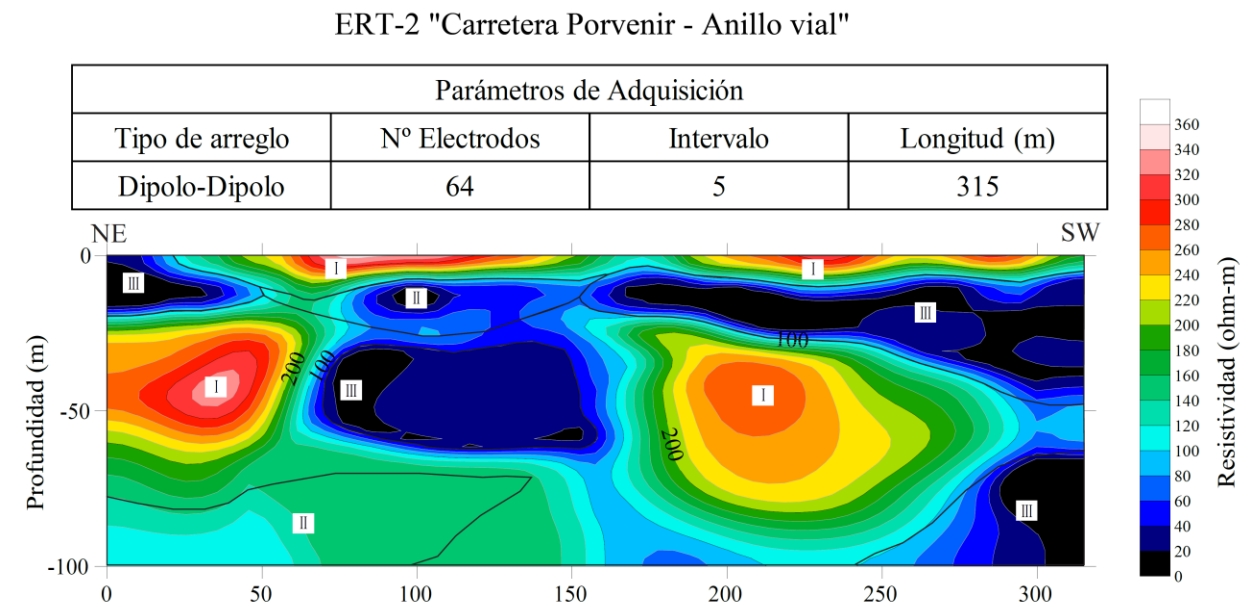


Figura 14. Tomografía de resistividad eléctrica 2D ERT-2, con la delimitación de las diferentes zonas geoelectricas.

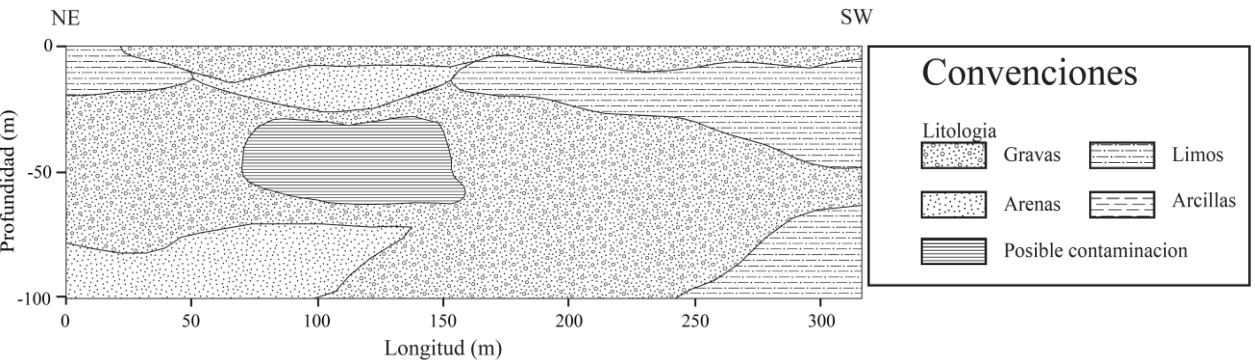


Figura 15. sección interpretada con las litologías asignadas a las diferentes zonas geo eléctricas de las ERT-2.

Teniendo en cuenta la interpretación litología de la tomografía de resistividad y las zonas geo eléctricas, se puede correlacionar con las facies descritas en el miembro órganos por Hernández y

FLUJO DE PLUMA DE LIXIVIADOS EN EL MIEMBRO ÓRGANOS

Ramírez, (2017). de la siguiente forma; la zona I se correlaciona con la litofacies Gc, la zona II se correlaciona con las litofacies Sh y Sm y la zona III se correlaciona con las litofacies Fm y FI (Figura 5 y 15).

4.1.3. ERT-3 Frigorífico Rio Frio. Localizada al SE de la zona de estudio, aproximadamente a 3000m del vertedero de residuos sólidos “El Carrasco” (Figura 1), se espera que no se encuentren fluidos contaminados por lixiviados. Para asegurar que así es, esta transecta está a una distancia mayor a la que se calculó podría llegar la contaminación. Además, está ubicada en el costado sur del Rio Frio, el cual sirve como una barrera física para el paso de fluidos contaminados con lixiviados desde “El Carrasco”. Los valores de resistividad resultantes en esta transecta se definen como de referencia, como valores normales para las facies saturadas del miembro Órganos. Por lo tanto, la comparación de esta transecta con las anteriores permite confirmar la interpretación sugerida.

En esta transecta se alcanzó una profundidad de investigación de 80m. En ella se observan resistividades entre 0 y 390 ohm-m, clasificadas en tres diferentes zonas geoelectricas las cuales según la escala gráfica tienen los siguientes intervalos de resistividad: zona I, 150 – 390 ohm-m (verde claro a blanco), zona II, 30 – 150 ohm-m (azul oscuro a azul aguamarina) y zona III, 0 – 30 ohm-m (negro a azul oscuro) (Figura 16).

La distribución de resistividades de esta sección es muy similar al modelo directo que se hizo a partir de los valores típicos de resistividad para las diferentes litologías del miembro Órganos sin fluidos contaminados por lixiviados (Figura 7). Partiendo de esta similitud, y usando el modelo directo mostrado en la Figura 7, se determinó que la zona geoelectrica I la cual es la más

FLUJO DE PLUMA DE LIXIVIADOS EN EL MIEMBRO ÓRGANOS

predominante en la sección, correlaciona con los valores de resistividad y distribución de un depósito de gravas saturadas. Las anomalías clasificadas en la zona geoelectrica II tienen una geometría lenticular, por lo que pueden interpretarse como capas de arenas saturadas (Figura 17). Finalmente, las resistividades clasificadas en la geoelectrica III, que aparecen en la parte más somera de la tomografía, son interpretas como capas de limos saturados (Figura 17).

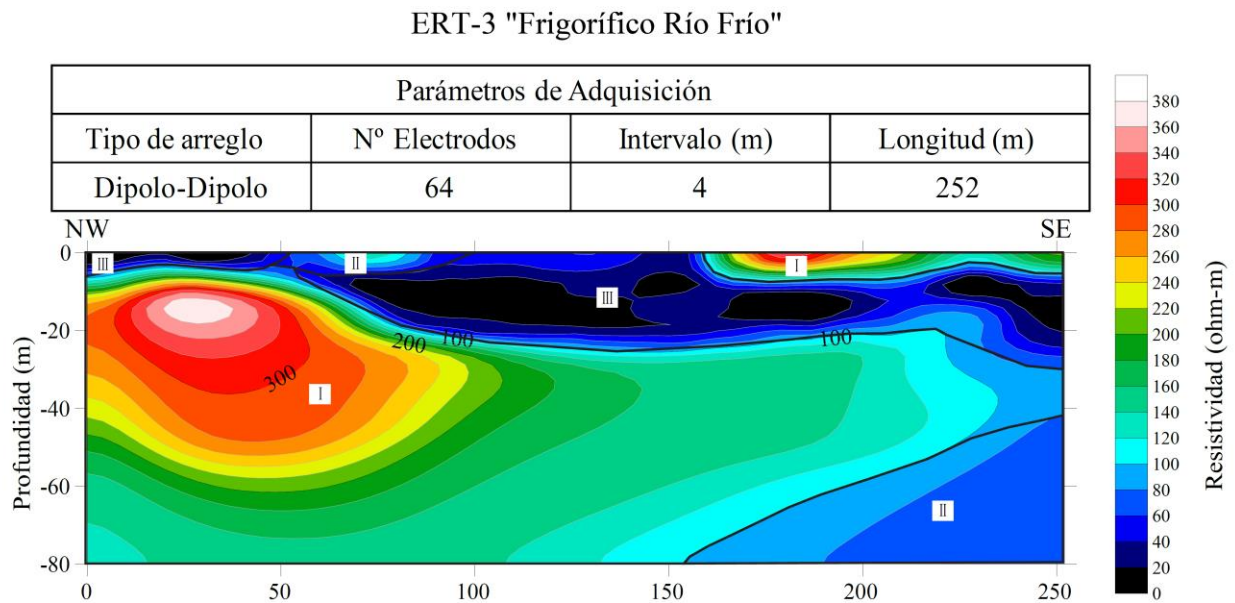


Figura 16. Tomografía de resistividad eléctrica 2D ERT-3, con la delimitación de las diferentes zonas geoelectricas.

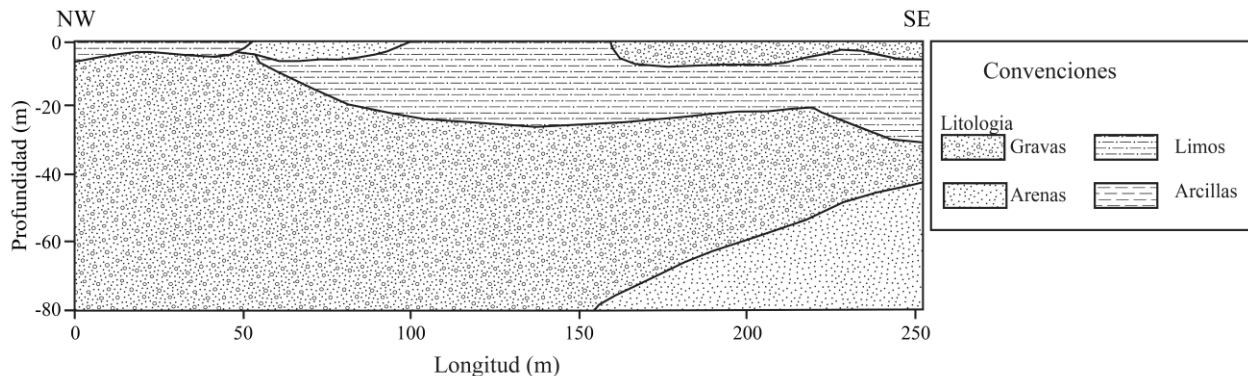


Figura 17. sección interpretada con las litologías asignadas a las diferentes zonas geo eléctricas de las ERT-3.

FLUJO DE PLUMA DE LIXIVIADOS EN EL MIEMBRO ÓRGANOS

Teniendo en cuenta la interpretación litología de la tomografía de resistividad y las zonas geoelectricas, los valores de resistividad se pueden correlacionar con las facies descritas en el miembro Órganos por Solano, (2016). de la siguiente forma; la zona I se correlaciona con la litofacies Gc, la zona II se correlaciona con las litofacies Sh y Sm y la zona III se correlaciona con las litofacies Fm y FI (Figuras 5 y 17).

4.2. Dirección de Flujo de la pluma contaminante

Klingbeli et al., (1999), clasifica a los acuíferos formados por depósitos de gravas de ríos entrelazados como los mejores acuíferos, ya que estos presentan una permeabilidad hidráulica alta, lo que permite el flujo de fluidos con facilidad y por lo tanto alta velocidad. Siendo esta facies la más representativa del miembro Órganos, y adicionalmente, en la que está ubicado el acuífero profundo de Bucaramanga, al cual se están filtrando lixiviados generados en el vertedero de residuos sólidos “El Carrasco” desde hace más de 40 años, es de esperar que la pluma de lixiviados haya alcanzado una extensión relativamente grande, causando un daño ambiental considerable, ya que contamina el agua fresca del acuífero profundo de Bucaramanga.

Los cálculos de distancia recorrida por la pluma de lixiviados, en la facie gravosa, usando los valores de permeabilidad horizontal de estas facies definidas por Klingbeli et al., (1999) (Tabla 2) predecían que esta ha alcanzado 2000m o más durante los 40 años de funcionamiento del vertedero.

Con las adquisiciones de las transectas ERT-1 y ERT-2, pudimos verificar los cálculos de distancia teóricos, ya que se observó una anomalía de baja resistividad a 1300m al Oeste y 900m al Sur del vertedero que podría corresponder a fluidos contaminados por lixiviados, según lo interpretado a partir de la comparación entre los datos invertidos con los modelos directos (Figura 13, 15 y 17). La identificación de la pluma de lixiviados se fortalece luego de comparar las transectas ERT-1 y ERT-2 con la transecta de control ERT-3. La comparación permite observar

FLUJO DE PLUMA DE LIXIVIADOS EN EL MIEMBRO ÓRGANOS

grandes diferencias en la distribución de resistividad eléctrica sobre todo la zona III, a profundidades de 20 a 25m. La anomalía de baja resistividad presenta una geometría es semicircular característica en las ERT-1, ERT-2 y ausente en la ERT-3.

A partir de los resultados obtenidos, y de la ubicación de las transectas de ERT-1 y ERT-2, se sugiere que el flujo de la pluma contaminante generada en el vertedero de residuos sólidos “El Carrasco”, es radial (Figura 19). Sedimentológicamente la sugerencia de flujo radial en el miembro órganos correlaciona con la interpretación de que este fue depositado por un río trezado con flujo en dirección SE/NW (Franco y Ramírez, 2017). En este modelo sedimentológico, los depósitos de gravas (facies Gc) corresponden a barras longitudinales y rellenos de canal que estarían alineados con la dirección del río como se muestra en el siguiente ejemplo de un río trezado actual (Figura 18).

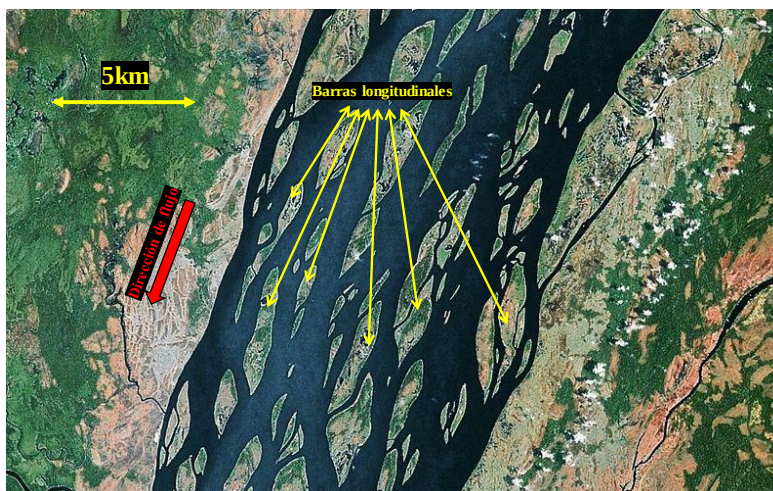


Figura 18. Imagen satelital del Río Congo, río trezado de la actualidad, donde se observa como las barras longitudinales están alineadas con la dirección de flujo del río, tomada y editada de Google Earth.

Por lo tanto, estos cuerpos de gravas elongados en dirección SE/NW facilitarían el flujo de lixiviados en dicha dirección, como parece evidenciar la transecta ERT-2. Si la pluma de lixiviados siguiera únicamente la dirección de flujo generada por el gradiente piezométrico del acuífero

FLUJO DE PLUMA DE LIXIVIADOS EN EL MIEMBRO ÓRGANOS

profundo en la zona de estudio que en general es E-W, ni la transecta ERT-2 no presentaría la anomalía de baja resistividad que sugiere material saturado de agua contaminada por lixiviados.

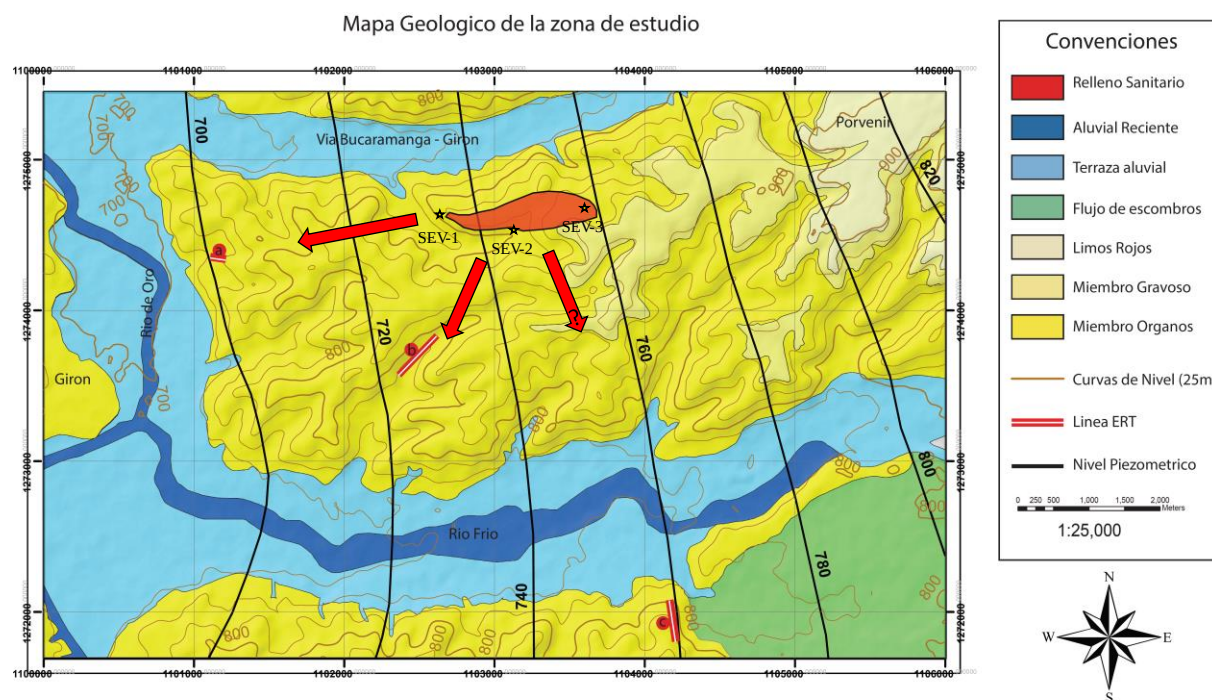


Figura 19. Mapa geológico del área de estudio en donde se sugiere la posible dirección de flujo de la pluma de lixiviados de forma radial a partir del vertedero de residuos sólidos “el Carrasco”.

5. Conclusiones

- Los valores de resistividad característicos para las diferentes litologías de la parte superior del miembro Órganos son de 150 – 400 ohm-m para los depósitos de gravas saturadas, 30 – 150 ohm-m para los depósitos de arenas saturadas y de 0 – 30 ohm-m para los depósitos de limos y arcillas, lo cual tiene similitud con los valores típicos de diferentes litologías mostradas en la Tabla 3.
- Los modelos directos de resistividad real presentan bastantes similitudes con los modelos geo eléctricos generados a partir de los datos adquiridos en la investigación, lo que hace a esta herramienta muy útil al momento de interpretar las secciones de resistividad 2D generadas después de la inversión
- Las anomalías de baja resistividad (0-10 ohm-m) con geometría semicircular observadas en las secciones de ERT-1 y ERT-2, sugieren un gran impacto ambiental, causado por los lixiviados generados en el vertedero el Carrasco ya que se encuentran a grandes distancias de este, evidenciando una amplia distribución espacial de la pluma contaminante.
- Se sugiere una distribución radial del flujo de lixiviados desde el vertedero “el Carrasco”, esto causado por los depósitos de barras longitudinales presentes en el miembro órganos elongadas en dirección SE/NW que generan caminos que facilitan el flujo de los fluidos en esta dirección.

6. Recomendaciones

- Se recomienda realizar un estudio geofísico detallado, en donde se combinen otras técnicas geofísicas para tener mayor veracidad de los resultados obtenidos, por ejemplo, un modelo de resistividad 3D y cargabilidad donde se pueda apreciar la distribución espacial de la pluma contaminante, y estudios de GPR donde se pueda mapear con precisión los elementos deposicionales del miembro Órganos.
- Se recomienda realizar estudios hidrogeológicos en donde se determinen las propiedades hidráulicas de los materiales del acuífero profundo de Bucaramanga. También realizar análisis de aguas subterráneas para corroborar la existencia o no de lixiviados en el acuífero profundo de Bucaramanga.
- Se recomienda realizar estudios ambientales, en los ríos aledaños al vertedero de residuos sólidos “el Carrasco” (Rio de Oro y Rio Frio), ya que debido a la alta permeabilidad de los cuerpos de grava del miembro Órganos, es posible que el agua contaminada este drenando en estos ríos.
- Se recomienda realizar un modelo geológico detallado de la zona, con el cual se pueda hacer un modelado del flujo de la pluma contaminante en el software Modflow.

Referencias bibliográficas

- Acworth, R. I., and L. B. Jorstad.(2006). Integration of multi-channel piezometry and electrical tomography to better define chemical heterogeneity in a landfill leachate plume within a sand aquifer. *Journal of Contaminant Hydrology* 83.3-4 (2006): 200-220.
- Arias, D. E., Ramírez, O. E., & Patiño, F. H. (2012). Relaciones geoelectricas en la exploracion geotecnica. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, (31), 39-50.
- Bhattacharya, B. B., & Sen, M. K. (1981). Depth of investigation of collinear electrode arrays over homogeneous anisotropic half-space in direct current methods. *Geophysics*, 46(5), 768-780.
- CDMB. (2010). Plan general para el control de la erosión.
- Contreras Manzano, I. E. (2012). Evaluación ambiental ex-post del sitio de disposición final de residuos sólido el carrasco en el municipio de Bucaramanga-Santander.
- De Porta, J. (1959). La Terraza de Bucaramanga. *Boletín de Geología*, (3), 5-13.
- Environmental Justice Atlas. (2014). Relleno sanitario (Landfill), El Carrasco, Bucaramanga, Colombia.: recuperado de <https://ejatlas.org/conflict/rellenosanitario-landfill-el-carrasco-bucaramanga-colombia>.
- Franco, A., & Ramírez, A. (2017). Reconstrucción paleoambiental de los miembros órganos, finos y gravoso de la formación Bucaramanga en el área metropolitana de Bucaramanga (Tesis para optar al título de Geólogo. Escuela de Geología, UIS, Bucaramanga).
- Giraldo, E. (2001). Tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios: avances recientes. *Revista de ingeniería*, (14), 44-55.

FLUJO DE PLUMA DE LIXIVIADOS EN EL MIEMBRO ÓRGANOS

- Hubach, E., (1952). Interpretación Geológica de la erosión y de los deslizamientos en Bucaramanga y medidas de defensa. Serv. Geol. Nal. Bogota. Inf. 867, 2-4 inédito.
- Huggenberger, P., & Regli, C. (2006). A sedimentological model to characterize braided river deposits for hydrogeological applications. In Braided rivers: process, deposits, ecology and management, (36), 51-74. Blackwell Publishing Ltd Oxford, UK.
- INGEOMINAS. (2001). Mapa de zonificación Geotécnica del área metropolitana de Bucaramanga.
- Julivert, M. (1958). La Morfoestructura de la Zona de las Mesas al SW de Bucaramanga. Boletín de Geología, (1).
- Julivert, M. (1963). Nuevas observaciones sobre la estratigrafía y tectónica del Cuaternario de los alrededores de Bucaramanga. Boletín de geología, (15).
- Klingbeil, R., Kleinedam, S., Asprion, U., Aigner, T., & Teutsch, G. (1999). Relating lithofacies to hydrofacies: outcrop-based hydrogeological characterisation of Quaternary gravel deposits. Sedimentary Geology, (129), 299-310.
- 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).
- MacFarlane, D. S., Cherry, J. A., Gillham, R. W., & Sudicky, E. A. (1983). Migration of contaminants in groundwater at a landfill: a case study: 1. Groundwater flow and plume delineation. Journal of Hydrology, (63), 1-29.
- Menke, W. (1989). Continuous inverse theory and tomography. International geophysics series 45 (1989): 171-182.

FLUJO DE PLUMA DE LIXIVIADOS EN EL MIEMBRO ÓRGANOS

- Miall, A. D. (1977). Lithofacies types and vertical profile models in braided river deposits: a summary.
- Miall, A. D. (1985). Architectural-element analysis: a new method of facies analysis applied to fluvial deposits. *Earth-Science Reviews*, 22(4), 261-308.
- Niño Carvajal, L. X., Valencia, R., Alexander, J., Valencia, R., & Lenin, J. (2016). Contaminación fisicoquímica de acuíferos por los lixiviados generados del relleno sanitario El Carrasco, de Bucaramanga. *Producción+ Limpia*, (11), 66-74.
- Noguera, K. M., & Olivero, J. (2010). Los rellenos sanitarios en Latinoamérica: caso colombiano. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, (34), 347-356.
- Omolayo, D., & Tope, F. J. (2014). 2D Electrical imaging surveys for leachate plume migration at an old dump site in Ibadan South Western Nigeria: a case study. *International Journal of Geophysics*, 2014.
- Ramírez, J., & Hernández, O. (2018). Caracterización hidroestratigráfica del miembro Órganos de la formación Bucaramanga en la zona occidental del municipio de Bucaramanga, Santander (Tesis para optar al título de Geólogo. Escuela de Geología, UIS, Bucaramanga).
- Rodríguez, J., & Torres, D. (2011). Inventario de puntos de aguas subterráneas y distribución espacial de niveles de acuíferos en la parte aluvial y sedimentaria de la región de Bucaramanga (Tesis para optar al título de Ingeniero Civil. Escuela de Ingeniería Civil, UIS, Bucaramanga).
- Solano, A. (2016). Estudio de proveniencia de los sedimentos de la formación Bucaramanga, al sur del Rio Frio; en los municipios de Floridablanca y Girón (Tesis para optar al título de Geólogo. Escuela de Geología, UIS, Bucaramanga).

FLUJO DE PLUMA DE LIXIVIADOS EN EL MIEMBRO ÓRGANOS

Syukri, M., Saad, R., & Abubakar, M. (2013). Leachate migration delineation using 2-D electrical resistivity imaging (2-DERI) at Gampong Jawa, Banda Aceh. *EDGE*, (18), 1505-1510.