

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**



TESIS

**APLICACIÓN DE MÉTODOS ELÉCTRICOS DE PROSPECCIÓN PARA
CARACTERIZAR ZONAS CONTAMINADAS EN EL ACUÍFERO
MONTERREY, CAMPUS UANL**

POR

KARLA ISELA MEDELLÍN VILLALOBOS

**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
MAestrÍA EN CIENCIAS CON ORIENTACIÓN EN INGENIERÍA
AMBIENTAL**

SEPTIEMBRE, 2024



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



TESIS
APLICACIÓN DE MÉTODOS ELÉCTRICOS DE PROSPECCIÓN PARA
CARACTERIZAR ZONAS CONTAMINADAS EN EL ACUÍFERO
MONTERREY, CAMPUS UANL

POR
KARLA ISELA MEDELLÍN VILLALOBOS

COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN CIENCIAS CON ORIENTACIÓN EN INGENIERÍA
AMBIENTAL

Vo. Bo.
DIRECTOR DE TESIS

Dr. Héctor de León Gómez

SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, NUEVO LEÓN, MÉXICO SEPTIEMBRE, 2024



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**



TESIS

**APLICACIÓN DE MÉTODOS ELÉCTRICOS DE PROSPECCIÓN PARA
CARACTERIZAR ZONAS CONTAMINADAS EN EL ACUÍFERO
MONTERREY, CAMPUS UANL**

POR

KARLA ISELA MEDELLÍN VILLALOBOS

**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN CIENCIAS CON ORIENTACIÓN EN INGENIERÍA
AMBIENTAL**

Vo. Bo.

COMITÉ DE REVISIÓN

Dr. Héctor de León Gómez

Director de Tesis

M.I. Carlos Avendaño Silva

Codirector de Tesis

Dra. Fabiola Yépez Rincón

Evaluadora Interna

SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, NUEVO LEÓN, MÉXICO SEPTIEMBRE, 2024



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

2024/09/17

DR. GERARDO FAJARDO SAN MIGUEL
SUBDIRECTOR DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
PRESENTE.-

Estimado Dr. Fajardo San Miguel,

Por medio de la presente, hago de su conocimiento que he finalizado la revisión del documento de **TESIS**, cuyo título es **“APLICACIÓN DE MÉTODOS ELÉCTRICOS DE PROSPECCIÓN PARA CARACTERIZAR ZONAS CONTAMINADAS EN EL ACUIFERO MONTERREY, CAMPUS UANL”**, que presenta la **ING. KARLA ISELA MEDELLÍN VILLALOBOS**, como requisito parcial para obtener el grado de **MAESTRA EN CIENCIAS**, del programa **MAESTRÍA EN CIENCIAS CON ORIENTACIÓN EN INGENIERÍA AMBIENTAL**.

Por lo anterior, me permito informar a Usted que el documento **CUENTA** con la calidad y nivel **CIENTÍFICO**, adecuados para su defensa, por lo que dictamino que este trabajo sea **APROBADO**.

Asimismo, anexo a este documento el formato de evaluación correspondiente, donde hago saber mis comentarios y observaciones al respecto.

Sin otro particular por el momento, me despido y quedo a sus órdenes para cualquier duda o aclaración que considere pertinente.

Atentamente,

DR. HÉCTOR DE LEÓN GÓMEZ

Evaluador



Av. Universidad S/N Cd. Universitaria Apdo. Postal 17
San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México, C.P. 66455
Tels. (81) 14424400 ext. 4448, 8329 4000 ext. 7216, 7234
www.ingenieriacivil.uanl.mx



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

FECHA: 2024/09/10

DR. GERARDO FAJARDO SAN MIGUEL
SUBDIRECTOR DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
PRESENTE.-

Estimado Dr. Fajardo San Miguel,

Por medio de la presente, hago de su conocimiento que he finalizado la revisión del documento de **TESIS**, cuyo título es **“APLICACIÓN DE MÉTODOS ELÉCTRICOS DE PROSPECCIÓN PARA CARACTERIZAR ZONAS CONTAMINADAS EN EL ACUIFERO MONTERREY, CAMPUS UANL”**, que presenta la **ING. KARLA ISELA MEDELLÍN VILLALOBOS**, como requisito parcial para obtener el grado de **MAESTRA EN CIENCIAS**, del programa **MAESTRÍA EN CIENCIAS CON ORIENTACIÓN EN INGENIERÍA AMBIENTAL**.

Por lo anterior, me permito informar a Usted que el documento **CUENTA** con la calidad y nivel **CIENTÍFICO**, adecuados para su defensa, por lo que dictamino que este trabajo sea **APROBADO**.

Asimismo, anexo a este documento el formato de evaluación correspondiente, donde hago saber mis comentarios y observaciones al respecto.

Sin otro particular por el momento, me despido y quedo a sus órdenes para cualquier duda o aclaración que considere pertinente.

Atentamente,

MI CARLOS ALÁN AVENDAÑO SILVA

Evaluador



Av. Universidad S/N Cd. Universitaria Apdo. Postal 17
San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México, C.P. 66455
Tels. (81) 14424400 ext. 4448, 8329 4000 ext. 7216, 7234
www.ingenieriacivil.uanl.mx



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

FECHA: 2024/10/01

DR. GERARDO FAJARDO SAN MIGUEL
SUBDIRECTOR DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
PRESENTE.-

Estimado Dr. Fajardo San Miguel,

Por medio de la presente, hago de su conocimiento que he finalizado la revisión del documento de **TESIS**, cuyo título es "**APLICACIÓN DE MÉTODOS ELÉCTRICOS DE PROSPECCIÓN PARA CARACTERIZAR ZONAS CONTAMINADAS EN EL ACUIFERO MONTERREY, CAMPUS UANL**", que presenta la **ING. KARLA ISELA MEDELLÍN VILLALOBOS**, como requisito parcial para obtener el grado de **MAESTRA EN CIENCIAS**, del programa **MAESTRÍA EN CIENCIAS CON ORIENTACIÓN EN INGENIERÍA AMBIENTAL**.

Por lo anterior, me permito informar a Usted que el documento **CUENTA** con la calidad y nivel **CIENTÍFICO**, adecuados para su defensa, por lo que dictamino que este trabajo sea **APROBADO**

Asimismo, anexo a este documento el formato de evaluación correspondiente, donde hago saber mis comentarios y observaciones al respecto.

Sin otro particular por el momento, me despido y quedo a sus órdenes para cualquier duda o aclaración que considere pertinente.

Atentamente,

Dra. Fabiola Doracely Yépez Rincón

Evaluador



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
Av. Pedro de Alba S/N Ciudad Universitaria, San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México, C.P. 66455
81 8329 4000 ext. 4060 • www.fic.uanl.mx



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

Comprobante de corrección de escritos

ESTUDIANTE PROFESOR

NOMBRE: KARLA ISELA MEDELLÍN VILLALOBOS

TIPO DE DOCUMENTO: ARTÍCULO TESIS PI OTRO

TÍTULO DEL DOCUMENTO A REVISAR:

APLICACIÓN DE MÉTODOS ELÉCTRICOS DE PROSPECCIÓN PARA CARACTERIZAR ZONAS CONTAMINADAS EN EL ACUÍFERO MONTERREY, CAMPUS UANL

RECOMENDACIONES ADICIONALES:

REALIZAR LAS CORRECCIONES QUE APAREZCAN EN LA TESIS IMPRESA.

*Este documento certifica la corrección DEFINITIVA del trabajo arriba identificado, en los aspectos: ortográfico, metodológico y estilístico.

Nombre y firma de quien corrigió:

Ramongoria

Arq. Ramón Longoria Ramírez
Asesor Profesional de Apoyo

[Signature]

Dr. Gerardo Fajardo San Miguel

Subdirector de Estudios de Posgrado e Investigación
Ciudad Universitaria, 27 de septiembre de 2024



Av. Universidad S/N Cd. Universitaria
San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México, C.P.P. 68455
Tels. (81) 14424400 ext. 4448 | 83294000 ext. 7218, 7234
correo electrónico: spi.fic@uanl.mx

Clave: FOR-SPI-14; Revisión: 02; Página 1 de 1

TÍTULO DE TESIS

**“APLICACIÓN DE MÉTODOS ELÉCTRICOS DE PROSPECCIÓN PARA
CARACTERIZAR ZONAS CONTAMINADAS EN EL ACUÍFERO MONTERREY,
CAMPUS UANL”**

Aprobación de la tesis

**Dr. Héctor de León Gómez
DIRECTOR DE TESIS**

**M.I. Carlos Alán Avendaño Silva
CODIRECTOR DE TESIS**

**Dra. Fabiola Yépez Rincón
EVALUADORA INTERNA**

**Dr. Gerardo de Jesús Fajardo San Miguel
SUBDIRECTOR DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN**

DEDICATORIA

A los que más quiero:

A mi mamá, Clara Isela Villalobos Mancha, por nunca dejarme sola y ser mi mejor amiga, siempre estaré para ti; a mi papá, Carlos Gerardo Medellín Villanueva por todo su apoyo. Este logro es para ustedes. Gracias por creer en mí, estoy muy orgullosa por ser su hija.

A mi hermano, Gerardo Medellín Villalobos, por las risas compartidas, siempre cuentas conmigo, estoy feliz de ser tu hermana mayor.

A mis tías, Blanca Idalia Villalobos Mancha, Elva Laura Villalobos Mancha y Norma Leticia Villalobos por siempre apoyarme y por creer en mí.

A mis abuelos, Francisca Mancha Cázares, Zeferino Medellín Torres, Rodrigo Villalobos Rodríguez y Estela Villanueva Gómez †, siempre están en mi corazón.

A Karenly Sosa, por ser una gran amiga y siempre estar ahí para mí.

A Rocky.

AGRADECIMIENTOS

A la Facultad de Ingeniería Civil por la oportunidad, al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) por el apoyo económico brindado durante el desarrollo de mis estudios.

Al Dr. Héctor de León Gómez y al M.H. Carlos Alán Avendaño Silva, gracias a ambos por el interés al asesorarme, su paciencia, apoyo y valiosas observaciones.

Al Departamento de Geohidrología y Geofísica, Geotecnia y al Laboratorio de Investigación e Innovación en Materiales de Construcción, y a todo el personal por todo el apoyo brindado.

A la M.C. Mariana Pérez por sus consejos para la elaboración de este trabajo, gracias por ser una muy buena amiga y los bonitos recuerdos. Al Ing. Luis Eduardo Arista por todo su apoyo y su disposición para ayudarme. A Adriana y a Yesenia por su ayuda para los detalles finales.

Al comité evaluador del presente trabajo de investigación, la Dra. Fabiola Yépez Rincón y el Dr. Carlos Castillo Zacarías, muchas gracias por todo su apoyo y sus valiosas sugerencias.

A Yesenia Jurado, a pesar de la distancia sé que siempre cuento contigo, a Briz Pineda por todos los buenos momentos juntas y por ayudarme, a Cristina Torres por los buenos momentos. Las quiero mucho, estoy feliz de coincidir con ustedes.

A las geocientíficas Mariana y Linda, por crear buenos recuerdos juntas y por todas las risas compartidas.

A las personas con las que coincidí estos dos años: Paola, Angela, Daniel, Arista, Adriana, Ilse, Julián, Francisco, Alán, Carlos, Dariela, Doña Blanquita, Lizbeth, compartí muy buenos momentos con todos, gracias.

A los profesores de posgrado por sus enseñanzas y compartir sus valiosos conocimientos.

A la vida por lo afortunada que soy, a las plantas, a la música de Taylor Swift, de Seventeen y a los libros de Ali Hazelwood.

RESUMEN

Karla Isela Medellín Villalobos

Fecha de Graduación: 16 de octubre de 2024

Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ingeniería Civil

Título del estudio: Aplicación de métodos eléctricos de prospección para caracterizar zonas contaminadas en el acuífero Monterrey, Campus UANL.

Número de páginas: 122

Candidata para el Grado de Maestría en
Ciencias con Orientación en Ingeniería Ambiental

Área de Estudio: Ingeniería Ambiental

Propósito y método del estudio: La calidad del agua subterránea en el campus de Ciudad Universitaria (CU) de la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL) ha sido afectada significativamente por la contaminación industrial de las empresas metalúrgicas colindantes. Al noreste del campus, en la zona del Instituto de Ingeniería Civil, se reportó un afloramiento de escorias en el subsuelo, lo cual representa un impacto ambiental negativo hacia el acuífero de Monterrey, campus CU-UANL. La presente investigación representó el primer estudio geofísico en el campus, cuyo objetivo principal fue identificar y determinar la distribución de las escorias en el área del Instituto de Ingeniería Civil, utilizando el método eléctrico de prospección: tomografía de resistividad eléctrica 2D y la geología local. Para cumplir los objetivos, se realizaron seis líneas geofísicas en la zona de estudio. Para asociar las resistividades obtenidas de cada perfil con los materiales geológicos, se elaboraron perfiles estratigráficos y modelos tridimensionales, con la integración de estos datos, se desarrollaron modelos geológicos-geofísicos. También, se determinó la composición química de una muestra de escoria del sitio investigado, mediante fluorescencia de rayos X (FRX).

Contribuciones y conclusiones: Como resultados principales, se obtuvieron anomalías altamente resistivas, con valores máximos de 522 Ω m, 902 Ω m y 888 Ω m que no corresponden a los materiales característicos del sitio de estudio, por lo tanto, estas anomalías resistivas se asocian con los materiales de escoria identificados en los perfiles estratigráficos. Además, a partir de la composición química se concluyó que la muestra es una escoria metalúrgica, del tipo producido en la fabricación de acero. Los modelos geológicos-geofísicos permitieron identificar la presencia de material de escoria en la zona no saturada. Dado que se identificaron elementos potencialmente tóxicos en la muestra de escoria, estos compuestos se pueden infiltrar en el agua subterránea, afectando la calidad del acuífero. Esta investigación es fundamental para desarrollar futuras estrategias efectivas de manejo sostenible y conservación de la calidad del subsuelo y el agua subterránea en el campus de CU-UANL, y establece una base para futuros estudios relacionados con la evaluación de contaminantes del acuífero causados por escorias.

ABSTRACT

Purpose and method of the study:

The quality of groundwater at the Ciudad Universitaria (CU) campus of the Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL) has been significantly affected by industrial pollution from neighboring metallurgical companies. To the northeast of the campus, throughout the Institute of Civil Engineering, an outcrop of slag was reported in the subsoil, which represents a negative environmental impact on the Monterrey aquifer, CU-UANL campus.

This research represented the first geophysical study on campus, whose main purpose was to identify and determine the distribution of slag throughout the Institute of Civil Engineering, using the electrical prospecting method: electrical resistivity tomography 2D and local geological data.

To achieve this purpose, six geophysical lines were carried out in the study area. To associate the resistivities obtained from each profile with the geological materials, stratigraphic profiles and three-dimensional models were developed. Geological-geophysical models were developed from the integration of resistivity values with the stratigraphic profiles. Additionally, the chemical composition of a slag sample from the investigated site was determined by X-ray fluorescence (XRF).

Contributions and conclusions:

The main outcome showed highly resistive anomalies, with maximum values of 522 Ω m, 902 Ω m and 888 Ω m that do not correspond to the characteristic materials of the study site; therefore, these highly resistive anomalies are associated with the slag materials identified in the stratigraphic profiles. In addition, from the chemical composition it was concluded that the sample is a metallurgical slag, of the type produced in the manufacture of steel. The geological-geophysical models allowed the presence of slag to be identified in the unsaturated zone. Since potentially toxic elements were identified in the slag sample, these compounds may infiltrate groundwater, affecting the quality of the aquifer.

This research is critical to developing future effective strategies for sustainable management and conservation of subsoil and groundwater quality on the CU-UANL campus and establishes a foundation for future studies related to the assessment of aquifer contaminants caused by slag.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CAPÍTULO 1	1
GENERALIDADES	1
1.1 INTRODUCCIÓN	1
1.2 ANTECEDENTES	2
1.3 JUSTIFICACIÓN	8
1.4 HIPÓTESIS	9
1.5 OBJETIVOS	9
CAPÍTULO 2	10
DESCRIPCIÓN DEL SITIO DE ESTUDIO	10
2.1 ÁREA DE ESTUDIO	10
2.2 FISIOGRAFÍA	12
2.3 HIDROLOGÍA	13
2.4 GEOLOGÍA	14
2.5 HIDROGEOLOGÍA	17
CAPÍTULO 3	19
MARCO TEÓRICO	19
3.1 AGUA SUBTERRÁNEA	19
3.2 ACUÍFEROS	20
3.3 CONTAMINACIÓN DE SUELOS Y ACUÍFEROS	21
3.4 PROSPECCIÓN GEOFÍSICA	23
3.5 MÉTODOS ELÉCTRICOS DE PROSPECCIÓN	24
CAPÍTULO 4	34
METODOLOGÍA	34
4.1 DETERMINAR LA UBICACIÓN DE LAS LÍNEAS GEOFÍSICAS	34
4.2 ADQUISICIÓN DE DATOS GEOELÉCTRICOS	41
4.3 PROCESAMIENTO DE DATOS	49
4.4 MODELOS DE INTERPRETACIÓN GEOLÓGICOS-GEOFÍSICOS	50
4.5 CORRELACIONAR CON EVIDENCIAS DE CONTAMINANTES EN LA ZONA DE ESTUDIO	51

CAPÍTULO 5	55
RESULTADOS Y DISCUSIONES	55
5.1 PERFIL GEOFÍSICO 1	55
5.2 PERFIL GEOFÍSICO 2	60
5.3 PERFIL GEOFÍSICO 3	69
5.4 PERFIL GEOFÍSICO 4	78
5.5 PERFIL GEOFÍSICO 5	81
5.6 PERFIL GEOFÍSICO 6	83
5.7 COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LA MUESTRA DE ESCORIA	86
CAPÍTULO 6	89
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	89
6.1 CONCLUSIONES	89
6.2 RECOMENDACIONES	90
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	91
ANEXO 1: SONDEOS CAMPO FOOTBALL-IIC	103
ANEXO 2: SONDEOS GRADAS ÁREA-DEPORTIVA DEL IIC	111
ANEXO 3: PSEUDOSECCIONES Y SECCIÓN DE RESISTIVIDAD	119

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Usos del agua en Nuevo León durante el 2022. Adaptado de CONAGUA (2024).	2
Figura 2. Usos del agua en el AMM durante el 2022. Adaptado de CONAGUA (2024).	3
Figura 3. Condición de sequía en el estado de Nuevo León, con base en el monitor de sequía del Servicio Meteorológico Nacional de la CONAGUA, con corte al 31 de diciembre de 2022. Adaptado de CONAGUA (2023).	4
Figura 4. Material de escoria en el Instituto de Ingeniería Civil (García, 2017). Fotografía tomada por Dr. Héctor de León Gómez, 2017.	7
Figura 5. Presencia de oxidación en el campus de CU-UANL (Pérez, 2019).	8
Figura 6. Ubicación del área de estudio dentro del campus de CU de la UANL. Generado en Google Earth (2024).	10
Figura 7. Área de estudio: zona del Instituto de Ingeniería Civil. Generado en Google Earth (2024).	11
Figura 8. Industrias metalúrgicas alrededor del campus de CU de la UANL. Adaptado de Pérez (2022). Generado en Google Earth (2024).	12
Figura 9. Ubicación de la cuenca Río Bravo-San Juan (Vázquez, 2023).	14
Figura 10. Sección del perfil estratigráfico realizado en Av. Pedro de Alba por Pérez (2019) y De León (2019).	16
Figura 11. Litología del campus de CU-UANL con la ubicación de las escorias reportadas por García (2017) y los estratos oxidados reportados por Pérez (2019), Silva et al. (2015), Pérez (2022).	16
Figura 12. Ubicación del acuífero de Monterrey (CONAGUA, 2024).	17
Figura 13. Cartas piezométricas del acuífero Monterrey, campus CU-UANL, del año 2016 al 2021. Elaboradas por Pérez (2022), García (2017) y De León (2019).	18
Figura 14. Distribución del agua subterránea (Tarbuck y Lutgens, 2013).	19
Figura 15. Tipos litológicos de acuíferos: a) acuífero de poros, b) acuífero de grietas, c) acuífero kárstico. Adaptado de Werner (1996).	20
Figura 16. Ejemplos de fuentes contaminantes del agua subterránea. Adaptado de British Geological Survey (2022).	22
Figura 17. Definición básica de resistividad a lo largo de un bloque de lado L con una corriente I aplicada y una caída de potencial entre las caras opuestas (V), (Reynolds, 2011).	25
Figura 18. Arreglos electródicos principales de cuatro electrodos: a) Schlumberger, b) Wenner, c) dipolo-dipolo. Adaptado de Everett (2013) y AGI (2017).	28

Figura 19. Representación gráfica de la adquisición de datos con la técnica tomografía eléctrica a partir del arreglo Schlumberger. Adaptado de Sikah et al. (2016).	29
Figura 20. Representación gráfica de la adquisición de datos con la técnica tomografía eléctrica a partir del arreglo Wenner. Adaptado de Fehdi et al. (2014).	30
Figura 21. Representación gráfica de la adquisición de datos con la técnica tomografía eléctrica a partir del arreglo dipolo-dipolo. Adaptado de Ariyanto et al. (2019).	30
Figura 22. Arreglo de prismas rectangulares utilizado en el modelo 2D (Loke y Barker, 1996).	32
Figura 23. Esquema metodológico.	34
Figura 24. Presencia escorias: a) excavación ubicada contigua a la cabaña: “Madriguera del Castor”, b) interior de la excavación con escorias, c) estrato conformado por escorias. Fotografías por Héctor de León Gómez (2017), García (2017).	35
Figura 25. Presencia escorias: a) excavación ubicada contigua al edificio de aulas, b) interior de la excavación, c) estrato conformado por escorias. Fotografías por Héctor de León Gómez (2017), García (2017).	36
Figura 26. Escorias ubicadas por la cabaña: “Madriguera del Castor”. Fotografías por Héctor de León Gómez (2017), García (2017).	37
Figura 27. Escorias ubicadas por el edificio de aulas. Fotografías por Héctor de León Gómez (2017), García (2017).	37
Figura 28. Ubicación de las líneas geofísicas realizadas y de las evidencias de escoria: fotografías reportadas por García y De León (2017), ubicación de los PCA y sondeos (Instituto de Ingeniería Civil, 2011-2014). Generado en Google Earth (2024).	38
Figura 29. Material de escoria fuera del área de estudio: a) ubicación de la zona, al lado del Instituto de Ingeniería Civil, b) escorias dispersas, c) escoria de menor tamaño, d) escoria oxidada, e) fragmento metálico oxidado adherido a este material.	40
Figura 30. Equipo SuperSting R1 con sus dispositivos. 1. Panel frontal. 2. Switch box. 3. Power supply. 4. Generador de energía.	42
Figura 31. Componentes del equipo SuperSting™ R1. a) Panel frontal: 1. Conectores para los cables que se vinculan a la Switch Box. 2. Conector para enlazar al dispositivo Power Supply. 3. Pantalla de cristal líquido. 4. Teclado; b) Switch Box: 1. Conectores para los cables multi-electrodo AGI; c) Power Supply: 1. Conector que se vincula con el panel frontal. 2. Conector que se enlaza con el generador de energía.	43

Figura 32. Cables multi-electrodo AGI.....	44
Figura 33. Instalación de las líneas geofísicos en campo: a) se colocan las estacas de acero inoxidable a lo largo del perfil, b) se coloca cada cable con una estaca, c) electrodo formado a partir del sensor del cable multi-electrodo y una estaca, d) electrodos formados a largo del perfil, e) se configura el equipo con los parámetros necesarios para la medición.....	45
Figura 34. Equipo Terra Ez Res Pro: 1. Conectores para los electrodos de corriente. 2. Conectores para los electrodos de potencial. 3. Interruptor giratorio para seleccionar la función del equipo. 4. Pantalla de cristal líquido.....	46
Figura 35. Instalación de las líneas geofísicas en campo: a) se conectan los cables al equipo, b) carretes de los dos cables utilizados para inyectar corriente, c) carretes de los dos cables empleados para medir la diferencia de potencial, d) electrodo formado al conectar los cables a la estaca metálica mediante el cable con pinza tipo caimán, e) los cables se conectan a cada estaca de manera manual para la alternancia de electrodos.	47
Figura 36. Líneas geofísicas instaladas en la zona de estudio: a) línea 1, b) línea 2, c) línea 3, d) línea 4, e) línea 5, f) línea 6.....	48
Figura 37. Ejemplo de correlación estratigráfica. Adaptado de Kappus et al. (2011) y Martínez (2018).	51
Figura 38. Muestra de escoria del área de estudio.....	52
Figura 39. Procedimiento de pulverización de la escoria: a) instrumento Esmeril Ryobi triturando la muestra, b) muestras pulverizadas en el Horno Matest, c) muestra pulverizada de la escoria sin oxidación, d) muestra pulverizada de la escoria con oxidación.....	53
Figura 40. Análisis FRX: a) pastilla de la muestra con oxidación, b) pastilla de la muestra sin oxidación, c) equipo utilizado.	54
Figura 41. Ubicación de la línea geofísica 1 y de los pozos: PCA-1, PCA-2, PCA-3 y PCA-4. Generado en Google Earth (2024).....	55
Figura 42. Representación de la estratigrafía de los PCA-1, PCA-2, PCA-3 y PCA-4 reportada por Instituto de Ingeniería Civil (2014).	56
Figura 43. Perfil estratigráfico 1.....	56
Figura 44. Primera representación tridimensional.	57
Figura 45. Modelo de resistividad real del primer perfil geofísico.	58
Figura 46. Modelo geológico-geofísico del primer perfil geofísico.	59
Figura 47. Ubicación de la línea geofísica 2 y de los sondeos: SG-1, SG-3, SC-1 y SC-2. Generado en Google Earth (2024).	60
Figura 48. Representación estratigráfica de los sondeos SC-1, SC-2, SG-1 y SG-3 reportada por Instituto de Ingeniería Civil (2014) y Instituto de Ingeniería Civil (2011).	61

Figura 49. Perfil estratigráfico 2.....	62
Figura 50. Perfil estratigráfico 3.....	64
Figura 51. Perfil estratigráfico 4.....	65
Figura 52. Segunda representación tridimensional.	66
Figura 53. Modelo de resistividad real del segundo perfil geofísico.	67
Figura 54. Modelo geológico-geofísico del perfil geofísico 2.	68
Figura 55. Ubicación de la línea geofísica 3 y de los sondeos: SG-1, SG-2, SG-3 y SG-4. Generado en Google Earth (2024).....	69
Figura 56. Representación de la estratigrafía de los sondeos SG-1,SG-2, SG-3 y SG-4, reportada en los documentos: Sondeos Gradadas-Área Deportiva del IIC (2011).	70
Figura 57. Perfil estratigráfico 5.....	71
Figura 58. Perfil estratigráfico 6.....	73
Figura 59. Perfil estratigráfico 7.....	74
Figura 60. Tercera representación tridimensional.....	75
Figura 61. Modelo de resistividad real del tercer perfil geofísico.	76
Figura 62. Modelo geológico-geofísico del perfil geofísico 3.	77
Figura 63. Ubicación de la cuarta línea geofísica y del aprovechamiento hidráulico PCU-2 para muestreo de agua subterránea. Generado en Google Earth (2024).	78
Figura 64. Modelo de resistividad real del cuarto perfil geofísico.	78
Figura 65. Modelo geológico-geofísico del cuarto perfil geofísico.	80
Figura 66. Ubicación de la línea geofísica 5. Generado en Google Earth (2024).	81
Figura 67. Modelo de resistividad real del quinto perfil geofísico.	81
Figura 68. Modelo geológico-geofísico del quinto perfil geofísico.	83
Figura 69. Ubicación de la línea geofísica 6. Generado en Google Earth (2024).	83
Figura 70. Modelo de resistividad real del sexto perfil geofísico.....	84
Figura 71. Sexto modelo geológico-geofísico.....	85

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Provincias y subprovincias de Nuevo León (Contreras, 2007; INEGI, 2016).....	12
Tabla 2. Ubicación de cada línea geofísica.....	39
Tabla 3. Características de cada línea geofísica.....	41
Tabla 4. Resultados del análisis FRX de la parte con oxidación de la muestra de escoria.....	86
Tabla 5. Resultados del análisis FRX de la parte de la muestra de escoria sin oxidación.	87

NOMENCLATURA Y ABREVIATURAS

m	metro
m ²	metro cuadrado
hm ³	hectómetro cúbico
Ωm	ohmio-metro
V	Voltios
A	Amperios
%	Por ciento
LMP	Límite Máximo Permisible
AMM	Área Metropolitana de Monterrey
SEMARNAT	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
CONAGUA	Comisión Nacional del Agua
INEGI	Instituto Nacional de Estadística y Geografía
SADM	Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey
EPA	Environmental Protection Agency
VKM	Norwegian Scientific Committee for Food and Environment

CAPÍTULO 1

GENERALIDADES

1.1 INTRODUCCIÓN

El agua es fundamental para la vida, con una disponibilidad global de aproximadamente 1386 billones de hm^3 . De este total, el 97.5% es agua salada, mientras que solo el 2.5% es agua dulce. En los últimos años, la demanda de este recurso ha aumentado, debido a la creciente producción de energía y alimentos, así como al abastecimiento de agua potable para una población mundial en constante crecimiento. Además, la contaminación de las fuentes hídricas afecta su calidad, imposibilitando su uso, y a su vez, agravando la escasez de agua (Clarke y King, 2004; SEMARNAT, 2012; CONAGUA, 2024).

El AMM es la segunda zona metropolitana más poblada de México con aproximadamente 5,341,177 habitantes (INEGI, 2020). Por lo tanto, la demanda de los servicios de agua, tanto para el abastecimiento público como para el desarrollo económico, es cada vez mayor. Como resultado, uno de los principales desafíos que afronta esta zona en la actualidad es el suministro de agua potable (Cantú-Martínez, 2023).

Además, otro problema en el AMM es el almacenamiento de agua subterránea, el cual se ha visto afectado por la sobreexplotación y la contaminación de los acuíferos, debido al aumento de las actividades domésticas e industriales. Dado que México es un país con recursos hídricos limitados, las ciudades como el AMM dependen cada vez más del aprovechamiento de las fuentes subterráneas. Por ello, es crucial conservar en buena calidad y proteger los acuíferos de esta zona urbana (Dávila y De León, 2011).

La calidad del agua subterránea en el campus de Ciudad Universitaria (CU) de la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL) se ve afectada por los residuos industriales de las empresas de acero cercanas a la institución. García (2017) y Pérez (2022) reportaron altas concentraciones de iones metálicos como Al^{3+} , Mn^{2+} y Fe^{3+} en el acuífero de esta área, a partir de análisis hidrogeoquímicos. También, se ha reportado la presencia de escorias en el subsuelo al noreste del campus, lo que constituye una fuente de contaminación significativa para el suelo y el acuífero de esta zona. Por ello, es fundamental llevar a cabo investigaciones para identificar la distribución del material de escoria en el campus de CU-UANL.

Los métodos eléctricos de prospección (MEP) son técnicas geofísicas ampliamente utilizadas para identificar zonas contaminadas en el subsuelo, debido a que la presencia de contaminantes altera las propiedades eléctricas del terreno. Por ejemplo, la resistividad eléctrica varía según el tipo de contaminante presente, lo que facilita detectar la distribución de las zonas contaminadas. Una de las principales ventajas de los MEP es que son técnicas no invasivas, es decir, no alteran los materiales del subsuelo, representando un gran beneficio para el medio ambiente. Entre la variedad de técnicas de los MEP, la tomografía de resistividad eléctrica 2D destaca por su capacidad para obtener la distribución bidimensional de la resistividad en el subsuelo, proporcionando una caracterización más precisa de la distribución de los contaminantes (Busquet et al., 1995; Aracil et al., 2003).

La presente investigación tiene como objetivo principal realizar el primer estudio geofísico para identificar material de escoria en la zona del Instituto de Ingeniería Civil, ubicado al noreste del campus de CU-UANL. Para delimitar la extensión horizontal y la profundidad del material de escoria, se utilizará el método eléctrico de prospección: tomografía de resistividad eléctrica 2D.

1.2 ANTECEDENTES

1.2.1 Distribución del agua en Nuevo León

En 2022 la extracción total de agua en Nuevo León fue de 2040 hm³/año, de los cuales, 1137 hm³/año corresponden a las fuentes superficiales y 903 hm³/año a las subterráneas. En la Figura 1 se muestra el consumo de agua (hm³/año) en diversos sectores (agrícola, abastecimiento público e industria autoabastecida) en todo el estado durante el 2022. Por otra parte, en la Figura 2 se pueden observar los consumos de este recurso solamente en el AMM (CONAGUA, 2024).

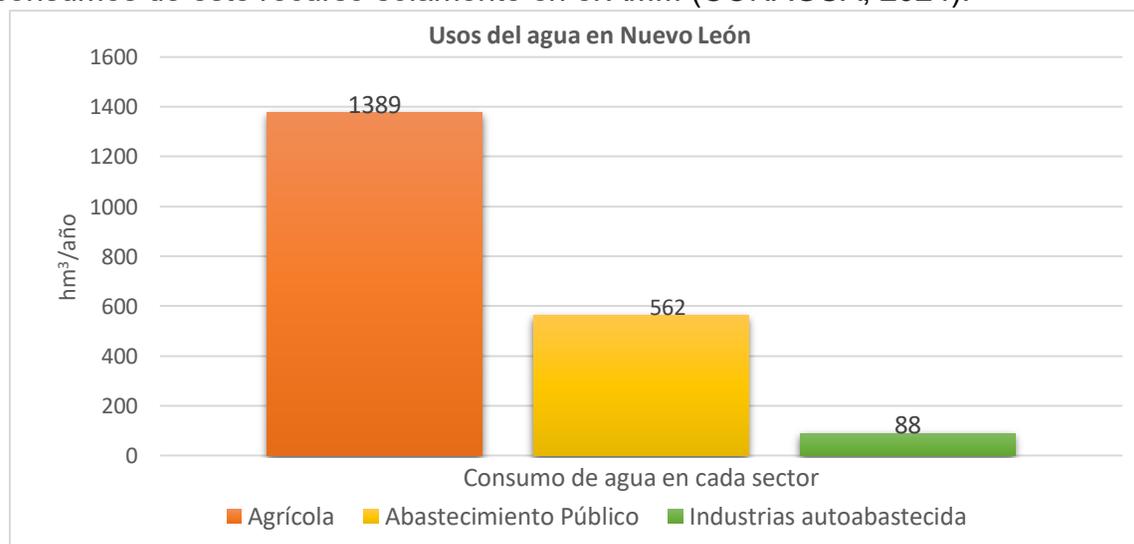


Figura 1. Usos del agua en Nuevo León durante el 2022. Adaptado de CONAGUA (2024).

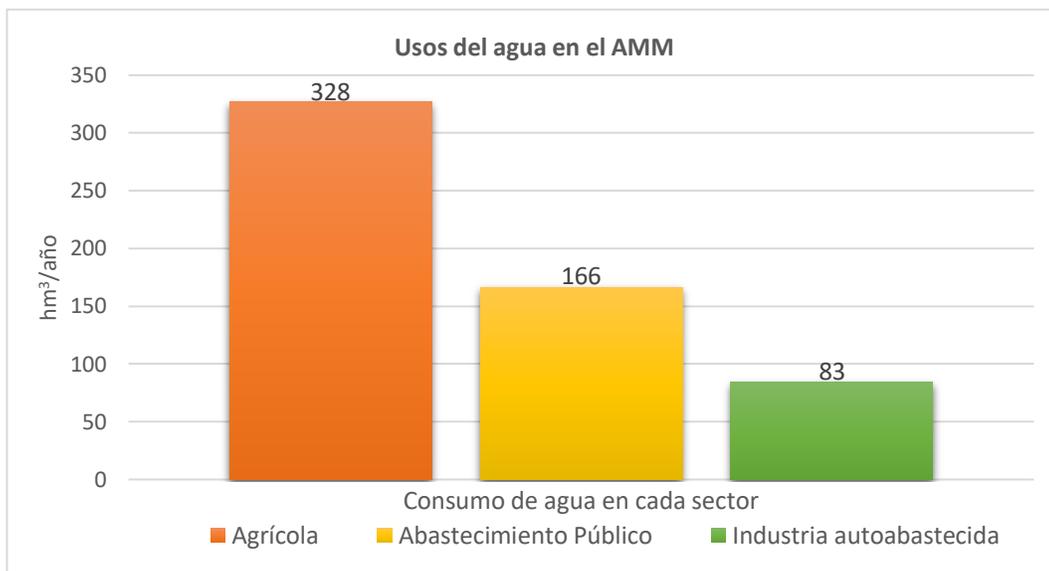


Figura 2. Usos del agua en el AMM durante el 2022. Adaptado de CONAGUA (2024).

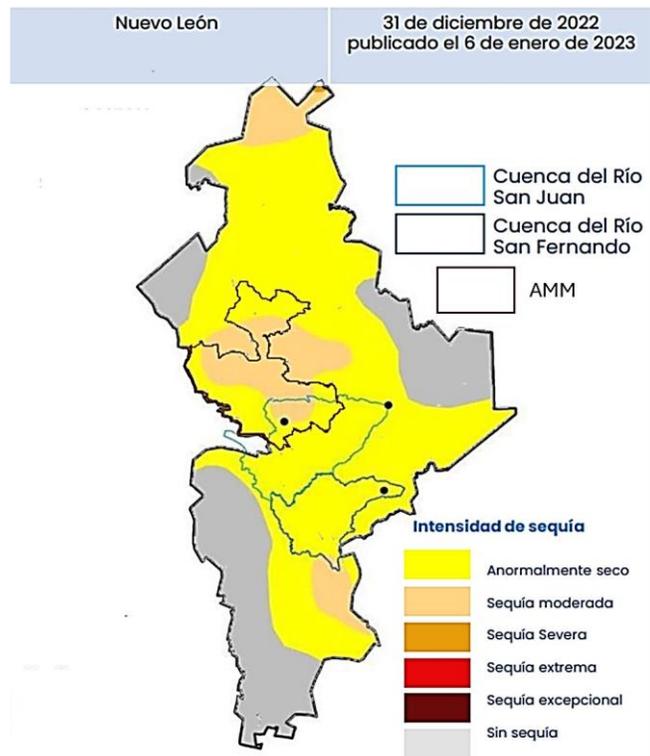
De acuerdo con las gráficas anteriores, el mayor consumo de agua en el estado de Nuevo León se debe a las actividades agrícolas. Además, el consumo estatal de este recurso para la industria autoabastecida es de 88 hm³/año de los cuales 83 hm³/año corresponden al AMM, por lo tanto, esta zona consume el 95% del agua usada para los diversos tipos de industrias en todo el estado (CONAGUA, 2024).

1.2.2 Crisis hídrica en el AMM

En el AMM reside el 92.3% de la población total de Nuevo León, lo cual representa una alta demanda de agua tanto para usos industriales como domésticos. Además, se debe considerar que Nuevo León se localiza en una región semiárida, donde predominan climas secos y semisecos extremos, por lo tanto, la población del estado es sumamente vulnerable ante la escasez y falta de agua (Ortega-Gaucin, 2013; INEGI, 2020; SADM, 2022).

En la Figura 3 se muestran las condiciones de sequía en porcentaje de área en el estado durante el mes de diciembre de 2022, según la CONAGUA (2023). Como se puede observar, el AMM presentaba una condición anormalmente seca, así como también una sequía moderada. Por otra parte, solamente el 25.6% de la superficie total de Nuevo León no presentaba afectaciones, mientras que el 60.4% presentaba un nivel anormalmente seco, el 13.9% una sequía moderada y el 0.1% una severa.

Estas condiciones de sequía, así como las escasas precipitaciones pluviales, han causado la disminución en los niveles de almacenamiento de las presas y acuíferos del estado.



Estado	Porcentaje de área (%) DICIEMBRE 2022					
	Sin afectaciones	D0 Anormalmente Seco	D1 Sequía moderada	D2 Sequía severa	D3 Sequía extrema	D4 Sequía Excepcional
N.L.	25.6	60.4	13.9	0.1	0.0	0.0

Figura 3. Condición de sequía en el estado de Nuevo León, con base en el monitor de sequía del Servicio Meteorológico Nacional de la CONAGUA, con corte al 31 de diciembre de 2022. Adaptado de CONAGUA (2023).

El suministro de agua para el AMM depende de fuentes superficiales, constituidas por tres presas de almacenamiento: La Boca, Cerro Prieto y El Cuchillo; así como también de fuentes subterráneas conformadas por 39 pozos profundos de 700 a 1000 m de profundidad en los acuíferos Buenos Aires, Mina y AMM; por 43 pozos someros de máximo 100 m de profundidad; un manantial (La Estanzuela); tres túneles (Cola de Caballo I y II y San Francisco) y una galería filtrante en La Huasteca (SADM, 2022).

En 2022 las fuentes superficiales que constituyen más de la mitad del abastecimiento de agua para el AMM presentaban volúmenes críticos de almacenamiento. La presa Cerro Prieto tenía sólo un 2% de su capacidad total, así como también la presa La Boca se encontraba a un 8% y el Cuchillo al 42% de su capacidad en ese año. Esto tuvo un severo impacto en la vida diaria de la población del área metropolitana, debido a que en la mayoría de los sectores de esta zona se

realizaron recortes diarios de los servicios de agua (Cantú-Martínez, 2023). Por otra parte, según reportes de SINA-CONAGUA (2022), los principales acuíferos que abastecen al AMM: Campo Buenos Aires y Mina pertenecen a los 157 acuíferos sobreexplotados de México.

El problema actual del agua en el AMM es una sequía de carácter hidrológico, debido a que este tipo de sequías se presentan cuando hay una deficiencia en el volumen de las fuentes superficiales o subterráneas, con respecto a los niveles que se consideran normales en una determinada región y a la falta de precipitaciones causadas por el cambio climático asociado con el fenómeno de El Niño y/o La Niña (Wilhite y Glantz, 1985; Marcos, 2001; Cantú-Martínez, 2022).

Esta situación se debe a diversos factores, como la alta vulnerabilidad de esta zona metropolitana ante condiciones de sequía, la sobreexplotación de los acuíferos, la falta de mantenimiento de la infraestructura hidráulica, así como a los altos consumos *per cápita* por parte de la sociedad (Cantú-Martínez, 2022).

1.2.3 Investigaciones previas a nivel nacional

Con la finalidad de identificar distintos contaminantes en el subsuelo, que al infiltrarse pueden contaminar los acuíferos, se han realizado múltiples estudios ambientales en diversos estados de México aplicando métodos eléctricos de prospección, también denominados métodos geoelectrónicos. A continuación, se presentan brevemente algunos de estos estudios, así como investigaciones que reportan evidencias de tiraderos industriales en el AMM.

Limón (2000), definió la situación ambiental de los residuos peligrosos en Nuevo León. En esta investigación se reportaron tiraderos industriales en diversas zonas del AMM, donde también se depositaban cantidades no cuantificadas de escorias de distintos tipos de fundición (Antigua industria siderúrgica de fundiciones de hierro y acero de Fundidora Monterrey).

Cisneros (2010), realizó el primer estudio geofísico en el relleno sanitario municipal de Linares, Nuevo León, a partir del método geoelectrónico de sondeos eléctricos verticales. En esta investigación se identificaron bajas resistividades entre 25 y 50 Ωm aproximadamente, las cuales se asociaron con material directamente afectado por flujos superficiales provenientes de lixiviados del relleno sanitario.

Castro et al. (2013), realizaron una caracterización geoquímica y geofísica de un sitio contaminado por hidrocarburos en el estado de Puebla. Se realizó un análisis químico a 42 muestras de suelo y como método complementario se utilizó la tomografía de resistividad eléctrica, realizando ocho perfiles geofísicos. Al

correlacionar los dos métodos empleados, se concluyó que las anomalías de alta resistividad reportadas (mayores a 600 Ωm) a profundidades someras, se deben a contaminación reciente por hidrocarburos en un material de relleno compactado en el sitio.

Reyes-Gutiérrez et al. (2013), evaluaron la calidad del agua subterránea a partir de un estudio hidroquímico y geoelectrico de un tiradero a cielo abierto en el municipio de Mexicaltzingo, ubicado en el Estado de México. Se utilizaron las técnicas de sondeos eléctricos verticales y tomografía de resistividad eléctrica, mediante las cuales se identificaron anomalías de baja resistividad asociadas con la pluma de lixiviados, además se obtuvieron altos valores de sólidos disueltos totales en los análisis hidroquímicos, por lo cual, se concluyó que el agua subterránea en la zona del basurero es inapropiada para uso doméstico.

Legorreta (2016), identificó plumas de contaminación alrededor del ex-relleno sanitario de la ciudad de Ensenada, Baja California, utilizando el método geoelectrico de polarización inducida. Se reportaron anomalías de alta cargabilidad-baja conductividad, asociadas con materiales contaminantes orgánicos, así como también se detectó una pluma contaminante asociada con compuestos resistivos, con valores de 150 a 500 Ωm .

Martínez (2018), realizó la caracterización geológica del Río Santa Catarina, en Nuevo León. En esta investigación se identificaron dos zonas de tiraderos de escoria a lo largo del área de estudio en el Río Santa Catarina, en los municipios de Monterrey y Guadalupe.

1.2.4 Investigaciones previas en el campus de CU-UANL

El campus de Ciudad Universitaria de la UANL se encuentra en una zona industrial, debido a esto, se han realizado diversos estudios hidrogeoquímicos e hidrogeológicos con el objetivo de evaluar la calidad química del agua subterránea y caracterizar el acuífero presente en esta área. En esta sección se describen brevemente los trabajos de investigación realizados en esta zona.

Hernández (1999) caracterizó el acuífero de la zona de estudio. En esta investigación se determinó que las rocas que conforman esta zona pertenecen geocronológicamente al Cretácico Superior, Terciario Superior y Cuaternario. Además, se estableció que el acuífero en estudio está localizado en la formación Méndez.

En 2015, Silva et al. realizaron un estudio de las microcuencas hidrológicas urbanas y los perfiles hidroestratigráficos en el campus, en el cual se concluyó que la parte superior del subsuelo (cerca de la superficie) de esta zona se compone de arcilla combinada con caliche, gravas, arenas y limos.

García (2017) llevó a cabo un análisis hidrogeológico e hidrogeoquímico en el acuífero de Monterrey, campus CU-UANL, en el cual reportó un afloramiento de materiales de escoria al noreste del campus, en el Instituto de Ingeniería Civil, (Figura 4) con una profundidad aproximada de 2 m.



Figura 4. Material de escoria en el Instituto de Ingeniería Civil (García, 2017). Fotografía tomada por Dr. Héctor de León Gómez, 2017.

En 2019, Pérez realizó un perfil estratigráfico dentro del campus, en Av. Pedro de Alba, donde se reportó la presencia de oxidación entre gravas y conglomerados, lo cual indica contaminación por metales, como se observa en la Figura 5. En este trabajo de investigación también se reportaron altas concentraciones de iones metálicos en el acuífero de la zona de estudio, al realizar análisis hidrogeológicos e hidrogeoquímicos. Se concluyó que los contaminantes metálicos encontrados en el agua subterránea generan daños a las cimentaciones del campus (la Torre de

Rectoría y del Estadio Universitario), en forma de corrosión del acero y degradación del concreto.



Figura 5. Presencia de oxidación en el campus de CU-UANL (Pérez, 2019).

Pérez (2022) evaluó los contaminantes en el agua subterránea del sitio de estudio al realizar dos campañas de muestreo de agua en enero y junio de 2021, en siete pozos dentro del campus. En el primer muestreo, el Fe^{3+} presentó altas concentraciones que superaron los LMP en el pozo cercano a la Facultad de Ingeniería Civil, según la norma *NOM-250-SSA1-2014*. En el segundo muestreo se presentaron concentraciones cercanas a los LMP de este ion metálico en todos los pozos analizados. También se realizó un análisis de suelo, en el cual se reportaron más de 20 iones metálicos que superaron los LMP.

1.3 JUSTIFICACIÓN

El acuífero de Monterrey, campus CU-UANL ha sido significativamente afectado por la contaminación industrial proveniente de las empresas metalúrgicas colindantes. Al noreste del campus, en la zona del Instituto de Ingeniería Civil, se han reportado diversas evidencias de este tipo de contaminación, principalmente, el afloramiento de materiales de escoria. Estos residuos industriales representan una fuente de contaminación que puede alterar las propiedades fisicoquímicas del suelo y del acuífero del campus.

Por lo tanto, es fundamental identificar la distribución de las escorias en el área del Instituto de Ingeniería Civil. Para ello, en el desarrollo del presente estudio se aplicará la técnica de tomografía de resistividad eléctrica 2D, que forma parte de los métodos eléctricos de prospección (MEP). Esta técnica facilitará la identificación de la presencia de escorias en el subsuelo, así como la delimitación de su extensión horizontal y su profundidad mediante mediciones de resistividad eléctrica.

La importancia de este trabajo de investigación radica en identificar y obtener la geometría de la distribución de las zonas contaminadas (escorias) en el acuífero de Monterrey, campus CU-UANL, específicamente en las áreas cercanas al Instituto de Ingeniería Civil, a través de métodos geofísicos (MEP).

1.4 HIPÓTESIS

La actividad industrial cercana al campus CU-UANL, en la zona del Instituto de Ingeniería Civil, causa zonas contaminadas (escorias), que deberán ser identificadas mediante la aplicación del método eléctrico de prospección: tomografía de resistividad eléctrica 2D, para determinar la geometría de su distribución.

1.5 OBJETIVOS

Objetivo general

Identificar material de escoria en el acuífero de Monterrey, campus CU-UANL, en la zona del Instituto de Ingeniería Civil, mediante el método eléctrico de prospección: tomografía de resistividad eléctrica 2D y caracterizar la geometría de su distribución.

Objetivos específicos

1. Adquirir datos mediante la técnica de tomografía de resistividad eléctrica 2D, utilizando los arreglos electródicos Schlumberger y Wenner (MEP).
2. Desarrollar modelos de la distribución espacial de la resistividad del subsuelo en la zona de estudio.
3. Realizar modelos geológicos-geofísicos, con base en los datos de resistividad obtenidos y correlacionarlos con los materiales geológicos presentes en la zona.
4. Correlacionar los valores de resistividad con las evidencias de contaminación en la zona: el afloramiento de escorias.

CAPÍTULO 2

DESCRIPCIÓN DEL SITIO DE ESTUDIO

2.1 ÁREA DE ESTUDIO

La zona del Instituto de Ingeniería Civil se localiza en el noreste del campus de CU de la UANL (Figura 6). El campus se encuentra dentro del AMM, en los límites del municipio de Monterrey y de San Nicolás de los Garza, colinda al norte con Av. Palacio de Justicia, al este con Av. Universidad, al oeste con Av. Manuel L. Barragán y al sur con el antiguo Campo Militar.



Figura 6. Ubicación del área de estudio dentro del campus de CU de la UANL. Generado en Google Earth (2024).

La zona del Instituto de Ingeniería Civil se compone de un área deportiva, edificios de aulas, laboratorio de topografía y de hidráulica, del Centro de Investigación e Innovación de Materiales de la Construcción (CIIMAC), así como de diversas áreas verdes. Además, colinda al norte con el arroyo del Topo Chico (Figura 7).



Figura 7. Área de estudio: zona del Instituto de Ingeniería Civil.
Generado en Google Earth (2024).

2.1.1 Problema industrial

El campus de CU de la UANL está ubicado en una zona industrial, rodeado principalmente de empresas metalúrgicas, como se puede observar en la Figura 8. Debido a esta ubicación, los residuos metálicos de las industrias cercanas se depositan en los suelos de la zona y se infiltran en el acuífero, deteriorando la calidad de este recurso (Pérez, 2022). Además, en los últimos años se han reportado evidencias de contaminación industrial, destacando el afloramiento de escorias en el área de estudio y las altas concentraciones de iones metálicos en el suelo y el agua subterránea del campus (García, 2017; Pérez, 2022).

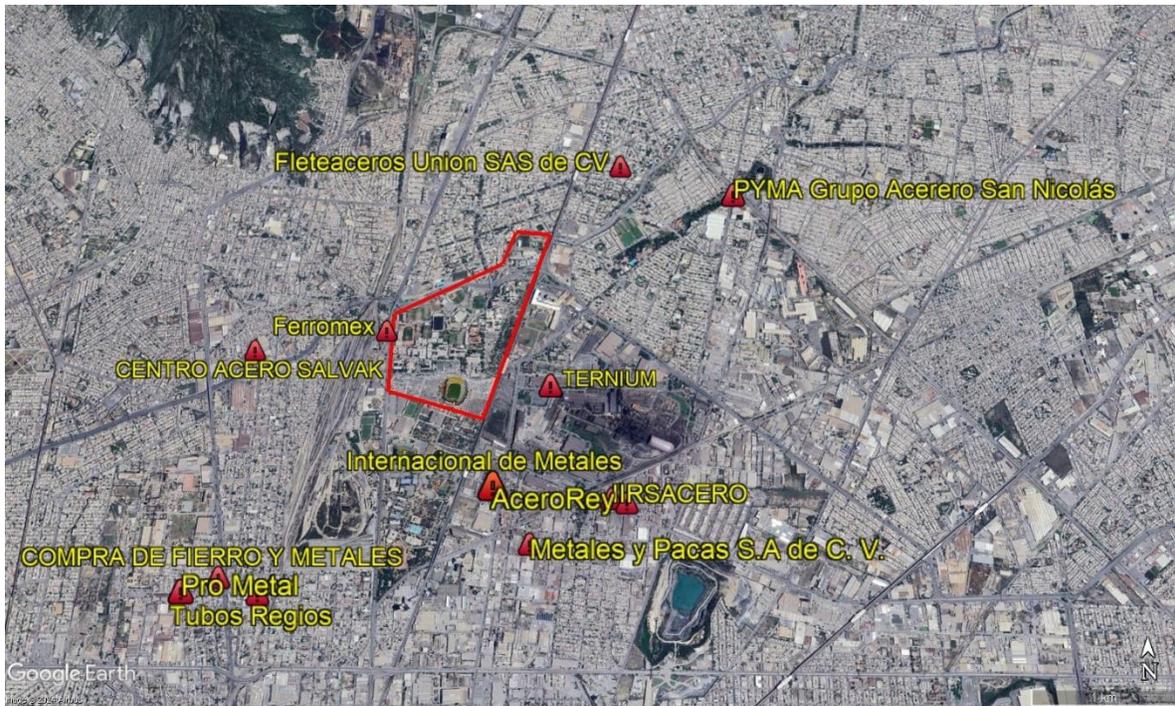


Figura 8. Industrias metalúrgicas alrededor del campus de CU de la UANL.
Adaptado de Pérez (2022). Generado en Google Earth (2024).

2.2 FISIOGRAFÍA

Con base en sus características geomorfológicas, el territorio mexicano se divide en 15 provincias fisiográficas. El estado de Nuevo León está conformado por tres provincias: la Sierra Madre Oriental, Llanura Costera del Golfo Norte y la Gran Llanura Norteamericana, las cuales están conformadas, a su vez, por subprovincias. En la tabla 1 se describen las subprovincias presentes en el estado de Nuevo León (INEGI, 2016).

Tabla 1. Provincias y subprovincias de Nuevo León (Contreras, 2007; INEGI, 2016).

Provincia	Subprovincia
Sierra Madre Oriental	Sierras y Llanuras Coahuilenses
	Pliegues Saltillo-Parras
	Sierras Transversales
	Gran Sierra Plegada
	Sierras y Llanuras Occidentales
Gran Llanura de Norteamérica	Llanuras de Coahuila y Nuevo León
Llanura Costera del Golfo	Llanuras y Lomeríos

La Sierra Madre Oriental es la cadena montañosa más elevada en el norte y oriente de México. Abarca más del 49% de la superficie del estado de Nuevo León, uno de los rasgos más destacados de esta provincia es la flexión a la altura de la ciudad de Monterrey, a partir de la cual adquiere una orientación general Este-Oeste, al norte de esta flexión los elementos orográficos se vuelven más espaciados y las estructuras geológicas menos estrechas, además, el relieve disminuye abruptamente al oriente, hasta constituirse en la Llanura Costera del Golfo. Por otra parte, la Gran Llanura de Norteamérica conforma el 35.08% de la superficie estatal, se caracteriza por amplias llanuras planas y cubiertas de vegetación de pradera (Contreras, 2007).

El municipio de San Nicolás de los Garza (municipio donde se ubica el área de estudio) se localiza en la provincia Llanura Costera del Golfo que abarca solamente el 15.07% de la superficie estatal, se caracteriza por una pequeña sierra baja (cerro de las Mitras), lomeríos suaves y llanuras de extensión considerable (Alva, 1997; Contreras, 2007).

2.3 HIDROLOGÍA

México se divide en 37 regiones hidrológicas, cada una está conformada por al menos una cuenca hidrográfica. Nuevo León está constituido por cuatro regiones hidrológicas (RH): RH24 Bravo-Conchos, RH25 San Fernando-Soto La Marina, RH26 Pánuco y RH37 El Salado (CONAGUA, 2016). El área de estudio está localizada en la RH 24 Bravo-Conchos, en la cuenca hidrográfica RH 24B Río Bravo-San Juan, la cual se ubica al noreste del territorio mexicano dentro de los estados de Coahuila de Zaragoza, Nuevo León y Tamaulipas (Figura 9), (Cantú et al., 2018; Vázquez, 2023).

La red de drenaje natural del campus de CU de la UANL presenta una tendencia a fluir de SW a NE y forma parte de la cuenca del arroyo del Topo Chico, actualmente este arroyo está canalizado desde la avenida Bernardo Reyes, hasta su desembocadura en el Río Pesquería, el cual, a su vez, desemboca en el Río Bravo (Hernández, 1999).

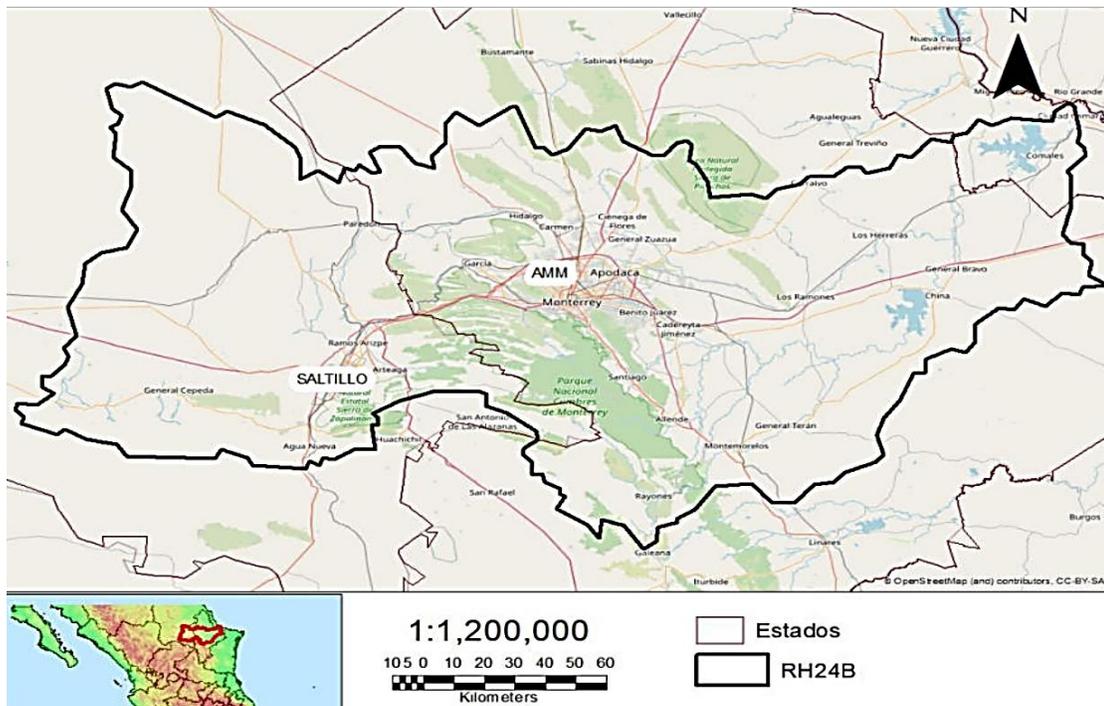


Figura 9. Ubicación de la cuenca Río Bravo-San Juan (Vázquez, 2023).

2.4 GEOLOGÍA

2.4.1 Geología regional

Nuevo León está localizado en el Noreste de México, donde predomina la presencia de rocas mesozoicas plegadas, que yacen sobre un basamento Paleozoico y Precámbrico (Morán-Zenteno, 1984).

La Sierra Madre Oriental está compuesta principalmente de rocas sedimentarias marinas evaporíticas, clásticas y calcáreas de origen Mesozoico. Estructuralmente, Campa y Coney (1983) denominaron a la Sierra Madre Oriental como el cinturón de pliegues y cabalgaduras mexicano, esto debido a que su estructura tectónica se compone esencialmente de pliegues y fallas inversas, este cinturón se formó diacrónicamente del oeste hacia el este entre el Turoniano y el Eoceno Medio, por la acreción de terrenos de origen oceánico y esfuerzos transferidos durante la somerización del ángulo de subducción bajo la placa de Norteamérica en el norte de México (Michalzik, 1988; Goldhammer et al., 1991; Goldhammer, 1999; Chávez Cabello, 2016).

El paquete sedimentario que compone a la Sierra Madre Oriental fue depositado durante el desarrollo de un margen pasivo relacionado con la formación del Golfo de México. A partir del Triásico Tardío hasta el Berriasiano en el NE de México, inició la fragmentación de Pangea que condujo a la generación de fosas y pilares que fueron paulatinamente invadidos por el mar y que controlaron ampliamente las facies sedimentarias marinas a partir del Calloviano, depositándose primero gruesas secuencias de evaporitas y posteriormente rocas calcáreo-arcillosas, calcáreas y finalmente clástico-calcáreas durante la regresión marina regional causada por el inicio de la orogenia Laramide en el norte de México (Padilla y Sánchez, 1982; Goldhammer et al., 1991; Michalzik y Schumann, 1994; Goldhammer, 1999; Chávez Cabello et al., 2007).

De acuerdo con Alva et al. (1998), en el AMM predominan sedimentos fluviales con escasos afloramientos de lutitas de la formación Méndez, la cual está conformada de lutitas y margas de color marrón claro-verdoso y gris con estratificación laminar, sobre esta formación afloran capas delgadas de depósitos sedimentarios fluviales del cuaternario, conformados por gravas, arenas, arcillas y limos.

La geología que aflora en la zona que comprende el acuífero de Monterrey o AMM está constituida por un gran paquete de material aluvial y rocas sedimentarias principalmente calcáreas (CONAGUA, 2024).

2.4.2 Geología local

El campus de CU de la UANL presenta un espesor de suelo entre 21 y 25 m, donde los materiales se presentan de la siguiente manera: sobre la roca base fracturada de tipo lutítico yacen lentes de material predominantemente arcilloso, con espesores de hasta 8 m. Encima se encuentran lentejones de gravas y materiales calizos significativamente lixiviados con empaquetamiento comúnmente apretado, por lo tanto, la matriz de naturaleza limo-arenosa con algo de arcilla, es rala o pobre, y junto con el cementante calcáreo se distribuye rellenando espacios y poros entre las gravas concediendo, según la cantidad de cementante, diferentes grados de cementación, el espesor de estos lentejones oscila entre 2.5 y 22 m (Hernández, 1999).

Pérez (2019) y De León (2019), realizaron un perfil estratigráfico de aproximadamente 30 m de longitud y 5 m de profundidad, dentro del campus de CU-UANL, en una parte de una trinchera en construcción para drenaje pluvial en la Av. Pedro de Alba. En la Figura 10 se puede observar una parte de este perfil, a partir del cual se concluyó que el campus se localiza sobre un depósito compuesto por gravas parcialmente cementadas, arenas, arcillas y limos.



Figura 10. Sección del perfil estratigráfico realizado en Av. Pedro de Alba por Pérez (2019) y De León (2019).

En la Figura 11 se muestra un perfil estratigráfico del campus de CU de la UANL elaborado por Silva et al. (2015), en el cual se puede observar que la parte superior del suelo de esta zona presenta un dominio de arcilla combinada con caliche, gravas, arenas y limos, así como a mayor profundidad, se reportó un estrato intermedio formado por paquetes de gravas y boleos medianamente cementados, debajo de ellos se presentan rocas lutíticas intemperizadas y poco intemperizadas de la Formación Méndez.

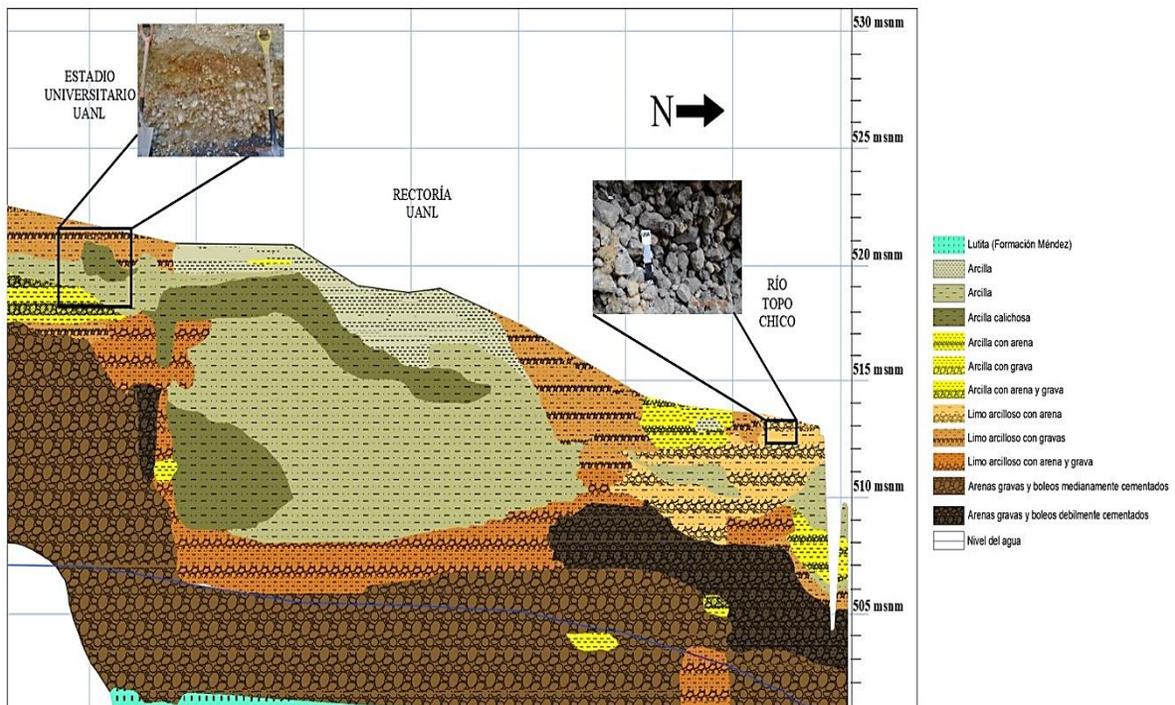


Figura 11. Litología del campus de CU-UANL con la ubicación de las escorias reportadas por García (2017) y los estratos oxidados reportados por Pérez (2019), Silva et al. (2015), Pérez (2022).

2.5 HIDROGEOLOGÍA

Las aguas subterráneas desempeñan un papel de gran importancia en el crecimiento socioeconómico del país. Para fines de administración, México se divide en 653 acuíferos, los cuales están distribuidos en 13 Regiones Hidrológicas-Administrativas (RHA).

El acuífero de Monterrey o del AMM, está definido con la clave 1906, se localiza en el centro-occidental del estado de Nuevo León, en el límite con el estado de Coahuila, cubriendo una superficie aproximada de 905 km². Este acuífero comprende la totalidad del municipio de San Pedro Garza García, casi la totalidad de Monterrey, San Nicolás de los Garza, Guadalupe, Juárez y Apodaca, así como abarca en menor proporción el municipio de General Escobedo (Figura 12). Este acuífero se denomina de tipo libre, heterogéneo y anisótropo, constituido por un medio granular y otro fracturado (CONAGUA, 2024).

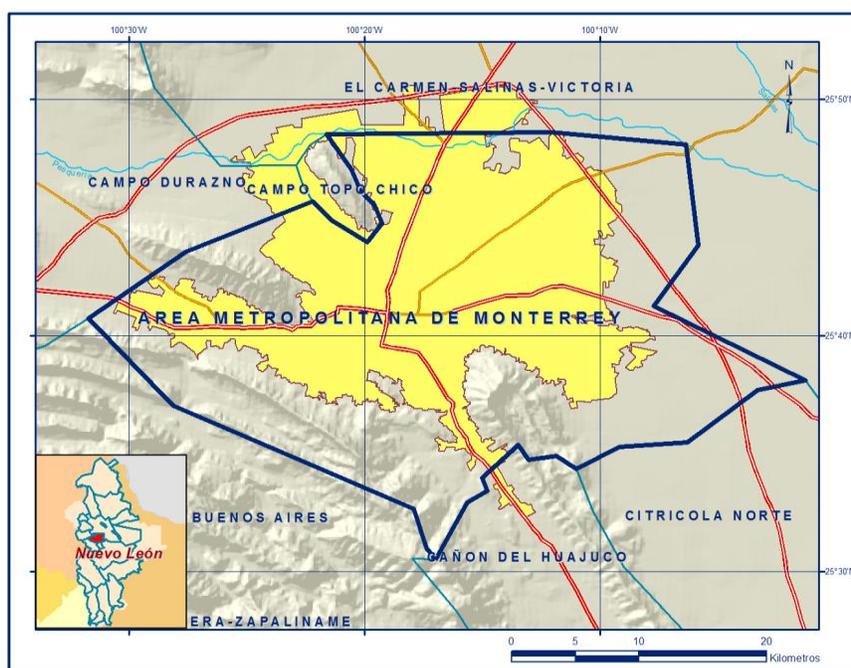


Figura 12. Ubicación del acuífero de Monterrey (CONAGUA, 2024).

El acuífero del campus de CU de la UANL pertenece a la clasificación litológica de acuífero de poros y gravas, está formado por gravas empacadas en arcilla limosa, gravas y boleos parcialmente cementados, limitados inferiormente por formaciones arcillosas y lutita café fracturada. La base de este acuífero es la unidad litológica impermeable: formación Méndez (Hernández, 1999).

De acuerdo con García (2017), De León (2019) y Pérez (2022), el acuífero en la zona de estudio presenta un comportamiento tanto estable como dinámico.

Es estable porque, como se observa en la Figura 13, el agua subterránea fluye de suroeste a noreste en todas las cartas piezométricas presentadas del año 2016 al 2021. A la vez, es dinámico debido a que los niveles piezométricos varían de 498 a 513 m sobre el nivel del mar.

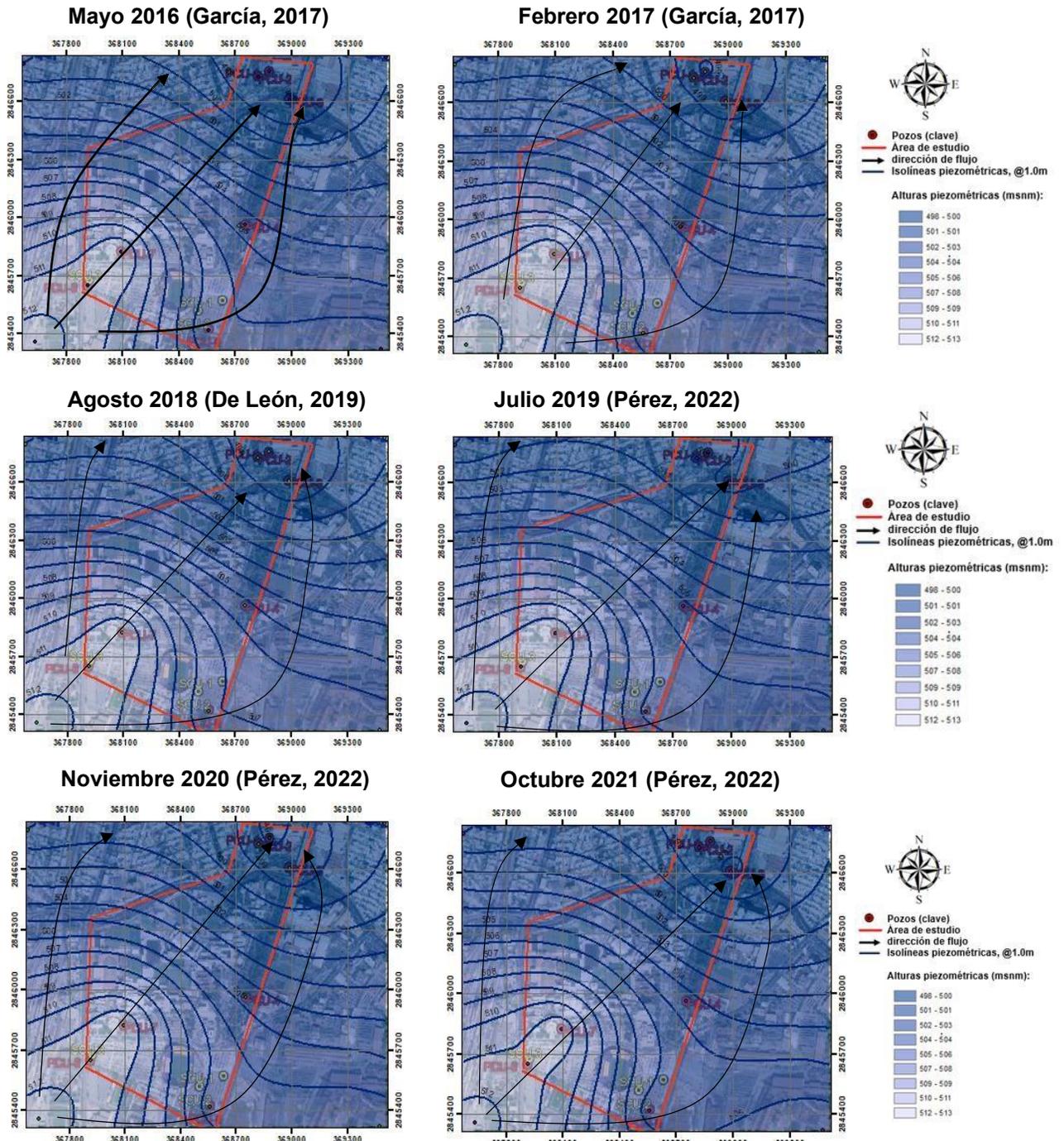


Figura 13. Cartas piezométricas del acuífero Monterrey, campus CU-UANL, del año 2016 al 2021. Elaboradas por Pérez (2022), García (2017) y De León (2019).

CAPÍTULO 3

MARCO TEÓRICO

3.1 AGUA SUBTERRÁNEA

Cuando llueve, una parte del agua discurre por la superficie, otra parte se evapora directamente y regresa a la atmósfera; el resto se infiltra en el subsuelo y, a su vez, una parte de esta agua es retenida como *humedad del suelo*, el resto continua infiltrándose hasta que alcanza una zona donde todos los espacios disponibles del sedimento están completamente llenos de agua, la cual se denomina como *agua subterránea*, esta es la *zona de saturación*, donde la presión del agua es lo suficientemente grande como para que el agua se mueva a través de los pozos, permitiendo así que el agua subterránea pueda extraerse para su uso, el límite superior de esta zona se denomina como *nivel freático*. Por otra parte, el área situada por encima del nivel freático se denomina como *zona no saturada*, en la cual los espacios porosos contienen aire y agua, aunque puede haber una cantidad considerable de agua en esta zona, esta agua no puede ser bombeada en los pozos, esta área abarca la zona de humedad del suelo y la *franja capilar*, es en esta última que el agua subterránea es mantenida por la tensión superficial en diminutos conductos comprendidos entre los granos del sedimento (Figura 14), (Tarbuck y Lutgens, 2013).

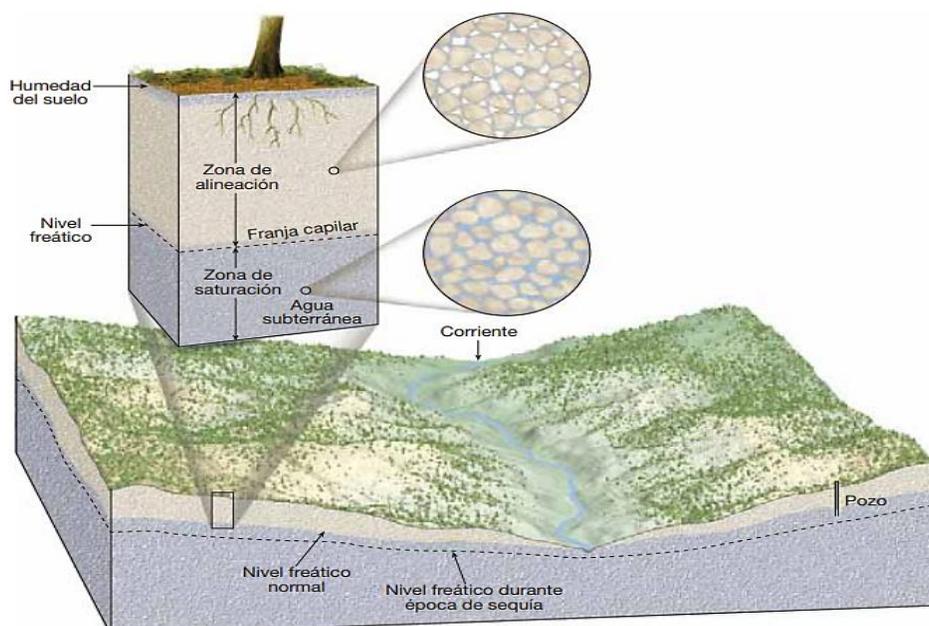


Figura 14. Distribución del agua subterránea (Tarbuck y Lutgens, 2013).

3.2 ACUÍFEROS

Se denomina acuífero a la formación geológica o estrato que permite la circulación del agua ya sea por sus poros, grietas, cavidades o fracturas, y de esta manera, se puede aprovechar este recurso hídrico en cantidades económicas apreciables para subvenir las necesidades de la sociedad (Custodio y Llamas, 1983; Tarbuck y Lutgens, 2013).

La cantidad de agua subterránea que puede almacenarse depende de la *porosidad* del material, que se define como el porcentaje del volumen total de roca o de sedimento ocupado por poros, no obstante, la porosidad por sí sola no puede medir la capacidad de un material para almacenar agua subterránea, lo que significa que la roca o el sedimento pueden ser porosos, pero no permitir el movimiento del agua a través de ellos, los poros deben estar conectados para permitir el flujo de agua y deben ser lo suficientemente grandes, por lo tanto, la *permeabilidad* de un material (su capacidad para transmitir un fluido), es igual de importante que la porosidad (Tarbuck y Lutgens, 2013).

Como se observa en la Figura 15, de acuerdo con Werner (1996) los acuíferos se clasifican en 3 tipos según su litología:

1. Acuífero de poros: Está formado en su mayor parte por sedimentos sueltos como gravas y arenas, y el agua subterránea se mueve en los poros de estos sedimentos.
2. Acuífero de grietas: Consiste en rocas consolidadas como las areniscas, calizas no karstificadas, basaltos, granitos u otras rocas extrusivas e intrusivas, gneises. El agua subterránea se mueve a través de las fracturas abiertas de origen tectónico o de intemperismo.
3. Acuíferos kársticos: Conformado por rocas karstificadas (calizas, dolomías y yeso), donde el agua se mueve en los huecos, los cuáles presentan diámetros significativamente variables.

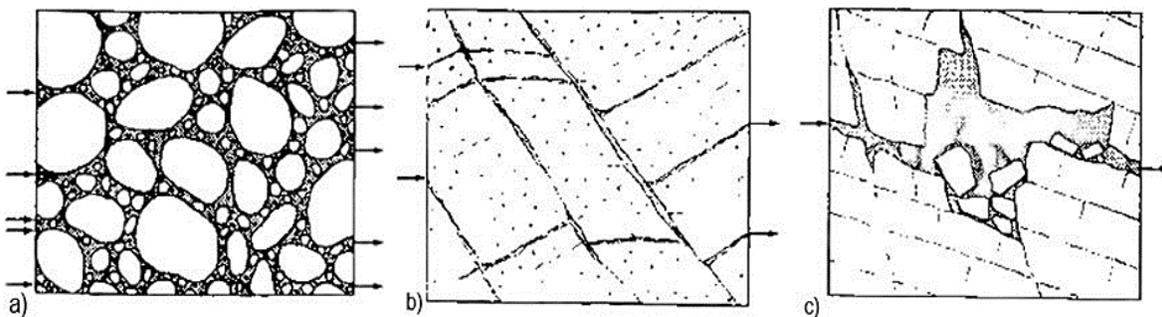


Figura 15. Tipos litológicos de acuíferos: a) acuífero de poros, b) acuífero de grietas, c) acuífero kárstico. Adaptado de Werner (1996).

Los acuíferos que se presentan con mayor frecuencia están formados por depósitos no consolidados de materiales sueltos, tales como arenas, gravas, mezclas de ambos, entre otros, y pueden ser de origen distinto como fluvial o deltaico (Custodio y Llamas, 1983).

3.3 CONTAMINACIÓN DE SUELOS Y ACUÍFEROS

Las actividades como la minería, la agricultura, los servicios de transporte, así como las actividades domésticas e industriales generan una enorme producción de residuos que dañan al medio ambiente, al igual que causan contaminación tanto en el suelo como en las aguas subterráneas. Debido a lo anterior, la contaminación de los acuíferos es inminente, sobre todo en los países en desarrollo donde la población es cada vez mayor y por consiguiente se incrementan las actividades antropogénicas (Dávila y De León, 2011; Currell y Han, 2017; Postigo et al., 2018).

Los contaminantes que se introducen en el subsuelo y se infiltran hasta el agua subterránea se propagan dentro de este sistema sólo si se dispone de un mecanismo de transporte, como un líquido. Estos contaminantes pueden infiltrarse a través de sistemas de macroporos y raíces, fracturas en las rocas, pozos abandonados y otros sistemas de grietas que proporcionan vías para la infiltración, tan pronto como el contaminante llega al agua subterránea en la zona saturada o no saturada, varios procesos (físicos, geoquímicos y bioquímicos) determinan su dirección (Jackson, 1980).

En la actualidad, existen diversas y múltiples fuentes de contaminación de las aguas subterráneas; las cuales pueden ser de origen natural o antropogénico, y a su vez, también se pueden clasificar si son fuentes puntuales o difusas (Talabi y Kayode, 2019).

La mayor parte de la contaminación de las aguas subterráneas proviene de fuentes antropogénicas, las cuales pueden ser causadas por diferentes actividades como el uso ilimitado de fertilizantes, las actividades mineras, industriales, entre otras. No obstante, las aguas subterráneas también pueden contaminarse a través de fuentes naturales, como es el caso de las rocas fáciles de disolver como el yeso que causan sales disueltas, la evaporación intensa, la deposición de sal y la degradación de las fuentes de agua en áreas ubicadas en zonas geotérmicas (Custodio y Llamas, 1983; Talabi y Kayode, 2019).

Con respecto a la clasificación de fuentes puntuales y difusas, la primera es una fuente única de contaminación localizada, lo que implica que es relativamente fácil de identificar, cuantificar y controlar, mientras que, las fuentes difusas son difíciles

tanto de monitorear como de identificar, debido a que en estos casos la contaminación no puede rastrearse hasta un solo punto de descarga, además son más difíciles de remediar, debido a que pueden cubrir grandes áreas geográficas. Como ejemplo de fuente puntual se incluyen los efluentes de plantas de tratamiento de aguas residuales y municipales, las actividades industriales, los vertederos; las fuentes difusas abarcan actividades como el uso de fertilizantes, pesticidas y herbicidas, así como fuentes naturales e infiltración química (Velthof et al., 2009; Savci, 2012; Lapworth et al., 2012; Cruz et al., 2013; Pal et al., 2016). En la Figura 16 se pueden apreciar ejemplos de diversas fuentes de contaminación del agua subterránea (British Geological Survey, 2022).

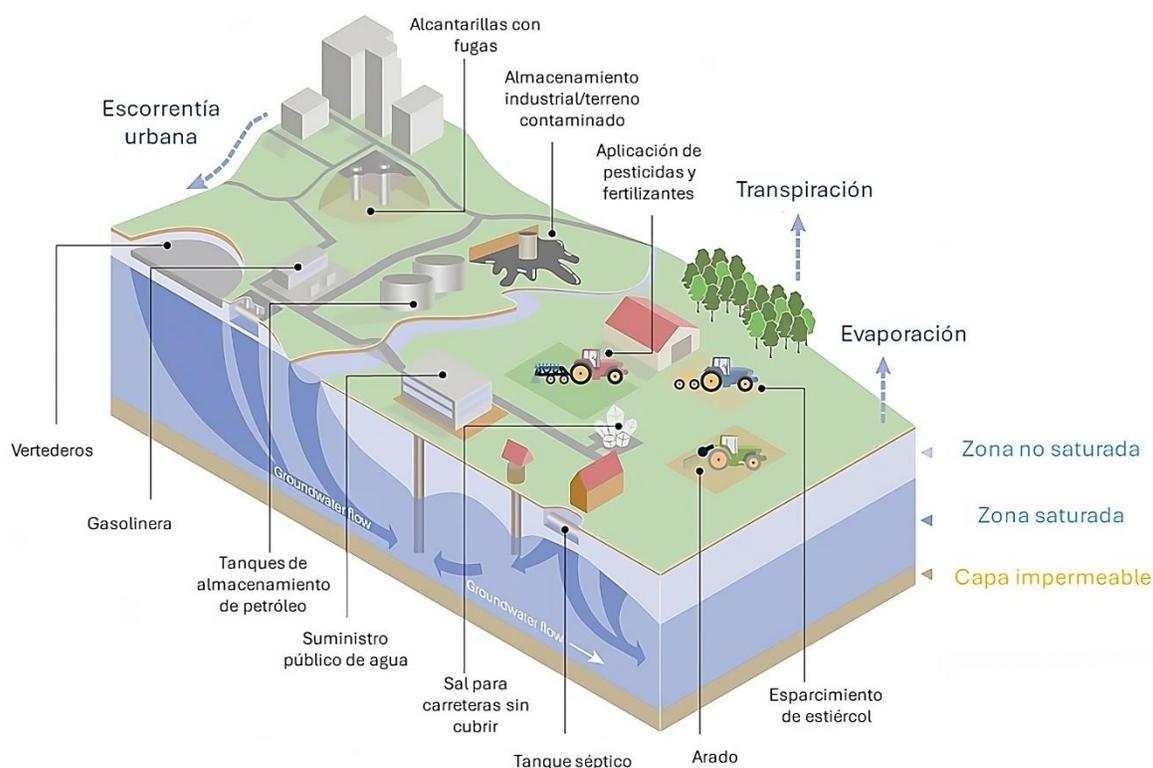


Figura 16. Ejemplos de fuentes contaminantes del agua subterránea. Adaptado de British Geological Survey (2022).

Custodio y Llamas (1983) señalan que las escombreras, así como los vertederos de basura y/o escorias son focos de posibles contaminaciones tanto para el suelo como para el agua. Por ejemplo, al llover, el agua entra en contacto y se transporta por dichos contaminantes para posteriormente infiltrarse en el subsuelo y a su vez en los acuíferos, contaminando de esta manera los suelos y el agua subterránea.

A causa de las actividades descritas, en el subsuelo se presentan múltiples casos de contaminación antrópica, como la presencia de lixiviados causados por

vertederos, infiltración de hidrocarburos y pesticidas, basura enterrada, entre otros ejemplos. Para poder identificar estos contaminantes en el suelo, así como conocer su extensión se pueden emplear métodos directos, indirectos o ambos. Las primeras técnicas incluyen las perforaciones exploratorias y análisis químicos a partir de muestras de suelo, entre otros; mientras que los segundos abarcan los métodos de prospección geofísica (Aracil et al., 2003; Castro et al., 2013; Rojas, 2023).

3.4 PROSPECCIÓN GEOFÍSICA

De acuerdo con Orellana (1972), la prospección geofísica es una disciplina de las ciencias de la tierra que estudia las estructuras que yacen en el subsuelo, así como la localización de cuerpos delimitados por el contraste de alguna de sus propiedades físicas con las del medio circundante. Los métodos geofísicos se dividen según la propiedad física a estudiar, dentro de la diversidad de estas metodologías destacan cuatro principales: gravimétrico, magnético, eléctrico y sísmico; los cuales se relacionan con las propiedades físicas de densidad, susceptibilidad magnética, resistividad eléctrica y velocidad de propagación de onda, respectivamente (González de Vallejo et al., 2002).

Las diversas técnicas geofísicas se clasifican en métodos de campo natural y artificial. Los métodos de campo natural consisten en estudiar las variaciones que ciertas estructuras generan sobre campos preexistentes o naturales, generalmente estas técnicas pueden proporcionar información sobre las propiedades de la Tierra a profundidades significativamente mayores. Por otra parte, en los métodos de campo artificial es el propio prospector el que genera artificialmente señales que se transmiten a través del subsuelo, estas señales se miden mediante detectores apropiados cuya respuesta puede visualizarse de manera detallada e interpretarse posteriormente (Howell, 1962; Orellana, 1972).

En la mayoría de los métodos de estudio geofísico, el objetivo principal es detectar una variación local de un parámetro medido en relación con algún valor de fondo normal, esta variación o contraste se debe a una zona subsuperficial en particular, de propiedad física distintiva y, por lo tanto, de posible importancia geológica. Las variaciones locales de este tipo se denominan *anomalías geofísicas* (Kearey et al., 2002; Ávila et al., 2014).

El tipo de propiedad física que mide cada técnica geofísica determina la gama de aplicaciones en las que se pueden emplear. Por ejemplo, el método magnético es uno de los más adecuados y utilizados para identificar yacimientos de magnetita, debido a la alta susceptibilidad magnética de este mineral; así como los métodos

sísmicos son los más apropiados para la exploración de combustibles fósiles. Frecuentemente las técnicas geofísicas se usan en combinación (Kearey et al., 2002).

En los últimos años los métodos geofísicos se han empleado cada vez más en el ámbito ambiental, como en el estudio de sitios contaminados por hidrocarburos, balsas mineras abandonadas, por vertederos, entre otros ejemplos; debido a esto, se ha desarrollado la subdisciplina de *geofísica ambiental*, la cual, según Reynolds (2011) se define como la aplicación de las técnicas geofísicas a la investigación de fenómenos *bio-físico-químicos* cercanos a la superficie que probablemente tengan implicaciones significativas para la gestión del medio ambiente local (Greenhouse, 1991; Steeples, 1991; Reynolds y McCann, 1992; Reynolds y Taylor, 1992).

Dentro de la variedad de los métodos geofísicos existentes, los métodos eléctricos de prospección (MEP) son una herramienta de suma importancia para la evaluación de los problemas ambientales, por lo que se han aplicado en múltiples casos para la identificación de zonas contaminadas tanto en el subsuelo como en el agua subterránea (EPA, 2000; Pellerin, 2002; Shevnin et al., 2005).

3.5 MÉTODOS ELÉCTRICOS DE PROSPECCIÓN

Estos métodos también denominados geoelectrónicos, estudian la distribución en profundidad de las propiedades eléctricas del subsuelo con el paso de corrientes continuas o alternas de baja frecuencia mediante mediciones realizadas en la superficie, además, estas corrientes se analizan considerando un medio tridimensional (González de Vallejo et al., 2002). De acuerdo con Ávila et al. (2014), los MEP más conocidos son el método de resistividad, polarización inducida y el método de potencial espontáneo.

El método de potencial espontáneo es una técnica de campo natural, en el cual se miden diferencias de potencial eléctrico natural, éstas diferencias son causadas por mecanismos fisicoquímicos en los que los fluidos y sus propiedades eléctricas juegan un papel importante. Por otra parte, el método de polarización inducida es una técnica de campo artificial que mide la cargabilidad eléctrica, la cual es la capacidad del material afectado por la corriente eléctrica para retener cargas eléctricas después de interrumpir el paso de esta corriente. Por último, el método de resistividad consiste en la inyección de corrientes eléctricas en el subsuelo generadas de manera artificial, como resultado se obtienen diferencias de potencial (Orellana, 1972; Kearey et al., 2002; Legorreta, 2016).

3.5.1 Tomografía de resistividad eléctrica 2D

La técnica de tomografía de resistividad eléctrica 2D forma parte del método de resistividad y permite obtener un modelo de la distribución de la resistividad tanto lateralmente como en profundidad. En la actualidad, es una de las técnicas más empleadas en estudios de sitios contaminados debido a que la presencia de contaminantes en el subsuelo modifica la resistividad eléctrica, generando contrastes que permiten distinguir entre las áreas afectadas por la contaminación y aquellas que no lo han sido. De esta manera, a partir de esta técnica se obtiene un modelo bidimensional en el cual se pueden identificar las dimensiones de las plumas contaminantes en el subsuelo (Sauck, 2000; Kearey et al., 2002; Aracil et al., 2003).

3.5.1.1 Resistividad

De acuerdo con Orellana (1972), la resistividad ρ se define como una propiedad intrínseca que cualquier material presenta al oponerse al paso de una corriente eléctrica, esta propiedad física se explica de la siguiente manera: si se considera un cubo eléctricamente uniforme, de longitud de lado L a través del cual pasa una corriente I , el material dentro del cubo resiste la conducción de electricidad a través de él, por consiguiente, se produce una caída de potencial V entre las caras opuestas (Figura 17), (Reynolds, 2011).

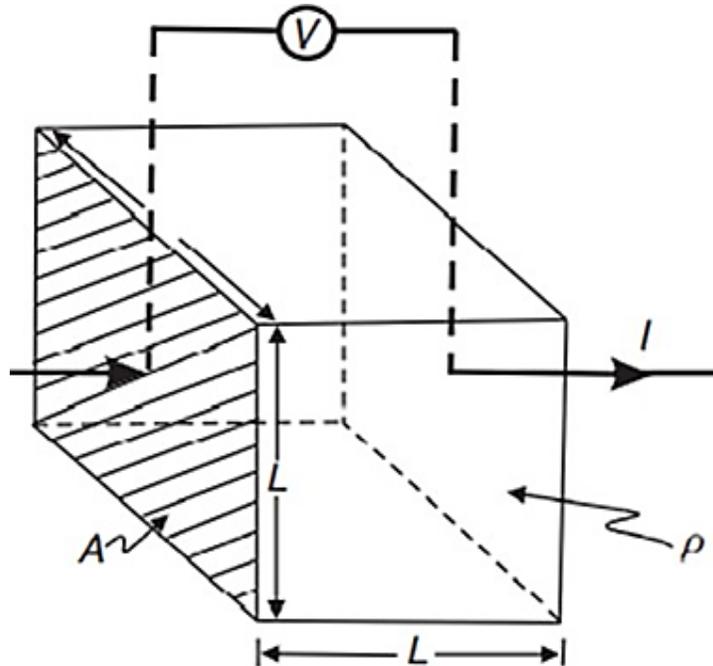


Figura 17. Definición básica de resistividad a lo largo de un bloque de lado L con una corriente I aplicada y una caída de potencial entre las caras opuestas (V), (Reynolds, 2011).

Con base en lo anterior, la resistividad se expresa matemáticamente como el producto de la caída de potencial y la sección transversal del material, dividido entre el producto de la corriente eléctrica y la longitud del material, como se muestra en la ecuación 1 (Reynolds, 2011; Everett, 2013).

$$\rho = \frac{VA}{IL} (\Omega m) \quad (1)$$

Donde:

V: Diferencia de potencial (V).

A: Sección transversal (m²).

L: Longitud del material (m).

I: Corriente eléctrica inyectada (A).

3.5.1.2 Resistividad Aparente

Sin embargo, si se tiene un cubo en el cual están presentes dos materiales distintos y cada uno con su propia resistividad (ρ_1 y ρ_2), el cubo anteriormente isotrópico ahora presentará variaciones en las propiedades eléctricas respecto a la dirección de medición (propiedad anisotrópica). Al igual que el ejemplo anterior, en el subsuelo se encuentran diversos materiales, cada uno con resistividades distintas, por lo tanto, no se compone de capas homogéneas y varían los valores de resistividad en las tres dimensiones del espacio. Debido a esto, los valores obtenidos en campo son datos de resistividad aparente ρ_a (Reynolds, 2011).

Para medir la resistividad aparente desde la superficie se utiliza un conjunto de electrodos denominado *arreglo eléctrico*, el cual generalmente consta de cuatro, para realizar la medición se inyecta la corriente (I) entre el par de electrodos A y B, y se mide la diferencia de potencial o voltaje resultante (ΔV) entre los electrodos M y N, la forma o geometría en la que se distribuyen estos cuatro electrodos se le denomina *factor geométrico*, y se designa con la letra K (Orellana, 1972; González de Vallejo et al., 2002).

Iakubovskii y Liajov (1980) describieron la ecuación general de la resistividad aparente como:

$$\rho_a = K \frac{\Delta V}{I} \text{ (}\Omega m \text{)} \quad (2)$$

Donde:

ΔV : Diferencia de potencial.

K : Factor geométrico.

I : Intensidad de corriente.

Como se puede observar en la ecuación anterior, la resistividad aparente depende de la geometría del arreglo electródico utilizado y no es un promedio de los valores de resistividad del subsuelo (Iakubovskii y Liajov, 1980; Hernández, 2019).

3.5.1.3 Arreglos electródicos

Cada arreglo electródico se diferencia entre sí por la manera en la que se colocan los electrodos en campo para realizar la adquisición de datos, es decir, por la posición y distancia de los electrodos de corriente respecto a los de potencial. Dentro de la variedad de arreglos electródicos existentes hay tres tipos principales: Schlumberger, Wenner y dipolo-dipolo (Alarcón, 2010).

La característica principal de los arreglos electródicos Wenner y Schlumberger, es que son relativamente sensibles a cambios verticales de resistividad, sin embargo, presentan una baja sensibilidad a cambios horizontales de resistividad, por lo cual, estos arreglos identifican de mejor manera las capas horizontales. Por otra parte, el arreglo dipolo-dipolo presenta buena sensibilidad a variaciones horizontales de resistividad, por lo cual, se utiliza para estudios en estructuras verticales (Gómez et al., 2021).

En la Figura 18 se muestran los arreglos Schlumberger, Wenner y dipolo-dipolo, cada uno con su respectivo factor geométrico (Everett, 2013; AGI, 2017).

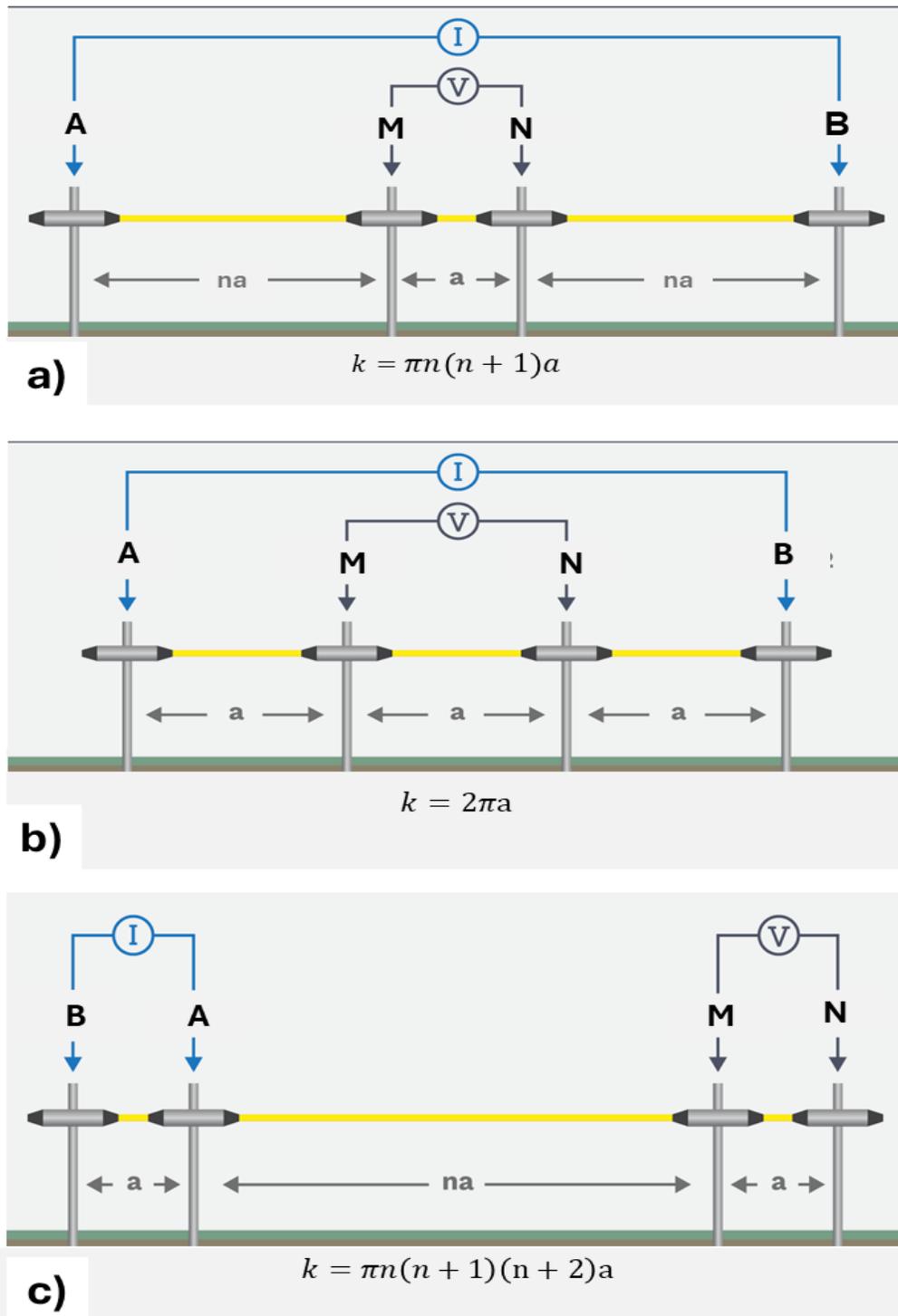


Figura 18. Arreglos electródicos principales de cuatro electrodos: a) Schlumberger, b) Wenner, c) dipolo-dipolo. Adaptado de Everett (2013) y AGI (2017).

En la tomografía de resistividad eléctrica 2D, el arreglo de electrodos se desplaza a lo largo de la línea geofísica para adquirir valores horizontales de resistividad aparente, mientras que las mediciones en profundidad se obtienen incrementando la distancia entre los electrodos según el arreglo utilizado. A continuación, se detalla el uso de esta técnica con cada uno de los principales arreglos electródicos para la adquisición de datos.

En el caso de emplear el arreglo electródico *Schlumberger*, los electrodos de potencial (*M* y *N*) se sitúan en el centro y los de corriente (*A* y *B*) en los extremos. Como se observa en la Figura 19, para incrementar la profundidad, el espaciamiento o distancia (denominada *a*) entre los electrodos de potencial se mantiene constante, sin embargo, la distancia aumenta entre cada electrodo de corriente respecto a uno de potencial. Por ejemplo, para obtener datos a un nivel de profundidad uno ($n=1$), todos los electrodos están separados a la misma distancia *a*, pero para adquirir mediciones a un nivel dos, se incrementa a $2a$ la distancia entre *A-M* y *N-B*, mientras que la distancia entre los electrodos *M-N*, se mantiene en *a*, y así sucesivamente para mayores niveles de profundidad (Sikah et al., 2016).

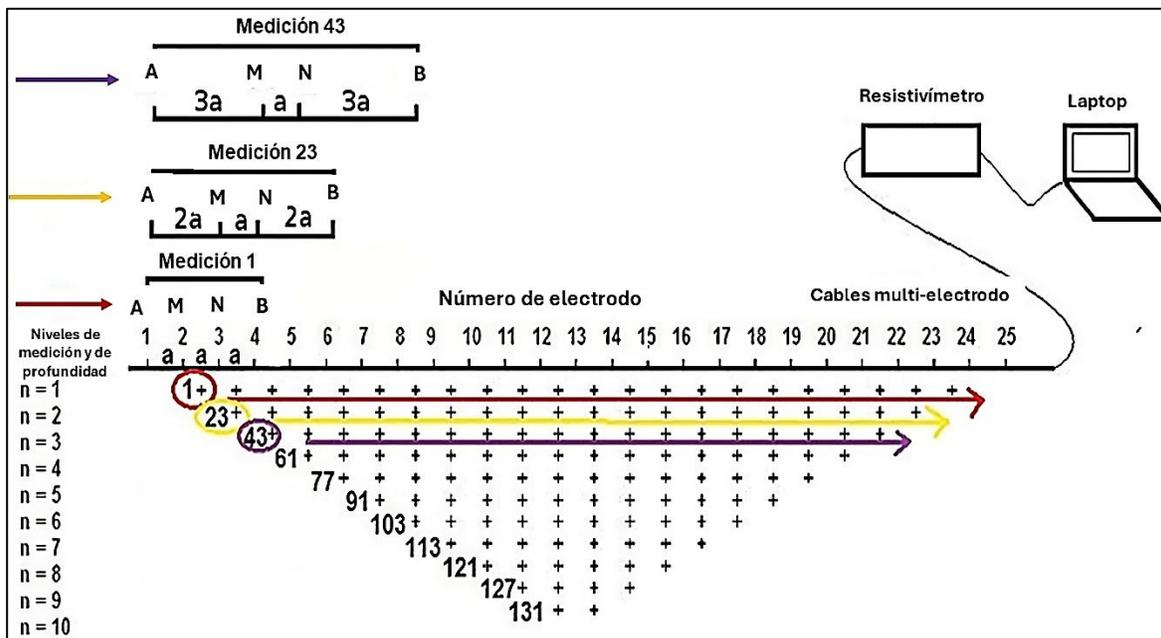


Figura 19. Representación gráfica de la adquisición de datos con la técnica tomografía eléctrica a partir del arreglo Schlumberger. Adaptado de Sikah et al. (2016).

Del mismo modo, en el arreglo electródico *Wenner* los electrodos de potencial se acomodan en el centro y los de corriente en los extremos, no obstante, todos se mantienen a una distancia *a*, y para aumentar la profundidad se incrementa el espaciamiento entre todos los electrodos de manera uniforme. Por ejemplo, para adquirir valores de resistividad aparente a un nivel dos y tres, la distancia entre todos los electrodos será de $2a$ y $3a$ respectivamente (Figura 20), (Fehdi et al., 2014).

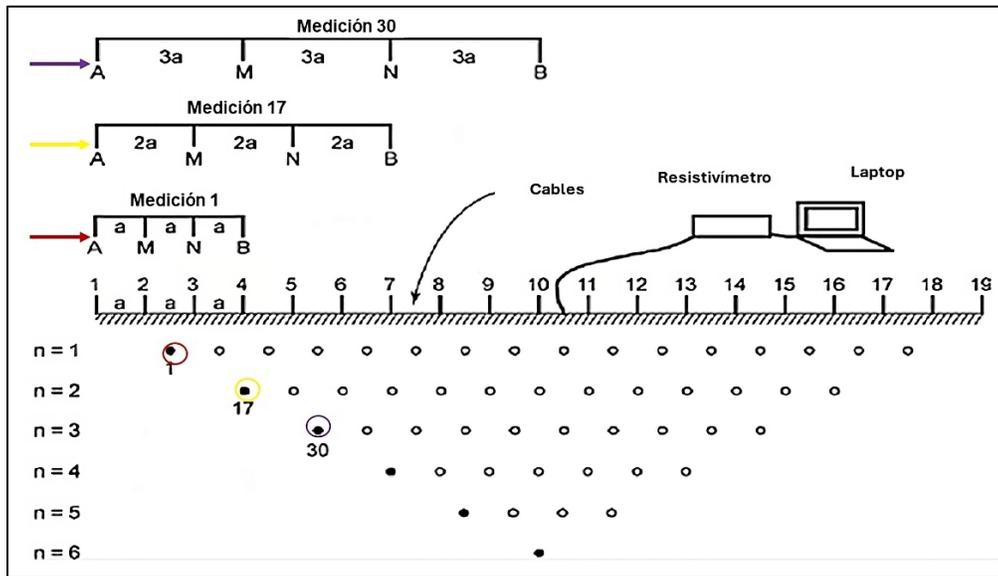


Figura 20. Representación gráfica de la adquisición de datos con la técnica tomografía eléctrica a partir del arreglo Wenner. Adaptado de Fehdi et al. (2014).

Por último, para emplear la técnica de tomografía de resistividad eléctrica 2D con el arreglo *dipolo-dipolo*, los dos electrodos de corriente se colocan en un extremo del arreglo y los dos electrodos de potencial en el otro extremo. Para incrementar la profundidad, solamente se aumenta la distancia entre un electrodo de corriente y uno de potencial. Como se observa en la Figura 21, para obtener valores de resistividad a un nivel de profundidad dos ($n=2$), la distancia entre $B-A$ y $M-N$, se mantiene en a , no obstante, la distancia entre $A-M$ será de $2a$, y así sucesivamente para los demás niveles (Ariyanto et al., 2019).

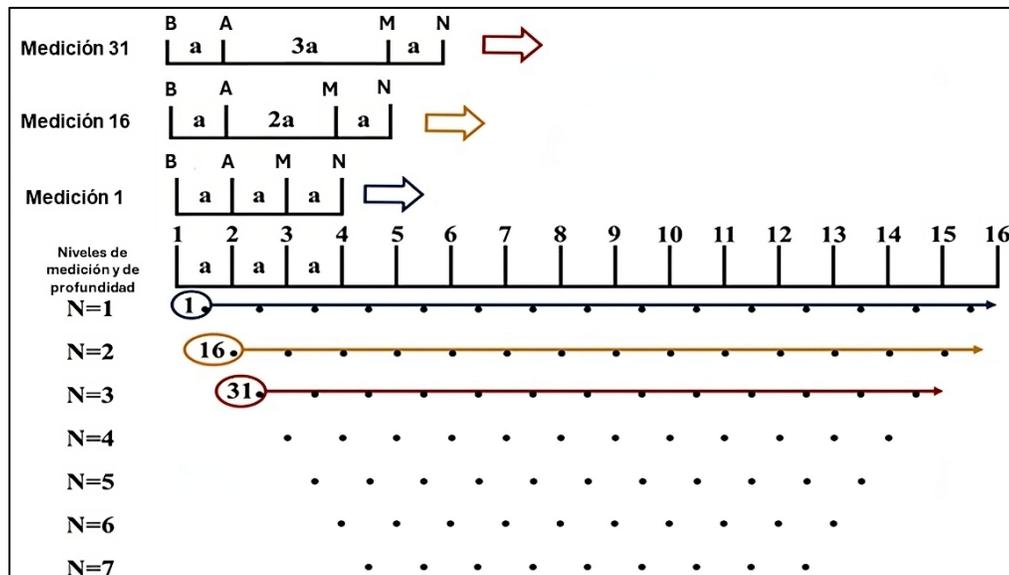


Figura 21. Representación gráfica de la adquisición de datos con la técnica tomografía eléctrica a partir del arreglo dipolo-dipolo. Adaptado de Ariyanto et al. (2019).

Es importante destacar que cada valor de resistividad aparente obtenido es una medición dada que ocurre debajo del arreglo electródico (cerca del punto medio de la configuración de los cuatro electrodos), y de la distribución real de la resistividad, como se observa en las figuras anteriores (Alarcón, 2010).

3.5.1.4 Inversión de datos de resistividad aparente

Para obtener la distribución de resistividad real de la zona en estudio, es fundamental someter los datos obtenidos en campo a un método de inversión. Este proceso consiste en obtener las resistividades reales a partir de las resistividades aparentes medidas.

El modelado inverso consiste en la comparación de los datos observados en campo con los datos sintéticos generados por un modelo que representa las propiedades físicas del medio, entre más sean parecidos estos valores entre sí, mejor es el modelo obtenido. En caso de no obtener un buen resultado, el modelo se cambia, los datos sintéticos se recalculan y se vuelven a comparar con los datos observados, este procedimiento se repite (iteraciones) hasta que se obtenga un ajuste aceptable entre los datos sintéticos y los observados (Meju, 1994; Legorreta, 2016).

Esta aproximación de datos para determinar las resistividades se denomina *proceso de optimización*, en el cual se busca un modelo que mejor represente los datos. Los métodos de optimización varían en base con su método de búsqueda para alcanzar el modelo óptimo, de los más empleados es el de Gauss-Newton (Meju, 1994).

Meju (1994) define que, en el método de optimización de Gauss-Newton la solución al problema inverso no lineal se plantea en determinar la predicción de parámetros que minimizan la suma del cuadrado de los residuales, $R(p)$, conocida como función objetivo, definida matemáticamente como:

$$R(p) = \sum_{i=1}^N [d_i - f_i(p)]^2 \quad (3)$$

Donde:

N : número total de observaciones o datos.

d_i : datos observados.

$f_i(p)$: función que representa la respuesta del modelo.

p : vector de parámetros del modelo a ajustar.

Según la ecuación anterior, para determinar la resistividad real se minimiza la suma del cuadrado de la diferencia entre la resistividad aparente medida y calculada.

La inversión de los datos de resistividad aparente obtenidos mediante la técnica de tomografía de resistividad eléctrica 2D se realiza a partir de un modelo teórico en el que el subsuelo se divide en un cierto número de capas discretizadas en prismas rectangulares con resistividad constante (Figura 22). Las dimensiones de estos bloques son proporcionales a las separaciones de los arreglos electródicos empleados y los valores de resistividad real de los prismas se determinan a partir del proceso de optimización que ajusta las resistividades de los bloques del modelo (Loke y Barker, 1996).

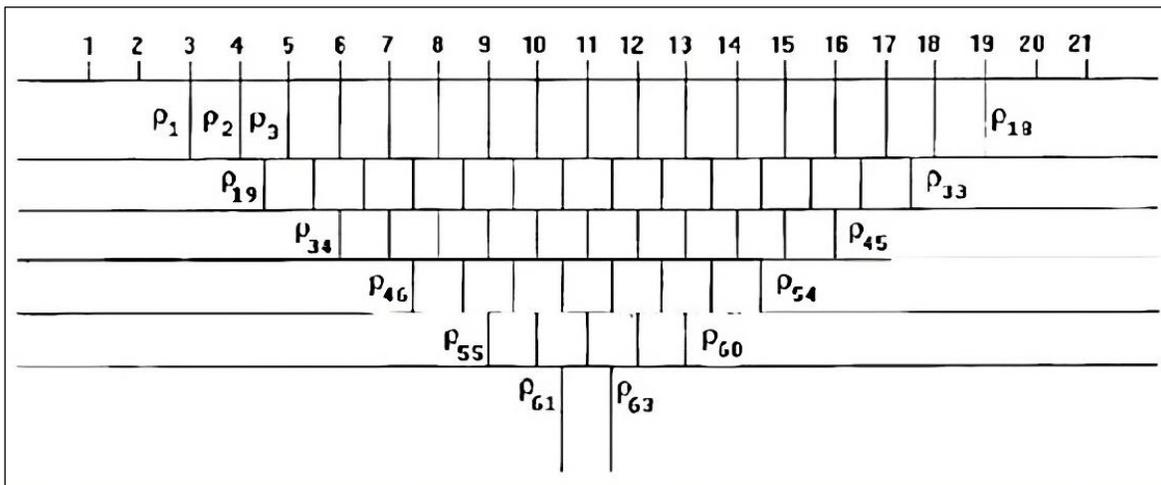


Figura 22. Arreglo de prismas rectangulares utilizado en el modelo 2D (Loke y Barker, 1996).

3.5.1.5 Conductividad Eléctrica

Otra propiedad eléctrica comúnmente usada en los MEP es la conductividad eléctrica, la cual se define como la capacidad que presentan ciertos materiales para transmitir una corriente eléctrica al aplicarse un voltaje, por lo tanto, es una magnitud inversa de la resistividad eléctrica (Orellana, 1972). Se expresa matemáticamente como:

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (4)$$

Donde:

ρ : Resistividad eléctrica.

σ : Conductividad eléctrica.

De acuerdo con Reynolds (2011), existen tres formas en las que la conductividad eléctrica se puede presentar en una roca:

1. Electrónica: Es el proceso por el cual el flujo de corriente es por medio de electrones libres, tal como los metales que permiten que los electrones se muevan rápidamente, transportando así la carga.

2. Electrolítica: Ocurre por el movimiento relativamente lento de iones dentro de un electrolito y depende del tipo de ion, concentración iónica y movilidad. En este caso, el flujo de corriente es a través del movimiento de iones en el agua presente en los poros de la roca.

3. Conducción dieléctrica: Se produce en materiales débilmente conductores, cuando se les aplica una corriente alterna externa, lo que causa que los electrones atómicos se desplacen ligeramente con respecto a sus núcleos.

La conducción eléctrica en la mayoría de las rocas es electrolítica, debido a que los poros y fracturas de las rocas normalmente contienen cierto porcentaje de agua, por lo tanto, la conducción dependerá de la cantidad de agua almacenada, así como de su salinidad (Hernández, 2019).

3.5.1.6 Propiedad eléctricas de los materiales

Las propiedades eléctricas de los materiales geológicos como la resistividad y su inverso: la conductividad; dependen de diversos factores como el tipo de roca, por ejemplo, las rocas ígneas tienden a presentar resistividades más altas, las rocas metamórficas suelen tener resistividades intermedias, aunque superpuestas, por otra parte, las rocas sedimentarias tienden a ser más conductoras, debido al alto contenido de fluido en sus poros (Reynolds, 2011).

La edad de la roca es otro factor importante que considerar, por ejemplo, las rocas más antiguas tienden a presentar mayor resistividad debido a que tienen mucho más tiempo de estar expuestas al relleno secundario de los intersticios mediante la mineralización y la compactación, reduciendo de este modo la porosidad y la permeabilidad. Además, otros factores que afectan las propiedades eléctricas de los materiales geológicos son el contenido de arcilla, la porosidad y la conectividad de los poros, la naturaleza del fluido, el contenido metálico de la matriz sólida (Telford et al., 1990; Reynolds, 2011).

CAPÍTULO 4

METODOLOGÍA

Con la finalidad de cumplir los objetivos planteados en la presente investigación, se desarrolló una metodología conformada por cinco etapas, las cuales se presentan en el siguiente esquema metodológico (Figura 23) y se describen detalladamente en este capítulo.

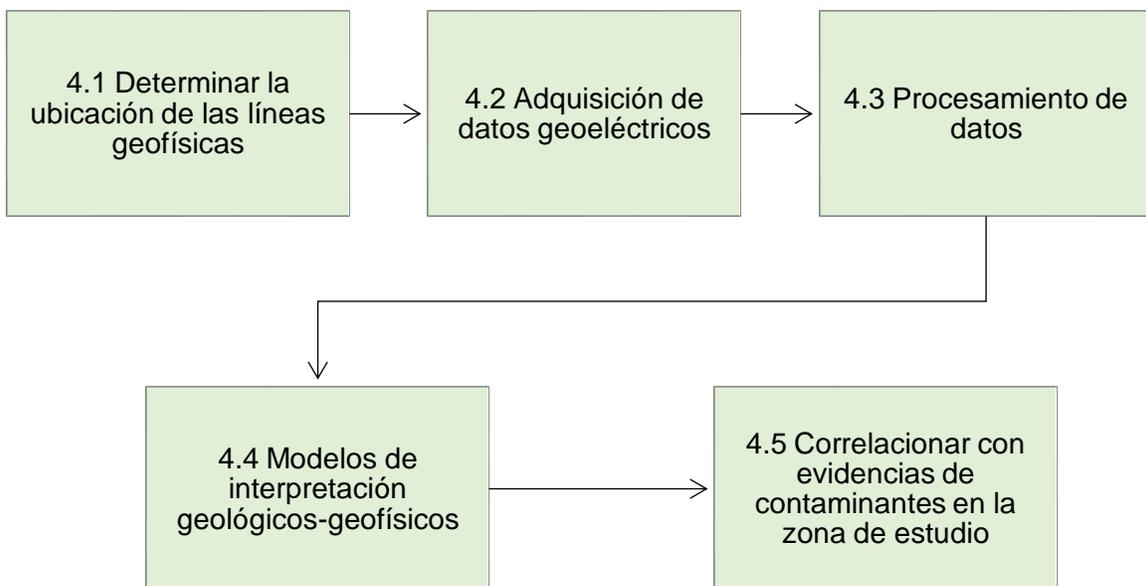


Figura 23. Esquema metodológico.

4.1 DETERMINAR LA UBICACIÓN DE LAS LÍNEAS GEOFÍSICAS

La ubicación de cada línea de medición se determinó con base en la ubicación de los materiales de escoria reportados por García (2017). Para esto se consideraron como evidencias fotografías tomadas en el año 2017, en las cuales se puede observar de manera detallada este material y su ubicación dentro del área de estudio. Cabe destacar que en la actualidad estas excavaciones están totalmente terminadas y este material de escoria se ubica en el subsuelo (Figuras 24 y 25).

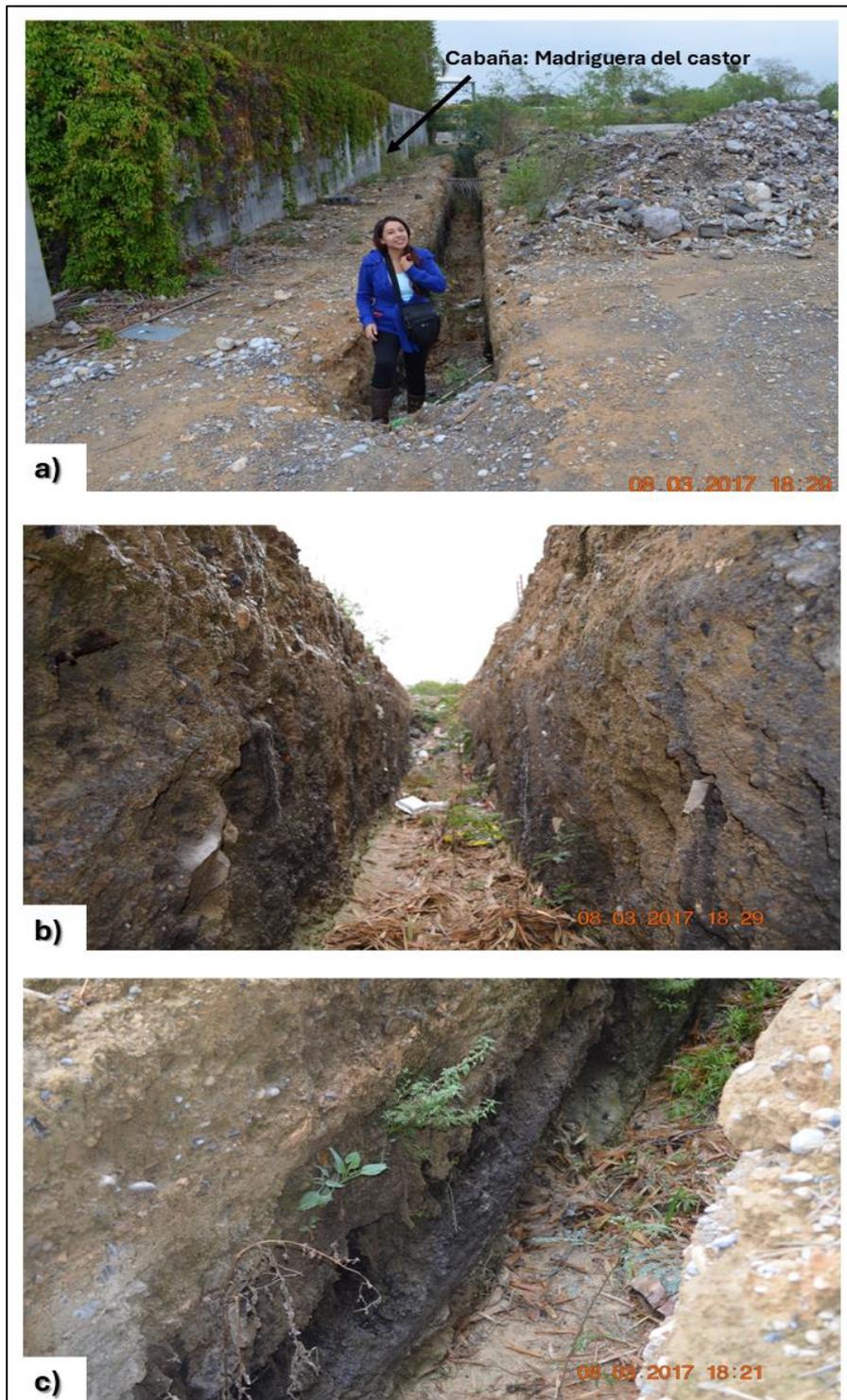


Figura 24. Presencia escorias: a) excavación ubicada contigua a la cabaña: “Madriguera del Castor”, b) interior de la excavación con escorias, c) estrato conformado por escorias. Fotografías por Héctor de León Gómez (2017), García (2017).

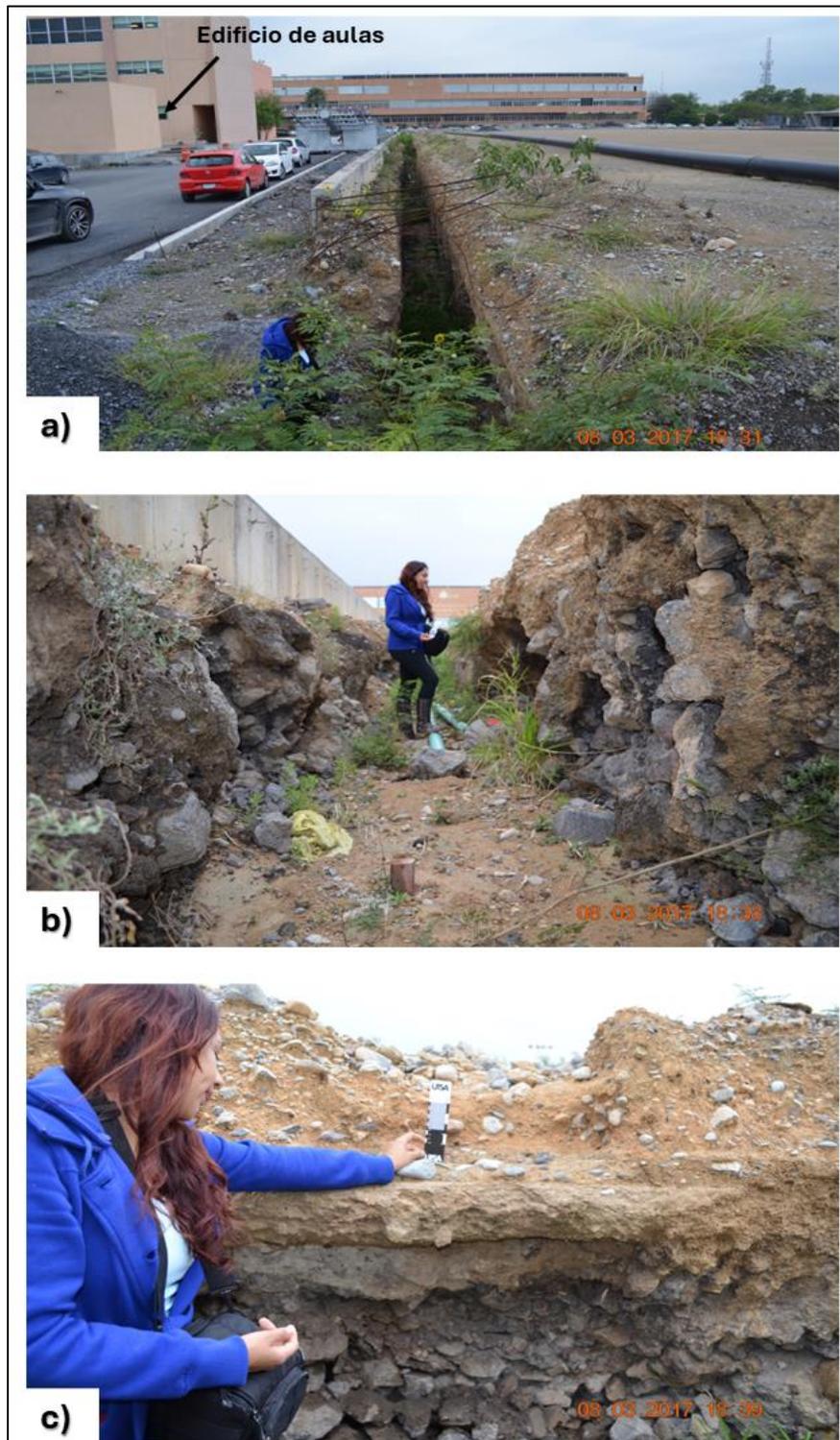


Figura 25. Presencia escorias: a) excavación ubicada contigua al edificio de aulas, b) interior de la excavación, c) estrato conformado por escorias. Fotografías por Héctor de León Gómez (2017), García (2017).

El material de escoria se muestra detalladamente en las Figuras 26 y 27, correspondientes a las zonas de excavación cerca de la cabaña y del edificio de aulas, respectivamente. En estas fotografías se aprecia que las escorias tienen formas irregulares y tamaños diversos, así como la mayoría presenta oxidación.



Figura 26. Escorias ubicadas por la cabaña: "Madriguera del Castor". Fotografías por Héctor de León Gómez (2017), García (2017).



Figura 27. Escorias ubicadas por el edificio de aulas. Fotografías por Héctor de León Gómez (2017), García (2017).

Además de las fotografías anteriores, se utilizaron como evidencia de la presencia de escoria los informes titulados “*Sondeos Gradadas-Área Deportiva del IIC*” y “*Sondeos Campo Football-IIC*”, elaborados por el Departamento de Geotecnia del Instituto de Ingeniería Civil. Estos documentos reportaron la estratigrafía de los pozos a cielo abierto (PCA) y sondeos con maquina perforada del tipo rotaria, realizados en la zona de estudio durante los años 2011 y 2014. En la mayoría de estos sondeos y pozos se identificó la presencia de escorias, como se puede observar en los anexos 1 y 2.

En la presente investigación se llevaron a cabo seis líneas geofísicas, cuya ubicación, junto con las evidencias de escorias mencionadas, se muestra en la Figura 28.



Figura 28. Ubicación de las líneas geofísicas realizadas y de las evidencias de escoria: fotografías reportadas por García y De León (2017), ubicación de los PCA y sondeos (Instituto de Ingeniería Civil, 2011-2014). Generado en Google Earth (2024).

En la tabla 2 se describe de manera detallada la ubicación y la fecha en la que se realizó cada línea de medición.

Tabla 2. Ubicación de cada línea geofísica.

Línea	Información de referencia (Ubicación)	Localización (Coordenadas UTM) (m)			Fecha de adquisición
		Punto	Norte (m N)	Este (m E)	
1	Entre los edificios de aulas.	Inicial	2846891	368978	27/03/23
		Final	2846863	368976	
2	En una jardinera dentro de la cabaña: <i>Madriguera del castor</i> .	Inicial	2846920	368885	
		Final	2846945	368883	
3	En el extremo oeste del área estudiada: paralela al arroyo Topo Chico.	Inicial	2846878	368828	
		Final	2846853	368818	
4	Entre el departamento de topografía e hidráulica.	Inicial	2846730	368802	19/05/23
		Final	2846729	368912	
5	En el extremo este de la zona de estudio: Entre Av. Universidad y el CIIMAC	Inicial	2846735	369040	1/12/23
		Final	2846775	369041	
6	En el extremo oeste del área del Instituto: paralela al arroyo Topo Chico.	Inicial	2846821	368799	
		Final	2846736	368768	

Es relevante señalar que, fuera de la zona del Instituto de Ingeniería Civil, al norte, por el arroyo Topo Chico, se pueden observar escorias dispersas a lo largo de esta área. A continuación, en la Figura 29, se presentan fotografías actuales de este material. Como se puede apreciar, las escorias varían desde tamaños pequeños hasta mayores dimensiones, y presentan señales de oxidación. También se identificó un fragmento metálico adherido a la superficie de uno de estos materiales.

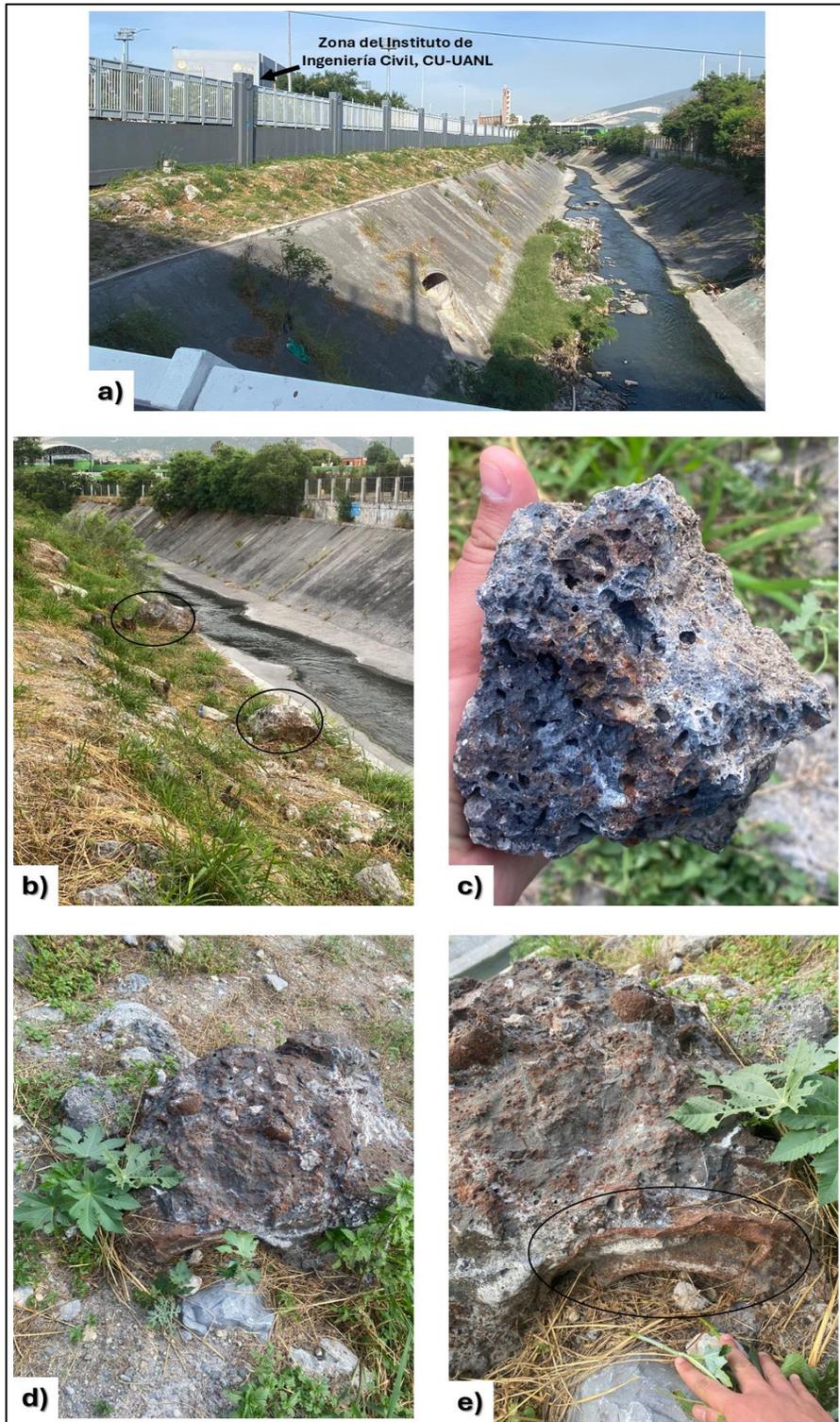


Figura 29. Material de escoria fuera del área de estudio: a) ubicación de la zona, al lado del Instituto de Ingeniería Civil, b) escorias dispersas, c) escoria de menor tamaño, d) escoria oxidada, e) fragmento metálico oxidado adherido a este material.

4.2 ADQUISICIÓN DE DATOS GEOELÉCTRICOS

En la presente sección se explica detalladamente la aplicación de la técnica de tomografía de resistividad eléctrica 2D, la instrumentación empleada y el procedimiento en campo realizado para la obtención de valores de resistividad aparente en las seis líneas geofísicas.

4.2.1 Aplicación de la tomografía de resistividad eléctrica 2D.

Según lo descrito en el marco teórico de este trabajo, entre mayor sea la longitud de la línea, mayor será la profundidad de investigación. Por lo cual, para adquirir datos de resistividad aparente a diversas profundidades en el sitio de estudio, las seis líneas geofísicas se colocaron en campo con longitudes distintas.

Dado que el área de estudio está ubicada en una zona urbana se necesita una relación señal-ruido eficiente, por ello se seleccionaron los arreglos *Wenner* y *Schlumberger* para este trabajo de investigación, debido a que presentan una intensidad de señal más fuerte comparada con otros arreglos, además de una mejor resolución a profundidades someras (Okpoli, 2013; Gómez et al., 2021).

A continuación, en la tabla 3 se describe la longitud, el espaciamiento entre cada electrodo, el arreglo electródico, así como el equipo utilizado en cada una de las líneas geofísicas del presente trabajo de investigación. Se puede observar que, entre mayor es el espaciamiento entre los electrodos, la línea tiene mayor longitud.

Tabla 3. Características de cada línea geofísica.

Línea	Longitud (m)	Número de electrodos utilizados	Espaciamiento entre electrodos a (m)	Arreglo electródico	Equipo utilizado
1	27	28	1	Schlumberger	<i>SuperSting R1</i>
2					
3					
4	108		4		
5	39	14	3	Wenner	<i>Terra Ez Res Pro</i>
6	100	11	10		

4.2.2 Equipo

La descripción y el procedimiento en campo de cada uno de los dos equipos utilizados en este trabajo se explican a continuación.

4.2.2.1 Equipo *SuperSting™ R1*

Es un instrumento de resistividad, polarización inducida y potencial espontáneo portátil, creado por la compañía *AGI (Advanced Geosciences, Inc)*. Este equipo es de un solo canal (*R1*), lo que significa solo se pueden usar cuatro electrodos (dos para corriente y dos para potencial) por cada medición. En la Figura 30 se observa este equipo con cada uno de sus dispositivos.



Figura 30. Equipo SuperSting R1 con sus dispositivos.

1. Panel frontal. 2. Switch box. 3. Power supply. 4. Generador de energía.

Las funciones de cada dispositivo que compone al equipo *SuperSting R1* son:

1. Panel frontal: Es la consola principal del equipo, en donde se están los controles necesarios para su configuración, así como los conectores que permiten la conexión con los demás dispositivos. Además, en este dispositivo se lleva a cabo la lectura y el almacenamiento de la información obtenida en campo. En la Figura 31 a se señalan solamente los elementos más importantes de este panel.

2. Switch Box: El objetivo principal de este dispositivo es realizar la alternancia de los electrodos de manera automática de acuerdo con el arreglo electródico elegido, lo que significa que el equipo asigna para cada medición cuales dos electrodos se utilizarán para inyectar la corriente en el subsuelo y cuales otros dos se emplearán para medir la diferencia de potencial (Figura 31 b).

3. Power Supply: Es el convertidor de corriente que mantiene con energía al equipo (Figura 31 c).

4. Generador de corriente *Honda Inverter EU22i*.



Figura 31. Componentes del equipo SuperSting™ R1.

a) Panel frontal: 1. Conectores para los cables que se vinculan a la Switch Box.
2. Conector para enlazar al dispositivo Power Supply. 3. Pantalla de cristal líquido.

4. Teclado; b) Switch Box: 1. Conectores para los cables multi-electrodo AGI;

c) Power Supply: 1. Conector que se vincula con el panel frontal. 2. Conector que se enlaza con el generador de energía.

En la Figura 32 se muestran los cables multi-electrodo patentados también por la compañía *AGI*. Su objetivo es transmitir la corriente generada por el equipo al subsuelo mediante una estaca, al igual que miden la diferencia de potencial. Este proceso se lleva a cabo conectando los cables al dispositivo *switch box*, el cual permite la alternancia automática de los cuatro electrodos por cada medición.

Cabe destacar que para el equipo *SuperSting™ R1* se utilizan 28 cables multi-electrodo *AGI*.



Figura 32. Cables multi-electrodo AGI.

Además del equipo y los cables multi-electrodo, se utilizaron las siguientes herramientas:

- Cinta de medir.
- Estacas de acero inoxidable de 45 cm.
- Martillos.

El procedimiento para instalar cada línea geofísica con el equipo *SuperSting™*, se realizó de la siguiente manera:

1. Primeramente, con la cinta de medir se estableció la longitud de cada línea.
2. Después, las estacas de acero inoxidable se colocaron fijas en el terreno de acuerdo con el espaciamiento entre electrodos de cada línea (Figura 33 a).
3. Posteriormente, cada cable multi-electrodo se colocó con una estaca de acero inoxidable (Figura 33 b).
4. Cada cable tiene un sensor, el cual se enlazó con una respectiva estaca, para formar el electrodo (Figura 33 c-d).
5. Por último, los dispositivos *power supply* y *switch box* se conectaron al panel frontal del equipo, y a su vez, los cables multi-electrodo se conectaron al dispositivo *switch box*.

6. Una vez que se instaló la línea geofísica se configuró en el panel frontal los parámetros utilizados como el arreglo eléctrico, la corriente inyectada, entre otros, para comenzar con las mediciones de resistividad aparente (Figura 33 e).



Figura 33. Instalación de las líneas geofísicas en campo: a) se colocan las estacas de acero inoxidable a lo largo del perfil, b) se coloca cada cable con una estaca, c) electrodo formado a partir del sensor del cable multi-electrodo y una estaca, d) electrodos formados a largo del perfil, e) se configura el equipo con los parámetros necesarios para la medición.

4.2.2.2 Equipo Terra Ez Res™ Pro

Es un resistivímetro creado por la compañía *Terra Exploration Group*, tiene como opciones las funciones de medición de la resistividad, resistencia y voltaje del subsuelo. En la Figura 34 se muestra este equipo, así como se señalan sus elementos más importantes.



Figura 34. Equipo Terra Ez Res Pro: 1. Conectores para los electrodos de corriente. 2. Conectores para los electrodos de potencial. 3. Interruptor giratorio para seleccionar la función del equipo. 4. Pantalla de cristal líquido.

Las herramientas utilizadas para realizar la adquisición de datos con este equipo son:

- Cinta de medir.
- Estacas de acero inoxidable.
- Martillos.
- Cables eléctricos con pinza *tipo caimán*.
- 4 carretes de cables eléctricos.

A continuación, se explica detalladamente el procedimiento realizado en campo para la adquisición de datos de resistividad aparente con el equipo *Terra Ez Res™ Pro*.

1. Primero se midió la longitud de la línea geofísica y se colocó la cinta de medir en el suelo como base.

2. Las estacas de acero inoxidable se fijaron en el terreno de acuerdo con la distancia entre electrodos de cada línea.
3. Después, los cuatro cables se conectaron al equipo, dos cables se enlazaron a los conectores para inyectar la corriente y los otros dos a los conectores para medir la diferencia de potencial (Figura 35 a-b-c).
4. Para adquirir cada medición de resistividad aparente, dos cables de corriente se enlazaron con dos estacas mediante el cable con pinza *tipo caimán* y después se hizo lo mismo con los dos cables de potencial. Para formar los dos electrodos de corriente y los dos de potencial (Figura 35 d).
5. Posteriormente, se eligió la función a medir en el equipo (en este caso resistividad aparente), para comenzar con las mediciones.
6. Por último, es importante destacar que los cables utilizados para este equipo no son cables multi-electrodo como en el equipo *SuperSting™*. Por lo cual, para alternar los electrodos de potencial y corriente a lo largo de la línea de medición, cada cable se conectó con la estaca de manera manual en campo, de esta forma se obtuvo cada valor de resistividad aparente (Figura 35 e).

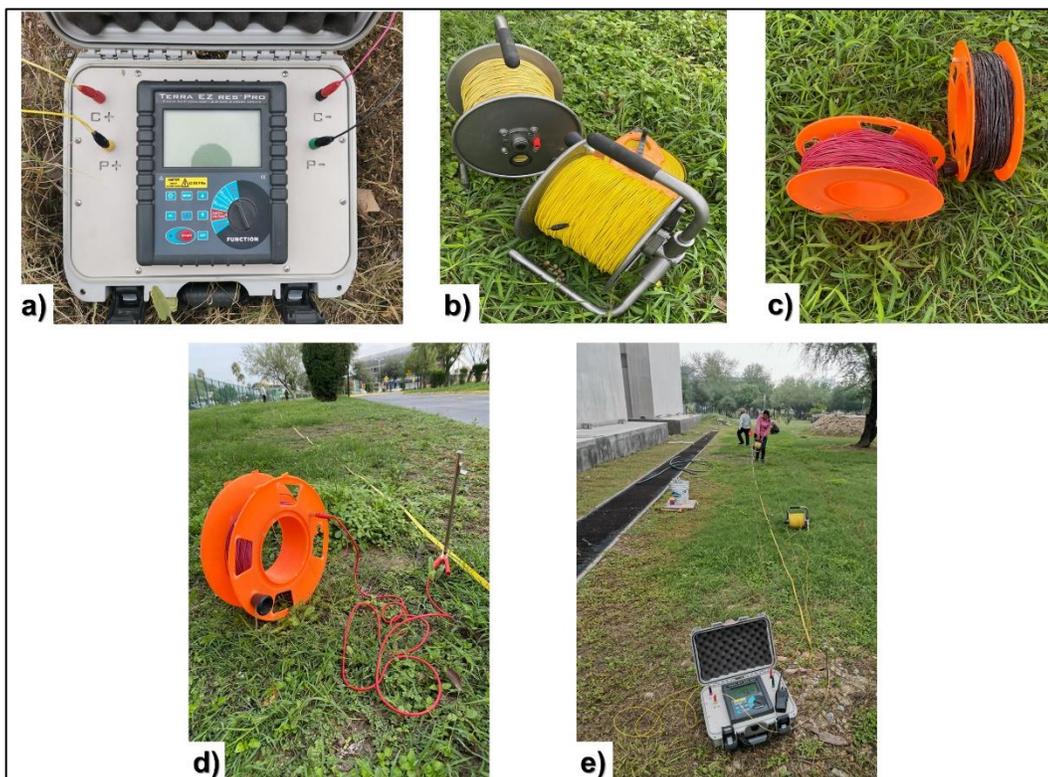


Figura 35. Instalación de las líneas geofísicas en campo: a) se conectan los cables al equipo, b) carretes de los dos cables utilizados para inyectar corriente, c) carretes de los dos cables empleados para medir la diferencia de potencial, d) electrodo formado al conectar los cables a la estaca metálica mediante el cable con pinza tipo caimán, e) los cables se conectan a cada estaca de manera manual para la alternancia de electrodos.

La Figura 36 corresponde a las seis líneas geofísicas instaladas para el presente trabajo de investigación.



Figura 36. Líneas geofísicas instaladas en la zona de estudio: a) línea 1, b) línea 2, c) línea 3, d) línea 4, e) línea 5, f) línea 6.

4.3 PROCESAMIENTO DE DATOS

El procesamiento de datos consiste en realizar la inversión de las resistividades aparentes medidas en campo, con la finalidad de obtener un modelo bidimensional que muestre los valores de resistividad real en cada perfil geofísico.

4.3.1 Software

En el presente trabajo de investigación se utilizó el software comercial *EarthImager 2D* de la compañía *AGI*, el cual realiza el modelado directo e inverso bidimensional de datos de resistividad y polarización inducida incluyendo la topografía del terreno.

Este software utiliza los métodos de *Gauss-Newton* y *Quasi-Newton*, también para realizar la inversión de datos presenta las siguientes tres opciones de algoritmos de inversión:

1. *Damped Least Squares.*
2. *Smooth Model inversion.*
3. *Robust inversion.*

Para realizar la inversión de datos de resistividad aparente de este trabajo, se utilizó el algoritmo *Smooth Model inversion*. De acuerdo con Pellicer (2015) este algoritmo es más eficiente en zonas donde se presenten variaciones graduales de resistividad en el subsuelo.

La técnica de tomografía de resistividad eléctrica 2D permite adquirir en campo una representación bidimensional de la distribución de la resistividad aparente, denominada como *pseudosección de resistividad aparente observada*. Para llevar a cabo la inversión, el software calcula valores sintéticos de resistividad aparente, los cuales se representan en una *pseudosección de resistividad aparente calculada*. La inversión se realiza a partir del método de optimización al comparar estas dos pseudosecciones mediante un algoritmo iterativo y obtener la sección de resistividad real.

Para obtener un modelo de resistividad real óptimo, es fundamental que el porcentaje del error cuadrático medio *RMS* sea mínimo, es decir, que la diferencia entre los datos calculados y los medidos sea menor. Conforme las iteraciones aumentan, el valor de *RMS* tiende a disminuir, por lo cual, López et al. (2012) señalan que un modelo adecuado de resistividad real se debe seleccionar para una iteración donde el error haya convergido y no cambie significativamente, esto sucede normalmente entre la cuarta y quinta iteración. De acuerdo con AGI (2009),

el valor RMS debe ser menor al 10% para garantizar la precisión del modelo obtenido. Es de suma importancia destacar que, cada modelo de resistividad real obtenido debe ser congruente con la geología del lugar de estudio.

Los modelos de resistividad real de cada perfil geofísico realizados en esta investigación se presentan en el capítulo de resultados, mientras que la pseudosección de resistividad aparente obtenida en campo y la calculada por el software se muestran en la sección de anexos.

4.4 MODELOS DE INTERPRETACIÓN GEOLÓGICOS-GEOFÍSICOS.

La interpretación de los valores de resistividad real es de suma importancia para obtener información sobre los materiales geológicos del subsuelo en el área de investigación. El contraste de resistividades obtenido en cada modelo permite diferenciar estos materiales en función de sus respectivos valores de resistividad. Dado que la resistividad de un material puede variar dentro de un amplio rango, es fundamental tener un conocimiento previo de la geología del área de estudio.

Para cumplir con los objetivos de esta investigación y obtener los modelos geológicos-geofísicos, los valores de resistividad resultantes de cada perfil geofísico se relacionaron con los materiales geológicos de la zona considerando como base diversas fuentes bibliográficas.

También, con la finalidad de obtener un conocimiento más amplio de la geología local y llevar a cabo una interpretación geológica eficiente en esta investigación, se elaboraron correlaciones estratigráficas a partir de la estratigrafía de los pozos y sondeos reportados en los informes: “*Sondeos Gradadas-Área Deportiva del IIC*” (2011) y “*Sondeos Campo Football-IIC*” (2014), proporcionados por el Departamento de Geotecnia del Instituto de Ingeniería Civil.

La correlación estratigráfica consiste en comparar dos o más secciones estratigráficas de un intervalo de tiempo semejante y geográficamente separadas entre sí, estableciendo una correspondencia o equivalencia entre los niveles de estratificación similares en cada sección (Vera, 1994). El objetivo fundamental de la correlación estratigráfica es ampliar la validez de los datos estratigráficos locales, en la Figura 37 se presenta un ejemplo de este procedimiento.

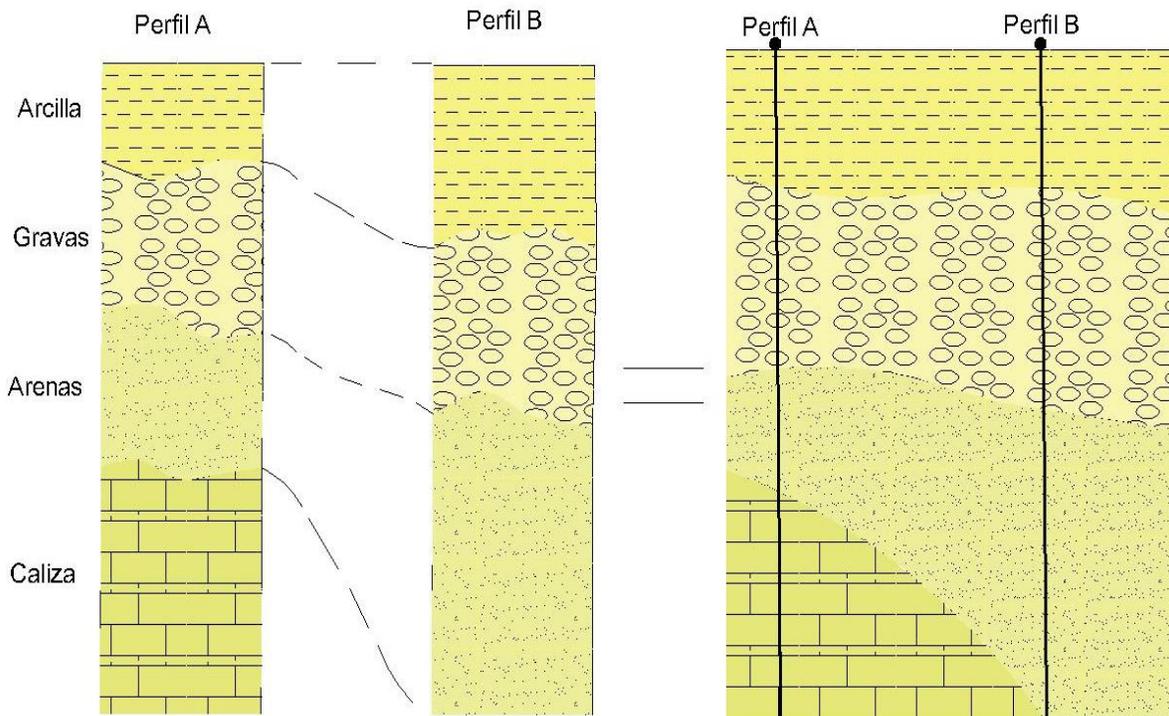


Figura 37. Ejemplo de correlación estratigráfica.
Adaptado de Kappus et al. (2011) y Martínez (2018).

Las correlaciones estratigráficas (perfiles estratigráficos) y los modelos geológicos-geofísicos se elaboraron en el software *AutoCAD 2023* (versión estudiantil), así como se muestran y explican detalladamente en el capítulo de resultados y discusiones.

4.5 CORRELACIONAR CON EVIDENCIAS DE CONTAMINANTES EN LA ZONA DE ESTUDIO.

Para identificar las zonas contaminadas por escorias en el área de estudio, los valores anómalos presentes en los modelos de resistividad se asociaron con las escorias. Además, con la finalidad de caracterizar este material de escoria de manera detallada, se obtuvo la composición química de una muestra obtenida por García (2017), (Figura 38).



Figura 38. Muestra de escoria del área de estudio.

Para obtener la composición química de la muestra de escoria se utilizó el método de *Fluorescencia de Rayos X (FRX)*. Como se puede observar, la muestra presentaba oxidación, por lo cual, el análisis se realizó en la parte con presencia de oxidación y en la parte sin oxidación de la muestra.

Preparación de la muestra

Para realizar el método de *FRX* es fundamental la homogeneidad de la muestra, de lo contrario se pueden invalidar los resultados, por lo tanto, la muestra de escoria se trituró y pulverizó para obtener un alto grado de homogeneidad y finura. Para lograr esta homogeneidad se utilizó el instrumento *Esmeril Ryobi* (herramienta eléctrica con un disco de corte abrasivo) y de esta manera, se obtuvieron dos muestras en polvo de la escoria: una con oxidación y otra sin. Por último, las dos muestras se colocaron en el *Horno Matest* por un día para que perdieran humedad y no afectara en los resultados, este procedimiento se muestra en la Figura 39.

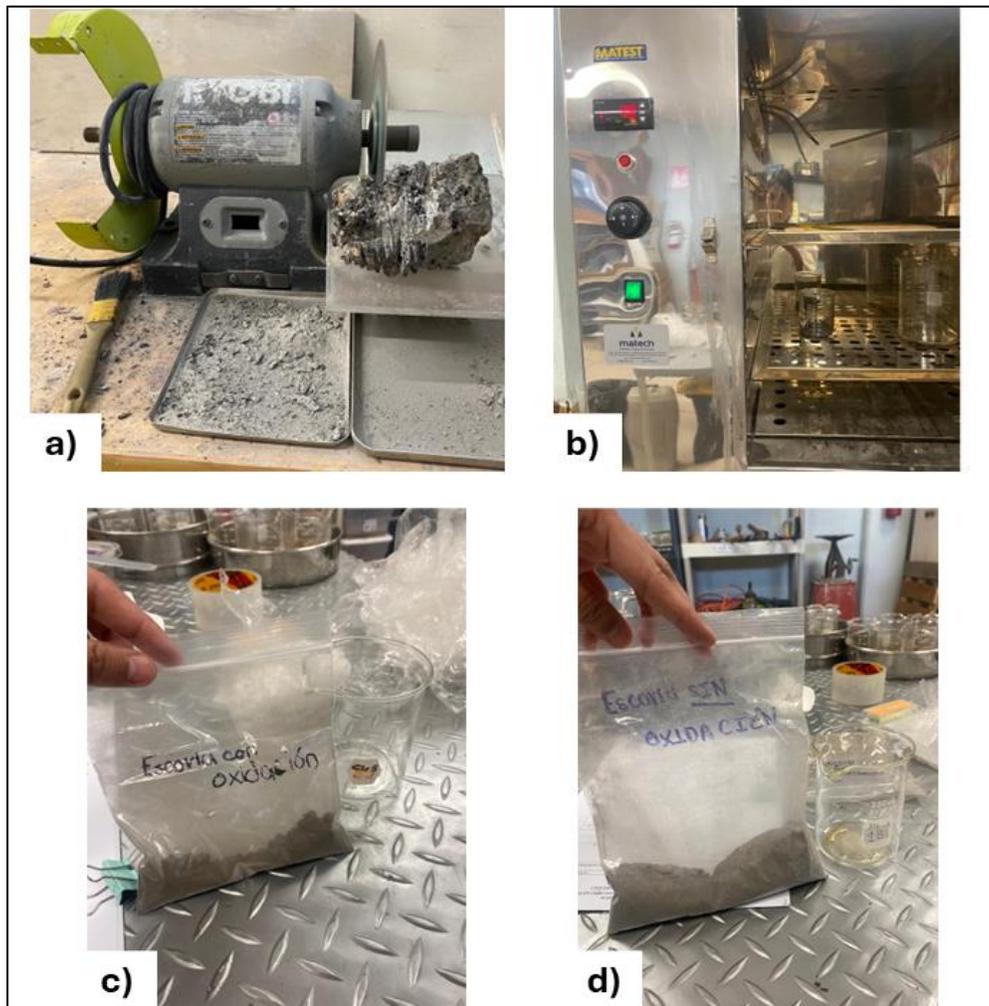


Figura 39. Procedimiento de pulverización de la escoria: a) instrumento Esmeril Ryobi triturando la muestra, b) muestras pulverizadas en el Horno Matech, c) muestra pulverizada de la escoria sin oxidación, d) muestra pulverizada de la escoria con oxidación.

Análisis de FRX

Una vez obtenidas las muestras pulverizadas, se prensaron en forma de pastillas, con el fin de colocarlas en el espectrómetro de fluorescencia de rayos X marca PANalytical-Epsilon3-XL (Figura 40).

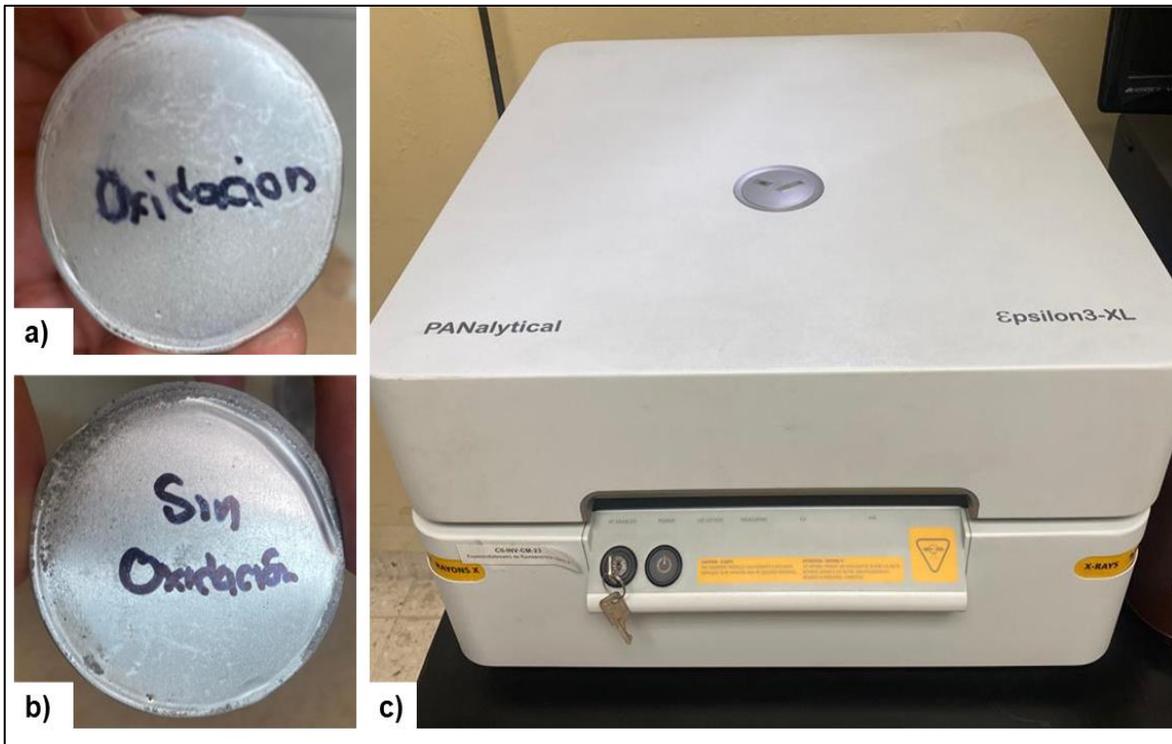


Figura 40. Análisis FRX: a) pastilla de la muestra con oxidación, b) pastilla de la muestra sin oxidación, c) equipo utilizado.

La composición química de la muestra de escoria analizada se presenta en el capítulo de resultados y discusiones.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS Y DISCUSIONES

En este capítulo se presentan los modelos de resistividad real de cada perfil geofísico y se comparan con la geología de la zona. Para ello, en las primeras secciones se presentan primero los perfiles estratigráficos realizados cerca de cada perfil, con la finalidad de asociar las resistividades obtenidas a los materiales geológicos e identificar aquellos valores que podrían estar asociados con las escorias reportadas. A partir de la integración de los datos de resistividad real y las correlaciones estratigráficas, se desarrollaron modelos geológicos-geofísicos en los cuales se identifican las posibles zonas contaminadas por escorias.

5.1 PERFIL GEOFÍSICO 1

La primera línea geofísica se ubicó estratégicamente paralela a la ubicación donde se realizaron los pozos a cielo abierto *PCA-1*, *PCA-2* y *PCA-3*. Además, está ubicada cerca de la evidencia de escorias reportada por García (2017) y del *PCA-4*, como se observa en la Figura 41.

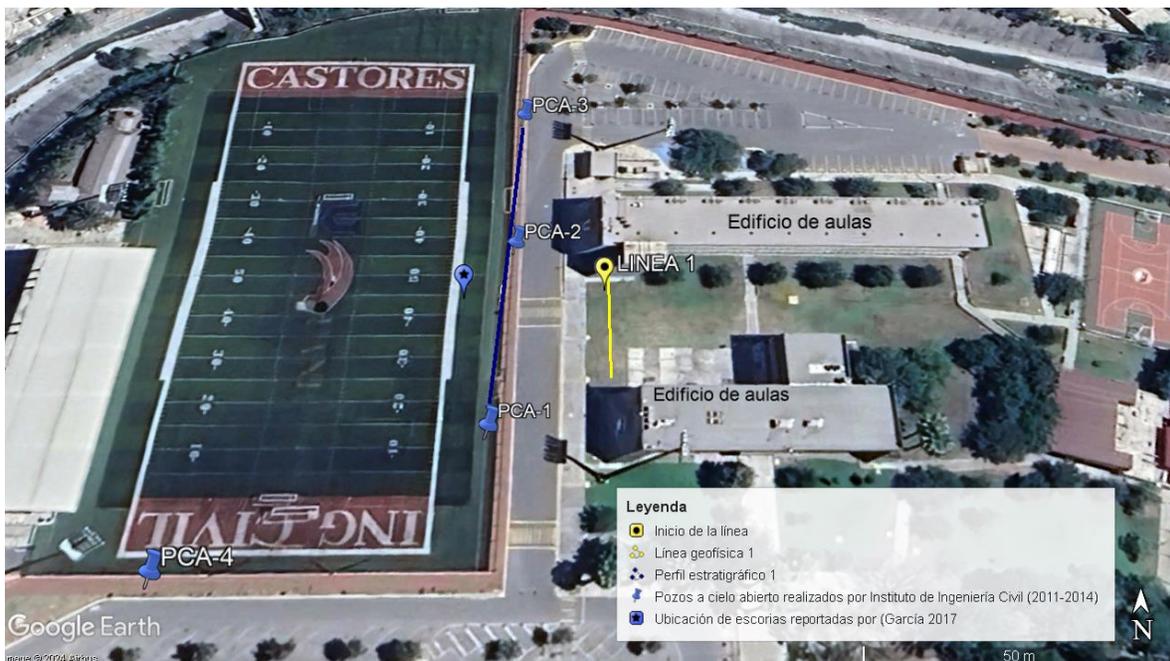


Figura 41. Ubicación de la línea geofísica 1 y de los pozos: *PCA-1*, *PCA-2*, *PCA-3* y *PCA-4*. Generado en Google Earth (2024).

En la Figura 42 se puede observar una representación de la estratigrafía de los pozos a cielo abierto PCA-1, PCA-2, PCA-3 y PCA-4.

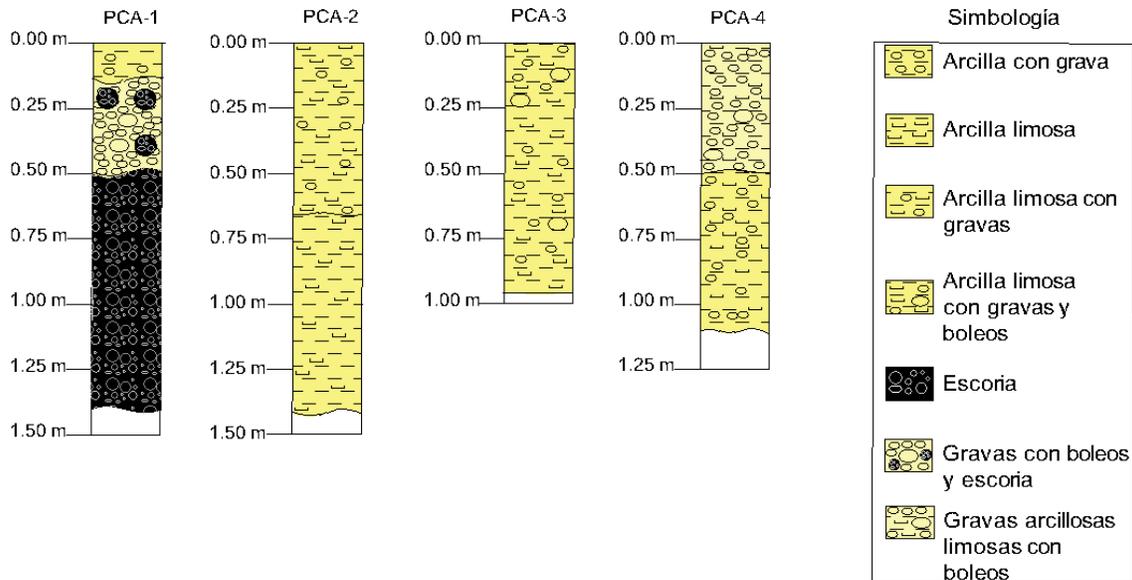


Figura 42. Representación de la estratigrafía de los PCA-1, PCA-2, PCA-3 y PCA-4 reportada por Instituto de Ingeniería Civil (2014).

El perfil estratigráfico 1, presentado en la Figura 43, se realizó a partir de la correlación estratigráfica de los pozos a cielo abierto PCA-3, PCA-2 y PCA-1. Este perfil tiene una orientación N-S y se extiende a lo largo de 64 m aproximadamente. Al inicio del perfil, se reportaron arcillas limosas con gravas aisladas hasta una profundidad de 0.75 m, seguidas de arcillas limosas hasta 1.5 m de profundidad (PCA-2). Hacia el final de este perfil (PCA-1), se identificaron gravas con escorias a una profundidad de 0.5 m, situadas sobre un estrato conformado por material de escoria, reportado hasta una profundidad de 1.5 m.

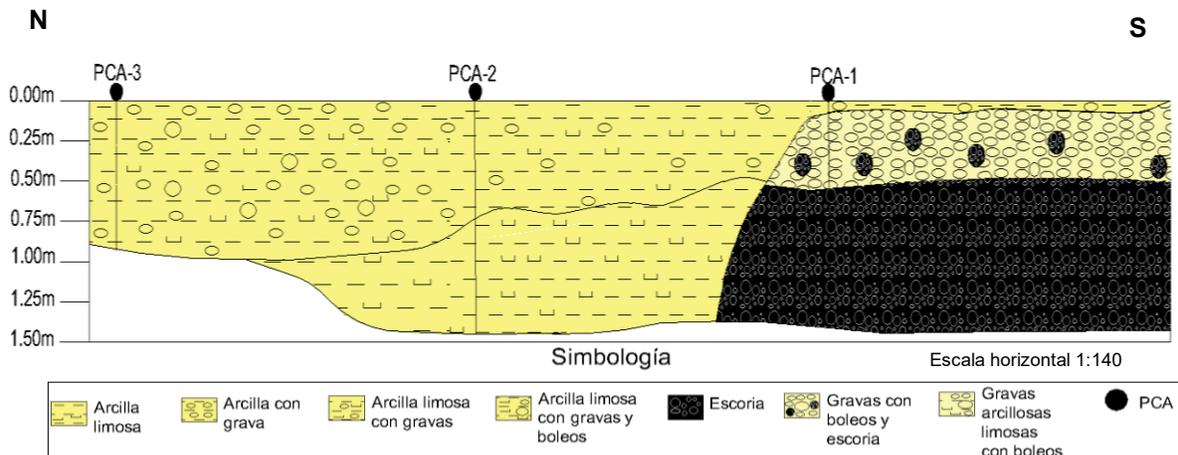
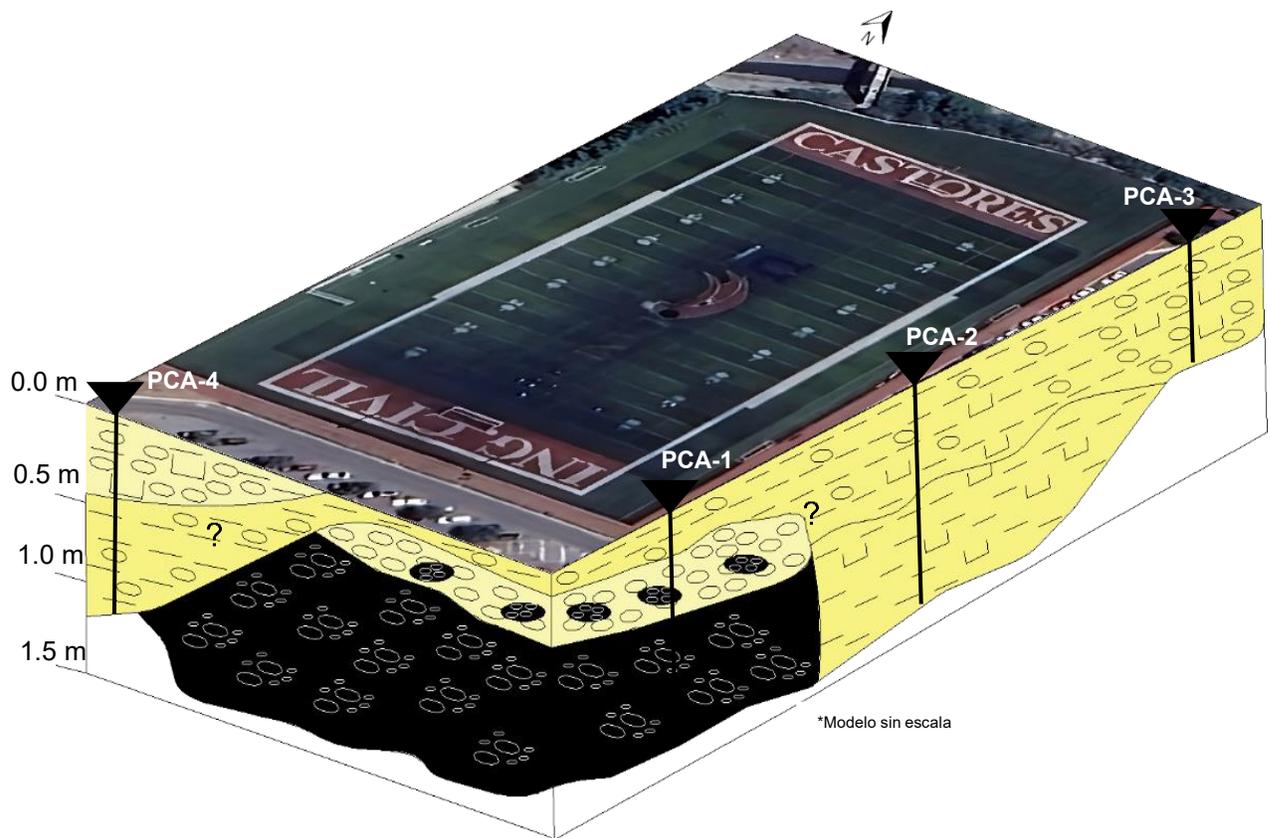


Figura 43. Perfil estratigráfico 1.

Para delimitar la extensión del material de escoria en el área de estudio, se llevó a cabo una representación 3D correlacionando la estratigrafía del PCA-4 con el PCA-1, y a su vez correlacionandola con el perfil estratigráfico 1 (Figura 44). Se pueden observar gravas arcillo limosas en los primeros 0.5 m (PCA-4), seguidas por un estrato de arcillas con gravas. Además, se destaca un estrato conformado completamente por escoria con una profundidad entre 0.5 y 1.5 m. Por lo tanto, en esta representación, se identificó un estrato compuesto por material de escoria con un espesor aproximado de 1 m, que se extiende de oeste a este y continúa hacia el norte. Cabe destacar que se desconoce la extensión horizontal del estrato de escoria (entre el PCA-4 y PCA-1) debido a la ausencia de sondeos en esta zona, así como entre el PCA-1 y el PCA-2.



Simbología

	Arcilla limosa		Arcilla con grava		Arcilla limosa con grava
	Escoria		Grava con escoria		Grava arcillo limosa

Figura 44. Primera representación tridimensional.

La Figura 45 corresponde al modelo de resistividad real del primer perfil geofísico. Este modelo se obtuvo a partir de 4 iteraciones entre los datos medidos en campo y los calculados, con un error RMS aceptable de 7.59% y un valor de 1.10 para el parámetro de suavizamiento L2.

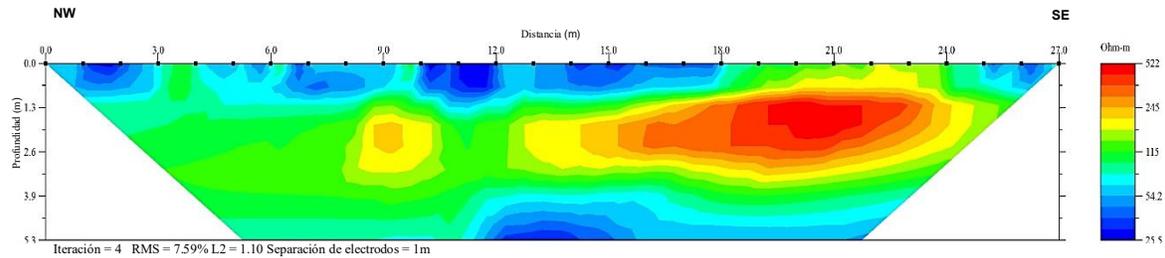


Figura 45. Modelo de resistividad real del primer perfil geofísico.

En este modelo se identificaron tres intervalos principales de resistividad, no obstante, es importante señalar que, diversos autores reportan variaciones en los valores de resistividad para el mismo tipo de material; esto se debe principalmente a que los rangos de resistividad varían según las propiedades del subsuelo, como la mineralogía, la porosidad, la geometría y conectividad de los poros, la temperatura y el grado de saturación de los sedimentos (Samouëlian et al., 2005; Zhou et al., 2015; Kazmi et al., 2016). Por esta razón, en el presente trabajo se hace referencia a diversas fuentes bibliográficas para un mismo material en los perfiles geofísicos.

1. Primer intervalo: Valores de resistividad que varían entre 25.5 y 80 Ω m, representados por tonalidades azules. Estas bajas resistividades predominan a lo largo del perfil, con un espesor máximo de 1.42 m. También se identificó otra zona con este rango de valores a profundidades entre 4 y 5.3 m.

Estos valores coinciden con el rango de 1 a 100 Ω m establecido por Telford et al. (1990) para arcillas. De acuerdo con Bryson y Bathe (2009), estas bajas resistividades se deben a la conductividad eléctrica superficial de los minerales arcillosos presentes en las arcillas, propiedad que también presentan los limos. Por lo tanto, este rango se puede asociar con los limos y arcillas identificados en la representación tridimensional de esta zona a profundidades de hasta 1.5 m.

2. Segundo intervalo: Valores de resistividad que varían entre 80 y 205 Ω m (tonalidades verdes y amarillas), los cuales se atribuyen a gravas y arenas, de acuerdo con el rango de resistividades de 30 a 225 Ω m reportado por Reynolds (2011), Telford et al. (1990), McGinnis y Jensen (1971), Reynolds (1987a), Reynolds y Paren (1980, 1984) para estos materiales geológicos.

Además, Lucius et al. (2008) señalan que debido al mayor tamaño de las partículas que componen las gravas y arenas, estos sedimentos tienden a presentar mayor resistividad que los limos y arcillas. Sin embargo, es importante resaltar que, debido a que el subsuelo es una mezcla heterogénea, estos valores pueden estar asociados a una combinación de arenas, gravas y arcillas en menor proporción.

3. Tercer intervalo: Se destaca una anomalía de alta resistividad con valores que varían entre 205 y 522 Ωm , representados por colores naranjas y rojos. Esta anomalía se extiende horizontalmente a lo largo de 12 m y se encuentra a profundidades de 0.7 a 3.4 m. También se identificó una anomalía de menor espesor y longitud, conformada por las resistividades mínimas de este rango (205 – 217 Ωm).

Como se puede observar en este modelo, la anomalía de más alta resistividad se localiza al final del perfil geofísico. De manera similar, al final del primer perfil estratigráfico se reportaron gravas con escoria y un estrato conformado por material de escoria, ubicado de forma paralela y cercana al perfil geofísico. Además, los sedimentos como las arcillas con limos y gravas reportados en esta zona tienden a presentar menores resistividades.

Considerando que, Ullrich et al. (2009) reportaron un intervalo de 200 a más de 500 Ωm para escorias derivadas de la fundición de hierro, las altas resistividades obtenidas en el primer perfil geofísico se pueden asociar a la presencia de escorias reportadas en el área de estudio.

Con base en la interpretación geológica anterior, se desarrolló un modelo geológico-geofísico a partir de los datos de resistividad real del primer perfil. Como se muestra en la Figura 46, en este modelo se destacan dos posibles áreas constituidas por material de escoria.

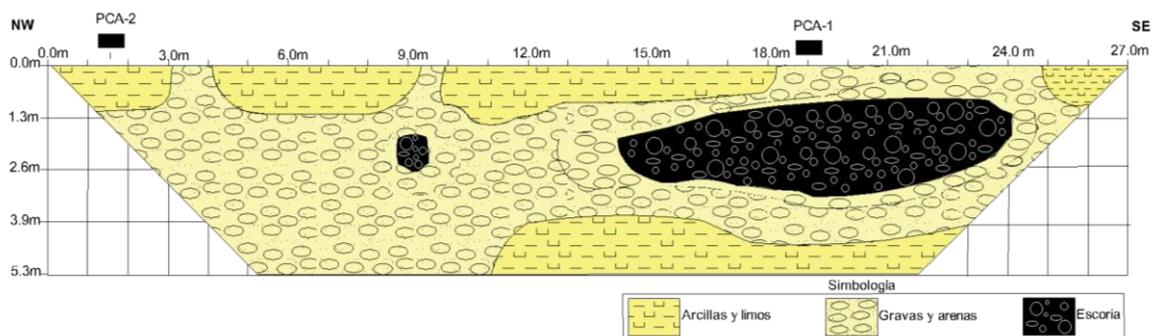


Figura 46. Modelo geológico-geofísico del primer perfil geofísico.

5.2 PERFIL GEOFÍSICO 2

La Figura 47 corresponde a la segunda línea geofísica, la cual se realizó contigua a la evidencia de escorias reportada por García (2017). De igual manera, se ubicó cerca de la zona en la que se llevaron a cabo los sondeos SG-1, SG-3, SC-1 y SC-2.



Figura 47. Ubicación de la línea geofísica 2 y de los sondeos: SG-1, SG-3, SC-1 y SC-2. Generado en Google Earth (2024).

Como se puede observar en la Figura 48, los sondeos en la cancha SC-1 y SC-2 se llevaron a cabo hasta una profundidad de aproximadamente 6 m, mientras que los sondeos en la zona de las gradas SG-3 y SG-1 se realizaron aproximadamente hasta 8 m y 11 m, respectivamente. Esto permitió obtener un registro de la estratigrafía e identificar el material de escoria en esta zona a mayores profundidades. Una vez presentada la estratigrafía, se explicarán y mostrarán los perfiles estratigráficos realizados a partir de estos sondeos.

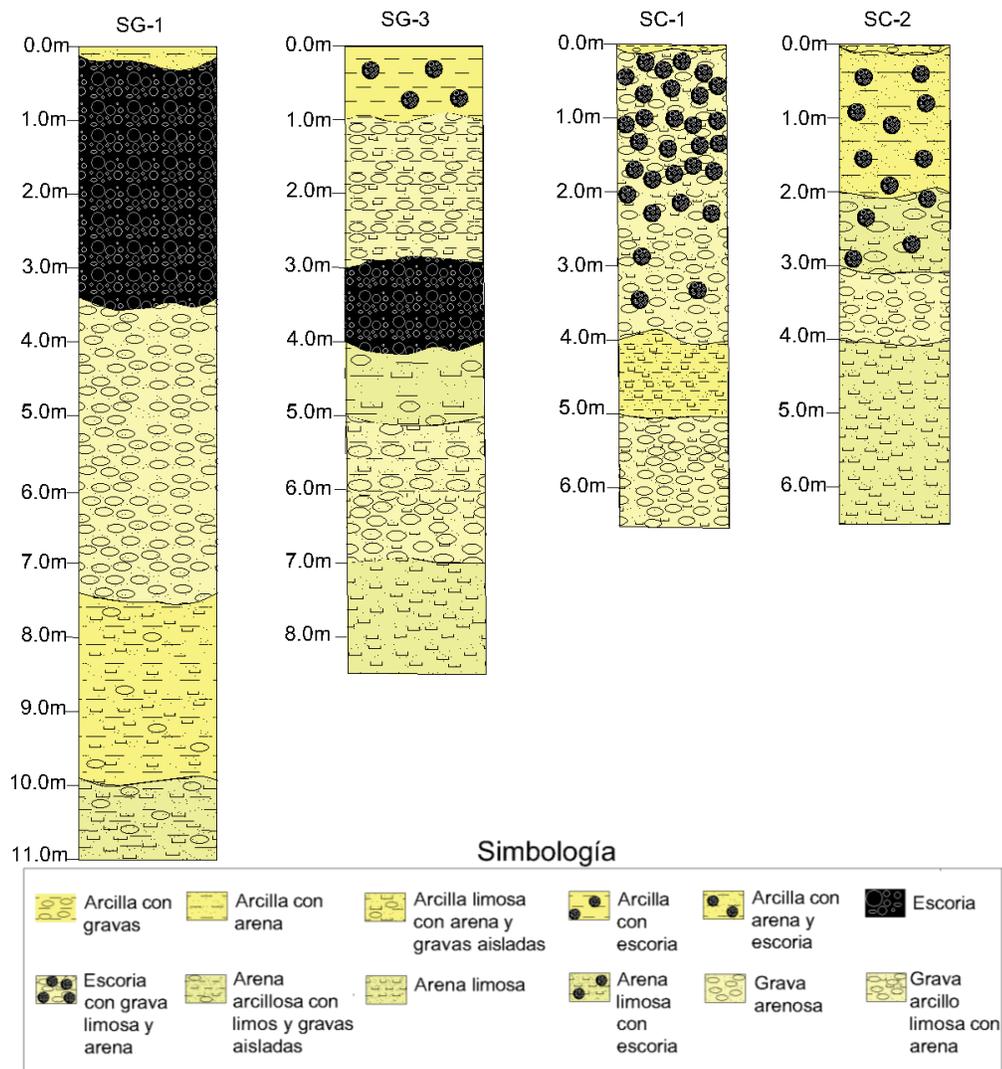
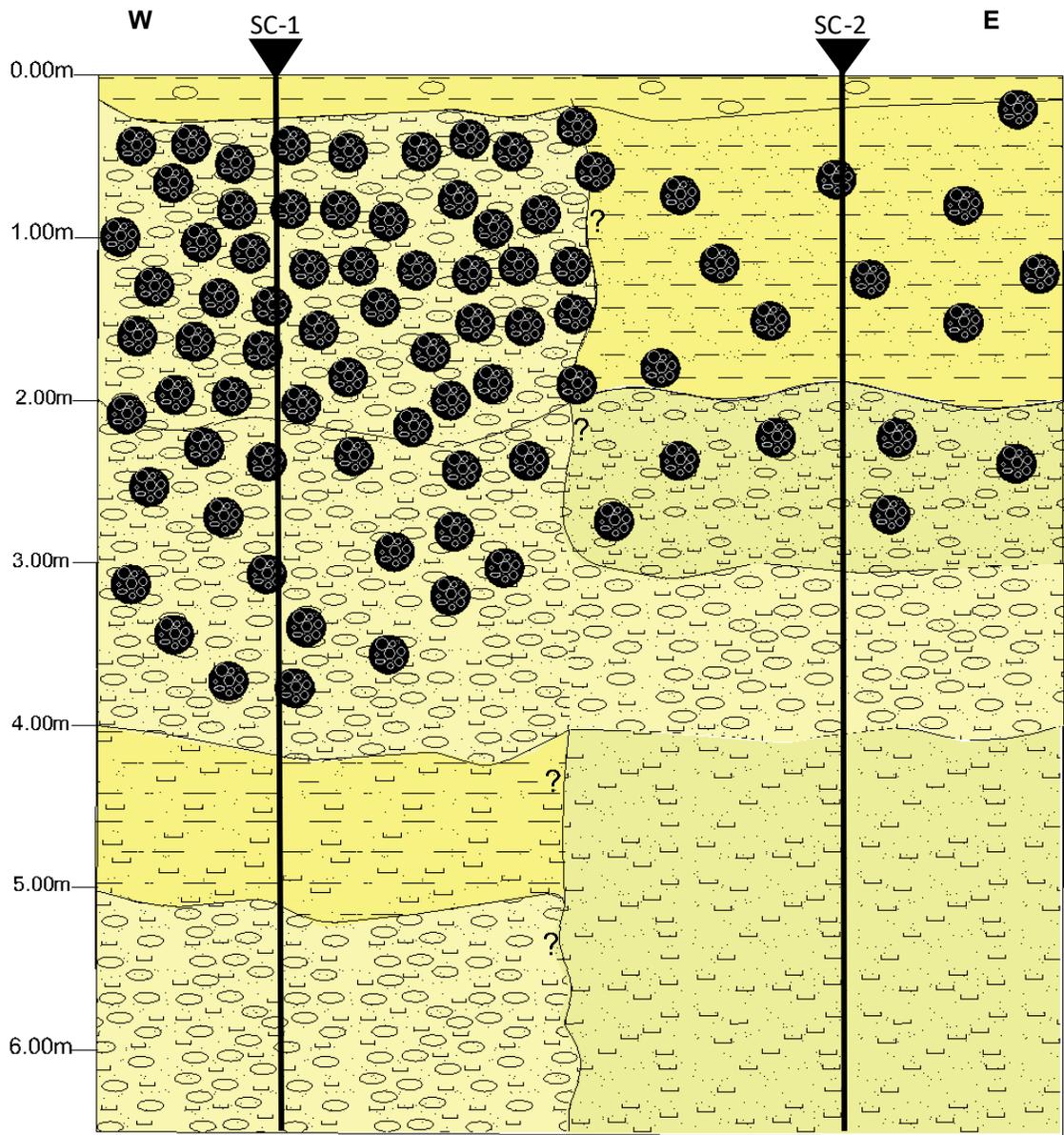


Figura 48. Representación estratigráfica de los sondeos SC-1, SC-2, SG-1 y SG-3 reportada por Instituto de Ingeniería Civil (2014) y Instituto de Ingeniería Civil (2011).

La Figura 49 muestra la correlación estratigráfica de los sondeos SC-1 y SC-2. Este perfil se extiende horizontalmente a lo largo de aproximadamente 22 m en dirección W-E. A una profundidad inferior a 0.25 m, se reportaron arcillas con gravas, las cuales están sobre un estrato de 4 m de espesor (SC-1), compuesto principalmente por escorias con gravas, limos y arena, a medida que la profundidad aumenta el material de escoria disminuye. Hacia el este del perfil, predominan en mayor parte sedimentos de arcilla con arena y arenas limosas con grava, mientras que la presencia de escorias es menor. Después de los 4 m de profundidad, predominan sedimentos como arcillas, limos, gravas y arenas. De acuerdo con lo anterior, en este perfil el material de escoria se identificó junto con otros sedimentos, hasta 4 m de profundidad.



Escala horizontal
1:160

Simbología

 Arcilla con grava	 Arcilla limosa con arena	 Arcilla con arena y escoria	 Escoria con grava, limo y arena	 Escoria
 Arena limosa	 Arena limosa con grava y escoria	 Grava con limo y arena	 Sondeo	

Figura 49. Perfil estratigráfico 2.

El perfil estratigráfico 3 (Figura 50) se obtuvo al correlacionar los sondeos SG-3 y SG-1, con una dirección de W-E y una longitud de 31 m.

En la parte inicial del perfil, se identificaron arcillas con escorias, seguidas de gravas, arcillas, limos y arenas entre una profundidad de 1 a 3 m (SG-3). A una profundidad de 3 a 4 m, se reportó un estrato de escoria, cuyo espesor aumenta hasta aproximadamente 4 m conforme se extiende hacia el este.

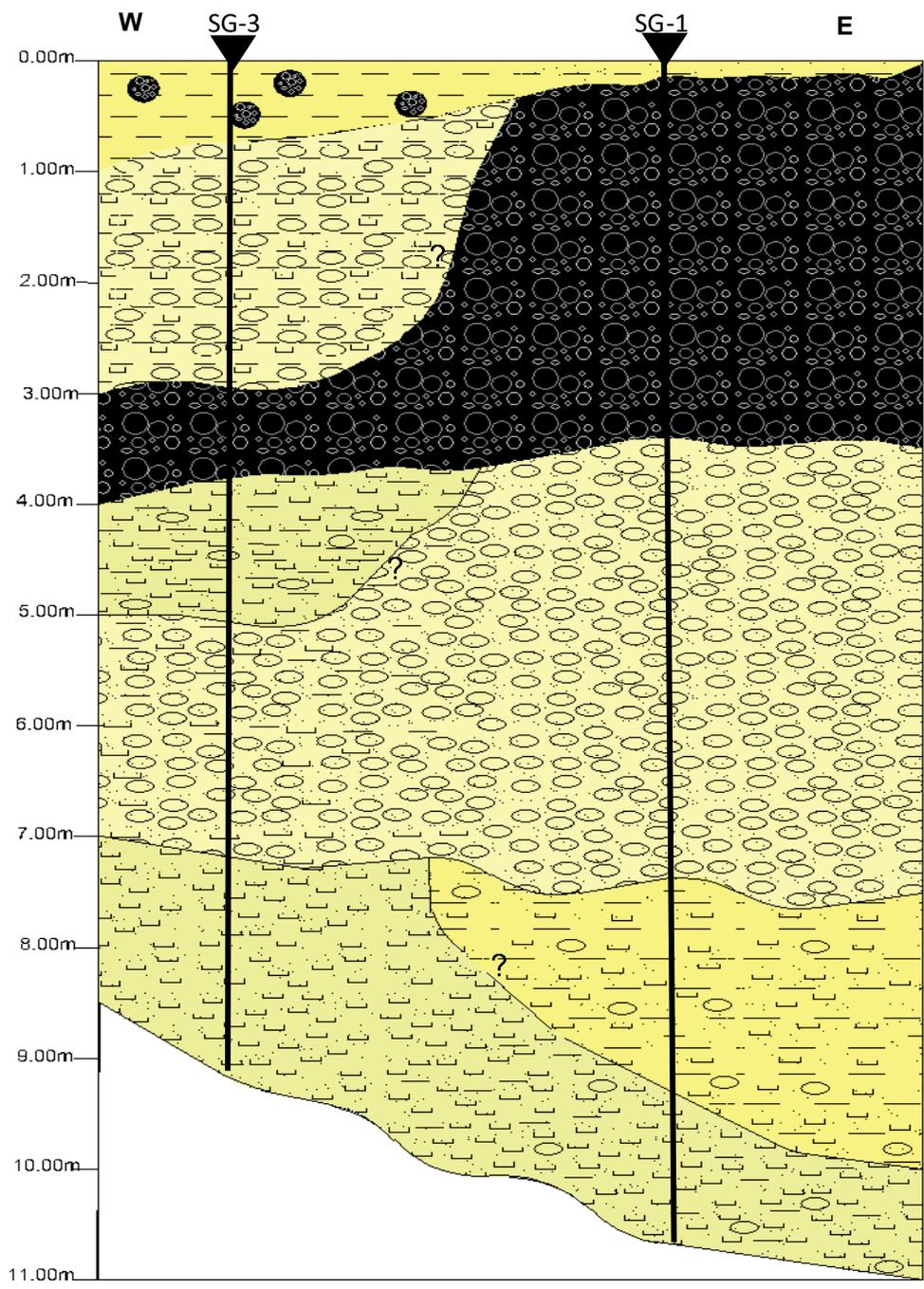
Se observaron arenas arcillo-limosas con grava a una profundidad de 4 a 5 m, subyacentes al estrato de escoria (SG-3), cuya extensión horizontal es desconocida. Posteriormente, se identificó un estrato de gravas arenosas que se extiende a lo largo del perfil, ubicado entre 4 y 7 m de profundidad. A mayores profundidades, se registraron arenas limosas y arcillas limo-arenosas con gravas aisladas. En este perfil destaca el estrato compuesto completamente por escoria, cuyo espesor aumenta hacia el este, entre una profundidad de 0.25 y 4 m (SG-1).

De manera similar, en el perfil estratigráfico 4 (Figura 51), se identificó material de escoria hasta una profundidad de 4 m. Este perfil se realizó al correlacionar los sondeos SC-1 y SG-1; el cual es perpendicular al perfil geofísico 2, cuya orientación es de NE-SW y longitud de 78 m.

En este perfil se reportaron arcillas con gravas aisladas y arena a una profundidad inferior a 0.25 m, las cuales están sobre un estrato compuesto principalmente de escorias con gravas, arenas y limos (SC-1). A medida que el perfil se extiende hacia el suroeste, se identificó un estrato compuesto por escorias hasta una profundidad de 4 m. Además, a partir de esta profundidad, se reportó una capa de gravas arenosas que inicia en el noreste con un espesor de 1 m y aumenta hasta 3 m, hacia el suroeste (SG-1). También, entre 7 y 11 m de profundidad, predominan arcillas y arenas con limos y gravas aisladas (SG-1), la extensión horizontal de estos sedimentos se desconoce.

Con la finalidad de determinar la extensión del material de escoria, se llevó a cabo una representación 3D a partir de los perfiles estratigráficos 3 y 4 (Figura 52). En la cual, se destaca un estrato compuesto completamente por escorias en una dirección W-E, que continúa hacia el noreste, sin embargo, la presencia de escoria disminuye en esta dirección (SC-1).

Según estos resultados, el material de escoria predomina principalmente en los primeros 4 m de profundidad, en esta zona. Por otra parte, se observa un estrato de gravas arenosas que predomina a una profundidad máxima de 7 m, subyacente al estrato de escorias.

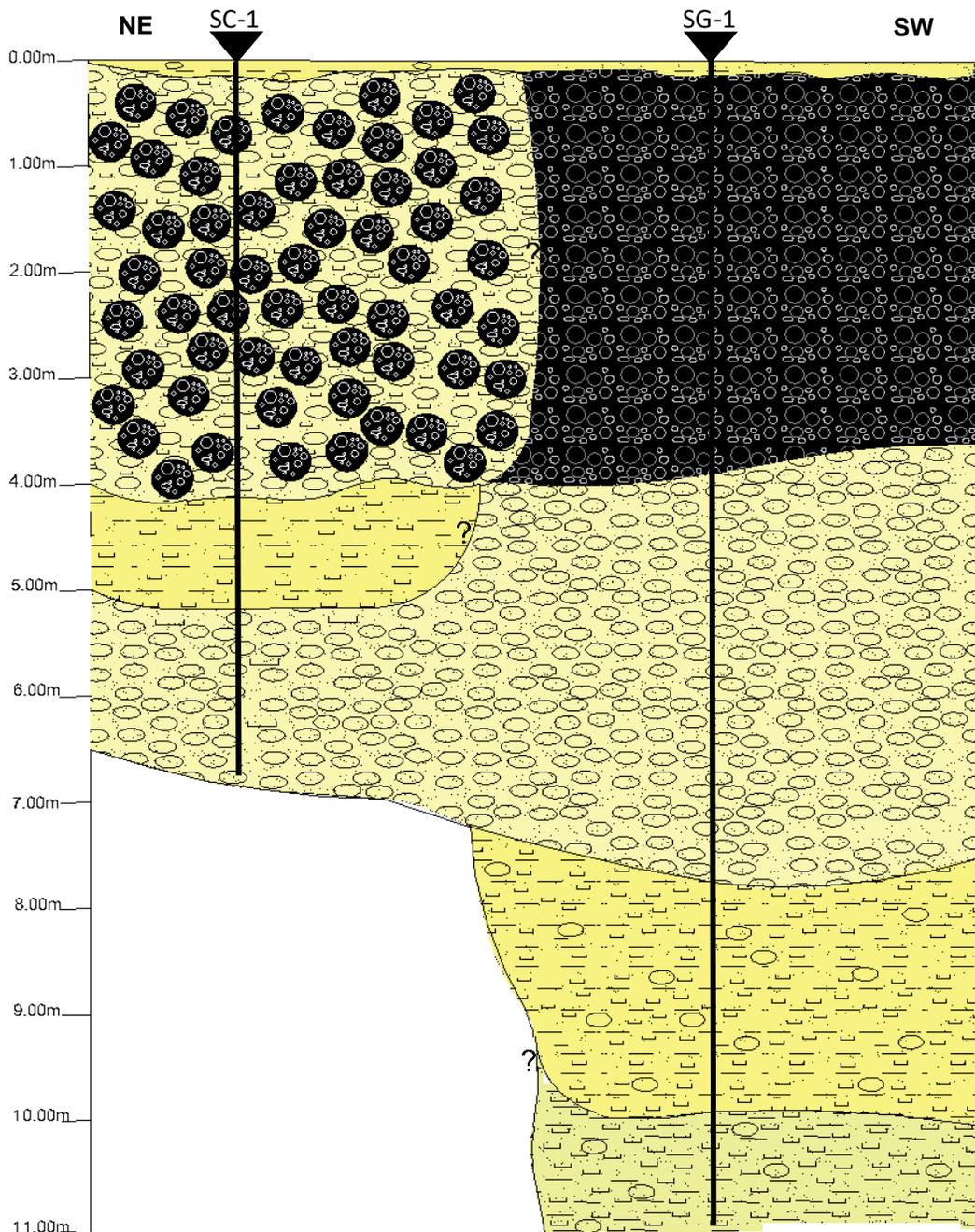


Simbología

Escala horizontal
1:270

	Arcilla con arena		Arcilla limosa con arena y gravas aisladas		Arcilla con escoria		Escoria
	Arena arcillo limosa con grava		Arena limosa		Grava con arena		Grava arcillo limosa con arena
							Sondeo

Figura 50. Perfil estratigráfico 3.

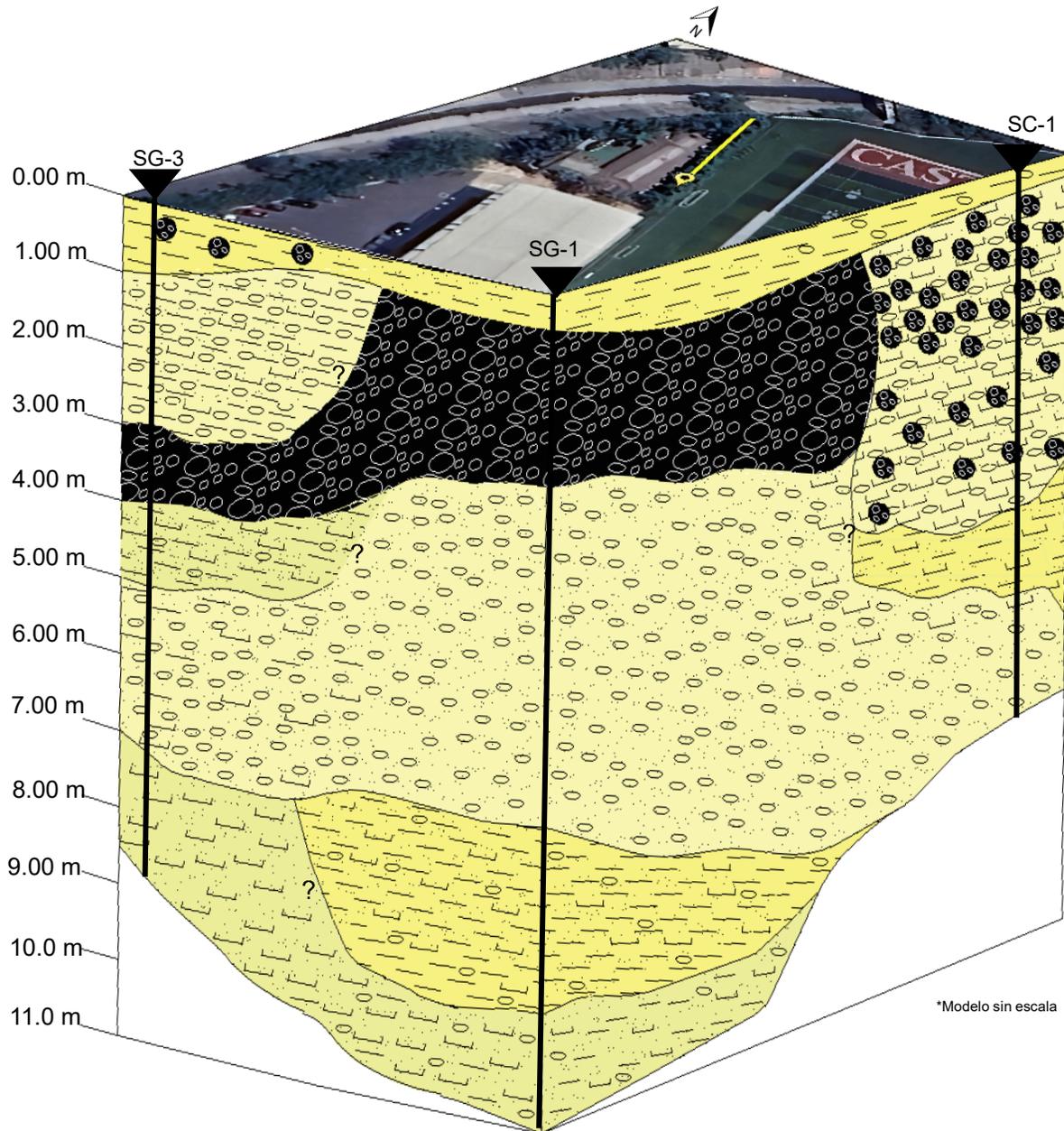


Escala horizontal
1:610

Simbología

	Arcilla con grava		Arcilla limosa con arena		Arcilla limosa con arena y gravas aisladas		Escoria con grava, limo y arena		Escoria
	Arena arcillo limosa con grava		Grava con arena		Grava con limo y arena		Grava limosa con arena y escoria		Sondeo

Figura 51. Perfil estratigráfico 4.



Simbología

	Arcilla con arena		Arcilla limosa con arena		Arcilla con grava		Arcilla limosa con arena y gravas aisladas		Arcilla con escoria		Escoria con grava, limo y arena		Escoria
	Arena arcillo limosa con grava		Arena limosa		Grava con arena		Grava arcillo limosa con arena		Grava con limo y arena		Grava limosa con arena y escoria		Sondeo

Figura 52. Segunda representación tridimensional.

El modelo de resistividad real del segundo perfil geofísico se obtuvo a partir de 4 iteraciones, con un error RMS de 13.10% y para el parámetro de suavizamiento L2 un valor de 1.17 (Figura 53).

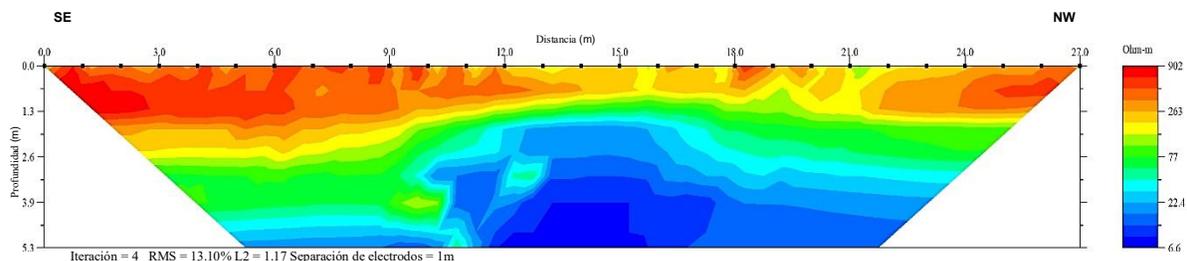


Figura 53. Modelo de resistividad real del segundo perfil geofísico.

A continuación, se describen los principales intervalos de resistividad presentes en este modelo, así como la interpretación geológica de estos valores:

1. Primer intervalo: Consiste en valores bajos de resistividad entre 6.6 y 40 Ωm (tonalidades azules), estos valores se sitúan dentro del intervalo de 5 a 30 Ωm señalado por Guérin et al. (2004) para arcillas. Dado que en la zona de estudio se ha reportado la presencia de limo, este primer rango de resistividades se puede relacionar con estos materiales geológicos.

Kazmi et al. (2016) y Sudha et al. (2009) indican que la resistividad eléctrica disminuye con el aumento del contenido de humedad en el subsuelo, particularmente en materiales de grano fino como las arcillas y los limos. Por lo tanto, el valor mínimo de 6.6 Ωm reportado podría atribuirse a que estos materiales estaban ligeramente húmedos al momento de realizar las mediciones.

2. Segundo intervalo: Se caracteriza por valores de resistividad que oscilan entre 40 y 210 Ωm (tonalidades verdes y amarillas), predominando en la parte intermedia del modelo. En la representación tridimensional de esta área destacan gravas arenosas, lo que indica que estas resistividades intermedias podrían estar relacionadas con estos materiales geológicos.
3. Tercer intervalo: Se identificaron anomalías de alta resistividad, con valores entre 210 y 902 Ωm (colores naranjas y rojos). Estos valores predominan mayormente a lo largo del perfil, a una profundidad máxima de 2.7 m, como se muestra en la Figura 53.

En la segunda representación tridimensional, se observa que los materiales geológicos cercanos al segundo perfil geofísico consisten principalmente en arcillas, gravas arcillo-limosas con arena, gravas arenosas y arena arcillo-limosa. Con base en esto, se puede concluir que el material de arcilla predomina en la mayoría de los sedimentos de esta área. Chambers et al. (2011) indican que la resistividad eléctrica disminuye con el incremento del contenido de arcilla en los sedimentos. Por lo tanto, las anomalías de alta resistividad identificadas en este modelo no corresponden a los materiales geológicos propios de esta zona.

Además, en la representación tridimensional de esta área destaca un estrato compuesto en su mayoría por escoria en los primeros 4 m de profundidad. Por consiguiente, estos altos valores de resistividad pueden asociarse con la presencia del material de escoria reportado.

La Figura 54 corresponde al segundo modelo geológico-geofísico, elaborado a partir de la interpretación geológica previa. Con base en este modelo se puede concluir que en esta área se identificó un estrato posiblemente compuesto en su mayor parte material de escoria en los primeros 2.7 m de profundidad.

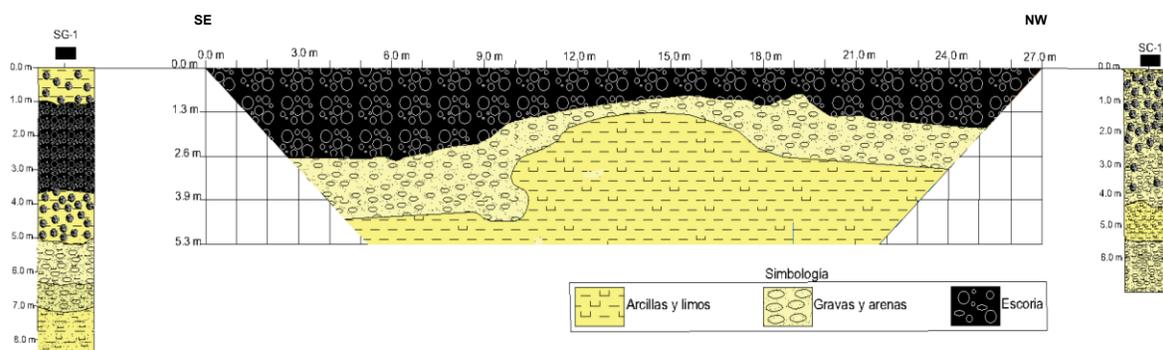


Figura 54 Modelo geológico-geofísico del perfil geofísico 2.

5.3 PERFIL GEOFÍSICO 3

La terca línea geofísica se colocó de manera estratégica paralela a la ubicación donde se realizaron los sondeos SG-3 y SG-4. También, se encuentra cercana a los sondeos previos SG-1 y SG-2 (Figura 55).



Figura 55. Ubicación de la línea geofísica 3 y de los sondeos: SG-1, SG-2, SG-3 y SG-4. Generado en Google Earth (2024).

La Figura 56 corresponde a la representación estratigráfica de los sondeos en esta área, los cuales presentaron una mayor profundidad en comparación con los pozos a cielo abierto y los sondeos realizados en la cancha. Por lo tanto, se identificó la estratigrafía de esta zona hasta 11 m de profundidad en el caso de los sondeos SG-1 y SG-2, y hasta 8 m de profundidad en los sondeos SG-3 y SG-4.

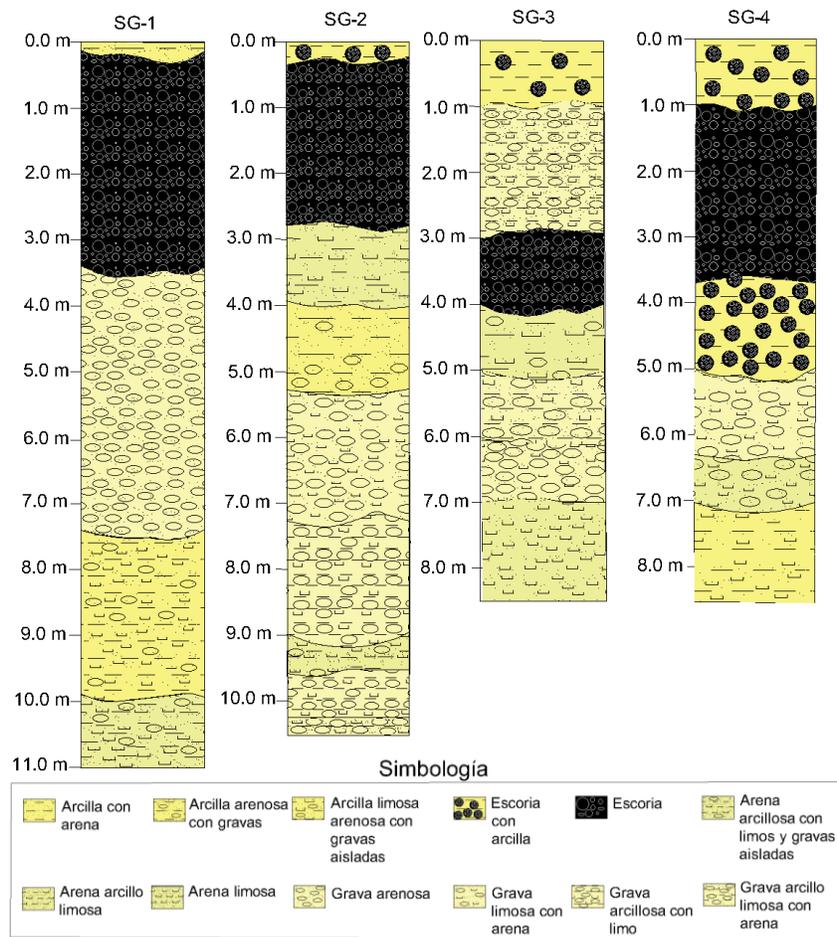
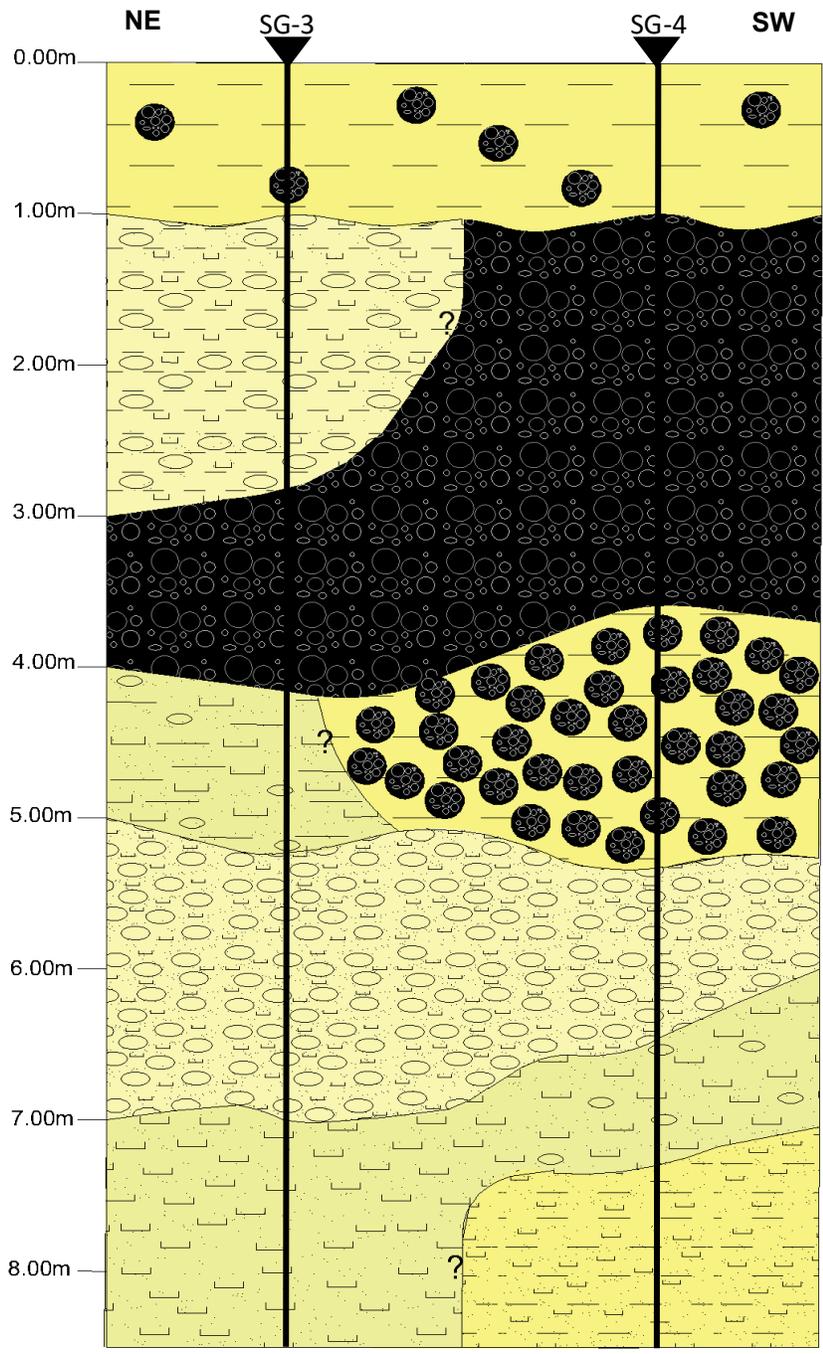


Figura 56. Representación de la estratigrafía de los sondeos SG-1, SG-2, SG-3 y SG-4, reportada en los documentos: Sondeos Gradas-Área Deportiva del IIC (2011).

A continuación, se presentan los perfiles estratigráficos realizados para esta zona:

El perfil 5 se obtuvo al correlacionar los sondeos SG-3 y SG-4, con una dirección NE-SW y una longitud aproximada de 30 m (Figura 57). En el primer metro de profundidad se identificó una capa de arcilla con escoria. Entre 1 y 3 m de profundidad (SG-3), se encontraron gravas arcillo-limosas con arena.

Destaca un estrato conformado completamente por escoria, que comienza en el noreste a una profundidad de 3 a 4 m (SG-3). A medida que se extiende hacia el suroeste, el espesor del estrato aumenta, abarcando una profundidad entre 1 y 4 m. Subyacente a este estrato se reportó arcilla con escoria hasta 5 m de profundidad (SG-4), la extensión horizontal de este sedimento es desconocida. Además, entre 5 y 7 m de profundidad, se identificó un estrato de gravas limo-arenosas que se extiende en dirección NE-SW. A partir de los 7 m de profundidad, se registraron sedimentos como arenas limosas y arcillas limo-arenosas. De acuerdo con lo anterior, en esta zona se encontró material de escoria hasta los 5 m de profundidad.



Simbología Escala horizontal
1:310

Arcilla limosa con arena	Arcilla con escoria	Escoria	Arena arcillosa con limos y gravas aisladas	▼ Sondeo
Arena limosa	Arena limosa con grava	Grava limosa con arena	Grava arcillo limosa con arena	

Figura 57. Perfil estratigráfico 5.

El perfil estratigráfico 6, presentado en la Figura 58, fue obtenido a partir de la correlación de los sondeos SG-4 y SG-2, con una orientación W-E y una longitud aproximada de 38 m. Se observaron arcillas con escoria en el primer metro de profundidad. En este perfil se identificó un estrato de material de escoria que se extiende a lo largo del perfil, con una profundidad entre 1 y 4 m. Subyacente a este, se encontraron arcillas con escoria a una profundidad de 4 a 5 m (SG-4) y arenas arcillo-limosas, así como arcilla con gravas y arena (SG-2). Entre 5 y 6 m de profundidad se reportó un estrato de gravas limosas-arenosas (SG-4), cuyo espesor aumenta conforme se extiende hacia el este. A profundidades mayores a 6 m, se identificaron arenas arcillo-limosas con grava, así como otros sedimentos como arcillas limo-arenosas y gravas con arcilla-limosa, de los cuales se desconoce su extensión horizontal.

Del mismo modo, en el perfil estratigráfico 7 se identificó un estrato de escoria en los primeros metros de profundidad. Este perfil se obtuvo al correlacionar los sondeos SG-1 y SG-2, con una dirección de NE-SW y una longitud aproximada de 29 m (Figura 59).

A una profundidad inferior a 0.25 m, se identificaron arcillas y en la dirección suroeste del perfil se observaron escorias en menor cantidad (SG-2). Subyacente a este material, se registró un estrato conformado por material de escoria que se extiende a lo largo del perfil hasta aproximadamente 3 m de profundidad.

Entre 4 y 7 m de profundidad (SG-1), se puede observar un estrato de gravas arenosas, cuyo espesor disminuye conforme se extiende hacia el suroeste (SG-2). Además, sobre este estrato, se reportaron arenas limo-arcillosas y arcilla limosa con arena (SG-2), de los cuales no se ha reportado su extensión horizontal. Por último, a partir de los 7 m se reportaron arcillas limo-arenosas, gravas arcillo-limosas y arenas limosas-arcillosas.

En la representación tridimensional realizada a partir de los perfiles estratigráficos 6 y 7 (Figura 60), se observa un estrato compuesto completamente por escorias que se extiende en dirección W-E continuando en dirección NE, con una profundidad entre 1 y 3.5 m. Subyacente a este estrato también se reportó escoria, sin embargo, en menor proporción y junto con arcilla, a una profundidad de 3.5 a 5 m aproximadamente (SG-4). Con base en lo anterior, en esta zona, se identificó material de escoria hasta una profundidad de 5 m.

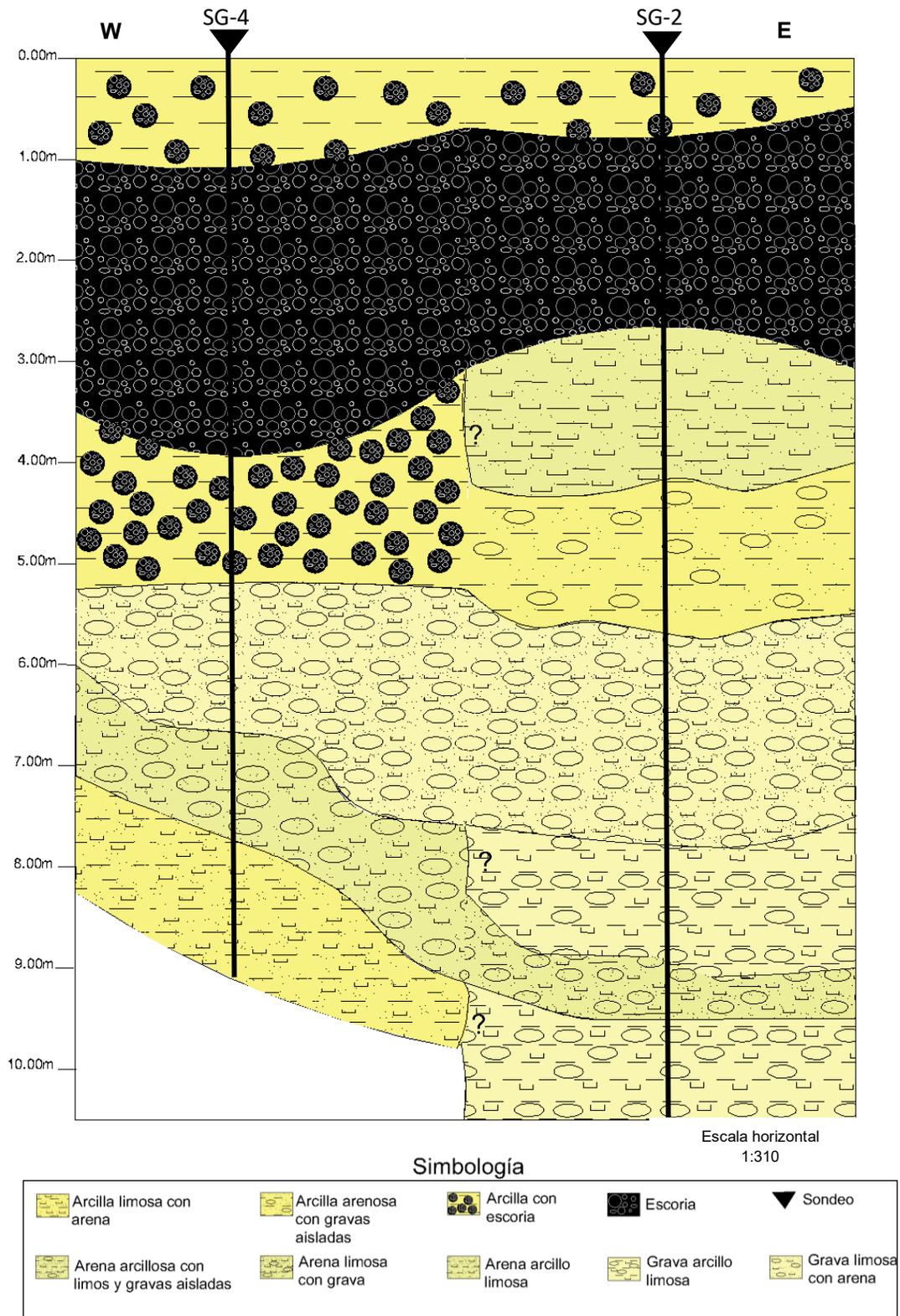


Figura 58. Perfil estratigráfico 6.

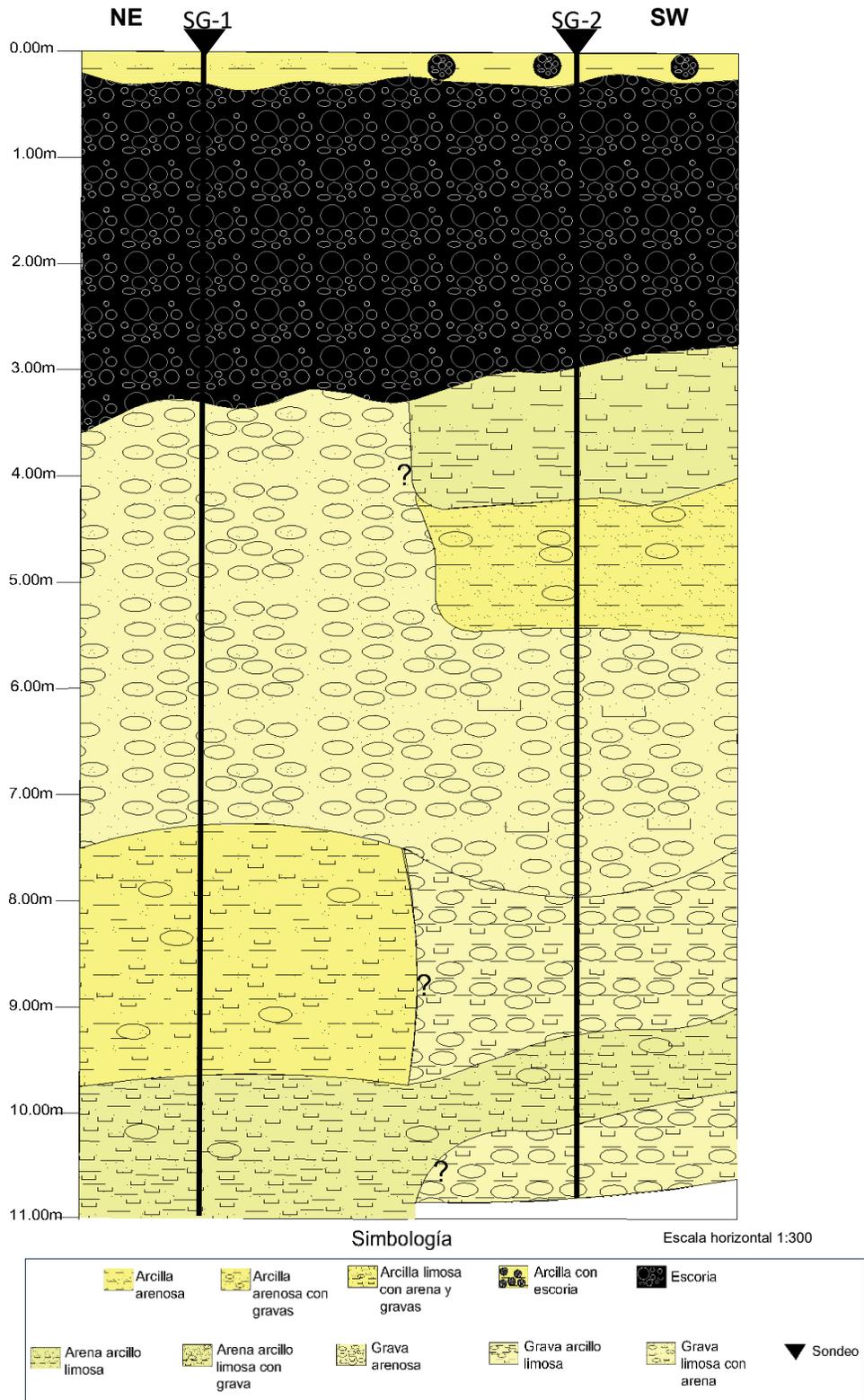
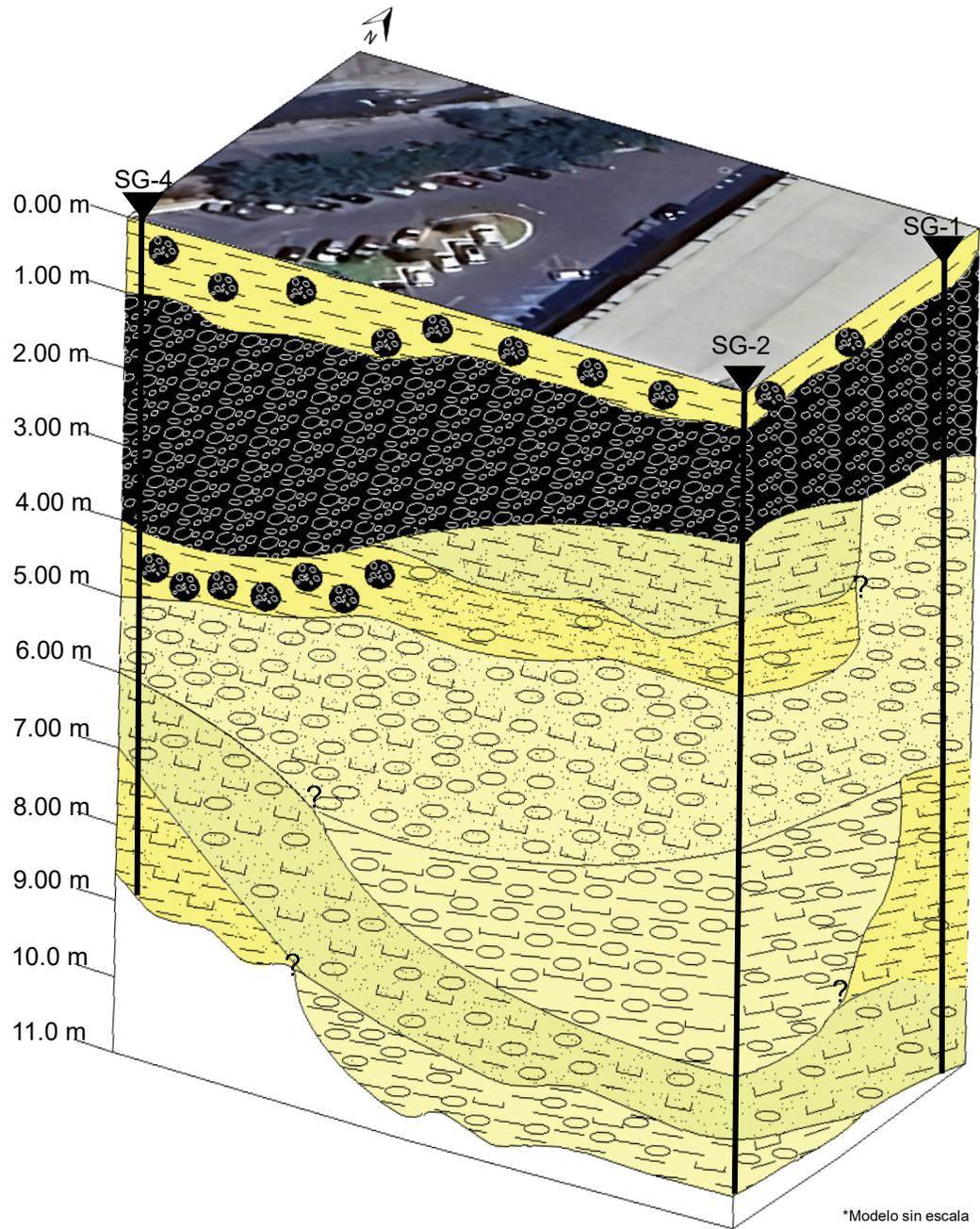


Figura 59. Perfil estratigráfico 7.



Simbología

Arcilla arenosa	Arcilla limosa con arena	Arcilla arenosa con gravas	Arcilla limosa con arena y gravas	Arcilla con escoria	Escoria
Arena limosa con grava	Arena arcillo limosa con grava	Grava arenosa	Grava arcillo limosa	Grava limosa con arena	Sondeo

Figura 60. Tercera representación tridimensional.

El ajuste entre los datos de resistividad medidos y calculados para el tercer modelo de resistividad real se obtuvo con un error RMS aceptable de 3.69%, a partir de 4 iteraciones y con un valor del parámetro de suavizamiento de L2 igual a 0.46 (Figura 61).

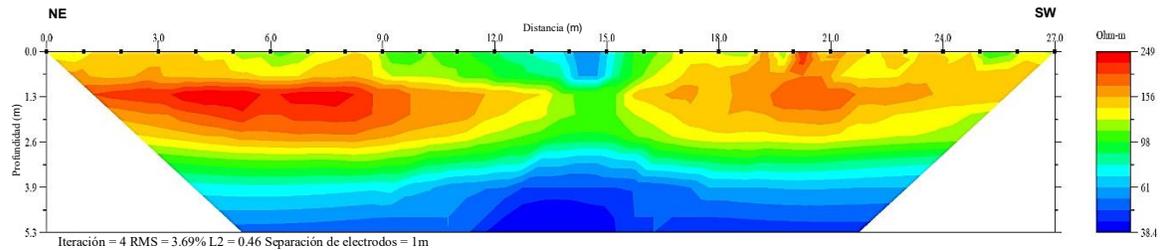


Figura 61. Modelo de resistividad real del tercer perfil geofísico.

Los valores de resistividad obtenidos para este modelo se agrupan en tres intervalos:

1. Primer intervalo: Valores entre 38.4 y 85 Ωm , representados por tonalidades azules, identificados mayormente en la parte inferior de este modelo, entre aproximadamente 3 y 5.3 m de profundidad. Estos valores coinciden con los establecidos por Telford et al. (1990) para arcillas. Por lo cual, estas resistividades se pueden asociar con las arcillas y limos, debido a que tienen propiedades similares, reportados en los perfiles estratigráficos cercanos al tercer perfil geofísico.
2. Segundo intervalo: Valores de 85 a 200 Ωm , representados por tonalidades verdes, amarillas y naranjas. Estos valores se pueden asociar a gravas y arenas según lo establecido por Reynolds (2011), Telford et al. (1990), McGinnis y Jensen (1971), Reynolds (1987a), Reynolds y Paren (1980, 1984).

No obstante, tanto en el quinto perfil estratigráfico (paralelo al tercer perfil geofísico) como en la representación tridimensional de esta área, se han identificado gravas arenosas con arcilla y limo. Esto sugiere que, aunque estos valores se asocien con gravas y arenas para este modelo, también pueden estar presentes otros sedimentos típicos de la zona de estudio, como arcillas y limos, aunque en menor medida.

3. Tercer intervalo: Se identificaron dos anomalías con resistividades que oscilan entre 200 y 249 Ωm (color rojo). La primera se extiende horizontalmente desde el inicio del perfil hasta 8.7 m, a una profundidad desde 1 a 2 m aproximadamente; por otra parte, la segunda anomalía es de menor espesor y se ubica al final del perfil geofísico.

En la representación tridimensional de esta área se observa que el material de escoria se reportó en los primeros 5 m de profundidad, por lo que estos valores pueden corresponder a este material. Sin embargo, aunque estas resistividades son las más altas obtenidas para este modelo, en comparación con las anomalías identificadas en los anteriores perfiles geofísicos (asociadas al material de escoria), este rango de valores no es tan alto.

Esto puede deberse a que, como se observa en la representación tridimensional de esta zona, los sedimentos presentan una distribución no uniforme. De este modo, pese a que este rango de resistividades se asocia con las escorias, también puede haber presencia de otros sedimentos en diferentes proporciones.

A partir de la integración de los valores de resistividad de este modelo y la interpretación geológica anterior, se realizó el tercer modelo geológico-geofísico del sitio de estudio (Figura 62).

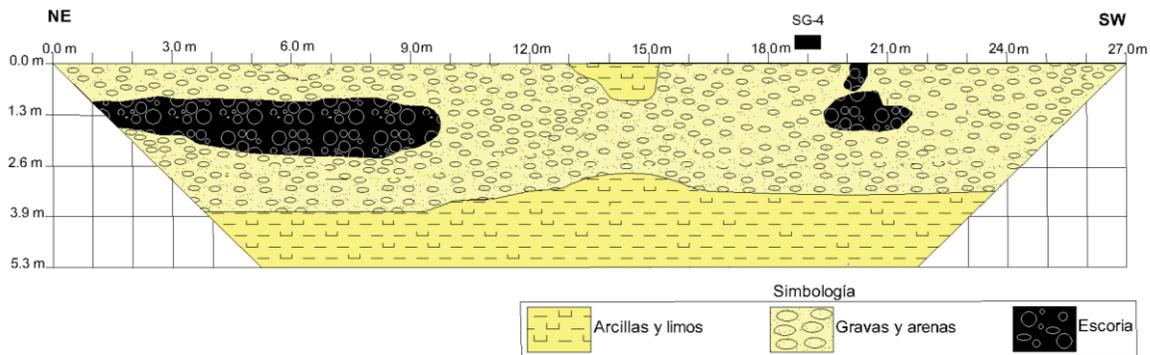


Figura 62. Modelo geológico-geofísico del perfil geofísico 3.

5.4 PERFIL GEOFÍSICO 4

La cuarta línea geofísica se extendió a una longitud mayor que las demás líneas de la presente investigación, lo que permitió obtener información a mayores profundidades. Como se observa en la Figura 63, esta línea se ubicó a una distancia considerable de las evidencias de escoria para caracterizar esta área sin registro previo de este material. Además, esta línea es paralela al aprovechamiento hidráulico PCU-2.



Figura 63. Ubicación de la cuarta línea geofísica y del aprovechamiento hidráulico PCU-2 para muestreo de agua subterránea. Generado en Google Earth (2024).

En la Figura 64 se presenta el modelo de resistividad real del cuarto perfil geofísico. El ajuste entre los datos medidos y los calculados se obtuvo después de 3 iteraciones, con un error RMS aceptable de 4.10% y un valor de 0.52 para el parámetro de suavizamiento L2.

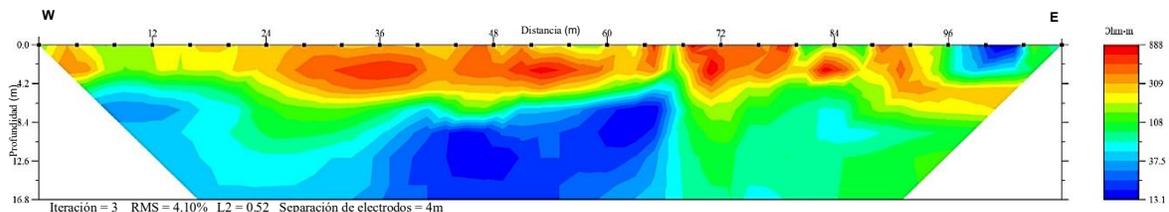


Figura 64. Modelo de resistividad real del cuarto perfil geofísico.

Los valores de resistividad identificados en este modelo se clasifican en tres intervalos:

1. Primer intervalo: Consiste en resistividades que oscilan entre 13.1 y 60 Ωm (tonalidades azules). Estos valores predominan principalmente desde los 5 m de profundidad hasta el límite inferior del modelo, extendiéndose horizontalmente desde el inicio del perfil hasta aproximadamente 68 m.

Este intervalo de valores se encuentra dentro del rango de 5 - 60 Ωm asignado para arcillas, según establece Kirsch (2009). Por lo tanto, estas resistividades pueden asociarse tanto a arcillas como a limos debido a sus características geológicas similares.

2. Segundo intervalo: Se caracteriza por resistividades que varían entre 60 y 210 Ωm (tonalidades verdes), este rango de valores es menos predominante en comparación con los otros intervalos. En las representaciones tridimensionales del sitio de estudio se ha observado que predominan estratos de gravas arenosas, lo que sugiere que estas resistividades podrían asociarse a estos materiales geológicos.

3. Tercer intervalo: Destacan altos valores de resistividades desde 210 a 888 Ωm (colores amarillos, naranjas y rojos), predominando a lo largo del perfil en la parte superior, a una profundidad máxima de 6 m. Las profundidades de estas anomalías coinciden con las reportadas para el material de escoria en la zona de estudio (máximo 5 m de profundidad). De igual manera, estos valores coinciden con los intervalos de resistividad asociados al material de escoria en los demás perfiles. Considerando que, Ullrich et al. (2009) señalan que las muestras y depósitos de escoria suelen caracterizarse por una alta resistividad debido a su alta porosidad, y que, como se ha mencionado, los sedimentos de la zona tienden a presentar resistividades menores, este rango de resistividades contrastantes se puede asociar a las escorias.

Aunque cada intervalo se asocia con materiales específicos, se deben considerar los siguientes aspectos en la interpretación geológica de este perfil:

- Falta de registros estratigráficos y extensión del perfil: A diferencia de los perfiles anteriores, no se reportaron registros estratigráficos cercanos para esta área. Además, la mayor profundidad y longitud del perfil aumentan la probabilidad de encontrar una mayor heterogeneidad en los sedimentos, lo cual dificulta la asociación de los valores de resistividad resultantes con los materiales geológicos específicos del sitio de estudio.
- Nivel freático: Con base en las mediciones del aprovechamiento hidráulico PCU-2, como parte de la tesis en proceso de Pérez (2024), el nivel freático del

acuífero de Monterrey, Campus CU-UANL, se registró a 16.82 m dos días después de la adquisición geofísica para este perfil (22 de mayo de 2023). Este factor puede afectar los materiales geológicos cercanos debido a la capilaridad, que consiste en el ascenso de un líquido por la tensión superficial (Duque, 2003). En el caso del subsuelo, este fenómeno ocurre cuando el agua subterránea asciende a la zona no saturada a través de los poros de los sedimentos (Munguía-Lara et al., 2022).

En el cuarto perfil geofísico, este nivel freático se encontró en la parte inferior (a 16.82 m), donde se identificaron resistividades correspondientes al primer y segundo rango. Sin embargo, el ascenso capilar puede causar un aumento de humedad en los sedimentos, afectando su resistividad. Por lo tanto, es posible que estos dos rangos se asocien a los mismos sedimentos, pero con diferentes niveles de humedad debido a la propiedad de capilaridad.

De acuerdo con la interpretación geológica de los valores de resistividad de este modelo, se elaboró el cuarto modelo geológico-geofísico. Para este perfil se identificó la posible presencia de escorias en profundidades superficiales, sobre el nivel freático (como se observa en la Figura 65). Por lo tanto, se puede concluir que, en el área de estudio las escorias se encuentran en la zona no saturada, sobre el acuífero Monterrey, Campus CU-UANL.

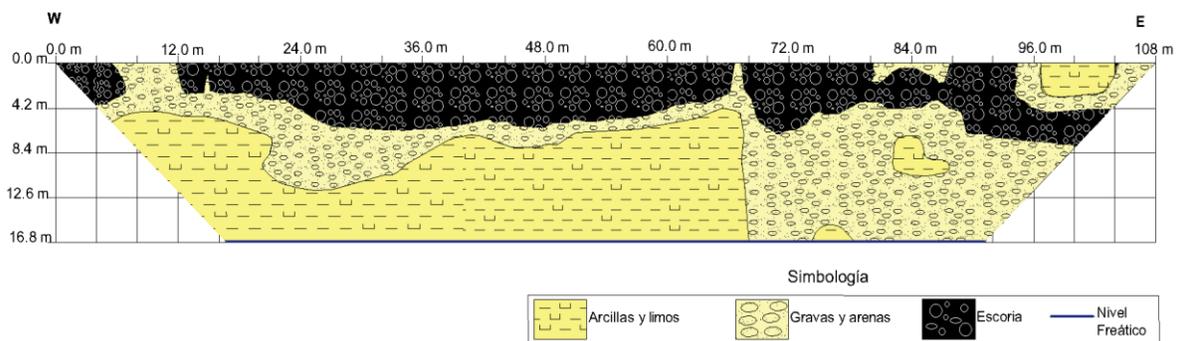


Figura 65. Modelo geológico-geofísico del cuarto perfil geofísico.

5.5 PERFIL GEOFÍSICO 5

Con el objetivo de caracterizar detalladamente la zona de estudio y obtener información en áreas sin registro previo de escoria, la quinta línea geofísica se ubicó estratégicamente a cierta distancia de las evidencias de escoria, como se muestra en la Figura 66.



Figura 66. Ubicación de la línea geofísica 5. Generado en Google Earth (2024).

En el modelo de resistividad real del quinto perfil geofísico, el ajuste entre los datos de resistividad adquiridos en campo y los calculados se obtuvo después de 4 iteraciones, con un error RMS aceptable de 1.71% y un valor de 0.73 para el factor de suavizamiento de L2 (Figura 67).

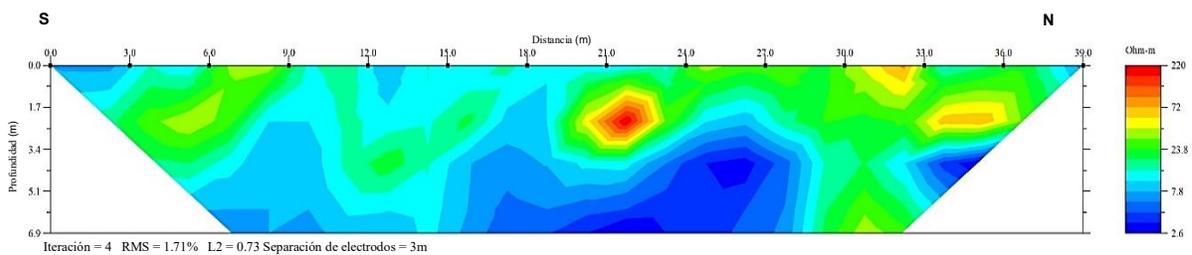


Figura 67. Modelo de resistividad real del quinto perfil geofísico.

En comparación con los demás perfiles en la zona de estudio, las resistividades resultantes en este perfil son menores, esto podría atribuirse a ligeras precipitaciones registradas días antes de las mediciones, las cuales podrían haber incrementado la humedad en los sedimentos presentes en la zona y, consecuentemente, influenciado en las resistividades. A continuación, se presentan los intervalos de resistividad identificados y su interpretación geológica.

1. Primer intervalo: Abarca valores de resistividad entre 2.6 y 15 Ωm , representados en el modelo por tonalidades azules. Según Hunt (2005), el rango de resistividad para los suelos arcillosos húmedos oscila entre 1.5 y 3.0 Ωm , mientras que para suelos arcillo-limosos húmedos varía entre 3 y 15 Ωm . Por lo tanto, este rango de resistividades se puede asociar a limos y arcillas húmedos.
2. Segundo intervalo: Los valores de resistividad oscilan entre 15 y 72 Ωm , representados por colores verdes y amarillos. Este intervalo se sitúa dentro del rango establecido por Kirsch (2009) para arcillas, no obstante, debido a la heterogeneidad del subsuelo, pueden encontrarse otros sedimentos en esta área; Hunt (2005) indica un rango de resistividades de 15 a 150 Ωm para limos y arenas (desde húmedos hasta secos). Por consiguiente, este rango puede asociarse con arcillas, limos y arenas, probablemente ligeramente húmedos debido a las condiciones climáticas.
3. Tercer intervalo: El valor máximo obtenido en este modelo fue de 220 Ωm , identificado por tonalidades naranjas y rojas, se ubica en una profundidad entre 1.6 y 3 m. Como se ha observado en las representaciones tridimensionales y los perfiles estratigráficos, el material de escoria se encuentra a profundidades superficiales, por lo cual este valor podría estar asociado con las escorias. No obstante, es importante señalar que, en comparación con los valores máximos reportados en los demás perfiles, este valor no es tan elevado. Por consiguiente, aunque este valor se asocia al material de escoria en este modelo, es importante considerar que podría haber otros sedimentos presentes.

La Figura 68 corresponde al quinto modelo geológico-geofísico, elaborado a partir de la interpretación geológica del modelo de resistividad real de este perfil. Se identificó una posible zona conformada por material de escoria de menor tamaño en comparación con los otros perfiles.

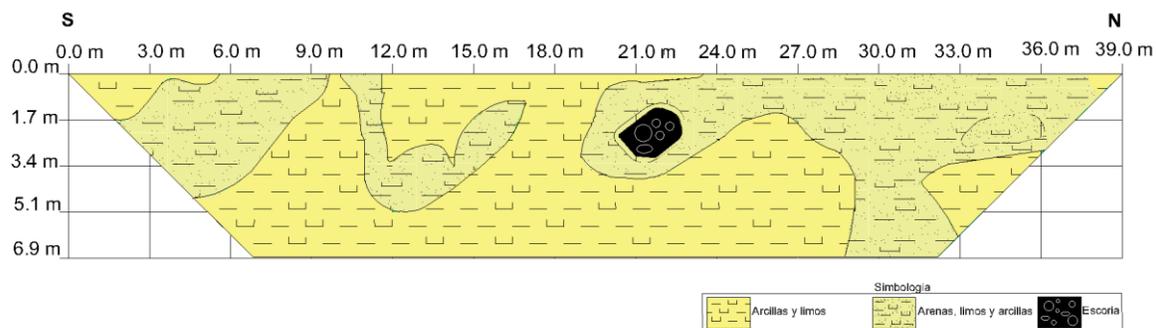


Figura 68. Modelo geológico-geofísico del quinto perfil geofísico.

5.6 PERFIL GEOFÍSICO 6

La sexta línea geofísica, al igual que la cuarta, se extendió a una longitud mayor que las demás. Esto permitió obtener valores de resistividad a mayor profundidad y longitud, como se muestra en el modelo de resistividad real presentado en esta sección.



Figura 69. Ubicación de la línea geofísica 6. Generado en Google Earth (2024).

El modelo de resistividad real del sexto perfil geofísico se obtuvo a partir de 4 iteraciones, con un error RMS de 7.07% y un valor de 5.55 del parámetro de suavizamiento L2 (Figura 70).

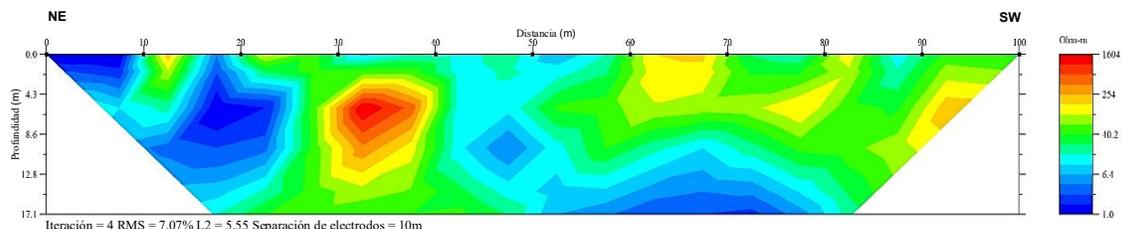


Figura 70. Modelo de resistividad real del sexto perfil geofísico.

Es importante señalar que la adquisición de datos para la quinta y sexta línea se realizó el mismo día, por lo cual, los valores obtenidos en este modelo también podrían haber sido afectados por las ligeras precipitaciones previas a las mediciones. A continuación, se presentan los intervalos identificados para el sexto modelo de resistividad.

1. Primer intervalo: Los valores mínimos registrados en este perfil oscilan entre 1-20 Ωm (tonalidades azules). Estas bajas resistividades se pueden asociar a las arcillas y limos húmedos presentes en la zona de estudio, de acuerdo con el rango establecido por Hunt (2005).
2. Segundo intervalo: Consiste en valores de resistividad intermedios que varían entre 20 y 217 Ωm (colores verdes y amarillos). Este intervalo de valores coincide con las resistividades establecidas por Reynolds (2011), Telford et al. (1990), McGinnis y Jensen (1971), Reynolds (1987a), Reynolds y Paren (1980, 1984) para arenas y gravas. Sin embargo, se debe considerar que, debido a la extensión y profundidad del perfil, hay una mayor heterogeneidad de los materiales geológicos. Por ende, no se puede asociar con certeza los valores de resistividad resultantes a un material específico. Además, es relevante señalar que se observó un registro pluvial en campo, entre los metros 60 y 70 de la línea, lo cual puede haber influido en los valores reportados.
3. Tercer intervalo: Se identificó una anomalía altamente resistiva, con un intervalo de valores que oscila entre 217 y 1604 Ωm (tonalidades naranjas y rojas), ubicada a una profundidad entre 4 y 12 m, con una extensión horizontal de aproximadamente 8 m. Además, se reportó una anomalía de menor espesor y longitud, con un valor de resistividad de 217 Ωm .

Considerando que los materiales típicos de la zona de estudio tienden a presentar bajas resistividades, estas anomalías se pueden asociar a las escorias. Cabe destacar que en este modelo se identificaron los valores de resistividad más altos y a mayores profundidades entre los seis perfiles geofísicos resultantes de esta investigación. Dado que las características de esta anomalía no coinciden con las anteriores, los valores más elevados obtenidos en este perfil cercanos al valor máximo (1604 Ωm), también podrían estar relacionados con materiales de construcción.

De acuerdo con la interpretación geológica del modelo de resistividad real de este perfil, se generó el sexto modelo geológico-geofísico, en el cual se identificaron dos posibles zonas constituidas por escorias, y la anomalía de mayor dimensión también podría estar asociada a residuos de construcción (Figura 71).

Como parte del trabajo de tesis en proceso de Pérez (2024), se registró el nivel freático a 16.92 m en el aprovechamiento hidráulico PCU-2, dos meses antes de la adquisición geofísica para este perfil (4 de octubre de 2023). Por consiguiente, se puede concluir que el material de escoria se encuentra sobre el nivel freático reportado, lo que implica que se localizan en la zona no saturada, sobre el acuífero Monterrey, Campus CU-UANL.

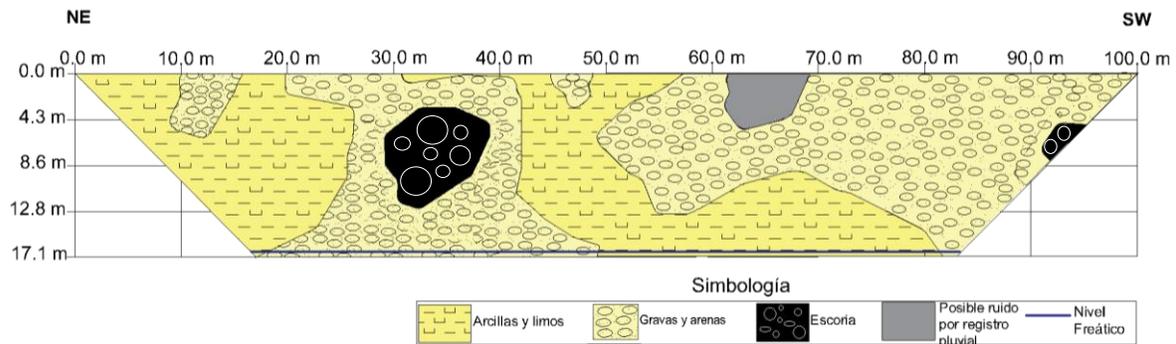


Figura 71. Sexto modelo geológico-geofísico.

5.7 COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LA MUESTRA DE ESCORIA

En esta sección se presenta la composición química de la escoria del sitio de estudio, analizada mediante FRX. La tabla 4 muestra la composición química de la parte oxidada de la escoria.

Tabla 4. Resultados del análisis FRX de la parte con oxidación de la muestra de escoria.

Compuesto	Fórmula	Concentración unitaria (%)
Óxido de hierro	Fe ₂ O ₃	57.140
Óxido de calcio	CaO	19.782
Dióxido de silicio	SiO ₂	16.053
Óxido de aluminio	Al ₂ O ₃	2.786
Óxido de manganeso (II)	MnO	1.4718
Trióxido de azufre	SO ₃	0.910
Óxido de magnesio	MgO	0.380
Óxido de cromo (III)	Cr ₂ O ₃	0.210
Óxido de cobre (II)	CuO	0.204
Óxido de cobalto (II, III)	Co ₃ O ₄	0.172
Dióxido de titanio	TiO ₂	0.172
Óxido de plata (I)	Ag ₂ O	0.150
Óxido de potasio	K ₂ O	0.129
Pentóxido de fósforo	P ₂ O ₅	0.105
Óxido de bario	BaO	0.0975
Óxido de níquel	NiO	0.0685
Cloro	Cl	0.0497
Óxido de plomo (II)	PbO	0.0418
Óxido de estroncio	SrO	0.0313
Dióxido de estaño	SnO ₂	0.0242
Pentóxido de vanadio	V ₂ O ₅	0.0231

La parte oxidada de la muestra está compuesta mayormente por Fe₂O₃, con concentraciones considerables de CaO y SiO₂. Además, se identificaron Al₂O₃ y MnO en concentraciones menores al 3%. En cantidades menores al 1% se reportaron diversos óxidos metálicos y dos óxidos no metálicos: SO₃ y P₂O₅, además de Cl.

La tabla 5 corresponde a los resultados del análisis de FRX de la parte sin oxidación de la escoria.

Tabla 5. Resultados del análisis FRX de la parte de la muestra de escoria sin oxidación.

Compuesto	Fórmula	Concentración unitaria (%)
Óxido de calcio	CaO	57.993
Dióxido de silicio	SiO ₂	26.386
Óxido de aluminio	Al ₂ O ₃	4.397
Óxido de fierro	Fe ₂ O ₃	3.324
Trióxido de azufre	SO ₃	1.356
Óxido de manganeso	MnO	1.316
Óxido de magnesio	MgO	0.528
Óxido de potasio	K ₂ O	0.341
Dióxido de titanio	TiO ₂	0.323
Óxido de plata (I)	Ag ₂ O	0.169
Óxido de bario	BaO	0.118
Pentóxido de fosforo	P ₂ O ₅	0.05092
Óxido de cromo (III)	Cr ₂ O ₃	0.06658
Óxido de estroncio	SrO	0.08953
Óxido de cobre (II)	CuO	0.03375

En la parte sin oxidación de la muestra predomina principalmente el óxido metálico CaO, seguido del compuesto no metálico SiO₂. En concentraciones menores del 5%, se identificaron los óxidos metálicos Al₂O₃, Fe₂O₃ y MnO, y otros óxidos metálicos en concentraciones menores del 1%. Para esta parte de la muestra, solo se reportaron tres óxidos no metálicos en total: SiO₂, SO₃ y P₂O₅.

Con base en la composición química obtenida, se puede concluir que la escoria es de tipo metalúrgica. Piatak et al. (2015) señalan que este tipo de escorias se pueden clasificar en tres tipos: ferrosas, de ferroaleación y no ferrosas. El alto contenido de Fe₂O₃ identificado en la parte oxidada de la muestra indica que la escoria puede ser de tipo ferrosa, a su vez, estas escorias pueden ser de fabricación de hierro o de acero (Ndlovu et al., 2017; Yang et al., 2014).

De acuerdo con Piatak et al. (2021) y Liang et al. (2013), los componentes químicos principales de las escorias de acero son los óxidos CaO, SiO₂ y FeO, otros compuestos abundantes en este tipo de escorias son el Al₂O₃ y MgO, los cuales usualmente se encuentran en mayores concentraciones que el MnO. Por otra parte, en menores concentraciones, las escorias de acero suelen presentar K₂O, Na₂O, TiO₂ y S.

La composición química obtenida de la muestra de escoria analizada del sitio de estudio, tanto en la parte oxidada como en la de sin oxidación, coincide con la composición de las escorias de acero. Por lo tanto, se puede concluir que esta muestra corresponde a una escoria de este tipo.

En la parte oxidada de la muestra se identificaron óxidos metálicos como Cr_2O_3 , CuO , BaO , PbO , NiO y V_2O_5 , los cuales son considerados compuestos potencialmente tóxicos (Gomes et al., 2019; VKM, 2022). Ettler y Vítková (2021) señalan que las escorias metalúrgicas están expuestas a la erosión en diversos entornos y que la lixiviación de sus contaminantes puede afectar el entorno ambiental. Dado que este tipo de escorias se encuentran en el subsuelo, es de suma importancia considerar que la lixiviación de los compuestos potencialmente tóxicos puede alterar las propiedades fisicoquímicas tanto del suelo como del agua subterránea en el acuífero de la zona.

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 CONCLUSIONES

El presente trabajo de investigación representó el primer estudio geofísico para identificar zonas contaminadas (escorias) en el área del Instituto de Ingeniería Civil, al noreste del campus de CU de la UANL. La técnica de tomografía de resistividad eléctrica 2D, junto con la geología local, permitió identificar la distribución y geometría de escorias en el subsuelo del sitio de estudio.

Con base en los perfiles estratigráficos y las representaciones tridimensionales, se determinó que la geología del área de estudio está compuesta por gravas, arenas, arcillas y limos, destacando la presencia de escorias, las cuales no son materiales propios de la zona. De los siete perfiles elaborados, en cuatro se identificaron estratos compuestos por escorias hasta una profundidad máxima de 4 m, mientras que en los otros tres se reportaron escorias junto con otros sedimentos. En el quinto y sexto perfil, se observó arcilla con escoria hasta una profundidad de 5 m. Por lo tanto, la profundidad del material de escoria varía hasta un máximo de 5 m en el sitio de estudio.

En los perfiles geofísicos 1, 2 y 4 se identificaron anomalías altamente resistivas, con intervalos de valores de 205-522 Ωm , 210-902 Ωm y 210-888 Ωm respectivamente. Estos altos valores no son característicos de los materiales geológicos propios de la zona, por lo cual se atribuyen a la posible presencia de escorias. Además, las profundidades de estas anomalías coinciden con las reportadas para el material de escoria en los perfiles estratigráficos. Por otra parte, en el perfil geofísico 3 se obtuvo un rango de 200-249 Ωm , y en el perfil 5 se registró un valor máximo de 220 Ωm sin un rango definido, aunque estos valores de resistividad también se asocian a las escorias, son inferiores en comparación con los obtenidos en los demás perfiles, lo que sugiere la posible presencia de otros sedimentos. El perfil geofísico 6 presentó la anomalía con las resistividades más altas del presente estudio (217-1604 Ωm), atribuida al material de escoria y a otros posibles materiales de relleno.

De acuerdo con los resultados del análisis de FRX, la muestra de escoria analizada se compone principalmente de Fe_2O_3 , CaO y SiO_2 , así como de Al_2O_3 y MnO , entre otros compuestos. Esto sugiere que este material es una escoria metalúrgica, específicamente del tipo producido en la fabricación de acero. Aunque esta conclusión se basa en una sola muestra, los resultados indican que la actividad

industrial de las empresas siderúrgicas cercanas al campus de CU de la UANL ha afectado el área estudiada de manera permanente y continua.

Los modelos geológicos-geofísicos indican que la profundidad de las posibles zonas constituidas por escorias varía hasta máximo 6 m, a excepción del sexto modelo, en el cual se identificó una zona de contaminación hasta 12 m de profundidad. Esto indica que las escorias se localizan sobre el nivel freático reportado al momento de realizar las mediciones, como se detalló en la sección de resultados. Por lo tanto, las escorias se encuentran sobre el acuífero de Monterrey, campus CU-UANL.

Este estudio permitió identificar la posible presencia de escoria en la zona no saturada, lo que representa una fuente de contaminación tanto para el subsuelo como para el agua subterránea. Dado que en la muestra de escoria analizada se identificaron compuestos potencialmente tóxicos, la lixiviación de estos compuestos se infiltra en el agua subterránea del acuífero, afectando la calidad de este recurso hídrico.

6.2 RECOMENDACIONES

1. Utilizar otros métodos de prospección geofísica (por ejemplo, métodos magnéticos) con la finalidad de corroborar las posibles zonas contaminadas.
2. Realizar sondeos exploratorios en otras áreas del sitio de estudio, para identificar el material de escoria de manera detallada en la zona de investigación, así como realizar sondeos horizontales para conocer la extensión longitudinal de las escorias.
3. Obtener y analizar más muestras de escoria con el objetivo de identificar otros posibles compuestos, y evaluar los niveles de toxicidad de estos, así como realizar posibles técnicas de remediación.
4. Realizar monitoreos y muestreos en los aprovechamientos hidráulicos del área de estudio para identificar los contaminantes presentes en el agua subterránea que pueden provenir de la lixiviación del material de escoria.
5. Se recomienda reubicar o reutilizar el material de escoria disperso fuera del área de estudio, para evitar una posible lixiviación hacia el arroyo Topo Chico.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Advanced Geosciences Inc. (AGI). (2017). Dipole-dipole array: Electrical resistivity methods, part 3. AGIUSA. https://www.agiusa.com/dipole-dipole%E2%80%8B-%E2%80%8Barray%E2%80%8B?utm_campaign=Non-Hosted%20AGI%20Blog&utm_source=AGI%20Blog%20Mise%20Post&utm_medium=link&utm_content=Link%20from%20Mise%20to%20Dip-Dip%20Post
2. Advanced Geosciences Inc. (AGI). (2017). Schlumberger array: electrical resistivity methods, part 2. AGIUSA. https://www.agiusa.com/schlumberger-array?utm_campaign=NonHosted%20AGI%20Blog&utm_source=AGI%20Blog%20Mise%20Post&utm_medium=link&utm_content=Link%20from%20Mise%20to%20Schlum%20Post
3. Advanced Geosciences Inc. (AGI). (2017). Wenner array: electrical resistivity methods, part 1. AGIUSA. https://www.agiusa.com/wenner-array?utm_campaign=NonHosted%20AGI%20Blog&utm_source=AGI%20Blog%20Mise%20Post&utm_medium=link&utm_content=Link%20from%20Mise%20to%20Wenner%20Post
4. Advanced Geosciences, Inc. (AGI). (2009). Instruction manual for EarthImager 2D: Version 2.4.0: Resistivity and IP inversion software. Advanced Geosciences, Inc.
5. Alarcón, B. A. (2010). *Exploración geofísica en terrenos del exbasurero de Ensenada, B.C.* [Tesis de maestría, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California]. Repositorio académico digital del Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California. <https://cicese.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1007/869>
6. Alva, E. (1997). *Estudio geológico-hidrogeológico de la región noroeste (Sierra las Mitras - Cerro el Topo- Cerro el Durazno) de Monterrey, Nuevo León/México.* [Tesis de Maestría, Universidad Autónoma de Nuevo León]. Repositorio académico digital de la Universidad Autónoma de Nuevo León. <http://eprints.uanl.mx/id/eprint/22942>
7. Alva, E., De León, H., & Werner, J. (1998). Aspectos hidrogeoquímicos del acuífero de gravas de la región noroeste del área metropolitana de Monterrey. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, 1, 6.
8. Aracil, E., Maruri, U., Vallés, J., Martínez-Pagán, P., & Porres, J.A. (2003). Evaluación de problemas medioambientales mediante tomografía eléctrica. *Ingeopres*, 122, 34-39. Entorno Gráfico.

9. Ariyanto, S., Joni, I., Prasetyowati, E., Susilo, A., & Yunanto, F. (2019). Geothermal investigation uses a dipole-dipole configuration geoelectric methods with delphi programming. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(8(99)), 50-56. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.160803>
10. Ávila, M. A., Reales, L. M., & Benítez, J. A. (2014). Análisis del subsuelo mediante polarización inducida y resistividad para la detección de estructuras minerales en la vereda Santa Lucía-Cauca. Twelfth LACCEI Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology (LACCEI 2014), Guayaquil, Ecuador. <https://laccei.org/LACCEI2014-Guayaquil/RP043.html>
11. British Geological Survey. (2022). The hazards posing a threat to groundwater quality [Imagen]. British Geological Survey. <https://www.bgs.ac.uk/news/the-question-of-quality-how-data-science-is-tackling-threats-to-our-groundwater/>
12. Bryson, L. S., & Bathe, A. (2009). Determination of selected geotechnical properties of soil using electrical conductivity testing. *Geotechnical Testing Journal*, 32(3), 252-261. <https://doi.org/10.1520/GTJ101632>
13. Busquet, E., Casas, A., Pinto, V., Rivero, L., & Sabadía, J. B. (1995). Geofísica ambiental: Técnicas no destructivas para el reconocimiento de zonas contaminadas por vertidos. *Acta geológica hispánica*, 30(1), 73–82.
14. Campa, U.M.F., & Coney, P.J. (1983). Tectono-stratigraphic terranes and mineral resource distribution in México. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 20(6), 1040-1051.
15. Cantú, C., Uvalle, J., González, F., & Herrera, B. (2018). Evaluación del grado de conservación de las cuencas hidrográficas de Nuevo León, México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 9(50), 140-173.
16. Cantú-Martínez, P.C. (2022). Agua, sequía y cambio climático. *Ciencia UANL*, 25(116), 66-77.
17. Cantú-Martínez, P.C. (2023). El día cero en el área metropolitana de Monterrey. *Ciencia UANL*, 26(119), 64-71.
18. Castro, A., Acevedo-Berruecos, D., Urbieto, J., Rosario, I., & Delgado-Rodríguez, O. (2013). Caracterización geoquímica y geoelectrica de un sitio contaminado por hidrocarburos en el estado de Puebla, México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 65(2), 405-418.
19. Chambers, J. E., Wilkinson, P.B., Weller, A., Meldrum, P.I., Kuras, O., Ogilvy, R. D., Aumonier, J., Bailey, E., Griffiths, N., Matthews, B., Penn, S., & Wardrop, D. (2011). Characterising sand and gravel deposits using electrical resistivity tomography (ERT): case histories from England and Wales. In E. Hunger & G.

Walton (Eds.), *Proceedings of the 16th Extractive Industry Geology Conference* (pp. 166-172). EIG Conferences Ltd.

20. Chávez Cabello, G. (2016). La Sierra Madre Oriental de México, un cinturón orogénico de pliegues y cabalgaduras de la cordillera de Norteamérica. *Ciencia UANL*, 19(82), noviembre-diciembre. <https://cienciauanl.uanl.mx/?p=6714>.

21. Chávez Cabello, G., Aranda-Gómez, J.J., Molina-Garza, R. S., Cossío-Torres, T., Arvizu-Gutiérrez, I. R., & González-Naranjo, G. A. (2007). The San Marcos Fault; a Jurassic multireactivated basement structure in northeastern México. *Geological Society of America, Special Paper*, 422, 261–286. [https://doi.org/10.1130/2007.2422\(08\)](https://doi.org/10.1130/2007.2422(08))

22. Cisneros, R. (2010). *Estudio geofísico en el relleno sanitario municipal de Linares, Nuevo León, México*. [Tesis de Licenciatura, Universidad Autónoma de Nuevo León]. Repositorio académico digital de la Universidad Autónoma de Nuevo León.

23. Clarke, R., & King, J. 2004. *The Water Atlas*. The New Press.

24. Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2022). Estadísticas del Agua en México 2021. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. https://sinav30.conagua.gob.mx:8080/port_publicaciones.html

25. Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2024). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Área Metropolitana de Monterrey (1906), estado de Nuevo León. Subdirección General Técnica, Gerencia de Agua Subterráneas. https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/Edos_Acuiferos_18/nleon/DR_1906.pdf

26. Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2024). Estadísticas del Agua en México 2023. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. https://sinav30.conagua.gob.mx:8080/port_publicaciones.html

27. Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). 2016. Atlas del Agua en México. Comisión Nacional del Agua. Subdirección General de Planeación. SINA. México D.F., México. 137.

28. Contreras, C. (2007). Geografía de Nuevo León. Fondo Editorial de Nuevo León. <https://www.fondoeditorialnl.gob.mx/pdfs/geografiadenl.pdf>

29. Cruz, J.V., Silva, M.O., Dias, M.I., & Prudencio, M.I. (2013). Groundwater Composition and Pollution Due to Agricultural Practices at Sete Cidades Volcano (Azores, Portugal). *Applied Geochemistry*, 29, 162-173.

30. Currell, M.J. & Han, D. (2017). The Global Drain: Why China's Water Pollution Problems Should Matter to the Rest of the World. *Environment: Science and Policy for Sustainable Development*, 59, 16-29. <https://doi.org/10.1080/00139157.2017.1252605>
31. Custodio, E., & Llamas, M. R. (1983). *Hidrología Subterránea* (Segunda Edición). OMEGA. Tomo I. Barcelona.
32. Dávila, R. A., & De León, H. (2011). Importancia de la hidrogeología urbana; ciencia clave para el desarrollo urbano sostenible. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 63(3). 463-477. <https://doi.org/10.18268/BSGM2011v63n3a8>
33. De León, H. (2019). *Evolución hidrogeológica del acuífero de Ciudad Universitaria y su impacto en las cimentaciones de la UANL* [Tesis de Licenciatura]. Universidad Autónoma de Nuevo León, México
34. Duque, G. (2003). *Manual de geología para ingenieros*. Universidad Nacional de Colombia, Manizales. <http://www.bdigital.unal.edu.co/1572/>
35. Environmental Protection Agency (EPA), 2000. Innovations in Site Characterization: Geophysical Investigation at Hazardous Waste Sites. <https://www.epa.gov/remedytech/innovations-site-characterization-geophysical-investigation-hazardous-waste-sites>
36. Ettler, V., & Vítková, M. (2021). Slag leaching properties and release of contaminants. En N. M. Piatak & V. Ettler (Eds.), *Metallurgical Slags: Environmental geochemistry and resource potential* (pp. 151-173). Royal Society of Chemistry.
37. Everett, M. (2013) *Near-Surface Applied Geophysics*. Cambridge.
38. Fehdi, C., Nouioua, I., Belfar, D., Djabri, L., & Salameh, E. (2014). Detection of underground cavities by combining electrical resistivity imaging and ground penetrating radar surveys: A case study from Draa Douamis area (North East of Algeria). In N. Bakalowicz (Ed.), *H2Karst research in limestone hydrogeology* (pp. 69–82). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-06139-9_5
39. García, S. (2017). *Análisis hidrogeológico e hidrogeoquímico del Campus Ciudad Universitaria de la UANL; como aporte para el manejo sostenible del agua subterránea* [Tesis de maestría, Universidad Autónoma de Nuevo León]. Repositorio académico digital de la Universidad Autónoma de Nuevo León. <http://eprints.uanl.mx/id/eprint/16425>
40. Gobierno del Estado de Nuevo León. (2023). *Nuevo León informa: Panorama hídrico 2023*. Gobierno del Estado de Nuevo León. https://www.sadm.gob.mx/SADM/archivos/uploaded_files/01_NUEVO_LEON_INFORMA_01_DE_FEBRERO_2023.pdf

41. Goldhammer, R.K. (1999). Mesozoic sequence stratigraphy and paleogeographic evolution of northeast of México, in Bartolini, C., Wilson, J.L., and Lawton, T.F., eds., *Mesozoic Sedimentary and Tectonic History of North-Central México*. Boulder, Colorado, Geological Society of North America Special Paper 340,1-58.
42. Goldhammer, R.K., Lehmann, P.J., Todd, R.G., Wilson, J.L., Ward, W.C., & Johnson, C.R. (1991) *Sequence Stratigraphy and Cyclostratigraphy of the Mesozoic of Sierra Madre Oriental, Northeast Mexico. A Field Guide Book: Gulf Coast Section*, Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, Tulsa, 85.
43. Gomes, H. I., Mayes, W.M., Whitby, P., & Rogerson, M. (2019). Constructed wetlands for steel slag leachate management: Partitioning of arsenic, chromium, and vanadium in waters, sediments, and plants. *Journal of Environmental Management*, 243, 30-38. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.04.127>
44. Gómez, H. F., Becerra, A. J., & Castro, H. A. (2021). *Análisis de sensibilidad para cinco configuraciones de electrodos en sondeos eléctricos verticales*. [Trabajo de grado, Universidad Industrial de Santander]. Repositorio de la Universidad Industrial de Santander. <https://noesis.uis.edu.co/handle/20.500.14071/41900>
45. González de Vallejo, L. I., Ferrer, M., Ortuño, L., & Oteo, C. (2002). *Ingeniería geológica*. Pearson Education. Madrid, España.
46. Greenhouse, J.P. (1991). Environmental geophysics: it's about time. *Geophysics: The Leading Edge*, 10, 32–34.
47. Guérin R, Munoz ML, Aran C, Laperrelle C, Hidra M, Drouart E, & Grellier S. (2004). Leachate recirculation: moisture content assessment by means of a geophysical technique. *Waste Manag*, 24(8),785-794. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2004.03.010>
48. Hernández, L. (1999). *Caracterización del acuífero de ciudad universitaria de la Universidad Autónoma de Nuevo León* [Tesis de maestría, Universidad Autónoma de Nuevo León]. Repositorio académico digital de la Universidad Autónoma de Nuevo León. <https://cd.dgb.uanl.mx/handle/201504211/1805>.
49. Hernández, M. C. (2019). *Aplicación de métodos geoelectrónicos para la detección de zonas de filtración en la presa Gonzalo N. Santo, San Luis Potosí*. [Tesis de maestría, Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C.]. Repositorio académico del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C. <https://repositorio.ipicyt.edu.mx/handle/11627/5079?locale-attribute=en>
50. Howell B. F. (1962). *Introducción a la Geofísica*. Omega.

51. Hunt, R. E. (2005). *Geotechnical engineering investigation handbook*. (2nd ed., pp.56-63). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781420039153>
53. Iakubovskii, I.U.V., & Liajov, L.L. (1980). *Exploración eléctrica (2ª ed.)*. Editorial Reverté.
54. Instituto de Ingeniería Civil. (2011). *Sondeos Gradadas-Área Deportiva del IIC*. Departamento de Geotecnia.
55. Instituto de Ingeniería Civil. (2014). *Sondeos Campo Football-IIC*. Departamento de Geotecnia.
56. Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2016). Anuario estadístico y geográfico de Nuevo León 2016. INEGI. https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvini/egi/productos/nueva_estruc/anuarios_2016/702825083656.pdf
57. Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2020). Obtenido de https://inegi.org.mx/contenidos/programas/ccpv/2020/doc/cpv2020_pres_res_nl.pdf
58. Jackson, R.E., Ed. (1980). *Aquifer Contamination and Protection. Studies and Reports in Hydrogeology Series, 30*. UNESCO, París.
59. Kappus, E. J., Spencer, G. L., & Langford, R. (2011). The Cerro de Cristo Rey Cretaceous Dinosaur tracksites, Sunland Park, New Mexico, USA, and Chihuahua, Mexico. *Fossil Record*. 3. 272-288.
60. Kazmi, D., Qasim, S., Siddiqui, F. I., & Azhar, S. B. (2016). Exploring the relationship between moisture content and electrical resistivity for sandy and silty soils. *International Journal of Engineering Science Invention*, 5(7), 42-47.
61. Kearey, P., Brooks, M., & Hill, I. (2002). *An Introduction to Geophysical Exploration*. Blackwell Science Ltd., Oxford.
62. Kirsch, R. (Ed.). (2009). *Groundwater Geophysics: A Tool for Hydrogeology (2nd ed.)*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-88405-7>
63. Lapworth, D.J. (2022). The question of quality: How data science is tackling threats to our groundwater. British Geological Survey. <https://www.bgs.ac.uk/news/the-question-of-quality-how-data-science-is-tackling-threats-to-our-groundwater/>
64. Lapworth, D.J., Baran, N., Stuart, M.E., & Ward, R.S. (2012). Emerging Organic Contaminants in Groundwater: A Review of Sources, Fate and Occurrence. *Environmental Pollution*, 163, 287-303.

65. Legorreta, K. P. (2016). *Detección de plumas de contaminación aplicando el método de Polarización Inducida alrededor del ex-relleno sanitario de la ciudad de Ensenada, Baja California, México*. [Tesis de maestría, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California]. Repositorio académico digital del Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California. <https://cicese.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1007/1316>.
66. Liang, Y., Li, W., & Wang, X. (2013). Influence of water content on mechanical properties of improved clayey soil using steel slag. *Geotechnical and geological engineering* 31, 83-91. <https://doi.org/10.1007/s10706-012-9564-8>
67. Limón, B. (2000). *Residuos peligrosos en el estado de Nuevo León, situación actual y perspectivas* [Tesis de maestría, Universidad Autónoma de Nuevo León]. Repositorio académico digital de la Universidad Autónoma de Nuevo León. <http://eprints.uanl.mx/6463/>.
68. Loke, M.H. and Barker, R.D. (1996) Rapid Least-Squares Inversion of Apparent Resistivity Pseudosections by a Quasi-Newton Method. *Geophysical Prospecting*, 44, 131-152. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2478.1996.tb00142.x>
69. López, A. A., Loke, M.H., Fanton, G. O., & Cara Rubí, E. (2012). Técnicas prácticas para investigación de resistividad en dos y tres dimensiones (Tomografía eléctrica 2D y 3D). San Juan, Argentina, Instituto Geofísico Sismológico, 36 pp. https://www.researchgate.net/publication/266036673_TECNICAS_PRACTICAS_PARA_INVESTIGACION_DE_RESISTIVIDAD_EN_DOS_Y_TRES_DIMENSIONES_TOMOGRAFIA_ELECTRICA_2D_y_3D
70. Lucius, J. E., Abraham, J. D., & Burton, B. L. (2008). *Resistivity profiling for mapping gravel layers that may control contaminant migration at the Amargosa Desert Research Site, Nevada* (No. 2008-5091). U.S. Geological Survey.
71. Marcos, Ó. (2001). Sequía: definiciones, tipologías y métodos de cuantificación. *Investigaciones Geográficas*, (26), 59–80. <https://doi.org/10.14198/INGEO2001.26.06>
72. Martínez, G. E. (2018). *Caracterización geológica del Río Santa Catarina como base para la elaboración de estudios ambientales de contaminación y abastecimiento de agua potable para el área metropolitana de Monterrey (AMM)* [Tesis de maestría, Universidad Autónoma de Nuevo León]. Repositorio académico digital de la Universidad Autónoma de Nuevo León. <http://eprints.uanl.mx/16176/>
73. McGinnis, L.D., & Jensen, T.E. (1971). Permafrost-hydrogeologic regimen in two ice-free valleys, Antarctica, from electrical depth sounding. *Quaternary Research*, 1, 389–409.

74. Meju, M. A. (1994). *Geophysical data analysis: understanding inverse problem theory and practice* (Vol. 6). Tulsa, OK: Society of Exploration Geophysicists.
75. Michalzik, D. (1988). Trias bis tiefste Unter-Kreide der nordöstlichen Sierra Madre Oriental, Mexiko: Fazielle Entwicklung eines passiven Kontinentalrandes: Darmstadt, Hesse, Alemania. [Tesis Doctoral]. Universidad Técnica de Darmstadt.
76. Michalzik, D., & Schumann, D. (1994). Lithofacies relations and palaeology of a Late Jurassic to Early Cretaceous fan delta to shelf depositional system in the Sierra Madre Oriental of north-east Mexico. *Sedimentology*, 41(3), 463-477. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.1994.tb02006.x>
77. Morán-Zenteno, D. J. (Ed.). (1985). Geología de la República Mexicana: México, 1984 (2ª ed.). Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.
78. Munguía-Lara, A. I., Hernández-Martínez, J. I., & Martínez-Villegas, N. V. (2022). A favor y en contra de la gravedad: La capacidad del suelo para filtrar contaminantes a contracorriente. *Nuestra Tierra*, 18(38), 7-9. Estación Regional del Noroeste, UNAM.
79. Ndlovu, S., Simate., G S. & Matinde, E. (2017). *Waste Production and Utilization in the Metal Extraction Industry*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781315153896>
80. Norwegian Scientific Committee for Food and Environment (VKM). (2022). *Risk assessment of potentially toxic elements (heavy metals and arsenic) in soil and fertilizer products-fate and effects in the food chain and the environment in Norway* (VKM Report 2022: 09). <https://vkm.no/english/riskassessments/allpublications/riskassessmentofpotentiallytoxicmetalsinsoilandfertiliserproductsfateandeffectsinthefoodchainandtheenvironmentinnorway.4.6ef00a6c15feaaffcf174feb.html>
81. Okpoli, C. (2013). Sensitivity and resolution capacity of electrode configurations. *International Journal of Geophysics*, 2013. <https://doi.org/10.1155/2013/608037>
82. Orellana, E. (1972). *Prospección geo-eléctrica en corriente continua*. Madrid, ES: Parainfo.
83. Ortega-Gaucin, D. (2013). Impacto de las sequías en Nuevo León. *Ciencia UANL*, 16(63), 8-14pp.
84. Padilla, R. J., & Sánchez, A. (1982). Geologic evolution of the Sierra Madre Oriental between Linares, Concepción del Oro, Saltillo, and Monterrey, México. [Tesis doctoral]. Universidad de Texas.
85. Pal, A., Gin, K.Y.H., Lin, A.Y.C., & Reinhard, M. (2010). Impacts of Emerging Organic Contaminants on Freshwater Resources: Review of Recent Occurrences,

Sources, Fate and Effects. *Science of the Total Environment*, 408, 6062-6069. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2010.09.026>.

86. Pellerin, L. (2002). Applications of electrical and electromagnetic methods for environmental and geotechnical investigations. *Surveys in Geophysics*, 23, 101-132.

87. Pellicer, E. (2015). Caracterización mediante tomografía eléctrica del deslizamiento de Toleo (Oviedo). [Trabajo fin de máster, Universidad de Oviedo]. Repositorio Institucional de la Universidad de Oviedo <https://digibuo.uniovi.es/dspace/handle/10651/33870>

88. Pérez, M. (2019). *Hidrogeoquímica de las aguas subterráneas por contaminación industrial y su impacto en las cimentaciones de los edificios universitarios* [Tesis de licenciatura]. Universidad Autónoma de Nuevo León.

89. Pérez, M. (2022). *Evolución de contaminantes en aguas subterráneas y su impacto sobre edificaciones universitarias (hidrogeoquímica e hidrogeología)* [Tesis de maestría, Universidad Autónoma de Nuevo León]. Repositorio académico digital de la Universidad Autónoma de Nuevo León. <http://eprints.uanl.mx/id/eprint/23040>

90. Pérez, M. (2024). *Vulnerabilidad a la contaminación de las aguas superficiales y subterráneas del acuífero Monterrey. Caso estudio: campus UANL*. [Tesis doctoral en progreso]. Universidad Autónoma de Nuevo León.

91. Piatak, N. M., Ettler, V., & Hoppe, D. (2021). Geochemistry and mineralogy of slags. En N. M. Piatak & V. Ettler (Eds.), *Metallurgical Slags: Environmental geochemistry and resource potential* (pp. 59-124). Royal Society of Chemistry.

92. Piatak, N.M, Parsons, M. B., & Seal II, R.R. (2015). Characteristics and environmental aspects of slag: A review. *Applied Geochemistry*, 57, 236-266. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2014.04.009>.

93. Postigo, C., Martinez, D.E., Grondona, S., & Miglioranza, K.S.B. (2018). Groundwater Pollution: Sources, Mechanisms, and Prevention. 87-96.

94. Reyes-Gutiérrez, L. R., Vázquez-Castro, M. L., Pedroza-Benítez, S., Gómez-Beltrán, G., & Macedo-Miranda, M.G. (2013). *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales*, 9(1), 107-114.

95. Reynolds, J. (2011). *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*. (Segunda edición) Wiley-Blackwell.

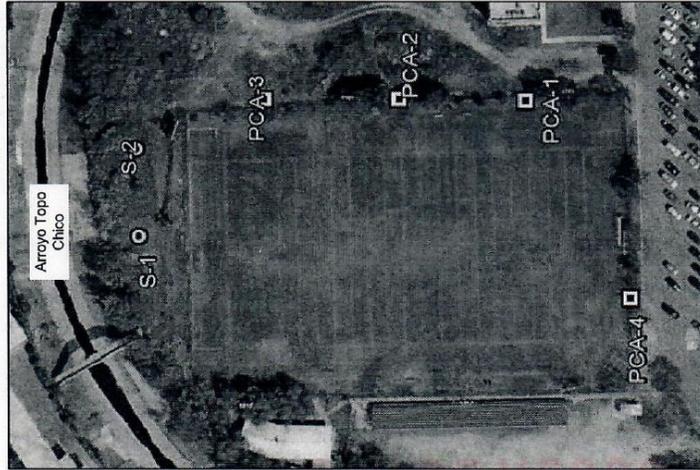
96. Reynolds, J.M. (1987a) The role of surface geophysics in the assessment of regional groundwater potential in northern Nigeria, in Planning and Engineering Geology (eds M.G. Culshaw, F.G. Bell, J.C. Cripps and M. O'Hara), *Geological Society Engineering Group Special Publication No. 4*, 185–190.

97. Reynolds, J.M., & McCann, D.M. (1992). Geophysical methods for the assessment of landfill and waste disposal sites, in *Proceedings of 2nd International Conference on Construction on Polluted and Marginal Land, 30 Junio–2 Julio 1992, Brunel University, Londres* (ed. M.C. Forde), Engineering Technics Press, Edimburgo, 63–71.
98. Reynolds, J.M., & Paren, J.G. (1980). Recrystallisation and electrical behaviour of glacier ice. *Nature*, 283(5742). 63–64.
99. Reynolds, J.M., & Paren, J.G. (1984). Electrical resistivity of ice from the Antarctic Peninsula. *Journal of Glaciology*, 30. 289–295.
100. Reynolds, J.M., & Taylor, D.I. (1992). The use of sub-surface imaging techniques in the investigation of contaminated sites, in *Proceedings of 2nd International Conference on Construction on Polluted and Marginal Land, 30 Junio–2 Julio 1992, Brunel University, Londres* (ed. M.C. Forde), Engineering Technics Press, Edimburgo 121– 131.
101. Rojas, L. (2023). Prospección geoelectrica para la detección de plumas contaminantes de pesticidas en un cultivo de habichuelas en Ubaque, Cundinamarca. [Proyecto de grado, Universidad de los Andes]. Repositorio Institucional digital de la Universidad de los Andes. <https://repositorio.uniandes.edu.co/entities/publication/f050f8a8-04ee-47ab-b685-98977e07ac3a>
102. Samouëlian, A., Cousin, I., Tabbagh, A., Bruand, A., & Richard, G. (2005). Electrical resistivity survey in soil science: A review. *Soil and Tillage Research*, 83(2), 173-193. <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.10.004>
103. Sauck, W.A. (2000). A model for the resistivity structure of LNAPL plumes and their environs in sandy sediments. *Journal of Applied Geophysics*, 44, 151-165.
104. Savci, S. (2012). An Agricultural Pollutant: Chemical Fertilizer. *International Journal of Environmental Science and Development*, 3, 77-80. <https://doi.org/10.7763/IJESD.2012.V3.19>
105. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2012). Informe de la Situación del Medio Ambiente en Mexico. Compendio de Estadísticas Ambientales. Indicadores Clave y de Desempeño Ambiental. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. <http://www.semarnat.gob.mx>
106. Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey, I.P.D. (SADM). (2022). *Plan Estratégico de Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey, I.P.D. 2022-2027*.

107. Shevnin V., Delgado-Rodríguez, O., Fernández-Linares, L., Zegarra-Martínez, H., Mousatov, A., & Ryjov, A. (2005). Geoelectrical characterization of an oil-contaminated site in Tabasco, México. *Geofísica Internacional*, 44, 251-263.
108. Sikah, J., Aning, A., Danuor, S., Manu, E., & Okrah, C. (2016). Groundwater exploration using 1D and 2D electrical resistivity methods. *Journal of Environment and Earth Science*, 6(7), 55-63.
109. Silva, J.L., Hernández, F.J, & Gonzalez, J.A. (2015). *Estudio de microcuencas hidrológicas urbanas y perfiles hidroestratigráficos en la zona del campus "ciudad universitaria-uanl" aplicando técnicas de geomática*. [Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma de Nuevo León, México].
110. Steeples, D. (1991) Uses and techniques of environmental geophysics. *Geophysics: The Leading Edge*, 10 (9), 30–31.
111. Sudha, K., Israil, M., Mittal, S., & Rai, J. (2009). Soil characterization using electrical resistivity tomography and geotechnical investigations. *Journal of Applied Geophysics*. 67(1), 74-79. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2008.09.012>
112. Talabi, A. O., & Kayode, T. J. (2019). Groundwater Pollution and Remediation. *Journal of Water Resource and Protection*, 11, 1-19. <https://doi.org/10.4236/jwarp.2019.111001>
113. Tarbuck, E. J., & Lutgens, F.K. (2013). *Ciencias de la Tierra: Una introducción a la geología física* (10ª ed.). Pearson Education. Madrid, España.
114. Telford, W. M., Geldart, L. P., & Sheriff, R. E. (1990). *Applied geophysics* (Vol. 1). Cambridge University Press, Cambridge, UK.
115. Ullrich, B., Weller, A., Günther, T., & Carsten, R. (2009). *Geophysical prospecting of ancient slag deposits in Munigua (Spain) and Ain-al Hajer (Morocco) using complex resistivity tomography*. En *Archaeometallurgy in Europe 2007: Selected papers of the 2nd International Conference*, 17-21 June 2007, Aquileia.
116. Vázquez, D. A. (2023). *Análisis de tendencias de precipitación en la cuenca Río Bravo-San Juan por medio de productos satelitales de precipitación y estaciones climatológicas*. [Tesis de Maestría de la Universidad Autónoma de Nuevo León]. Repositorio académico digital de la Universidad Autónoma de Nuevo León. <http://eprints.uanl.mx/id/eprint/26176>
117. Velthof, G., Oudendag, D., Witzke, H., Asman, W., Klimont, Z., & Oenema, O. (2009). Integrated Assessment of Nitrogen Losses from Agriculture in EU-27 Using MITERRA-EUROPE. *Journal of Environmental Quality*, 38, 402-417.
118. Vera, J. A. (1994). *Estratigrafía: Principios y Métodos* (1ª ed.). Editorial Rueda.

119. Werner, J. (1996). *Introducción a la Hidrogeología. Primera Edición. Universidad Autónoma de Nuevo León*. Linares, Nuevo León.
120. Wilhite, D. A., & Glantz, M.H. (1985). Understanding the drought phenomenon: The role of definitions. *Water International*, 10(3), 111-120. <https://doi.org/10.1080/02508068508686328>
121. Yang, Y., Raipala, K., & Holappa, L. (2014). Ironmaking. En S. Seetharaman (Ed.), *Treatise on process metallurgy. Volume 3: Industrial processes* (pp. 2-88). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-096988-6.00017-1>
122. Zhou, M., Wang, J., Cai, L., Fan, Y., & Zheng, Z. (2015). Laboratory investigations on factors affecting soil electrical resistivity and the measurement. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 51(6), 5358-5365. <https://doi.org/10.1109/TIA.2015.2465931>

ANEXO 1: SONDEOS CAMPO FOOTBALL-IIC



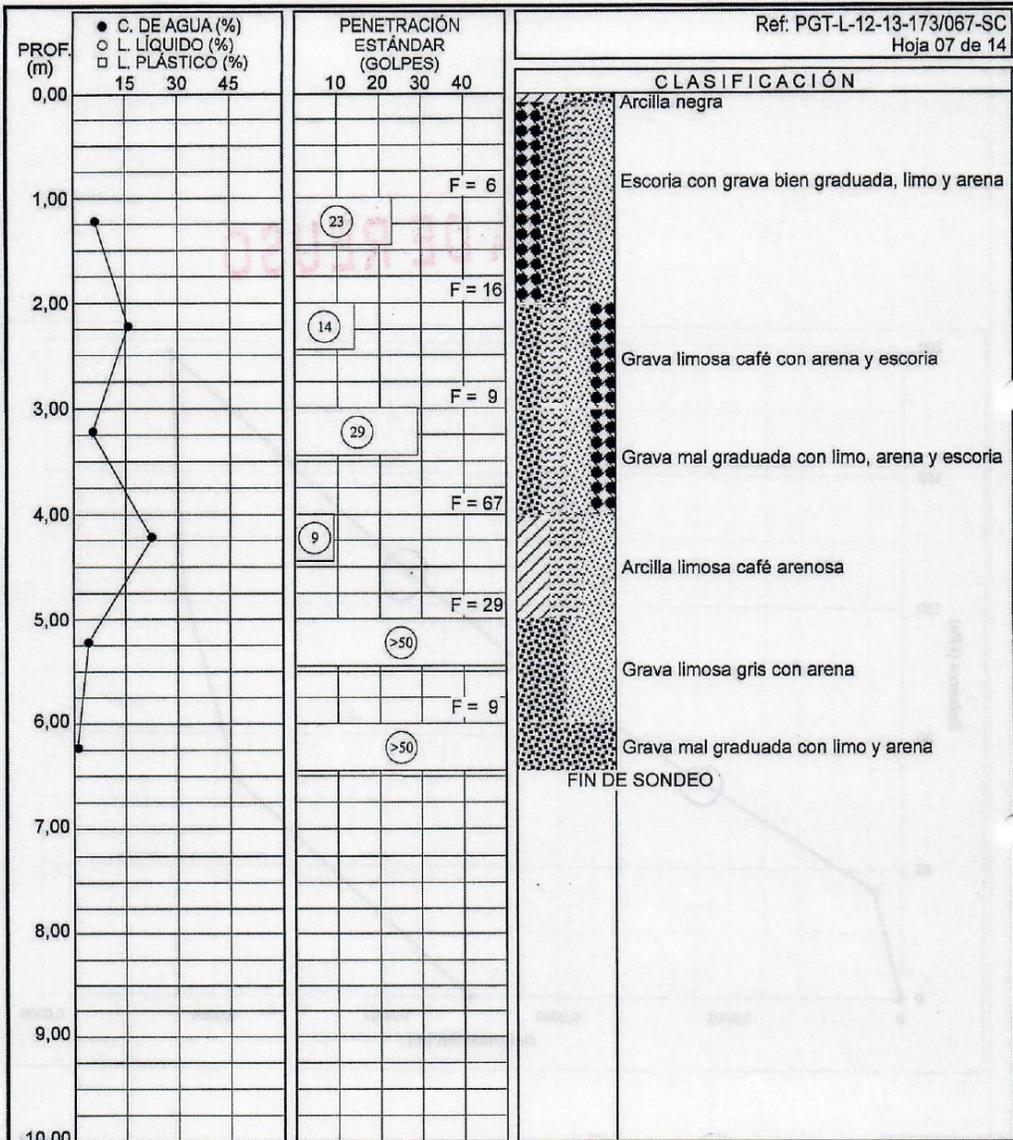
ELIMINOLOGÍA

- ☉ SONDEO CON MÁQUINA PERFORADORA DEL TIPO ROTARIA
 - ☐ POCO A CIELO ABIERTO, PCA's
- REFERENCIAS:
 N.M.C.-491-2010-05-2010
 Decreto 2.1.2.2.4.4
 ASTM-D-4221-96 (Reaprobada 2009)

Elaborado por:
 Fecha: 2014-05-21

Revisado por:
 Fecha: 2014-05-21

	UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN INSTITUTO DE INGENIERÍA CIVIL DEPARTAMENTO DE GEOTECNIA
	Departamento de Ingeniería Estructural y Materiales de Construcción Muro - Cliente Campo de Fútbol - IIC
Ctl. Universitario, San Nicolás de los Garza, N. L., CROQUIS DE LOCALIZACIÓN DE SONDEOS	
SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, N. L. MAYO DEL 2014	
Código: ECR-GE-02; Revisión 01; Página 1 de 1	



SIMBOLOGÍA

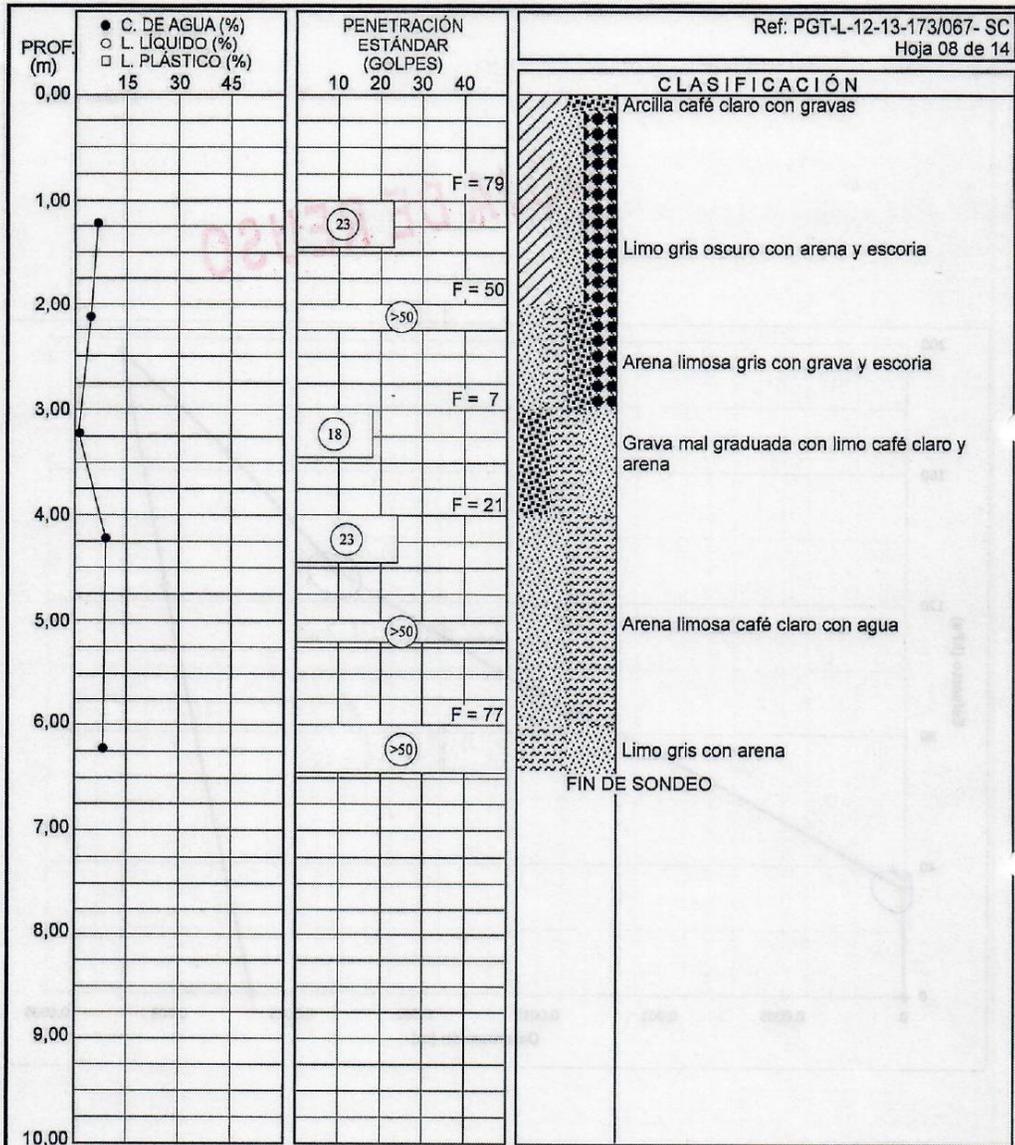
	ARCILLA		ALMENDRILLA
	LIMO		CONGLOMERADO
	ARENA		NIVEL FREÁTICO
	GRAVA	F = % De material que pasa la malla No 200.	
	BOLEOS	T.S. = Tubo Shelby.	
	CALICHE	B.D. = Barril denison.	
	LUTITA	B.D.G. = Barril doble giratorio.	
		R.E.C. = Recuperación de la roca	
		R.Q.D. = Índice de calidad de la roca	
		P.F.P. = Pérdida de fluido de perforación	

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
INSTITUTO DE INGENIERÍA CIVIL
DEPARTAMENTO DE GEOTECNIA

Departamento de Ingeniería Estructural y materiales de Construcción
 Muro Oriente
 Campo Football - IIC
 San Nicolás de los Garza, N. L.

PERFIL ESTRATIGRÁFICO	SONDEO: 1
SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, N. L. MAYO DE 2014	FIGURA: 2

Elaboró: gggg Revisó: cmd Aprobó: sss Código: FOR-GEO-08; Revisión: 06; Página 1 de 1
 Fecha: 2013/12/18 Fecha: 2014/05/21 Fecha: 2014/05/21



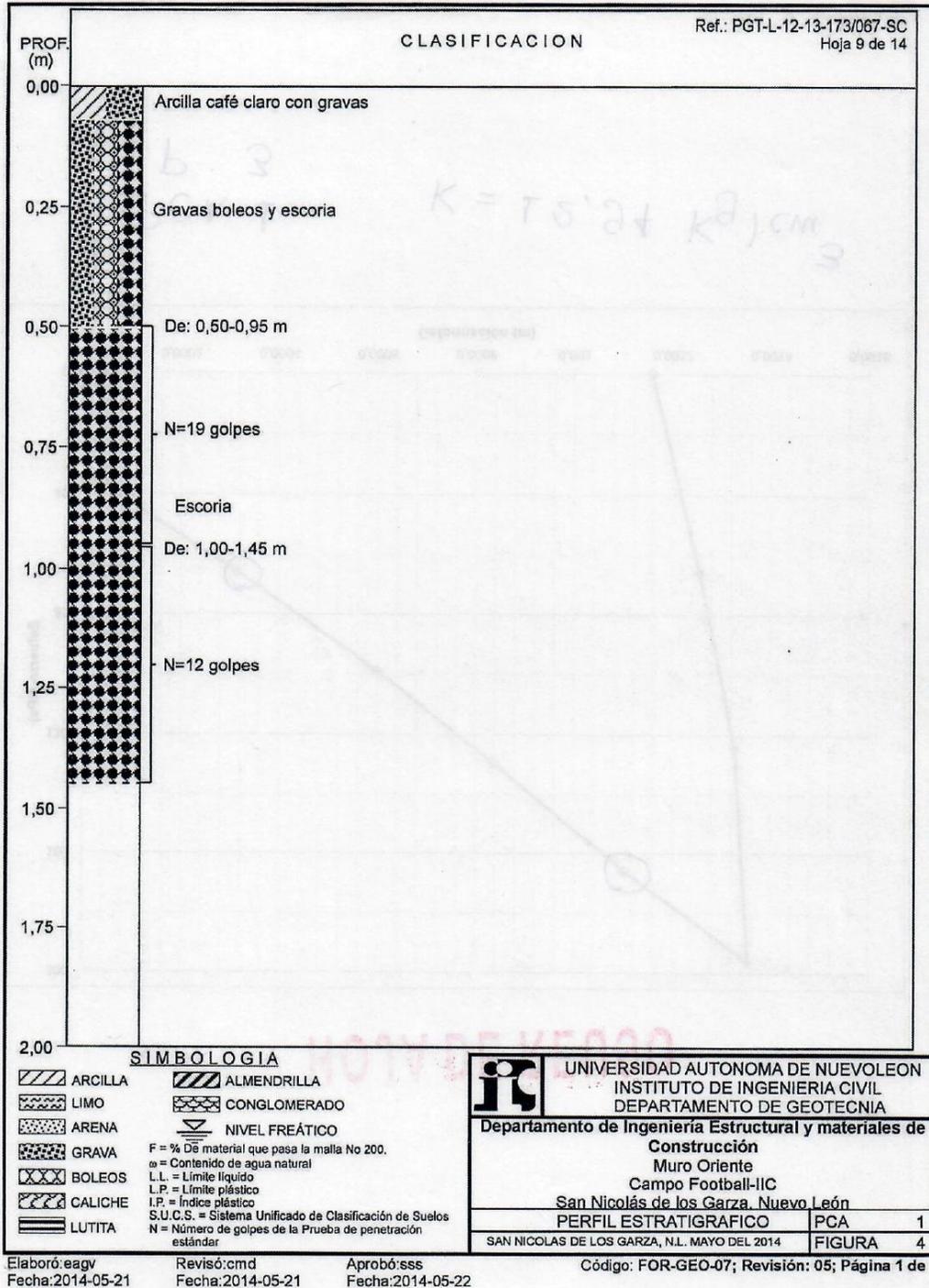
SIMBOLOGÍA

	ARCILLA		ALMENDRILLA
	LIMO		CONGLOMERADO
	ARENA		NIVEL FREÁTICO
	GRAVA	F = % De material que pasa la malla No 200.	
	BOLEOS	T.S. = Tubo Shelby.	
	CALICHE	B.D. = Barril denison.	
	LUTITA	B.D.G. = Barril doble giratorio.	
		R.E.C. = Recuperación de la roca	
		R.Q.D. = Índice de calidad de la roca	
		P.F.P. = Pérdida de fluido de perforación	

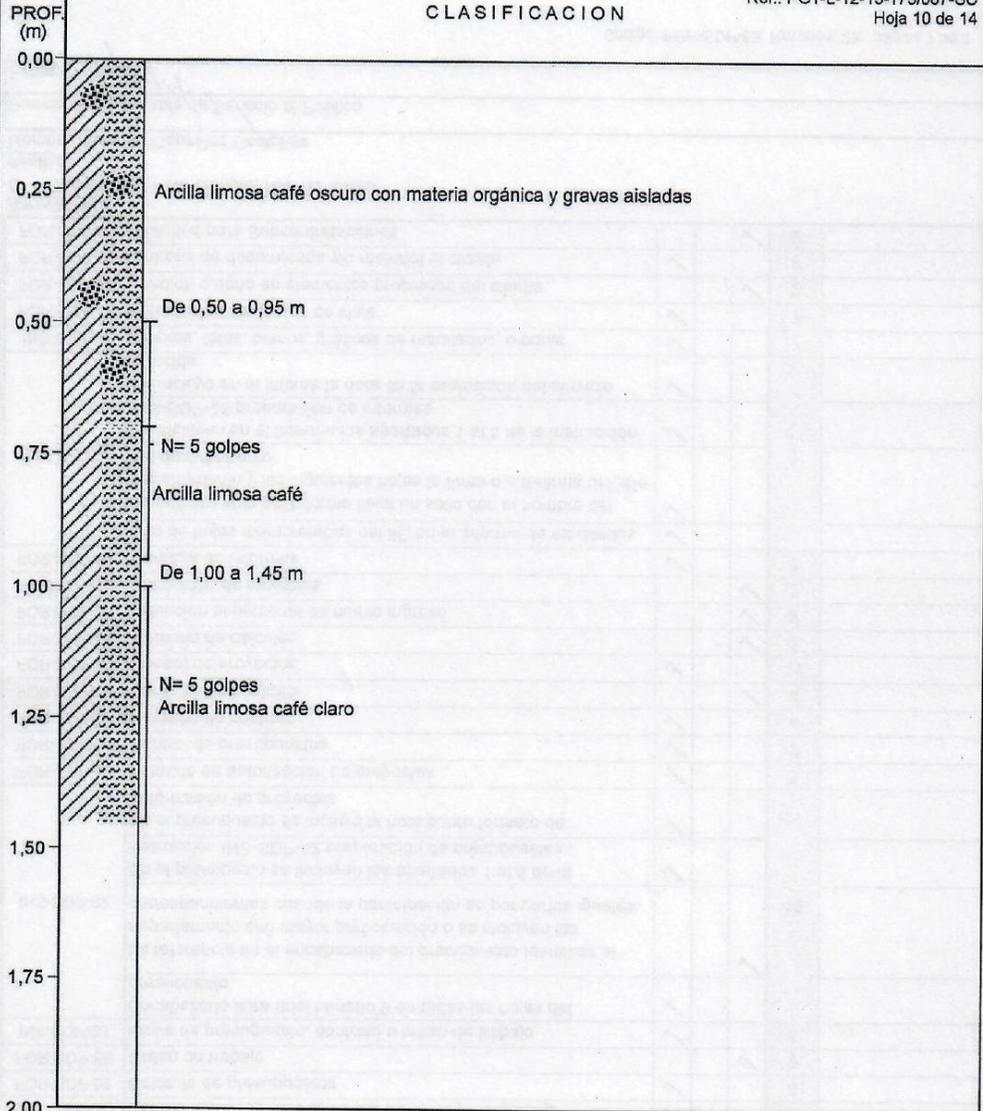
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
INSTITUTO DE INGENIERÍA CIVIL
DEPARTAMENTO DE GEOTECNIA

Departamento de Ingeniería Estructural y materiales de Construcción
Muro Oriente
Campo Football - IIC
San Nicolás de los Garza, N. L.

PERFIL ESTRATIGRÁFICO	SONDEO: 2
SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, N. L. DICIEMBRE DE 2013	FIGURA: 3



CLASIFICACION



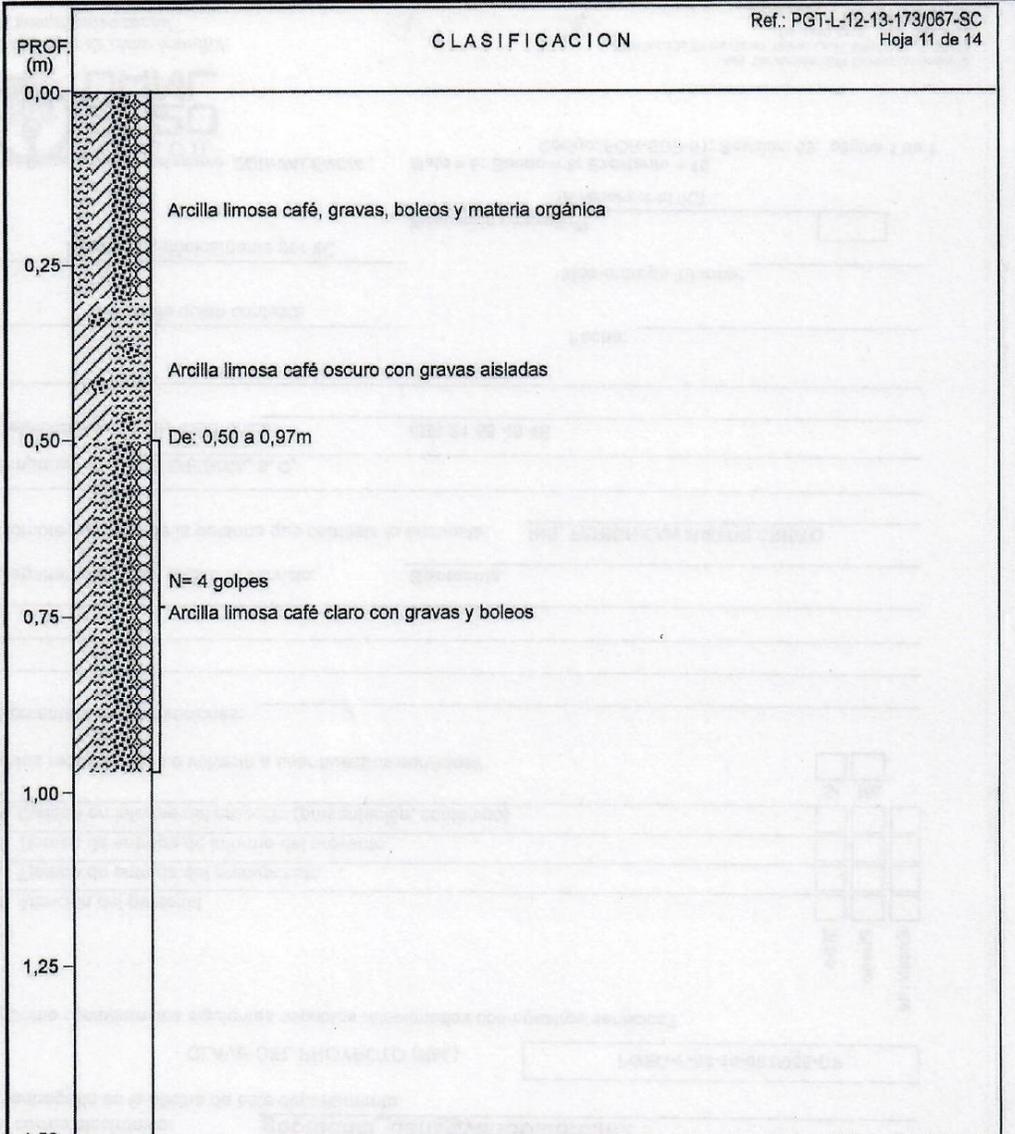
SIMBOLOGIA

	ARCILLA		ALMENDRILLA
	LIMO		CONGLOMERADO
	ARENA		NIVEL FREÁTICO
	GRAVA	F = % De material que pasa la malla No 200.	
	BOLEOS	ω = Contenido de agua natural	
	CALICHE	L.L. = Límite líquido	
	LUTITA	L.P. = Límite plástico	
		I.P. = Índice plástico	
		S.U.C.S. = Sistema Unificado de Clasificación de Suelos	
		N = Número de golpes de la Prueba de penetración estándar	

	UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVOLEON INSTITUTO DE INGENIERIA CIVIL DEPARTAMENTO DE GEOTECNIA	
	Departamento de Ingeniería Estructural y Materiales de Construcción Muro Oriente Campo Football - IIC San Nicolas de los Garza, N.L.	
PERFIL ESTRATIGRAFICO	PCA	2
SAN NICOLAS DE LOS GARZA, N.L. MAYO DEL 2014	FIGURA	5

Elaboró: eagy Revisó: cmd Aprobó: sss
Fecha: 2014-05-21 Fecha: 2014-05-22 Fecha: 2014-05-22

Código: FOR-GEO-07; Revisión: 05; Página 1 de 1



SIMBOLOGIA

	ARCILLA		ALMENDRILLA
	LIMO		CONGLOMERADO
	ARENA		NIVEL FREÁTICO
	GRAVA	F = % De material que pasa la malla No 200.	
	BOLEOS	ω = Contenido de agua natural	
	CALICHE	L.L. = Límite líquido	
	LUTITA	L.P. = Límite plástico	
		I.P. = Índice plástico	
		S.U.C.S. = Sistema Unificado de Clasificación de Suelos	
		N = Número de golpes de la Prueba de penetración estándar	

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVOLEON INSTITUTO DE INGENIERIA CIVIL DEPARTAMENTO DE GEOTECNIA			
		Departamento de Ingeniería Estructural y Materiales de Construcción Muro Oriente Campo Football - IIC San Nicolas de los Garza, N.L.	
PERFIL ESTRATIGRAFICO		PCA	3
SAN NICOLAS DE LOS GARZA, N.L. MAYO DEL 2014		FIGURA	6

Elaboró: eagv Revisó: cmd Aprobó: sss
 Fecha: 2014-05-21 Fecha: 2014-05-22 Fecha: 2014-05-22

CLASIFICACION

PROF.
(m)

0,00

0,25

0,50

0,75

1,00

1,25

1,50

Gravas arcilolimosas con boleos y materia orgánica

Arcilla limosa café oscuro con materia orgánica y gravas aisladas

De: 0,70 a 1,15 m

Limo café claro con gravas, materia orgánica y boleos aislados.
N= 5 golpes

1,50

SIMBOLOGIA

	ARCILLA		ALMENDRILLA
	LIMO		CONGLOMERADO
	ARENA		NIVEL FREÁTICO
	GRAVA	F = % De material que pasa la malla No 200.	
	BOLEOS	ω = Contenido de agua natural	
	CALICHE	L.L. = Límite líquido	
	LUTITA	L.P. = Límite plástico	
		I.P. = Índice plástico	
		S.U.C.S. = Sistema Unificado de Clasificación de Suelos	
		N = Número de golpes de la Prueba de penetración estándar	



UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVOLEON
INSTITUTO DE INGENIERIA CIVIL
DEPARTAMENTO DE GEOTECNIA

Departamento de Ingeniería Estructural y Materiales de
Construcción
Muro Oriente
Campo Football - IIC
San Nicolas de los Garza, N.L.

PERFIL ESTRATIGRAFICO	PCA	4
SAN NICOLAS DE LOS GARZA, N.L. MAYO DEL 2014	FIGURA	7

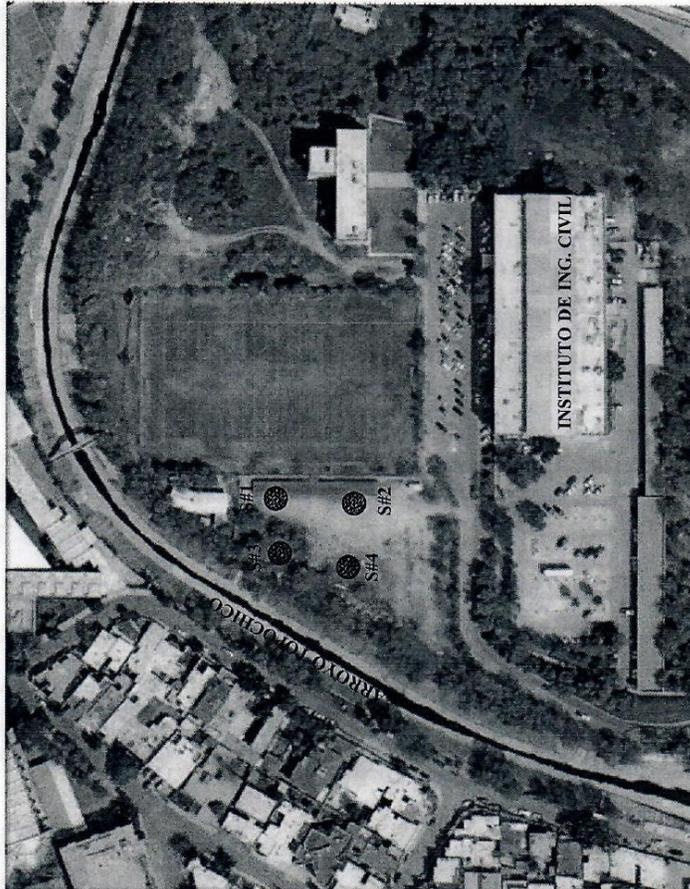
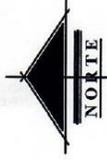
Elaboró: eagv
Fecha: 2014-05-21

Revisó: cmd
Fecha: 2014-05-22

Aprobó: sss
Fecha: 2014-05-22

Código: FOR-GEO-07; Revisión: 05; Página 1 de 1

**ANEXO 2: SONDEOS GRADAS
ÁREA-DEPORTIVA DEL IIC**

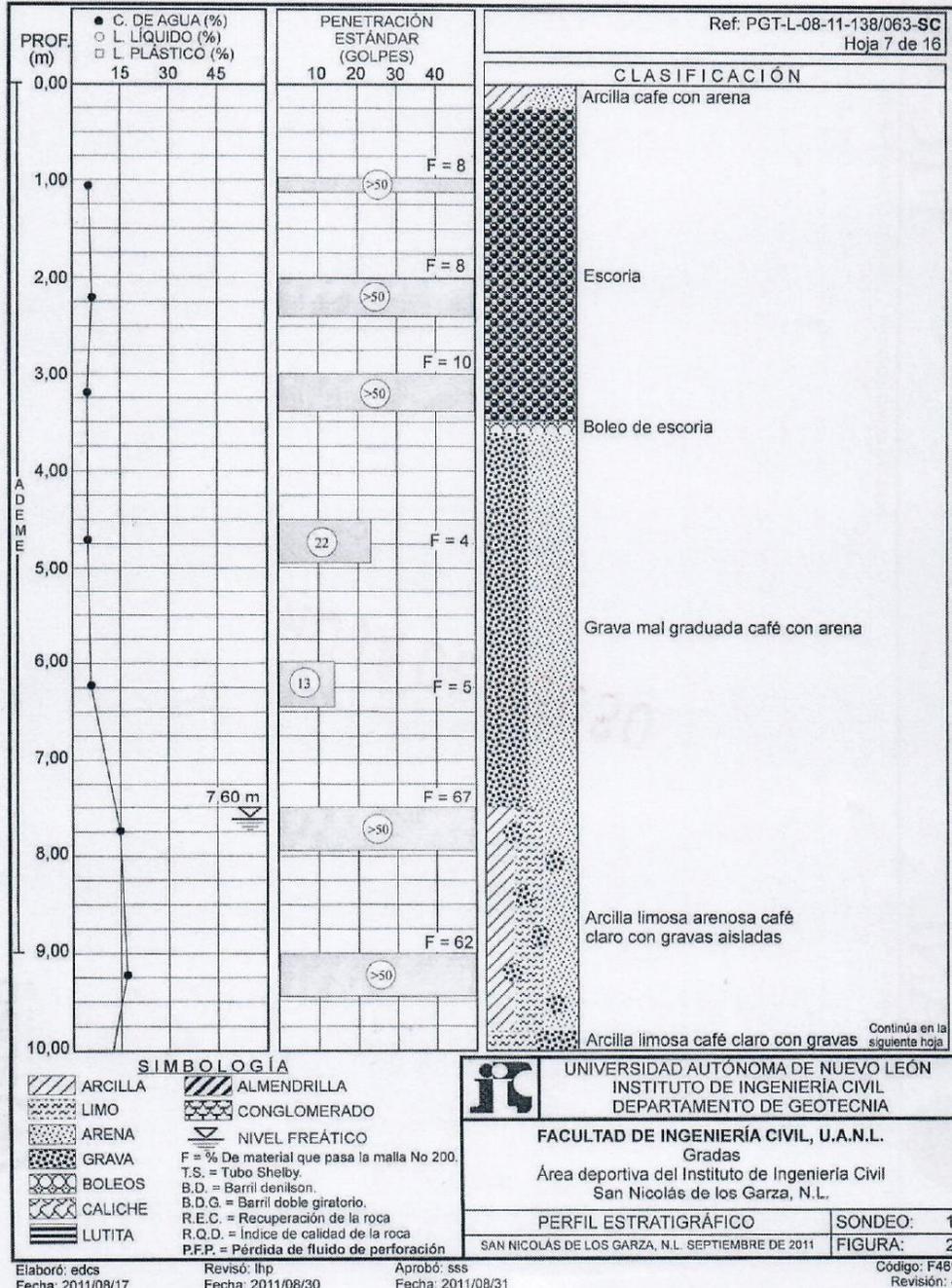


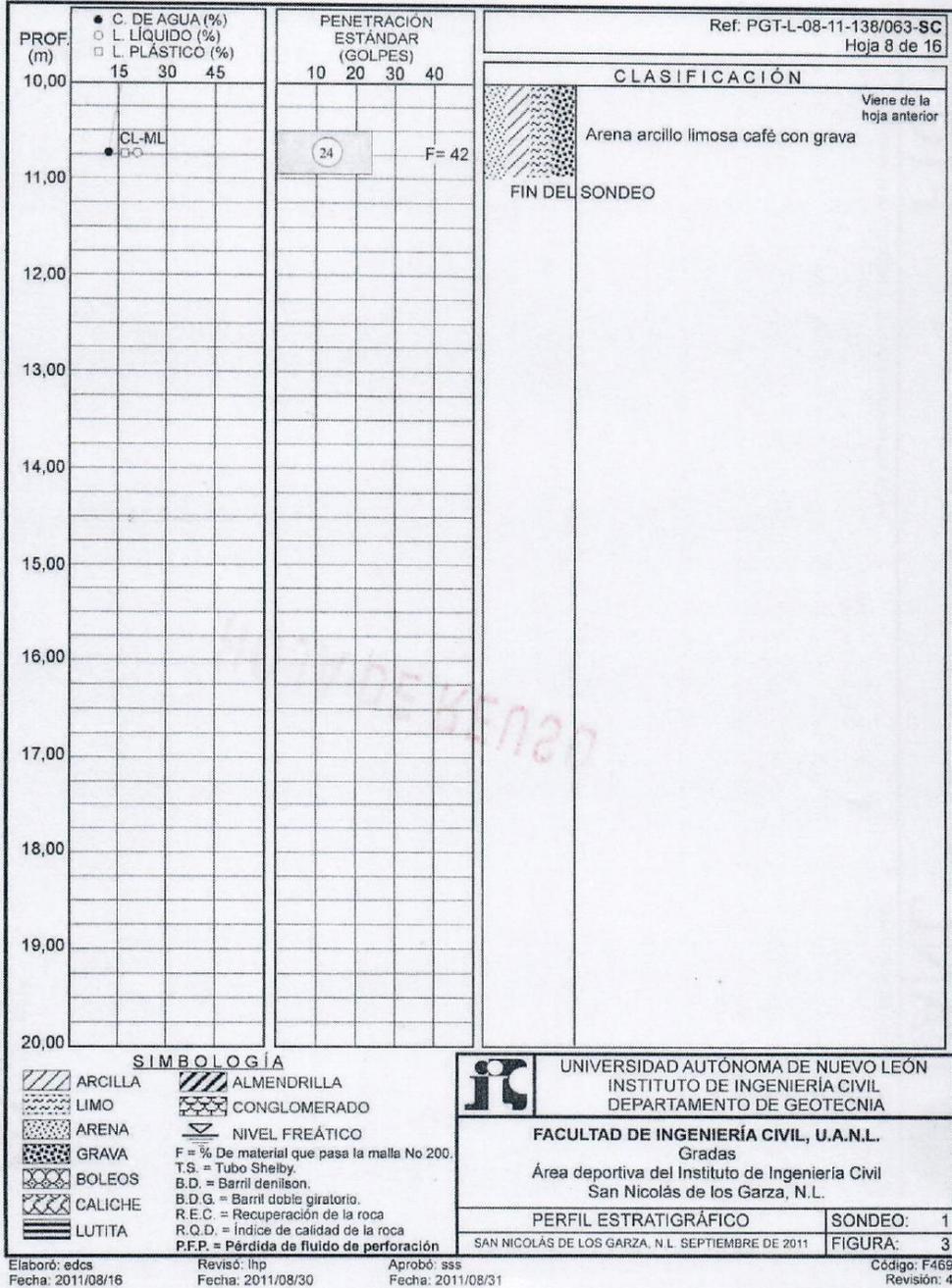
Ubicación del sitio de estudio

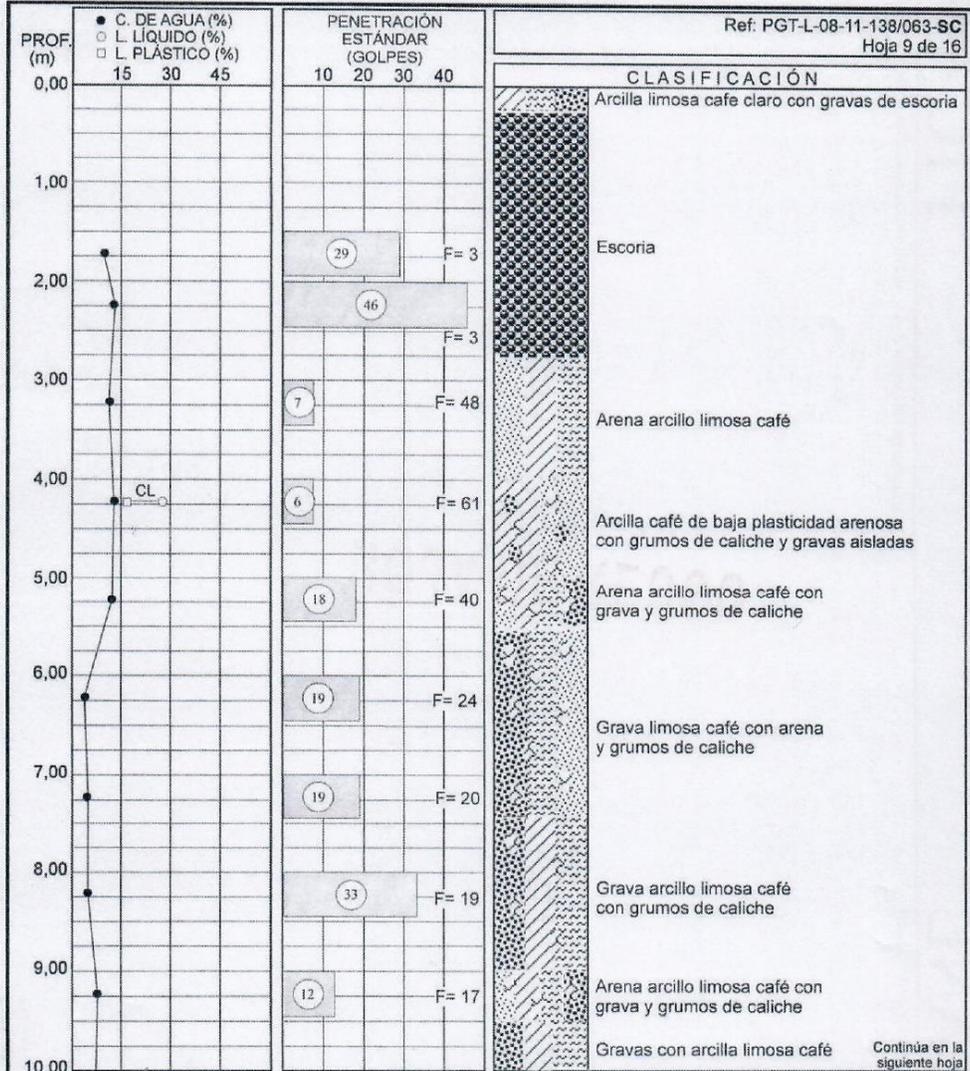
	INSTITUTO DE INGENIERIA CIVIL DE LA FAC. DE ING. CIVIL DE LA UANL.
	FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL UANL Grado Área departativa del Instituto de Ingeniería Civil San Nicolás de los Garza, Nuevo León
	CROQUIS DE LOCALIZACIÓN DE SONDEOS
	SAN NICOLAS DE LOS GARZA, N.L. SEPTIEMBRE DEL 2011
	FIGURA: 1

SAMBOLAGUA
 SONDEO CON MAQUINA PERFORADORA DEL TIPO ROTARIA
 REFERENCIAS:
 ANAX. C. - H4ANNCE-2003
 ANAX. C. - H4ANNCE-2006
 ASTM. D. - 4252-99 (Reaprobado en 2007)

Elaboró: BPT
 Fecha: 2011/07/09
 Revisó: RSG
 Fecha: 2011/09/12
 Aprobó: MSA
 Fecha: 2011/09/13







SIMBOLOGÍA

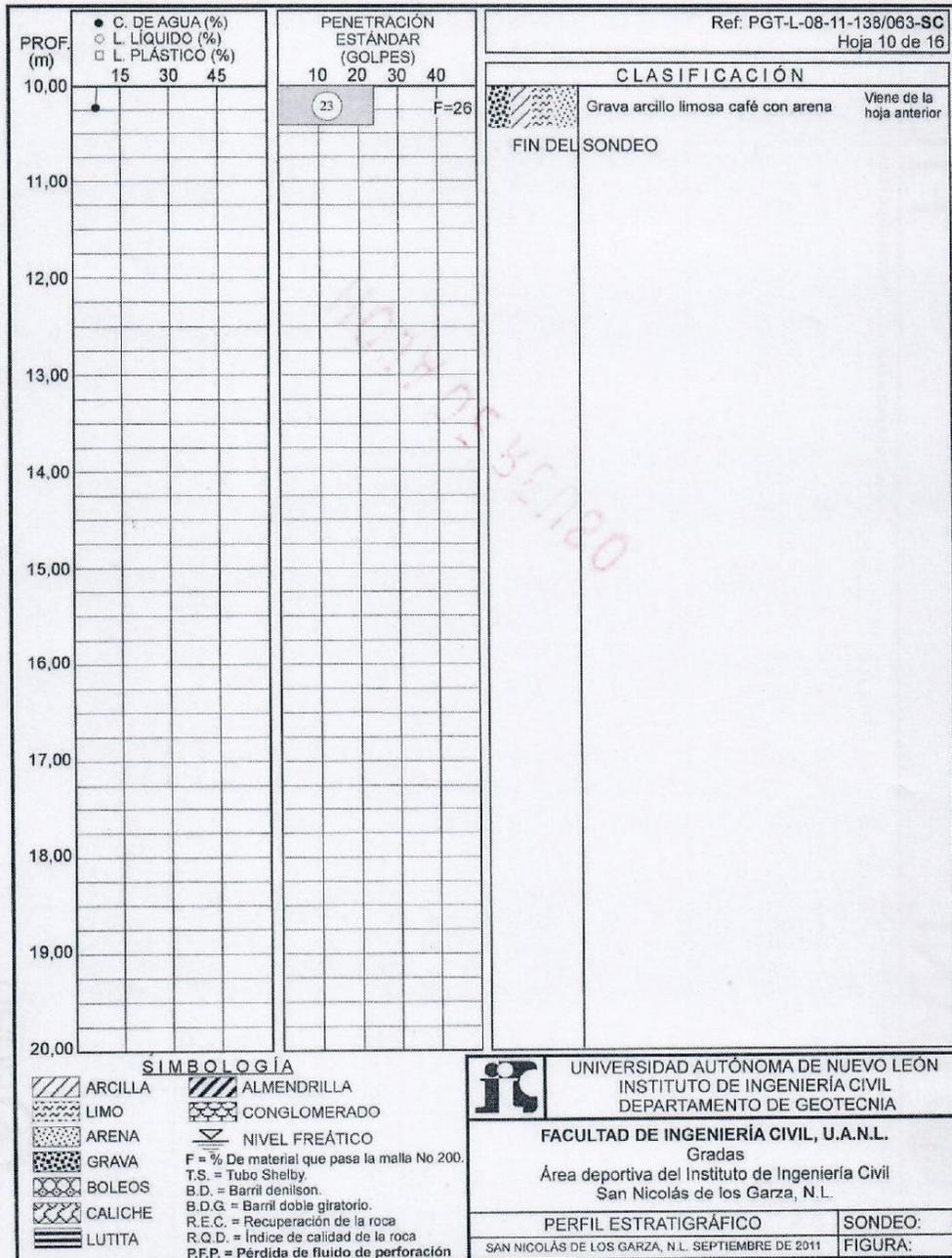
	ARCILLA		ALMENDRILLA
	LIMO		CONGLOMERADO
	ARENA		NIVEL FREÁTICO
	GRAVA	F = % De material que pasa la malla No 200.	
	BOLEOS	T.S. = Tubo Shelby.	
	CALICHE	B.D. = Barril denison.	
	LUTITA	B.D.G. = Barril doble giratorio.	
		R.E.C. = Recuperación de la roca	
		R.Q.D. = Índice de calidad de la roca	
		P.F.P. = Pérdida de fluido de perforación	

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
INSTITUTO DE INGENIERÍA CIVIL
DEPARTAMENTO DE GEOTECNIA

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL, U.A.N.L.
Gradas
Área deportiva del Instituto de Ingeniería Civil
San Nicolás de los Garza, N.L.

PERFIL ESTRATIGRÁFICO	SONDEO: 2
SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, N.L. SEPTIEMBRE DE 2011	FIGURA: 4

Elaboró: edcs Revisó: lhp Aprobó: ess Código: F468
 Fecha: 2011/08/17 Fecha: 2011/08/30 Fecha: 2011/09/03 Revisión: 4

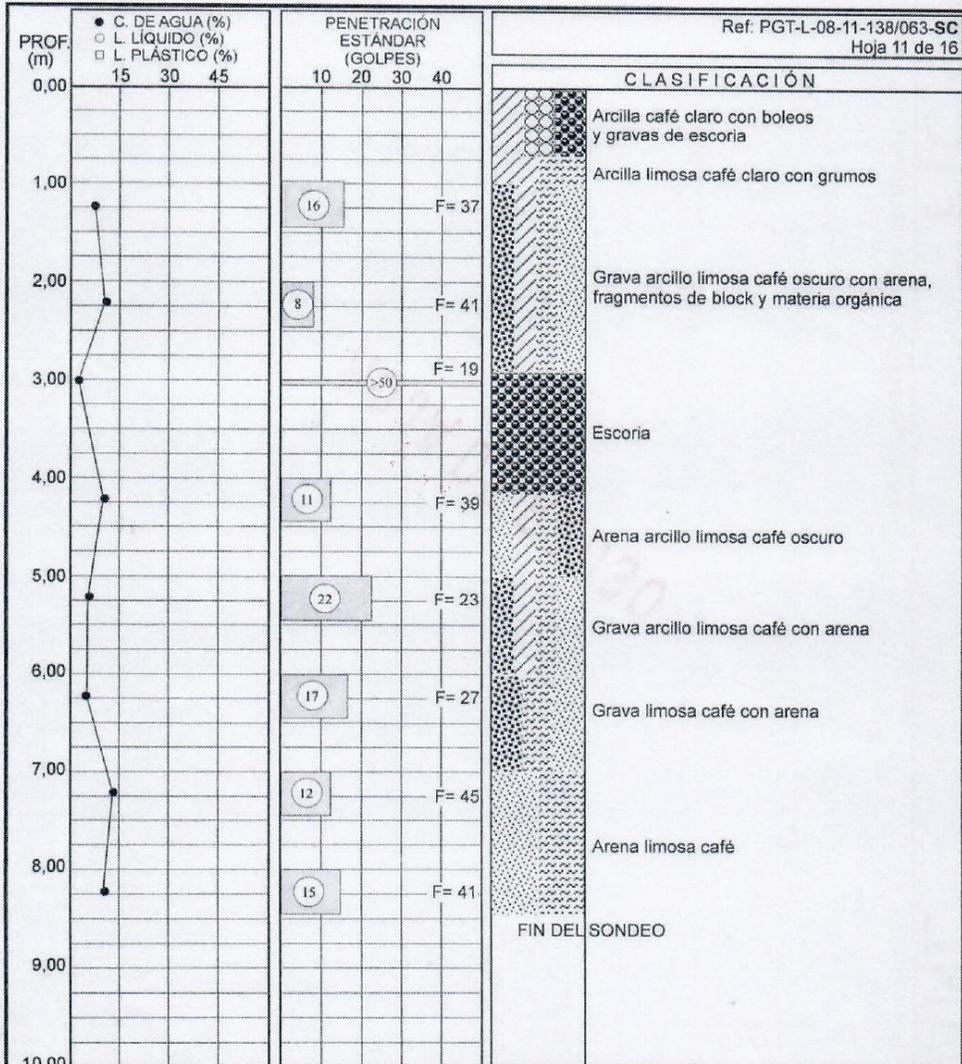


Elaboró: edcs
Fecha: 2011/08/16

Revisó: lhp
Fecha: 2011/08/18

Aprobó: sss
Fecha: 2011/09/06

Código: F489
Revisión: 4



SIMBOLOGÍA

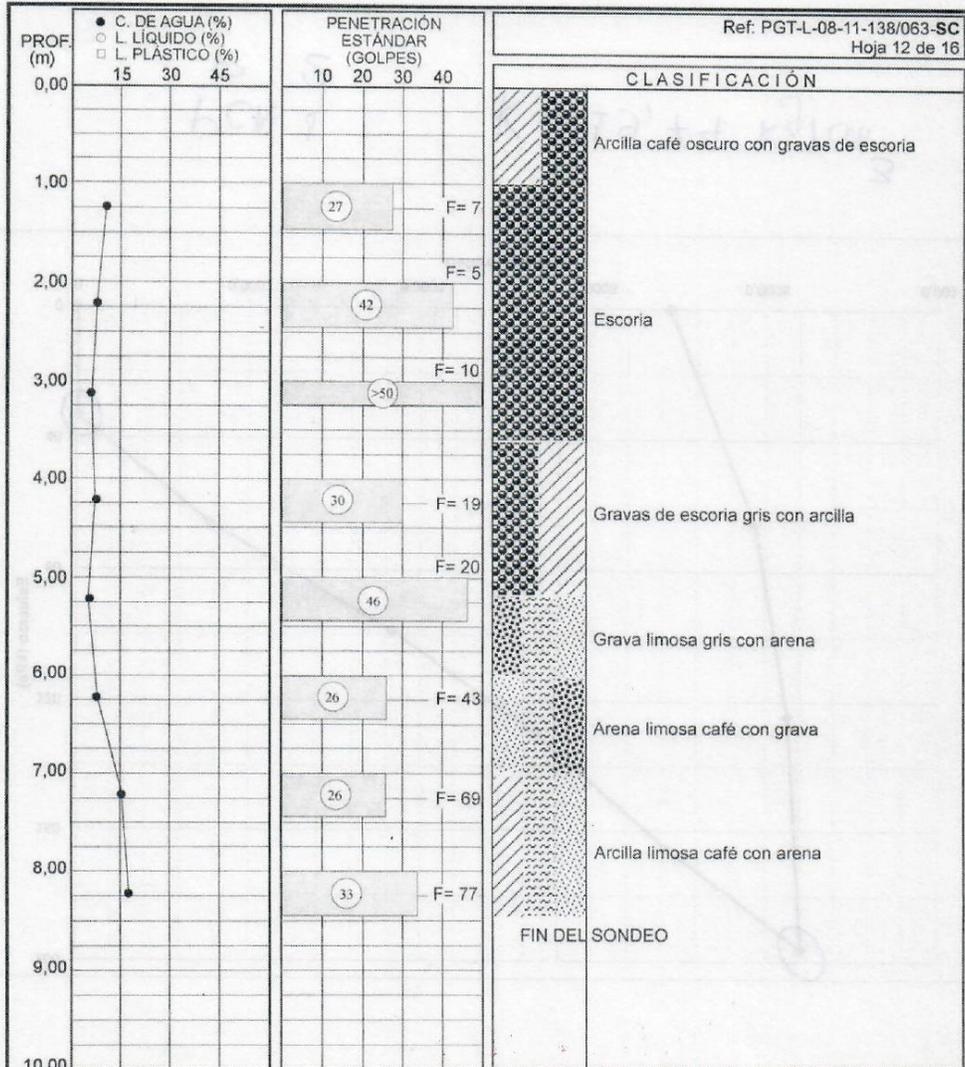
	ARCILLA		ALMENDRILLA
	LIMO		CONGLOMERADO
	ARENA		NIVEL FREÁTICO
	GRAVA	F = % De material que pasa la malla No 200.	
	BOLEOS	T.S. = Tubo Shelby.	
	CALICHE	B.D. = Barril denilson.	
	LUTITA	B.D.G. = Barril doble giratorio.	
		R.E.C. = Recuperación de la roca	
		R.Q.D. = Índice de calidad de la roca	
		P.F.P. = Pérdida de fluido de perforación	

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
INSTITUTO DE INGENIERÍA CIVIL
DEPARTAMENTO DE GEOTECNIA

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL, U.A.N.L.
Gradas
Área deportiva del Instituto de Ingeniería Civil
San Nicolás de los Garza, N.L.

PERFIL ESTRATIGRÁFICO	SONDEO: 3
SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, N.L. SEPTIEMBRE DE 2011	FIGURA: 6

Elaboró: edcs Revisó: lhp Aprobó: sss Código: F469
 Fecha: 2011/09/06 Fecha: 2011/09/06 Fecha: 2011/09/07 Revisión: 4



SIMBOLOGÍA

	ARCILLA		ALMENDRILLA
	LIMO		CONGLOMERADO
	ARENA		NIVEL FREÁTICO
	GRAVA	F = % De material que pasa la malla No 200.	
	BOLEOS	T.S. = Tubo Shelby.	
	CALICHE	B.D. = Barril dentison.	
	LUTITA	R.E.C. = Recuperación de la roca	
		R.Q.D. = Índice de calidad de la roca	
		P.F.P. = Pérdida de fluido de perforación	

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
INSTITUTO DE INGENIERÍA CIVIL
DEPARTAMENTO DE GEOTECNIA

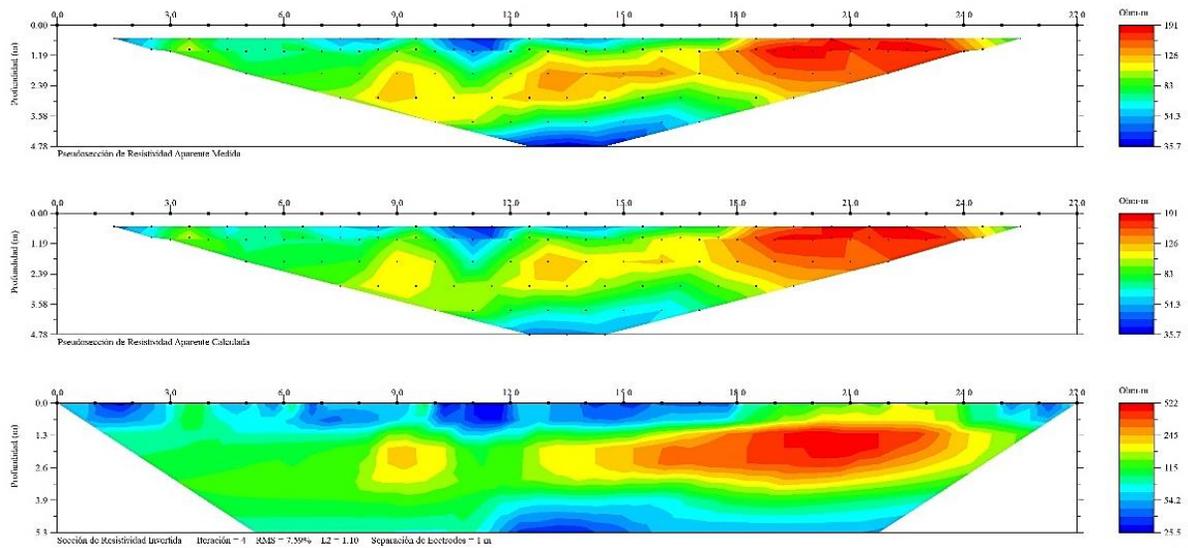
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL, U.A.N.L.
Gradas
Área deportiva del Instituto de Ingeniería Civil
San Nicolás de los Garza, N.L.

PERFIL ESTRATIGRÁFICO	SONDEO: 4
SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, N.L. SEPTIEMBRE DE 2011	FIGURA: 7

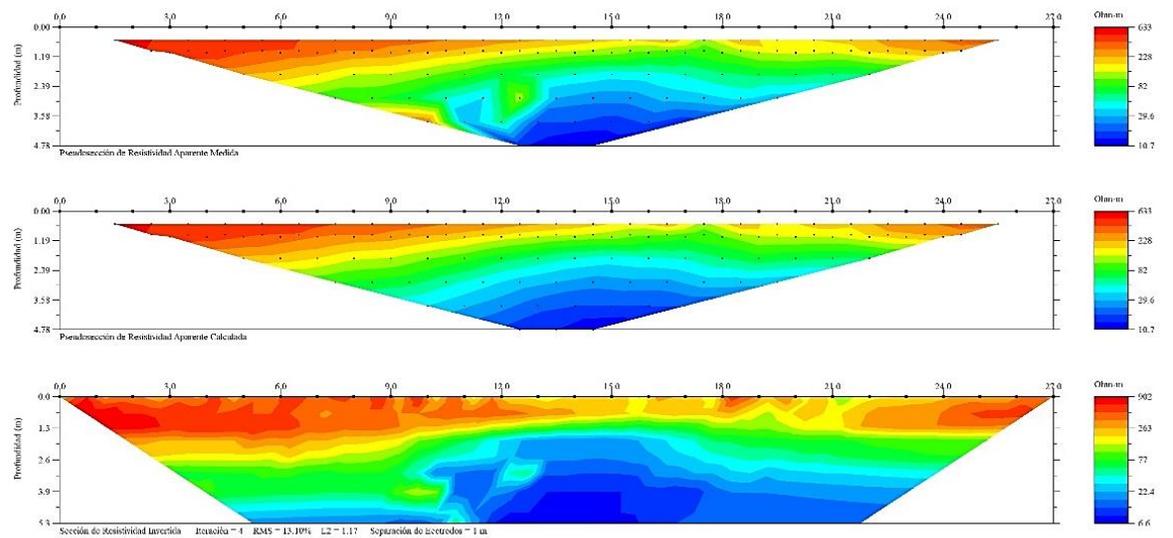
Elaboró: edcs Revisó: ihp Aprobó: sss Código: F469
 Fecha: 2011/09/06 Fecha: 2011/09/06 Fecha: 2011/09/07 Revisión: 4

ANEXO 3: PSEUDOSECCIONES Y SECCIÓN DE RESISTIVIDAD

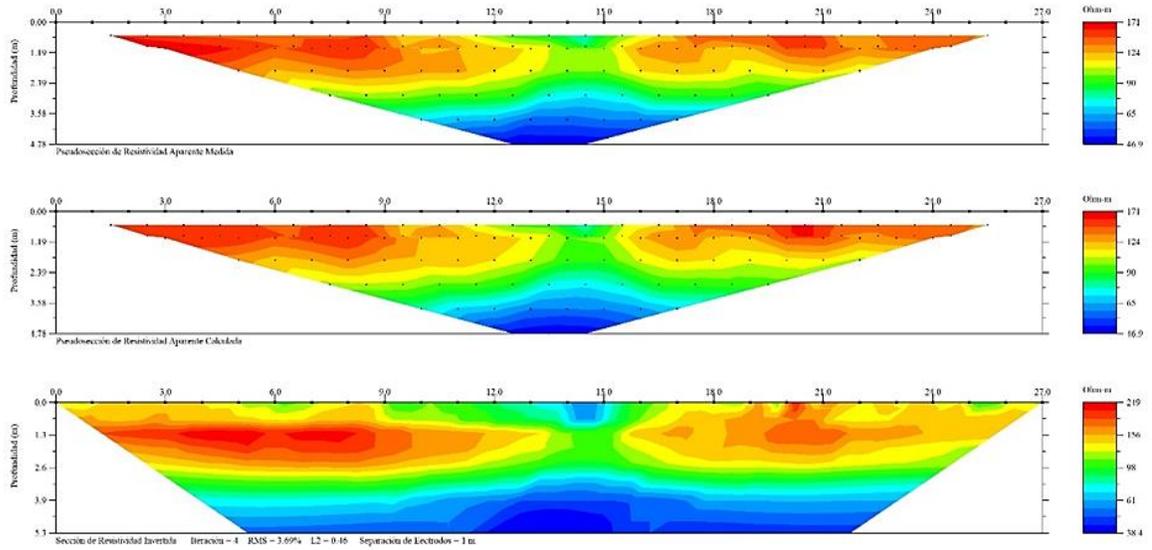
Perfil geofísico 1



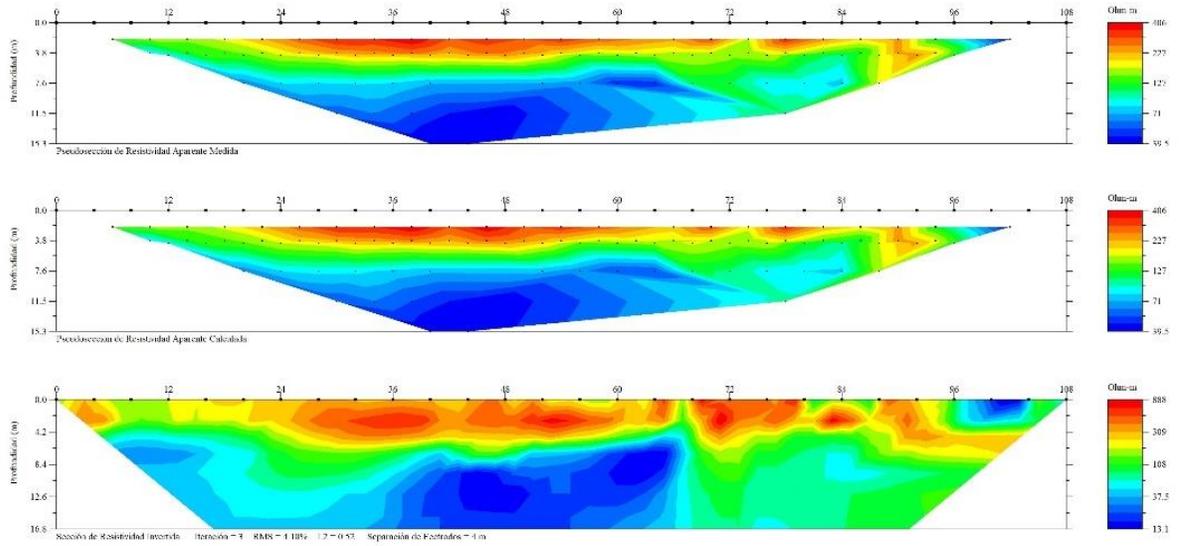
Perfil geofísico 2



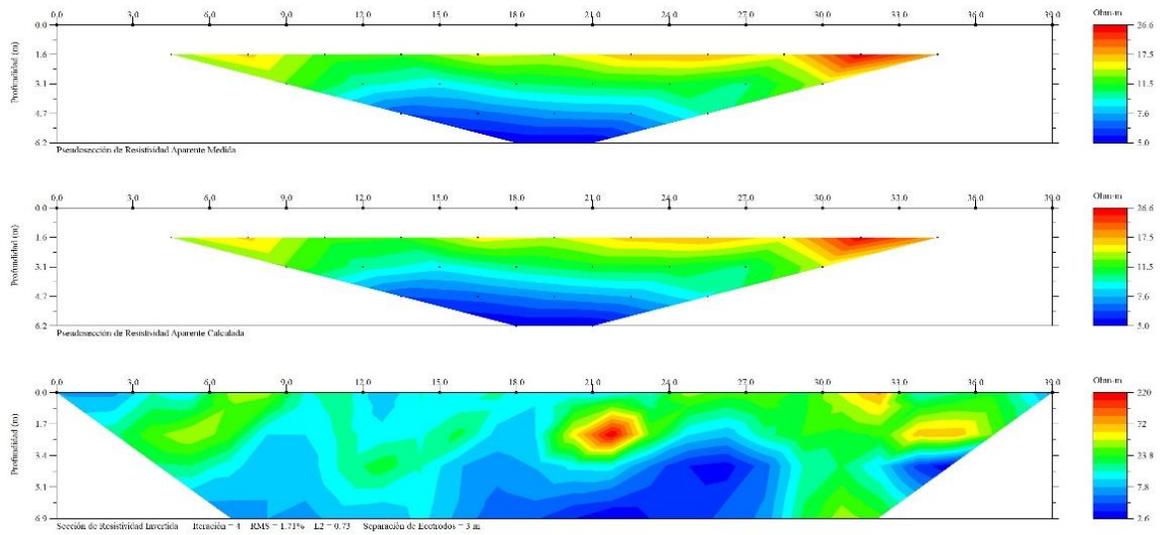
Perfil geofísico 3



Perfil geofísico 4



Perfil geofísico 5



Perfil geofísico 6

