



**INSTITUTO POTOSINO DE INVESTIGACIÓN
CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA, A.C.**

POSGRADO EN GEOCIENCIAS APLICADAS

**Caracterización geofísica y geoquímica de la
franja capilar y la atenuación natural de arsénico
en Matehuala, San Luis Potosí.**

Tesis que presenta
José Alberto Aguirre García

Para obtener el grado de
Maestro en Geociencias Aplicadas

Codirectores de la Tesis:
Dra. Nadia Valentina Martínez Villegas
Dr. Omar Delgado Rodríguez

San Luis Potosí, S.L.P., 11 de agosto de 2025



Constancia de aprobación de la tesis

La tesis “**Caracterización geofísica y geoquímica de la franja capilar y la atenuación natural de arsénico en Matehuala, San Luis Potosí**” presentada para obtener el Grado de Maestro en Geociencias Aplicadas fue elaborada por **José Alberto Aguirre García** y aprobada el **11 de agosto de 2025** por los suscritos, designados por el Colegio de Profesoras y Profesores de la División de Geociencias Aplicadas del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C.

Dra. Nadia Valentina Martínez Villegas
Codirectora de la tesis

Dr. Omar Delgado Rodríguez
Codirector de la tesis

Dr. Vsevolod Yutsis
Miembro del Comité Tutorial

Dr. Javier Aguilar Carrillo de Albornoz
Miembro del Comité Tutorial



Créditos Institucionales

Esta tesis fue elaborada en el Laboratorio de Hidrogeoquímica de la División de Geociencias Aplicadas del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C., bajo la codirección de la Dra. Nadia Valentina Martínez Villegas y el Dr. Omar Delgado Rodríguez.

Durante la realización del trabajo el autor recibió una beca académica del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, ahora Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación, (No. 922834) y del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A. C.

Página en Blanco que se va a utilizar para colocar la copia del acta de examen.

Dedicatorias

Este trabajo está dedicado a mí,
como un recordatorio de que este logro
es uno de los más valiosos de mi vida.
Culminarlo ha representado el proceso personal
más difícil, reencontrarme conmigo mismo,
y lo logré realizando este gran trabajo.
Recuerda siempre que, a pesar de las adversidades
y de lo difícil que pueda tornarse la vida,
siempre, siempre puedes lograr grandes cosas.

Agradecimientos

A lo largo de estos dos años he encontrado a grandes personas que han estado a mi lado. Personas que me tendieron una mano cuando llegué a una ciudad donde no conocía a nadie, que me escucharon y acompañaron cuando tenía tantos cuestionamientos en mi cabeza, cuando luchaba por seguir, por permanecer y por ayudarme a liberar lo que había guardado por tanto tiempo. Escribiendo esto, me doy cuenta que estuve en el lugar y momento correctos para alcanzar esta meta, y que necesitaba derrumbar todos los pilares que había construido para comenzar de nuevo y crear una versión nueva, auténtica y únicamente mía.

Agradezco profundamente a mis codirectores de tesis, la Dra. Nadia y el Dr. Omar, por su apoyo incondicional, su retroalimentación que siempre me ayudó a sacar lo mejor de mí y sus clases que expandieron mis conocimientos y alimentaron mi deseo de superación. De igual forma, al Dr. Vsevolod y al Dr. Javier, por sus observaciones y comentarios que enriquecieron este trabajo. Un agradecimiento especial a la Dra. Nadia, por aventarme al ruedo e impulsarme siempre a dar lo mejor de mí, por cada revisión y comentario que me permitió ver mi evolución en cada uno de los trabajos que realizaba, y sobre todo por escucharme en más de una ocasión, por reconocermme y por apoyarme. Sin duda no pude llegar a un mejor lugar que con ella, ya que la vida a veces se pone difícil, pero su convicción de que la vida personal y la vida laboral pueden ir de la mano fueron de gran ayuda en este camino.

Al Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica (Ipicyt), mi hogar académico durante esta maestría, gracias por brindarme las herramientas, recursos y un espacio de aprendizaje que hicieron posible este logro.

A mis amigxs de maestría, Violeta, Mayla, Nery y Mahendra, gracias por su compañía, por su apoyo y amistad. Sus consejos (aunque no siempre los escuchaba), los momentos de risas, charlas y reuniones han hecho que cada momento a su lado sea valioso para mí. A Sarita, gracias por estar siempre cuando más lo necesité, he aprendido tanto contigo, como el valor del amor, a vivir sin prejuicios, de evitar expectativas y de experimentar la libertad de ser yo mismo. Siempre tendré los mejores recuerdos de esta maestría a tu lado.

A lxs integrantes del equipo de higroquímica de la Dra. Nadia, gracias por el apoyo, la retroalimentación, los momentos compartidos y el reconocimiento, que es algo que siempre caracteriza a este grupo. Un agradecimiento especial a Lucero, por su apoyo incondicional, sus asesorías, el trabajo de campo, por escucharme y sobre todo por su amistad.

A la Fundación Trayectoria de Éxito, gracias por reconocermme como uno de los “100 mejores estudiantes de San Luis Potosí”, algo que valoro profundamente

en un estado del cual no soy originario, pero sin duda esta experiencia ha sido una de las más memorables de la maestría.

A mamá, gracias por siempre estar pendiente de mí, a mi papá por siempre apoyarme, a ambos los quiero mucho y esto también es para ustedes. A mi hermana, por siempre estar junto a mí, te quiero. A mi familia, que siempre me alentaron y apoyaron a lograr este sueño. Y a mis amigxs Judith y Erik por siempre estar presentes en cada momento.

También me agradezco a mi mismo. Lograr este sueño no fue fácil, representó abandonar todo lo seguro que ya tenía en mi vida, mi trabajo, mi negocio, mi familia, mis amigxs, mis perritas, pero me permitió arriesgarme, comenzar de cero y reencontrarme cada día más conmigo mismo. Este camino me ha permitido acercarme cada día más a la persona segura y libre que siempre soñé ser.

Finalmente, agradezco a Dios, a la Vida, al Universo por enseñarme en más de una ocasión que las cosas siempre tienen un propósito y siempre suceden por algo. Estar aquí ha sido un gran reto que no me hubiera permitido lograr si cada acción, cada momento y cada desafío no hubieran ocurrido tal y como ocurrieron.

Contenido

Capítulo 1. Introducción	1
1.1 Hipótesis	5
1.2 Objetivos	5
1.2.1 Objetivo general	5
1.2.2 Objetivos específicos	5
1.3 Localización del área de estudio	6
Capítulo 2. Materiales y métodos	8
2.1 Descripción de horizontes	9
2.1.1 Fundamento teórico	9
2.1.2 Procedimiento experimental	9
2.2 Textura	11
2.2.1 Fundamento teórico	11
2.2.2 Procedimiento experimental	12
2.3 Humedad gravimétrica y volumétrica del suelo	14
2.3.1 Fundamento teórico	14
2.3.2 Procedimiento experimental	15
2.3 Densidad aparente del suelo	16
2.3.1 Fundamento teórico	16
2.4.2 Procedimiento experimental	17
2.5 Porosidad y saturación de agua	17
2.5.1 Fundamento teórico	17
2.5.2 Procedimiento experimental	19
2.6 Espectrometría por fluorescencia de rayos X (XRF)	21
2.6.1 Fundamento teórico	21
2.6.2 Procedimiento experimental	22
2.7 Resistividad aparente por horizonte	22
2.7.1 Fundamento teórico	22
2.7.2 Procedimiento experimental	23
2.8 Perfilaje electromagnético	25
2.8.1 Fundamento teórico	25
2.8.2 Procedimiento experimental	27
Capítulo 3. Resultados	29
3.1 Horizontes de los perfiles del suelo	29
3.2 Textura y clases texturales	31
3.3 Humedad del suelo	33

3.4 Densidad aparente del suelo	35
3.5 Porosidad y saturación del agua	36
3.6 Concentración de arsénico	38
3.7 Resistividad por horizonte	39
3.8 Perfiles TRE-PEM	40
3.8.1 Sección geoelectrica del perfil 2	41
3.8.2 Sección geoelectrica del perfil 6	44
3.8.3 Sección geoelectrica del perfil 24	46
3.8.4 Sección geoelectrica del perfil 30	48
3.8.5 Sección geoelectrica del perfil 32	50
3.9 Delimitación de la frontera capilar	52
3.10 Mapa de la distribución de la frontera de la franja capilar	53
3.11 Relación entre las concentraciones de arsénico en el suelo de la franja capilar y la resistividad del subsuelo	55
Conclusiones	58
Bibliografía	60
Anexos	72

Lista de tablas

Tabla 2.1 Valores típicos de ascenso capilar en diferentes tipos de suelo (modificado de Ward y Robinson, 2000). 11

Tabla 3.1 Rangos de resistividades eléctricas de materiales geológicos encontramos en Matehuala, S.L.P. 40

Lista de figuras

- Figura 1.1 a) Mapa mundial y b) mapa de América Latina con agua subterránea contaminada con arsénico. c) Mapa de México con concentraciones de arsénico (rojo) que superan los límites establecidos por la OMS (10 $\mu\text{g/L}$). Imágenes tomadas de Alarcón-Herrera et al., 2020; Bhat et al., 2024; Bundschuh et al., 2012. -----1
- Figura 1.2 Localización geográfica de la Ciudad de Matehuala, San Luis Potosí: a) ubicación en México, b) ubicación dentro del estado de San Luis Potosí, c) ubicación de la cabecera municipal. -----6
- Figura 1.3 Esquema de la ubicación de a) Villa de la Paz, mostrando concentraciones de arsénico en suelos, agua subterránea y maíz, b) Matehuala, mostrando concentraciones de arsénico en agua subterránea, suelos y maíz y c) Cerrito Blanco, ilustrando concentraciones de arsénico en el sistema hidráulico, así como en suelos y maíz. -----7
- Figura 2.1. Mapa de la fundidora abandonada ubicada en la ciudad de Matehuala, San Luis Potosí, mostrando los 6 puntos de análisis (2, 6, 24, 30 y 32) donde se realizaron descripciones de horizontes y mediciones geofísicas. -8
- Figura 2.2 Procedimiento de campo y laboratorio para la descripción de horizontes. a) Perfil de suelo expuesto con medición de profundidad, b) muestra de suelo para determinar las propiedades del suelo (volumen de piedras, humedad actual, estructura de suelo, abundancia de poros y densidad de raíces) y c) prueba de estabilidad de agregados, textura y contenido de CaCO_3 .----- 10
- Figura 2.3. Proceso de tamizado para determinar la textura del suelo: a) secado al aire y separación de la fracción menor a 2 mm, b) tamizado en húmedo a través de una malla ASTM No. 200 (0.074 mm) hasta obtener agua clara y c) secado del residuo a 105 °C por 16 o 24 h y determinación del peso de las arenas retenidas.----- 13
- Figura 2.4. Esquema del procedimiento de muestreo de suelo para el análisis gravimétrico del contenido de agua: a) perfil de suelo muestreado cada 10 cm, b) lote de muestras de suelo para determinar humedad y c) secado de muestras de suelo para retirar humedad y calcular el contenido de agua perdida. ----- 15
- Figura 2.5 Proceso experimental para la determinación de porosidad y saturación de agua de los horizontes de suelo de los perfiles 2 y 32. a) Resistivímetros (soil-box) utilizados; b) Saturación de muestras de suelo (<2 mm) con soluciones de NaCl a concentraciones de 2, 5, 6, 16 y 27 g/L; c) Medición de resistividad eléctrica con terrimeter Saturn Geo LEM en configuración de cuatro polos (AMNB); d) Medición de salinidad residual en tubo de plástico con terrimeter Saturn Geo LEM.----- 20

Figura 2.6 Esquema de radiación de un átomo con rayos X y emisión de fluorescencia ilustrando el principio de la fluorescencia de rayos X.-----	21
Figura 2.7 Arreglo Wenner para medición de resistividad eléctrica por horizonte en los perfiles de suelo 2 y 32. -----	24
Figura 2.8. Configuración esquemática del perfilaje electromagnético (PEM). 26	
Figura 2.9 Ubicación de perfilajes electromagnéticos a) a una distancia aproximada de 2 m a los puntos de muestreo 2, 6, 24, 30 y 32 y b) en la sección sureste del área de estudio para identificar la frontera de la franja capilar. -----	28
Figura 3.1 Horizontes y colores de los perfiles a) 2, b) 30, c) 32.-----	29
Figura 3.2 Distribución de finos y arenas y clases texturales de los horizontes de los perfiles: a) 2, b) 30 y c) 32. -----	31
Figura 3.3 Clases texturales del suelo para los perfiles 2, 30 y 32. -----	33
Figura 3.4 Humedad volumétrica del suelo en función de la profundidad para los perfiles 2, 30 y 32. -----	34
Figura 3.5 Densidad aparente del suelo en función de la profundidad para los perfiles 2, 30 y 32. -----	35
Figura 3.6 Porosidad total y saturación del suelo en función de la profundidad para los perfiles 2 y 32.-----	36
Figura 3.7 Concentraciones de arsénico del suelo en función de la profundidad para los perfiles 2, 6, 24, 30 y 32. -----	38
Figura 3.8 Resistividad aparente (ρ_a) del suelo en función de la profundidad para los perfiles 2 y 32.-----	39
Figura 3.9 Secciones geoeléctricas de 14 m y 24 m de longitud del perfil 2 a a) ~2.3 y b) ~6 m de profundidad, obtenidas mediante perfilaje electromagnético utilizando el CMD-MiniExplorer 6L y el EM31-MK2 Data Loggin System, respectivamente. Las líneas punteadas muestran la proyección de la ubicación del perfil de muestreo 2, localizado a 2.5 metros de distancia de los perfilajes electromagnéticos. La línea blanca indica la profundidad de trabajo del primer perfil.-----	41
Figura 3.10 Secciones geoeléctricas de 12 m de longitud del perfil 6 a a) ~2.3 y b) ~6 m de profundidad, obtenidas mediante perfilaje electromagnético utilizando el CMD-MiniExplorer 6L y el EM31-MK2 Data Loggin System, respectivamente. Las líneas punteadas muestran la proyección de la ubicación del perfil de muestreo 6, localizado a dos metros de distancia de los perfilajes electromagnéticos. La línea blanca indica la profundidad de trabajo del primer perfil.-----	44

Figura 3.11 Secciones geoeléctricas de 40 m de longitud del perfil 24 a a) ~2.3 y b) ~6 m de profundidad, obtenidas mediante perfilaje electromagnético utilizando el CMD-MiniExplorer 6L y el EM31-MK2 Data Loggin System, respectivamente. Las líneas punteadas muestran la proyección de la ubicación del perfil de muestreo 24, localizado a dos metros de distancia de los perfilajes electromagnéticos. La línea blanca indica la profundidad de trabajo del primer perfil.----- 46

Figura 3.12 Secciones geoeléctricas de 40 m de longitud del perfil 30 a a) ~2.3 y b) ~6 m de profundidad, obtenidas mediante perfilaje electromagnético utilizando el CMD-MiniExplorer 6L y el EM31-MK2 Data Loggin System, respectivamente. Las líneas punteadas muestran la proyección de la ubicación del perfil de muestreo 30, localizado a dos metros de distancia de los perfilajes electromagnéticos. La línea blanca indica la profundidad de trabajo del primer perfil.----- 48

Figura 3.13 Secciones geoeléctricas de 50 m de longitud del perfil 32 a a) ~2.3 y b) ~6 m de profundidad, obtenidas mediante perfilaje electromagnético utilizando el CMD-MiniExplorer 6L y el EM31-MK2 Data Loggin System, respectivamente. Las líneas punteadas muestran la proyección de la ubicación del perfil de muestreo 32, localizado a dos metros de distancia de los perfilajes electromagnéticos. La línea blanca indica la profundidad de trabajo del primer perfil.----- 50

Figura 3.14 Comparación de la sección geoeléctrica del perfil 32, la franja capilar observada en campo y los valores de resistividad medidos por horizonte, mostrando que la distribución del cuerpo conductor ($<20 \Omega \cdot m$) a ~1.7 m es concordante con la frontera capilar observada en campo, también a 1.7 m de profundidad, y la resistividad medida en el subsuelo (de $17 \Omega \cdot m$) a esta profundidad. ----- 52

Figura 3.15 a) Área de estudio y b) mapa de las elevaciones del techo de la franja capilar determinadas a una resistividad de $20 \Omega \cdot m$ y asumiendo una superficie plana del suelo, a 1,575 m de elevación. Los mapas muestran las ubicaciones de los perfiles de suelo (2, 6, 24, 30 y 32). La línea negra punteada muestra un transecto en donde la franja capilar es, en general, más somera y donde se podría observar el fenómeno de ascenso capilar de As a profundidades menores a 2.5 m, fácilmente alcanzadas con una retroexcavadora. ----- 54

Figura 3.16. Concentración de arsénico y resistividad del subsuelo para los perfiles 2, 6, 24, 30 y 32. En la franja capilar (recuadro azul), las concentraciones de arsénico mostraron una relación con la resistividad, resultado de un proceso indirecto mediado por la humedad del suelo, con la excepción de la muestra 2 del perfil 30, correspondiente a una capa superficial que no pertenecía a dicha franja. Los números, multiplicados por 10, indicaron la profundidad representativa de cada muestra de suelo, en centímetros; por ejemplo, el número

22 indicó una muestra recolectada a 220 cm de profundidad. ----- 56

Figura 3.17 Perfiles hipotéticos de concentración de un contaminante en un perfil de suelo, derivados de procesos de: a) lixiviación del contaminante (desde la superficie del suelo), b) atenuación del contaminante (del acuífero hacia el suelo) y c) lixiviación + atenuación del contaminante (desde el suelo y el acuífero contaminados). ----- 57

Anexos

1. Cadena de custodia #COC83 para la descripción de horizontes de suelo 72
2. Descripción de los horizontes de suelo de los perfiles 2, 6*, 30 y 32 73
3. Datos de humedad gravimétrica y densidad aparentes de los perfiles 2, 30 y 32, a partir de los cuales se obtuvo la humedad volumétrica del suelo 74

Resumen

Caracterización geofísica y geoquímica de la franja capilar y la atenuación natural de arsénico en Matehuala, San Luis Potosí.

En un perfil de suelo que sobreyace el acuífero somero de la ciudad de Matehuala, San Luis Potosí, se han reportado altas concentraciones de arsénico en la franja capilar, lo que sugiere un posible mecanismo de remoción del contaminante desde el agua subterránea hacia el suelo por ascenso capilar. Sin embargo, se desconoce si este fenómeno ocurre en otros puntos del sitio. Obtener evidencia adicional permitiría fortalecer la hipótesis de que el ascenso capilar contribuye a un proceso de atenuación natural del arsénico en esta zona. Por lo anterior, los objetivos de este trabajo fueron determinar: 1) las propiedades físicas y morfológicas en tres perfiles de suelo (2, 30 y 32), 2) las concentraciones de arsénico en cinco perfiles de suelo (2, 6, 24, 30 y 32), 3) la delimitación de la franja capilar a partir de la resistividad eléctrica en todos los perfiles de suelo y 4) la relación entre las concentraciones de arsénico en el suelo de la franja capilar y la resistividad eléctrica del subsuelo. Para ello, se emplearon la clasificación de suelos de la base de referencia mundial del recurso suelo (WRB), fluorescencia de difracción de rayos X (XRF), perfilaje electromagnético (PEM) y gráficos bivariados. Los resultados de las propiedades físicas y morfológicas de los perfiles 2, 30 y 32 evidenciaron la presencia de texturas finas (77-96% de limo y arcilla), con clases texturales franco arcillosas-limosas. En general, la densidad aparente (0.6-1.3 g/cm³), la saturación de agua (22-88%) y la humedad volumétrica (10-47%) del suelo aumentaron con la profundidad. El incremento de la saturación de agua y de la humedad volumétrica en los perfiles 30 y 32 se asoció a ascenso capilar del agua, desde el acuífero somero, cuyo manto freático se encontró en campo a 1.6 y 2.1 m de profundidad, respectivamente. Las concentraciones de arsénico disminuyeron con la profundidad desde 40,440.15 mg/kg hasta 32.73 mg/kg a 5 y 3.05 m de profundidad, respectivamente, evidenciando un patrón clásico de lixiviación de arsénico (desde la superficie hacia el subsuelo); excepto en los perfiles 30 y 32 donde se observó un incremento a partir de 0.85 y 1.35 m de profundidad, cuyos valores alcanzaron hasta 501.52 y 359.27 mg/kg, respectivamente. En las secciones geoeléctricas se identificaron cuerpos conductivos con resistividades menores a 20 $\Omega \cdot m$, correspondientes a la franja capilar. Este resultado permitió establecer una metodología para el mapeo del techo de la topografía de la franja capilar en la porción sureste del área de estudio. En los perfiles 30 y 32, dicho techo se encontró entre 1.4 y 1.7 m, coincidiendo con los incrementos de las concentraciones de arsénico registradas a estas profundidades. Estos hallazgos respaldan la hipótesis de que el arsénico asciende desde el acuífero somero contaminado y se acumula en la franja capilar del suelo. Además, la modelación de la franja capilar, basada en la resistividad eléctrica, estableció una relación indirecta entre esta propiedad y la presencia de arsénico en el sitio de estudio.

En contraste, en los perfiles 2, 6 y 24, el techo de la franja capilar se observó a más de 3 m de profundidad. La falta de datos de concentración de arsénico a esas profundidades impidió evaluar dicha relación en estos perfiles. Los resultados de esta tesis confirman la acumulación de arsénico en la franja capilar del suelo por ascenso capilar y aportan evidencia adicional del proceso de atenuación natural del arsénico, previamente propuesto, que ocurre en esta zona de estudio. Este trabajo contribuye a la comprensión del mecanismo de atenuación natural de arsénico en el subsuelo de Matehuala.

Palabras clave: ascenso capilar, acuífero, perfilaje electromagnético, sección geoelectrica, contaminación, agua subterránea, remediación.

Abstract

Geophysical and geochemical characterization of the capillary fringe and natural arsenic attenuation in Matehuala, San Luis Potosí.

In a soil profile overlying the shallow aquifer in the city of Matehuala, San Luis Potosí, high concentrations of arsenic have been reported in the capillary fringe, suggesting a possible mechanism for removing the contaminant from groundwater to the soil by capillary rise. However, it is unknown whether this phenomenon occurs at other points in the site. Obtaining additional evidence would strengthen the hypothesis that capillary rise contributes to a natural attenuation process of arsenic in this area. Therefore, the objectives of this work were to determine: 1) the physical and morphological properties in three soil profiles (2, 30 and 32); 2) arsenic concentrations in five soil profiles (2, 6, 24, 30 and 32); 3) delimitation of the capillary fringe based on electrical resistivity in all soil profiles; and 4) the relationship between arsenic concentrations in the soil of the capillary fringe and subsoil electrical resistivity. For this purpose, the soil classification of the World Reference Base for Soil Resources (WRB), X-ray fluorescence diffraction (XRF), electromagnetic profiling (EM), and bivariate graphs were used. The results of the physical and morphological properties of profiles 2, 30, and 32 showed the presence of fine textures (77–96% silt and clay), with clayey-silty loam texture classes. In general, the apparent density (0.6–1.3 g/cm³), water saturation (22–88%) and volumetric moisture content (10–47%) of the soil increased with depth. The increase in water saturation and volumetric moisture content in profiles 30 and 32 was associated with capillary rise of water from the shallow aquifer, whose water table was found in the field at 1.6 and 2.1 m depths, respectively. Arsenic concentrations decreased with depth from 40,440.15 mg/kg to 32.73 mg/kg at 5 and 3.05 m depths, respectively, evidencing a classic pattern of arsenic leaching (from the surface to the subsoil); except in profiles 30 and 32 where an increase was observed from 0.85 and 1.35 m depths, whose values reached up to 501.52 and 359.27 mg/kg, respectively. In the geoelectrical sections, conductive bodies with resistivities less than 20 $\Omega \cdot m$ were identified, corresponding to the capillary fringe. This result made it possible to establish a methodology for mapping the top boundary of the capillary fringe topography in the southeastern portion of the study area. In profiles 30 and 32, this top was found between 1.4 and 1.7 m, coinciding with the increases in arsenic concentrations recorded at these depths. These findings support the hypothesis that arsenic rises from the contaminated shallow aquifer and accumulates in the soil capillary fringe. Furthermore, the modeling of the capillary fringe, based on electrical resistivity, established an indirect relationship between this property and the presence of arsenic at the study site. In contrast, in profiles 2, 6, and 24, the top of the capillary fringe was observed at more than 3 m depth. The lack of arsenic concentration data at these depths prevented the evaluation of this relationship in these profiles. The results of this thesis confirm the accumulation

of arsenic in the capillary fringe of the soil by capillary rise and provide further evidence of the previously proposed natural arsenic attenuation process occurring in this study area. This work contributes to the understanding of the natural arsenic attenuation mechanism in the Matehuala subsoil.

Keywords: capillary rise, aquifer, electromagnetic logging, geoelectrical section, contamination, groundwater, remediation.

Capítulo 1. Introducción

La contaminación por arsénico en aguas subterráneas representa un problema ambiental y de salud pública a nivel global, afectando a millones de personas, especialmente en regiones con escasez de agua segura (Bhat et al., 2024; Natasha et al., 2020; Saxena y Kumar, 2020). Esta contaminación puede originarse tanto de fuentes naturales como de fuentes antropogénicas, como la minería, agricultura y otros procesos industriales (Castro-Larragoitia et al., 1997; Martínez-Villegas et al., 2013; McCarty et al., 2011; Yadav et al., 2020). Se estima que 230 millones de personas en 106 países están expuestos a agua subterránea contaminada con arsénico (Figura 1.1a) por encima del límite de 10 µg/L establecido por la Organización Mundial de la Salud (Bhat et al., 2024; WHO, 2011), con alrededor de 14 millones en América Latina (Figura 1.1b) (Bundschuh et al., 2012; Litter et al., 2020) y al menos 8.81 millones en México (Figura 1.1c) (Alarcón-Herrera et al., 2020).

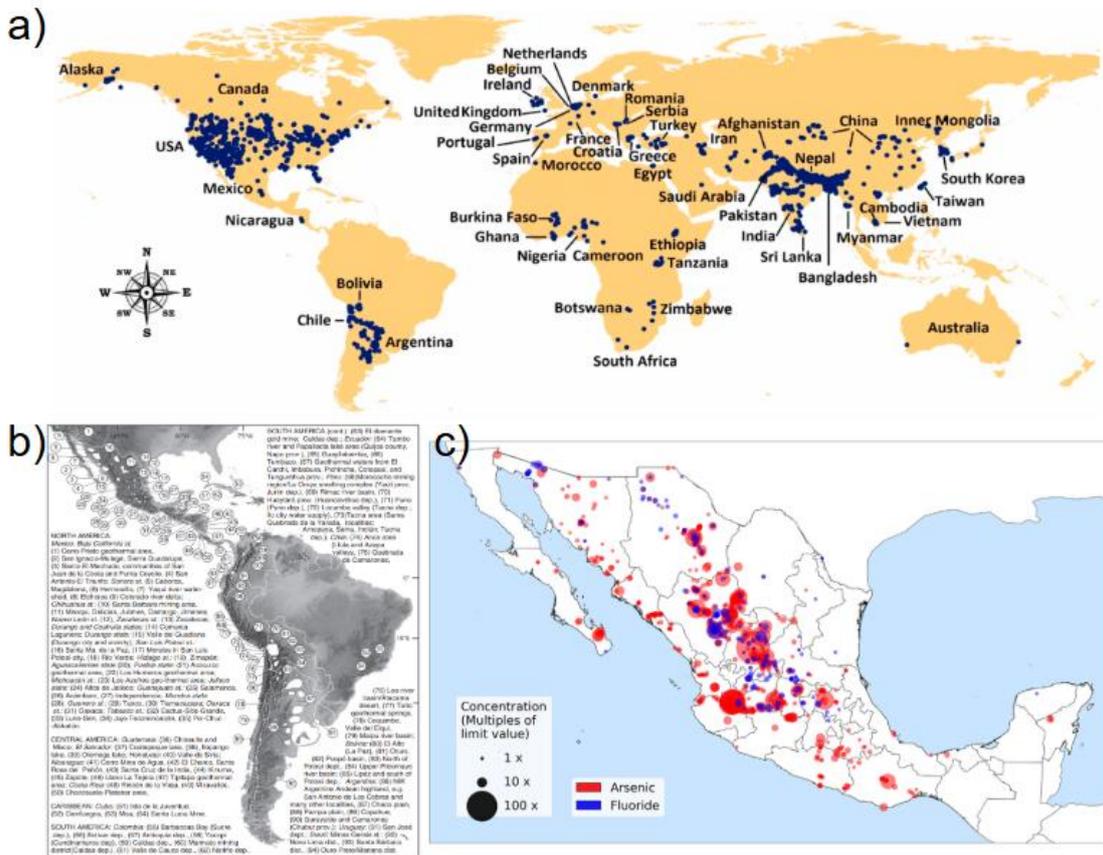


Figura 1.1 a) Mapa mundial y b) mapa de América Latina con agua subterránea contaminada con arsénico. c) Mapa de México con concentraciones de arsénico (rojo) que superan los límites establecidos por la OMS (10 µg/L). Imágenes tomadas de Alarcón-Herrera et al., 2020; Bhat et al., 2024; Bundschuh et al., 2012.

La exposición prolongada al arsénico ocasiona enfermedades graves como cáncer de piel, pulmón y vejiga, así como alteraciones neurológicas y

cardiovasculares (Alarcón-Herrera et al., 2020; Chakrabarti et al., 2019, 2019; Chettri et al., 2024; García-Rico et al., 2019; Hurtado-Jiménez y Gardea-Torresdey, 2006; Khan et al., 2020; McClintock et al., 2012; Mendoza-Cano et al., 2017; Sánchez-Rodríguez et al., 2023; Tchounwou et al., 2004; Yu et al., 2018). Dada la gravedad de la contaminación por arsénico en aguas subterráneas, el estudio de los procesos de atenuación natural que regulan la retención de este contaminante en la franja capilar resulta crucial, debido a que este proceso tiene un alto impacto para disminuir las concentraciones de arsénico en el agua subterránea, la exposición de las poblaciones afectadas y los riesgos para la salud.

La atenuación natural es un conjunto de procesos naturales que reducen la concentración y toxicidad de contaminantes en aguas subterráneas, llegando a inmovilizar al contaminante en acuíferos contaminados a través del ascenso capilar de agua contaminada hacia el suelo que le sobreyace y su posterior retención en las fases sólidas (Dupont, 2012; Mulligan y Yong, 2004). Estos procesos incluyen dilución, dispersión, volatilización, precipitación, intercambio iónico, sorción (adsorción/absorción), transformación y degradación (Apostu et al., 2004; Dupont, 2012; González Herrera et al., 2007; Truskewycz et al., 2019). En el caso de elementos traza la atenuación natural no los elimina, sino que los inmoviliza, principalmente, mediante sorción y precipitación (Reisinger et al., 2005; Stauder y Werner, 2012; Wang y Mulligan, 2006). Este mecanismo de atenuación natural se ha propuesto para explicar la disminución de arsénico (de 91.5 a 11.3 mg/L) en una distancia de 1.3 km, en el agua de un acuífero contaminado de la ciudad de Matehuala (Martínez-Villegas et al., 2013, 2019). En este lugar, la disminución en la concentración de arsénico en el agua subterránea se atribuyó a su salida, del acuífero hacia el suelo que le sobreyace, y su posterior retención en las fases sólidas del suelo, proponiendo que la salida del contaminante del acuífero ocurrió a través de un proceso de ascenso capilar de agua contaminada que acumuló arsénico en el suelo que sobreyace el acuífero. A este conjunto de controles físicos (ascenso capilar) y químicos (sorción y/o precipitación) se le describió como un proceso de atenuación natural de arsénico en el subsuelo de Matehuala (Martínez-Villegas et al., 2019). Sin embargo, esta inferencia proviene de un solo perfil de suelo, que aunque permitió proponer una explicación convincente para la disminución de las concentraciones de arsénico en el agua del acuífero, se requiere evidencia adicional para respaldar y fortalecer la hipótesis de atenuación natural de arsénico en la franja capilar del suelo.

La franja capilar es una zona casi saturada ubicada justo por encima del nivel freático, donde el agua asciende por capilaridad (Bing et al., 2020; Fiola et al., 2020). La franja capilar del suelo puede caracterizarse utilizando métodos geoquímicos, como la fluorescencia de rayos X (XRF), para determinar las concentraciones de arsénico y métodos geofísicos, particularmente los métodos

geoeléctricos, debido a la influencia que tiene las variaciones de humedad del suelo en el valor de su resistividad eléctrica (Ayolabi et al., 2015; Dobrin y Savit, 1988; Everett, 2013; Ribeiro et al., 2017; Telford et al., 1990). La fluorescencia de rayos X es una técnica analítica no destructiva que permite un análisis rápido con una precisión aceptable de la composición elemental, incluido el arsénico, en muestras de suelo y agua, mediante la excitación de átomos con rayos X (Parsons et al., 2013; Ribeiro et al., 2017; Weindorf y Chakraborty, 2020). Complementariamente, la resistividad eléctrica (ρ), definida como la capacidad de un material para resistir el flujo de corriente eléctrica, es una propiedad clave en la exploración geofísica para detectar variaciones en el subsuelo, incluida la franja capilar (Asry et al., 2012; Liu et al., 2025; Persson et al., 2015; Santarato, 2022). En este sentido, la exploración geoeléctrica distingue los materiales del subsuelo según el contraste en sus propiedades eléctricas, que depende de factores como la composición mineralógica (ej. contenido de arcilla), la porosidad, humedad y la salinidad del agua de poro (Orellana, 1982). En particular, la franja capilar se puede diferenciar de la zona no saturada debido al aumento de la humedad y la conducción iónica, influenciadas por la textura, densidad y porosidad del medio granular (Bano, 2007b, 2007a; Everett, 2013; Masoudi et al., 2011; Telford et al., 1990).

Dentro de la amplia gama de métodos geoeléctrico (Burger et al., 2006; Telford et al., 1990), el perfilaje electromagnético (PEM) es un método de fuente artificial que se basa en los principios de inducción electromagnética para determinar la conductividad eléctrica del subsuelo sin necesidad de contacto directo con la superficie del terreno mediante electrodos, lo que permite cubrir extensas áreas de estudio en poco tiempo (Burger et al., 2006; Hibbs et al., 2014; Hoekstra, 2007; Holladay, 2017; Ingerov et al., 2016; Martens y Walraevens, 2009; Telford et al., 1990). El PEM ha sido ampliamente aplicado en estudios hidrogeológicos (Maurya et al., 2023; McLachlan et al., 2021), de impacto ambiental (Delgado-Rodríguez, 2017; Ladrón De Guevara-Torres et al., 2017; Peinado-Guevara et al., 2017), arqueológicos (Capozzoli et al., 2025; Osella et al., 2005), de suelos agrícolas (Cordero-Vázquez et al., 2023), entre otros.

Para la aplicación del perfilaje electromagnético (PEM), se emplearon dos equipos especializados. El CMD-MiniExplorer 6L (GF Instruments, 2020), un equipo multifrecuencia de fabricación checa, el cuál utiliza una bobina transmisora (Tx) y seis bobinas receptoras (Rx) con diferentes separaciones, permitiendo obtener simultáneamente seis valores de conductividad aparente (σ_a) para distintas profundidades en un mismo punto. Su unidad central con conexión Bluetooth facilita la adquisición de datos georreferenciados. Los datos de σ_a pueden convertirse en una sección de resistividad aparente (ρ_a) como resultante de la aplicación del método de Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE), generando un modelo geoeléctrico que representa con alta precisión la franja capilar (método TRE-PEM). Complementariamente, el EM31-MK2

(Geonics Limited, 2010), de fabricación canadiense, mide σ_a a profundidades de 3 m y 6 m, integrando estos datos con los del CMD-MiniExplorer 6L se pueden obtener secciones TRE-PEM con una profundidad máxima de 6 m.

Por lo anterior, el objetivo de este trabajo fue caracterizar física, geoquímica y geofísicamente los perfiles de suelo en un sitio de estudio en Matehuala, San Luis Potosí, mediante trabajo de campo, análisis de laboratorio y levantamiento de resistividad con el método TRE-PEM, con el fin de identificar la acumulación de arsénico en la franja capilar asociado al ascenso capilar. Esto contribuirá a una mejor comprensión sobre el proceso de atenuación natural del suelo.

1.1 Hipótesis

La franja capilar del suelo, en el área de la antigua fundidora de Matehuala, presenta acumulación de arsénico por ascenso capilar de agua contaminada desde el acuífero somero.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Caracterizar física, geoquímica y geofísicamente los perfiles de suelo en un sitio de estudio en Matehuala, San Luis Potosí, mediante trabajo de campo, análisis de laboratorio y perfilaje electromagnético, con el fin de identificar la acumulación de arsénico en la franja capilar asociado al ascenso capilar.

1.2.2 Objetivos específicos

- Determinar los horizontes, textura, humedad, densidad aparente, porosidad y saturación del suelo en los perfiles de suelo para determinar las características físicas y morfológicas del suelo, mediante trabajo de campo y laboratorio.
- Determinar las concentraciones de arsénico en los perfiles de suelo para identificar las profundidades de mayor acumulación, mediante espectrometría de fluorescencia de rayos X (XRF).
- Determinar la profundidad del techo de la franja capilar en modelos geoelectrónicos 2D determinados con la aplicación del método tomografía de resistividad eléctrica a partir de los datos de perfilaje electromagnético (TRE-PEM).
- Analizar la relación entre las concentraciones de arsénico en la franja capilar y la resistividad eléctrica en el subsuelo para explicar la acumulación de arsénico en los perfiles por medio de un proceso de ascenso capilar, mediante gráficos bivariados.

1.3 Localización del área de estudio

El municipio de Matehuala se localiza al norte del estado de San Luis Potosí, en la porción centro de México (Figura 1.2). Geográficamente, el municipio de Matehuala se extiende entre los paralelos 353316.49 y 318385.76 E y 2566382.87 y 2638762.69 O, con una altitud que varía entre 1,300 y 2,500 metros sobre el nivel del mar (INEGI, 2010). La cabecera municipal, Ciudad de Matehuala, está situada en las coordenadas 332463.47 E y 2615668.9 O, a 1,615 metros de altitud (SGM, 2005). Con una superficie de 1,165 km², equivalente al 1.87% de la superficie estatal, Matehuala colinda al norte con los municipios de Cedral, Villa de la Paz y el estado de Nuevo León; al este con Nuevo León; al sur con Villa de Guadalupe y Nuevo León; y al oeste con Villa de Guadalupe y Villa de la Paz (INEGI, 2010; SGM, 2005).

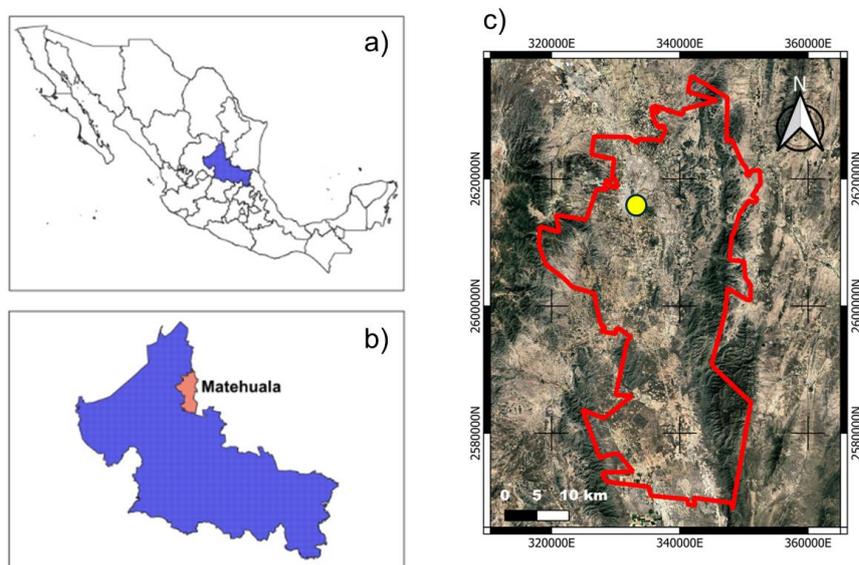


Figura 1.2 Localización geográfica de la Ciudad de Matehuala, San Luis Potosí: a) ubicación en México, b) ubicación dentro del estado de San Luis Potosí, c) ubicación de la cabecera municipal.

Fisiográficamente, Matehuala pertenece a la provincia de la Sierra Madre Oriental, subprovincia de Sierras y Llanuras Occidentales, con toposformas que incluyen llanuras desérticas y sierras plegadas. Su clima es predominantemente seco semicálido, con temperaturas de 14 a 20 °C y precipitaciones de 300 a 500 mm anuales (INEGI, 2010).

En términos edafológicos, los suelos predominantes en la ciudad de Matehuala son principalmente Calcisol y Gypsisol, mientras que a nivel municipal hay Calcisol (38.77%), Leptosol (31.10%), y Kastañozem (15.24%), con menores proporciones de Gypsisol (7.97%), Phaeozem (2.90%), Regosol (1.18%), Chernozem (0.82%), y Solonchak (0.27%) (INEGI, 2010).

Matehuala se encuentra en la parte centro-norte de San Luis Potosí, México, en el municipio de Villa de la Paz, a 8 km al oeste de la ciudad de Matehuala. La actividad minera en esta región, específicamente en el distrito minero de Santa María de la Paz (Figura 1.3a), se remonta a 240 años. La explotación se centra en depósitos de skarn de cobre, plata, zinc, plomo y oro del cerro El Fraile (Castro-Larragoitia et al., 1997). Se estima que se han acumulado millones de toneladas de relaves activos e históricos en los terrenos circundantes de la mina. Además, un centro urbano de Matehuala fue sede de una fundición de minerales metálicos inactiva hasta la década de 1960, que dejó escorias y escombros de construcción.

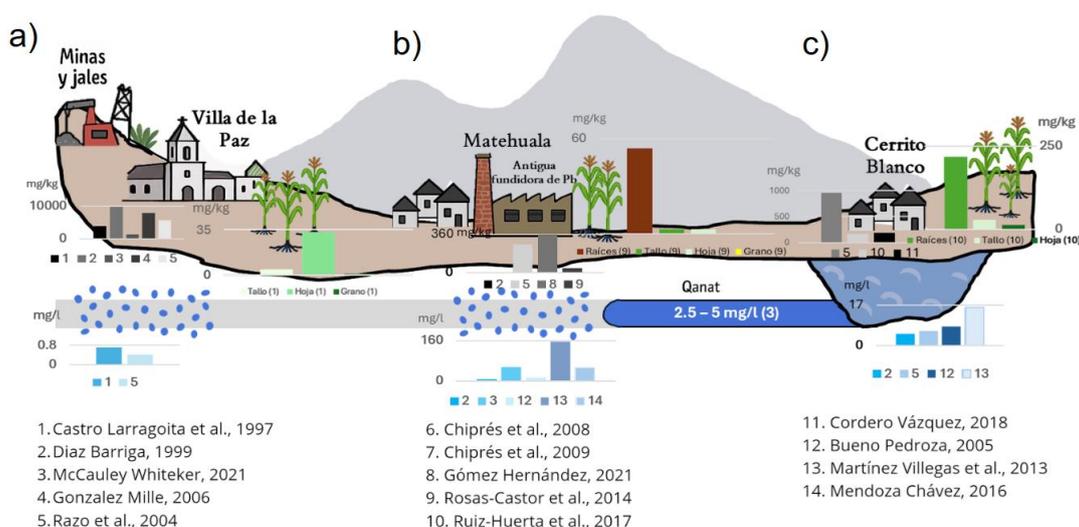


Figura 1.3 Esquema de la ubicación de a) Villa de la Paz, mostrando concentraciones de arsénico en suelos, agua subterránea y maíz, b) Matehuala, mostrando concentraciones de arsénico en agua subterránea, suelos y maíz y c) Cerrito Blanco, ilustrando concentraciones de arsénico en el sistema hidráulico, así como en suelos y maíz.

La contaminación por arsénico en Matehuala proviene principalmente de la disolución de arseniatos de calcio presentes en los residuos de la fundición inactiva (Martínez-Villegas et al., 2013). Los suelos alrededor de esta fundición demolida contienen hasta 4.5% (p/p) de arsénico en forma de arseniatos de calcio. Las concentraciones de arsénico alcanzan hasta el 155 mg/L en el agua subterránea (Figura 1.3b). En el sistema hidráulico de Cerrito Blanco (Figura 1.3c), las concentraciones de arsénico alcanzaron hasta 16 mg/L.

La región de Matehuala enfrenta una contaminación severa por arsénico en suelos (hasta 360 mg/kg) y agua (hasta 158 mg/L), superando ampliamente los límites permisibles para uso humano (25 µg/L, DOF, 2021) y riego agrícola (10 µg/L, DOF, 2022). La disolución de arseniatos de calcio, la lixiviación y el ascenso capilar son los principales mecanismos de movilidad de arsénico. La bioacumulación en cultivos como el maíz y el impacto en ecosistemas (vegetación y zooplancton) representan riesgos significativos para la salud humana y el medio ambiente.

Capítulo 2. Materiales y métodos

En este capítulo se presenta una revisión de las técnicas geoquímicas y geofísicas empleadas para caracterizar las propiedades del suelo, incluyendo los procedimientos experimentales, los materiales y los equipos utilizados para el desarrollo de esta investigación. El estudio se llevó a cabo en una antigua fundidora abandonada ubicada en la ciudad de Matehuala, San Luis Potosí (Figura 2.1).



Figura 2.1. Mapa de la fundidora abandonada ubicada en la ciudad de Matehuala, San Luis Potosí, mostrando los 6 puntos de análisis (2, 6, 24, 30 y 32) donde se realizaron descripciones de horizontes y mediciones geofísicas.

Para caracterizar la distribución vertical del arsénico en los perfiles de suelo, en función de la profundidad del nivel freático y el espesor de la franja capilar, en los perfiles 2, 30 y 32, se realizaron descripciones de horizontes de suelo y análisis físicos (textura, humedad, porosidad, grado de saturación y concentración de arsénico) cada 10 cm de profundidad. Solo se trabajó con los perfiles 2, 30 y 32 porque los demás perfiles disponibles en el área de estudio estaban cerrados, rellenados o no accesibles durante el período de muestreo. Además, en los perfiles 2 y 32, se determinó la resistividad eléctrica por horizonte y, en todos los perfiles (2, 6, 24, 30 y 32), se obtuvieron secciones geoelectricas utilizando técnica de TRE-PEM.

Se llevaron a cabo varias campañas de muestreo y adquisición de datos entre verano 2024, otoño 2024 y verano de 2025.

2.1 Descripción de horizontes

2.1.1 Fundamento teórico

Los horizontes del suelo son las capas o estratos diferenciados que se forman dentro de un perfil de suelo. La variación de las propiedades del suelo con la profundidad es un principio fundamental en la ciencia del suelo. Esta heterogeneidad se debe a la influencia de varios factores de formación del suelo, como el material parental, la vegetación, el clima, la topografía y el tiempo (Essington, 2004).

La descripción de horizontes en el contexto de la Clasificación de Suelos de la Base de Referencia Mundial del Recurso Suelo (WRB) (2022) se refiere a la caracterización detallada de las capas del suelo, en particular, los horizontes diagnóstico, los cuales se definen por una combinación de atributos que reflejan los resultados comunes y generalizados de los procesos de formación del suelo. Sus características pueden ser observadas o medidas tanto en campo como en laboratorio. Además, deben tener un espesor mínimo específico para ser reconocibles como una capa en el suelo.

Una capa de suelo es una zona aproximadamente paralela a la superficie del suelo con propiedades distintas de las capas adyacentes. Si al menos una de estas propiedades es el resultado de procesos de formación del suelo, la capa se denomina horizonte del suelo. El término "capa" se utiliza de manera preferente para incluir aquellas zonas donde no se han producido procesos de formación de suelo, mientras que "horizonte" se reserva principalmente para los horizontes de diagnóstico.

Para la descripción, las capas se numeran consecutivamente desde la superficie hacia abajo. Las características que se utilizan para identificar y describir las capas incluyen: color de la matriz, textura del suelo, densidad aparente, estructura del suelo, contenido de carbonatos, etc. Además, se consideran la homogeneidad de la capa, el estado de humedad, los límites de capa y la presencia de raíces (WRB, 2022).

2.1.2 Procedimiento experimental

Para la descripción cualitativa de los perfiles de suelo en campo se seleccionaron los perfiles 2, 30 y 32 (Figura 2.1) por su accesibilidad y representatividad en el área de estudio, georreferenciándolos con un GPS. Cada perfil fue perforado con

una retroexcavadora. Antes de la descripción se eliminó la capa superficial de la pared, aproximadamente 30 cm, con una pala, para exponer una pared vertical limpia.

Los horizontes se identificaron mediante las características observadas en campo utilizando la clasificación de la WRB (WRB, 2022). Para cada horizonte, se determinaron las siguientes propiedades: clase textural por el método de tacto en campo, color en húmedo con la carta de Munsell, volumen de piedras por estimación visual, contenido de carbonato de calcio mediante reacción de HCl al 10%, humedad actual por observación táctil, estructura del suelo y estabilidad de agregados por manipulación manual, abundancia de poros con lupa en campo y densidad de raíces por estimación visual (Figura 2.2) (Siebe et al., 1996). Con base en estas observaciones, se establecieron los límites por horizonte, así como su espesor y profundidad.

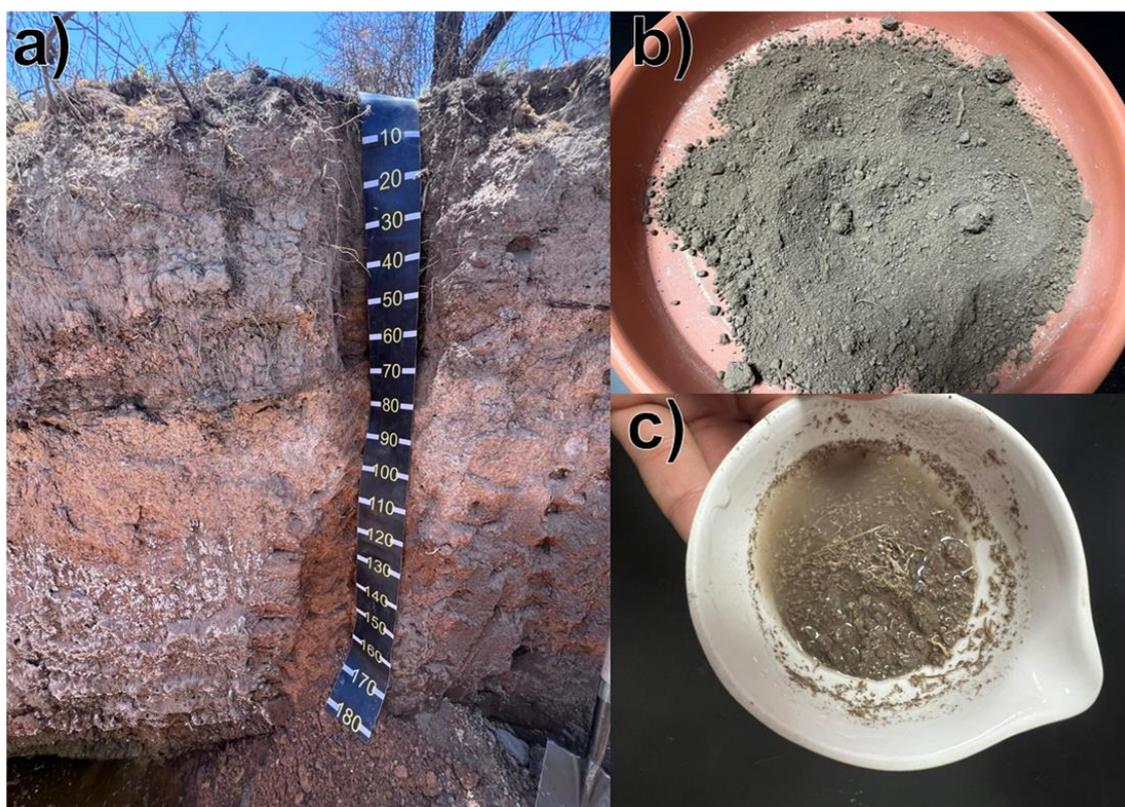


Figura 2.2 Procedimiento de campo y laboratorio para la descripción de horizontes. a) Perfil de suelo expuesto con medición de profundidad, b) muestra de suelo para determinar las propiedades del suelo (volumen de piedras, humedad actual, estructura de suelo, abundancia de poros y densidad de raíces) y c) prueba de estabilidad de agregados, textura y contenido de CaCO_3 .

Las observaciones se documentaron con fotografías digitales y la cadena de custodia #COC83 (Anexo 1). Además, se recolectaron muestras de cada horizonte en bolsas de polietileno para análisis de laboratorio, etiquetando profundidad y perfil.

2.2 Textura

2.2.1 Fundamento teórico

La textura del suelo se refiere a la proporción de diferentes clases de tamaño de partículas minerales del suelo, definidas como arena (2.0-0.05 mm), limo (0.05-0.002 mm) y arcilla (<0.002 mm) según la clasificación estándar (Carter y Gregorich, 2008; Weil y Brady, 2017; WRB, 2022). Las proporciones de arena, limo y arcilla determinan la clase textural del suelo (Weil y Brady, 2017). La tierra fina, que comprende todos los constituyentes del suelo con un diámetro equivalente de 2 mm o menos, es la base para esta caracterización (WRB, 2022). La textura, junto con el contenido de materia orgánica y arcilla, influye significativamente en el comportamiento de los compuestos en el entorno del suelo, afectando propiedades como la retención de agua, la aireación, la estabilidad estructural y la retención de nutrientes y químicos (Essington, 2004; Weil y Brady, 2017). Por ejemplo, la conductividad hidráulica saturada de un suelo aumenta considerablemente con una textura más gruesa, es decir, con partículas de mayor tamaño (Carter y Gregorich, 2008). De igual forma, el tamaño de las partículas del suelo se asocia con el espesor de la franja capilar, siendo mayor en suelos con granos más finos (Tabla 2.1), por ejemplo, alcanzando hasta 2 m de ascenso capilar en suelos limosos y 0.43 m en arenas finas (Ward y Robinson, 2000).

Tabla 2.1 Valores típicos de ascenso capilar en diferentes tipos de suelo (modificado de Ward y Robinson, 2000).

Tipos de suelo	Tamaño de partículas (mm)	Ascenso capilar (m)
Limo	0.05-0.02	2.00
Limo grueso	0.1-0.05	1.06
Arena fina	0.2-0.1	0.43
Arena media	0.5-0.2	0.25
Arena gruesa	1.0-0.5	0.14
Arena muy gruesa	2.0-1.0	0.065
Grava fina	5.0-2.0	0.025

La determinación de la textura del suelo se puede obtener y estimar tanto en el campo como en el laboratorio. El análisis granulométrico en laboratorio permite una medición precisa de la distribución de partículas mediante técnicas como el tamizado para fracciones de arena, limo y arcilla (Carter y Gregorich, 2008). Este proceso, conocido como análisis del tamaño de partículas, proporciona datos cuantitativos que clasifican el suelo en categorías específicas según el triángulo textural (WRB, 2022). Por otro lado, las estimaciones iniciales en campo se realizan mediante el método de tacto, que permite estimar las clases texturales del suelo, y aunque es una aproximación útil, puede ser menos fiable y se recomienda comparar los resultados con análisis de laboratorio de muestras

seleccionadas (Carter y Gregorich, 2008; WRB, 2022). Estas estimaciones en campo utilizan un diagrama de flujo que guía la identificación de clases como arenosa, franco arenoso, limosa, franco limoso, franco, franco arcilloso, entre otras, basándose en la sensación de plasticidad, adherencia y granulometría al manipular el suelo (WRB, 2022).

En el municipio de Matehuala, San Luis Potosí, la textura del suelo se ve influenciada por depósitos aluviales y/o lacustres con una compleja estratigrafía (Grande López et al., 1967; Rodríguez Rodríguez, 2016; SGM, 2012). Estos depósitos, resultado de procesos sedimentarios, generan variaciones en la distribución de partículas, que afectan la proporción de arena, limo y arcilla a lo largo de los perfiles de suelo. Asimismo, en suelos como los Gypsisoles, presentes en la región, según el INEGI (2010), la textura puede modificarse adicionalmente por la acumulación de yeso secundario, mismo que altera la proporción de partículas finas y la cohesión (WRB, 2022). A fin de lograr una caracterización precisa de la textura en los perfiles 2, 30 y 32, en este estudio se determinó la textura en campo y laboratorio para lograr determinar su influencia en la atenuación natural del suelo en el contexto de esta investigación.

2.2.2 Procedimiento experimental

Después de la identificación de los horizontes de los perfiles 2, 30 y 32, se extrajo una muestra de suelo de 1 kg de cada horizonte, utilizando una pala. Las muestras se recolectaron asegurando la eliminación de material orgánico, piedras y otros desechos, y se trasladaron al laboratorio en bolsas de plástico limpias. En el laboratorio, las muestras se secaron al aire libre para eliminar la humedad. Posteriormente, los agregados se desmenuzaron cuidadosamente con un pistilo, evitando la alteración de su estructura. Cada muestra se tamizó con un tamiz ASTM de 2 mm para separar las partículas finas, garantizando que el análisis se realizará únicamente con la fracción de suelo adecuada (Figura 2.3a).

El análisis de la textura del suelo se realizó mediante el método de tamizado en húmedo, adaptado del procedimiento descrito por Carter y Gregorich (2008) para determinar la proporción de partículas finas (limos y arcillas) y arenas. El análisis de tamizado en húmedo se llevó a cabo utilizando un tamiz ASTM No. 200 (0.074 mm) de 30 cm de diámetro y una bandeja recolectora. Se pesó una muestra de 50 g (W_s) con una balanza de sensibilidad de 0,1 g y se colocó en el tamiz No.200, y se lavó con agua corriente de manera cuidadosa para evitar pérdidas de material o daños en la malla (Figura 2.3b). El lavado continuó hasta que el agua que pasaba a través del tamiz salió clara, indicando que las partículas menores a 0.074 mm (limo y arcilla) habían sido separadas de las partículas más gruesas (arenas).

El residuo retenido en el tamiz No. 200 se trasladó cuidadosamente a una cápsula de porcelana, previamente tarada, mediante lavado inverso, utilizando una piseta de plástico de 250 ml para recuperar todo el material. Se decantó el exceso de agua, asegurando no perder muestra, y la cápsula con el residuo se secó en un horno a 105 °C durante 16 a 24 horas (Figura 2.3c). Una vez seco, el material se dejó enfriar a temperatura ambiente, y se registró el peso (W_{sr}) con una precisión de 0,1 g. El porcentaje de arenas retenidas en el tamiz No. 200 se calculó utilizando la siguiente fórmula:

$$\% \text{ arenas} = \frac{W_s - W_{sr}}{W_s} \times 100$$

Donde W_s es el peso de la muestra de suelo seco antes de tamizar y W_{sr} es el peso de la muestra de suelo seco retenido en el tamiz No. 200. El contenido de finos se calculó como la diferencia entre el porcentaje inicial de muestra (100%) y el porcentaje de arenas calculado:

$$\% \text{ finos} = 100 - \% \text{ arenas}$$

Este procedimiento se repitió para cada horizonte de los perfiles 2, 30 y 32.

Los resultados obtenidos permitieron determinar la proporción de partículas finas (limo y arcilla) y arenas en cada horizonte de los perfiles de suelo 2, 30 y 32 para la clasificación textural del suelo.



Figura 2.3. Proceso de tamizado para determinar la textura del suelo: a) secado al aire y separación de la fracción menor a 2 mm, b) tamizado en húmedo a través de una malla ASTM No. 200 (0.074 mm) hasta obtener agua clara y c) secado del residuo a 105 °C por 16 o 24 h y determinación del peso de las arenas retenidas.

En campo, las clases texturales se determinaron siguiendo la guía del diagrama de flujo de la clasificación de la Base de Referencia Mundial del Recurso Suelo (WRB, 2022). En general, el método consistió en tomar una muestra de suelo del tamaño de una nuez que se amasó hasta obtener una consistencia similar a

la masilla, añadiendo agua lentamente, cuidando que la muestra estuviera húmeda pero no brillante, y posteriormente realizar la evaluación sensorial, la cual en general consistió en determinar el tamaño de partículas considerando lo siguiente:

- Arena: Se siente áspera y granulosa, y produce un ruido de molienda al frotarla cerca del oído.
- Limo: Se siente suave o sedosa, como harina, con poca pegajosidad o resistencia a la deformación.
- Arcilla: Se evalúa su maleabilidad, pegajosidad y rigidez. Se intenta formar una "aguja" apretando el suelo húmedo entre el pulgar y el índice, estirándola lo más posible hasta que se rompa por su propio peso. La longitud de la aguja indica el contenido de arcilla (una cinta larga y flexible sugiere arcilla) (Weil y Brady, 2017; WRB, 2022).

2.3 Humedad gravimétrica y volumétrica del suelo

2.3.1 Fundamento teórico

El contenido de agua se ha expresado como la relación entre la masa de agua presente en una muestra y la masa de la muestra después de haber sido secada a 105 °C hasta alcanzar una masa constante. En este mismo sentido, el volumen de agua presente en una unidad de volumen de suelo también puede usarse como medida del contenido de agua. Por lo tanto, el contenido de agua, como se usa habitualmente en los estudios de suelo, es una relación adimensional entre dos masas (humedad gravimétrica) o dos volúmenes (humedad volumétrica). Los valores a menudo se expresan como porcentajes, resultado de multiplicar las relaciones adimensionales por 100 (Carter, 1993).

El contenido de agua en el suelo puede variar considerablemente y depender de numerosos factores, como la textura, la estructura y la porosidad, y además es un parámetro importante que afecta diversos procesos, incluida la disponibilidad de agua para las plantas, la infiltración y la recarga de los acuíferos (Carter, 1993; Weil y Brady, 2017).

La humedad del suelo puede determinarse mediante diversos métodos, como el uso de sensores de humedad portátiles o el método gravimétrico. En este trabajo, se empleó el método gravimétrico para determinar el contenido de agua en el suelo de los perfiles 2, 30 y 32.

2.3.2 Procedimiento experimental

El método gravimétrico, descrito por Carter (1993), se empleó para determinar el contenido de agua en el suelo (Figura 2.4). Este método consistió en pesar una muestra de suelo húmeda, secarla en un horno a 105 ± 5 °C hasta alcanzar una masa constante y calcular la masa de agua en el proceso. Este procedimiento se aplicó a muestras de suelo colectadas cada 10 cm de profundidad en las paredes de los perfiles 2, 30 y 32 (Figura 2.4a). El muestreo se llevó a cabo durante otoño del 2024, tras un periodo de precipitaciones que influyeron en las condiciones de la humedad del suelo.

Para la recolección de las muestras, se utilizó un nucleador (cilindro metálico) de volumen conocido (aproximadamente 73 cm^3 , con un diámetro de 4.7 cm y una altura de 4.2 cm), que se insertó manualmente en el suelo, con ayuda de un martillo, hasta alcanzar la profundidad total del cilindro, teniendo cuidado de evitar la compresión de la muestra. El exceso de suelo fuera del cilindro se retiró cuidadosamente con un cuchillo, asegurando que la muestra permaneciera intacta (Figura 2.4a). Se extrajo el cilindro con la muestra, se removió la muestra del cilindro y se almacenó herméticamente, para evitar pérdida de humedad, en una charola de aluminio, previamente pesadas (W_t) con una precisión de 0.01g (Figura 2.4b). Para medir asegurar la calidad del procedimiento se recolectaron triplicados de muestras en cada horizonte de suelo en cada perfil de suelo.



Figura 2.4. Esquema del procedimiento de muestreo de suelo para el análisis gravimétrico del contenido de agua: a) perfil de suelo muestreado cada 10 cm, b) lote de muestras de suelo para determinar humedad y c) secado de muestras de suelo para retirar humedad y calcular el contenido de agua perdida.

En laboratorio, se pesaron las muestras húmedas (W_{sw}) junto con los contenedores ($W_{sw} + W_t$), y se colocaron en un horno a una temperatura preestablecida de 105 ± 5 °C durante 24 horas (Figura 2.4c). El proceso de secado se repitió en ciclos adicionales hasta que el peso de suelo seco (W_{sd}) fue estable. Dicha estabilidad se corroboró estadísticamente a través de la prueba de Kruskal-Wallis comparando los pesos de cada charola entre los ciclos de secado ($W_{sd} + W_t$). El proceso de secado se paró cuando los cambios entre los pesos secos entre los ciclos dejaron de presentar diferencias estadísticamente significativas ($P > 0.05$). Es decir, cuando las muestras alcanzaron una masa

constante.

El contenido de agua (% en base a masa) se calculó utilizando la fórmula:

$$\% \text{ Humedad} = 100 \left[\frac{(W_{sw} + W_t) - (W_{sd} + W_t)}{W_{sd}} \right]$$

El contenido de agua volumétrico (θ , % en volumen) se determinó multiplicando el contenido gravimétrico por la densidad aparente (ρ_b) (ver abajo) de cada muestra, según:

$$\theta = \text{contenido gravimétrico (\% masa)} \times \rho_b$$

En este trabajo, se optó por utilizar el contenido de humedad volumétrica (θ) de las muestras de suelo de los perfiles 2, 30 y 32, esta elección se realizó para poder comparar estos resultados con estudios previos (Gómez Hernández, 2021) los cuales emplearon medidores de humedad portátiles, los cuales miden directamente la humedad volumétrica.

2.3 Densidad aparente del suelo

2.3.1 Fundamento teórico

La densidad aparente del suelo (ρ_b) es una propiedad física del suelo definida como la masa de un volumen unitario de suelo seco que incluye tanto las partículas sólidas como los espacios porosos entre ellas, en unidades de megagramos por metro cúbico (Mg/m^3) o gramos por centímetro cúbico (g/cm^3), comúnmente (Weil y Brady, 2017). Es importante distinguirla de la densidad real (ρ_r), que se refiere únicamente a la masa por unidad de volumen de los sólidos del suelo, sin incluir el espacio poroso (Carter y Gregorich, 2008; Weil y Brady, 2017).

Según Carter y Gregorich (2008), la ρ_b está fuertemente influenciada por la cantidad y el tamaño de los poros, así como por la composición de los materiales sólidos del suelo. De acuerdo con Weil y Brady (2017), los suelos sueltos y porosos tienen densidades aparentes más bajas que los suelos compactos debido a un mayor espacio poroso. El WRB (2022) añade que el volumen total de los suelos puede variar por la expansión y retracción del suelo, un fenómeno relacionado con el contenido de humedad y el tipo de arcillas que lo comprenden.

La densidad aparente se ve influenciada por diversos factores, incluyendo: la textura del suelo, materia orgánica, la profundidad y compactación del suelo (Weil y Brady, 2017). Los suelos de textura fina (francos limosos, arcillas y francos arcillosos) generalmente tienen densidades aparentes más bajas que los suelos arenosos debido a la organización de partículas en gránulos porosos,

especialmente en la presencia de materia orgánica, misma que crea más espacio poroso total. En contraste, los suelos arenosos, con bajo contenido de materia orgánica y menor agregación, presentan densidades aparentes más altas, influenciadas también por la disposición del empaquetamiento de granos y la uniformidad del tamaño de grano (Weil y Brady, 2017). Por su parte, la profundidad en el perfil del suelo también influye en la densidad aparente del suelo. Generalmente, la densidad aparente es más alta a mayor profundidad del suelo como resultado de la compactación de las capas inferiores, por el peso de las capas superiores, así como por menor contenido de materia orgánica, agregación y bioporos, pudiendo alcanzar valores de hasta 2.0 Mg/m³ (Weil y Brady, 2017). Asimismo, la materia orgánica influye en la densidad del suelo, la cual es menor cuando hay mayor contenido de materia orgánica (Carter y Gregorich, 2008). Además, los suelos con alta densidad aparente suelen tener menor porosidad, lo que limita la infiltración y el crecimiento de raíces, mientras que valores bajos indican suelos más sueltos y permeables (Weil y Brady, 2017).

2.4.2 Procedimiento experimental

El análisis de la densidad aparente del suelo se llevó a cabo utilizando el método de muestras de núcleo inalterado, adaptado del procedimiento descrito por Carter y Gregorich (2008), para determinar la masa volumétrica de muestras de suelo en cada uno de los horizontes identificados en los perfiles de suelo 2, 30 y 32. Este método se basó en la recolección de muestras con un cilindro metálico de volumen conocido (~73 cm³), cuya masa de suelo fue determinado de acuerdo al apartado 2.3.2 de este trabajo (W_{sd}). La densidad aparente se calculó con la siguiente fórmula, según Carter y Gregorich (2008):

$$\rho_b = \frac{W_{sd}}{V}$$

donde W_{sd} es el peso seco de la muestra (g) y V es el volumen del cilindro (cm³).

2.5 Porosidad y saturación de agua

2.5.1 Fundamento teórico

La porosidad del suelo, o espacio poroso, es un concepto definido como la proporción de espacio no sólido dentro del volumen total del suelo (Weil y Brady, 2017; WRB, 2022). Este espacio poroso, que puede estar lleno de aire o agua, es esencial para el movimiento de fluidos y gases e influye en las propiedades físicas y la estructura del suelo (Carter y Gregorich, 2008). La porosidad total varía ampliamente, desde un 25% en subsuelos compactados hasta más del

60% en suelos superficiales bien agregados y ricos en materia orgánica (Weil y Brady, 2017). Los factores que influyen en la porosidad incluyen:

- Textura del suelo: Los suelos de textura fina presentan densidades aparentes más bajas y, por lo tanto, mayor porosidad debido a la organización de partículas en gránulos porosos, mientras que los suelos arenosos, con menor materia orgánica y menor agregación, tienen densidades aparentes más altas y menor porosidad.
- Materia orgánica: Un alto contenido de materia orgánica incrementa la porosidad al promover la formación de agregados estables.
- Profundidad del perfil: A mayor profundidad, la porosidad disminuye debido a la compactación por el peso de las capas superiores, menor contenido de materia orgánica y menos agregación.
- Uso y manejo del suelo: La labranza intensa y la compactación por maquinaria pesada pueden aumentar la densidad aparente, reduciendo la porosidad total, especialmente la de los macroporos.
- Agregación del suelo: La formación de agregados estables crea un sistema de poros que facilita el movimiento del aire y el agua (WRB, 2022).

Por otro lado, la saturación de agua en el suelo se refiere a la condición en la que los poros del suelo están completamente llenos de agua o casi completamente llenos (Carter y Gregorich, 2008). La saturación de agua en el suelo es un concepto fundamental en la química y física del suelo que influye en el movimiento del agua, la disponibilidad de nutrientes y la salud de las plantas (Carter y Gregorich, 2008). La condición en la que los poros están saturados tiene un impacto profundo en las propiedades físicas del suelo y su funcionamiento en el ecosistema, así como en su comportamiento para usos de ingeniería (Weil y Brady, 2017). La saturación se define como el porcentaje del volumen de poros ocupado por agua, calculado a partir de la relación entre la humedad volumétrica (determinada en la sección 3.3) y la porosidad total (Carter y Gregorich, 2008), y es una característica clave para la descripción y clasificación de los suelos según la Base Referencial Mundial del Recurso Suelo (WRB, 2022).

2.5.2 Procedimiento experimental

El análisis de la porosidad del suelo se realizó utilizando un método basado en mediciones de resistividad eléctrica, adaptado de Delgado Rodríguez et al. (2012), con el objetivo de determinar la textura de los horizontes de los perfiles 2 y 32, para posteriormente determinar la proporción de espacio poroso y

posteriormente calcular la saturación de agua. El procedimiento que se siguió fue el siguiente:

1. Preparación de muestras y soluciones: Se recolectaron muestras de suelo de los horizontes de los perfiles 2 y 32. En laboratorio, las muestras se secaron al aire y tamizaron con un tamiz ASTM de 2 mm para obtener muestras homogéneas de aproximadamente 250 g. Se prepararon soluciones de cloruro de sodio (NaCl) a concentraciones de 2, 5, 6, 16 y 27 g/L usando agua desionizada y un multiparámetro de mesa para determinar la concentración de las soluciones.
2. Calibración de resistivímetros: Se utilizaron cinco resistivímetros (soil-box) (Figura 2.5a). Cada resistivímetro cuenta con tres pares de electrodos: un par (A y B) para inyectar corriente y dos pares (M1-N1 y M2-N2) para medir el potencial y reducir errores instrumentales. La constante geométrica (K) se determinó para convertir la medición de voltaje y corriente eléctrica en un valor de resistividad aparente del suelo, la cual depende exclusivamente de la geometría y configuración de los electrodos (M1-N1 y M2-N2) durante la calibración.
3. Saturación y medición eléctrica: Las muestras de suelo (<2 mm) se colocaron en cinco resistivímetros hasta el nivel de calibración (~250 g). Cada resistivímetro se saturó con las soluciones de NaCl (2, 5, 6, 16 y 27 g/L), agregando un 10% extra de la solución (Figura 2.5b). Se dejó estabilizar por 1 hora para que los procesos físicoquímicos (interacción entre el suelo y la solución) se completaran. Se determinó la resistividad eléctrica utilizando un terrimeter Saturn Geo LEM (Fluke) en configuración de cuatro polos (AMNB) para inyectar corriente (I) a través de los electrodos A y B (Figura 2.5c) y medir el potencial (ΔU) entre los electrodos M1-N1 y M2-N2, obteniendo como resultado dos valores de resistencia eléctrica ($R_{Mini} = \Delta U/I$). Se midió la temperatura del suelo saturado, para realizar la corrección por temperatura. Posteriormente, la resistividad eléctrica (ρ) se calculó para cada par de electrodos (M1-N1 y M2-N2) y dichos valores se corrigieron por temperatura (a 20 °C) usando la expresión:

$$\rho_{Mini} = K_{Mini} \cdot R_{Mini} \cdot (1 + 0.0177 \cdot (T - T_0))$$

donde ρ_{Mini} es la resistividad corregida, K_{Mini} es la constante geométrica, R_{Mini} es la resistencia medida, T es la temperatura de la muestra y $T_0 = 20$ °C. Se promediaron los valores de ρ de ambos pares de electrodos (M1-N1 y M2-N2) para obtener un solo valor por resistivímetro, generando un conjunto de cinco valores de resistividad (ρ_1 - ρ_5) para cada horizonte de suelo. Posteriormente, se recolectó el 10% de la solución sobrante en un tubo de plástico, y su salinidad se midió utilizando un terrimeter Saturn Geo LEM (Figura 2.5d) para ajustar el valor real (sal del suelo + salmuera).

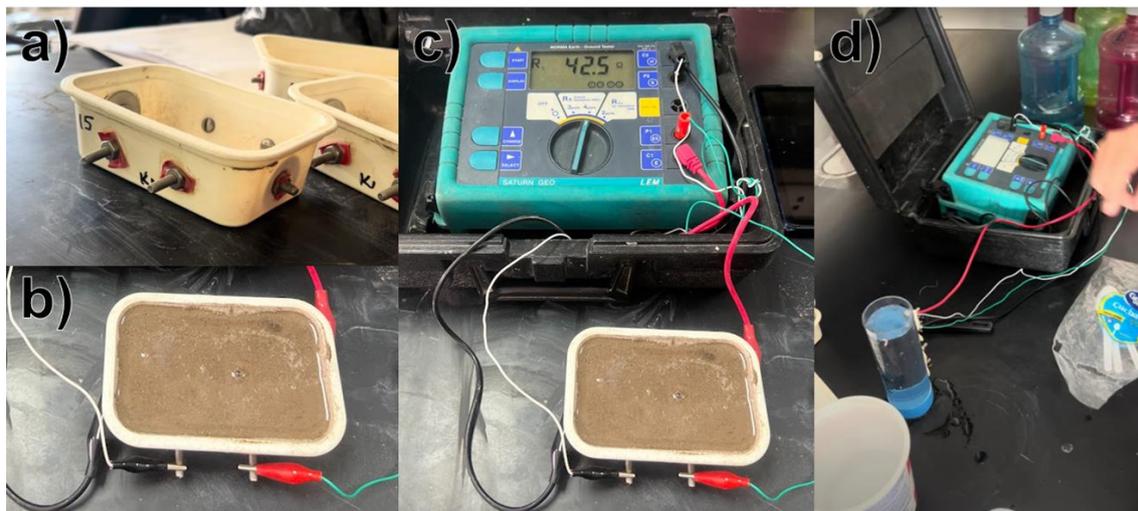


Figura 2.5 Proceso experimental para la determinación de porosidad y saturación de agua de los horizontes de suelo de los perfiles 2 y 32. a) Resistivímetros (soil-box) utilizados; b) Saturación de muestras de suelo (<2 mm) con soluciones de NaCl a concentraciones de 2, 5, 6, 16 y 27 g/L; c) Medición de resistividad eléctrica con terrimeter Saturn Geo LEM en configuración de cuatro polos (AMNB); d) Medición de salinidad residual en tubo de plástico con terrimeter Saturn Geo LEM.

4. Cálculo de porosidad total. Los datos de resistividad eléctrica $\rho(C)$ obtenidos se ajustaron iterativamente con el modelo petrofísico de Ryjov (1987) y el programa PetroWin (Ryjov y Sudoplatov, 1990), modificando parámetros como radios capilares y porosidad. La porosidad total (Φ) se estimó comparando las curvas teóricas de resistividad contra salinidad y textura calculada con el modelo de Ryjov, validando lo anterior con los resultados de textura de la sección 3.2.
5. Cálculo de la saturación de agua: La saturación de agua se calculó a partir de la porosidad total determinada en el paso anterior y la humedad volumétrica obtenida en la sección 3.3, utilizando la relación:

$$S_w(\%) = \frac{\theta}{P_t} \times 100$$

2.6 Espectrometría por fluorescencia de rayos X (XRF)

2.6.1 Fundamento teórico

La espectroscopia de fluorescencia de rayos X (XRF) es una técnica analítica no destructiva que se utiliza para el análisis elemental y químico de diversos materiales, como el suelo. Funciona irradiando una muestra con rayos X, lo que induce la emisión de rayos X fluorescentes. Estos rayos emitidos presentan energías características específicas de los elementos presentes en la muestra, permitiendo su identificación y cuantificación (González et al., 2024; Hanns, 2018; Sindhu et al., 2022). La espectrometría XRF fue reconocida oficialmente

en 1996 como un método válido de caracterización de suelos, formalizado en el Método 6200 de la EPA (USEPA, 2007).

Cuando una muestra se irradia con rayos X primarios provenientes de un tubo de rayos X (Figura 2.6), la energía de estos excita los átomos, provocando la expulsión de electrones de las capas internas y generando vacantes (Karathanasis y Hajek, 2018, 2018; Klisińska-Kopacz, 2024). Estas vacantes son ocupadas por electrones de niveles energéticos superiores, liberando la diferencia de energía en forma de fotones de rayos X característicos. Como se mencionó anteriormente, las energías de estos rayos son específicas de los elementos presentes, lo que permite su identificación y cuantificación (Karathanasis y Hajek, 2018, 2018; Klisińska-Kopacz, 2024). Por lo anterior, la espectrometría XRF se considera una técnica analítica tanto cualitativa como cuantitativa.

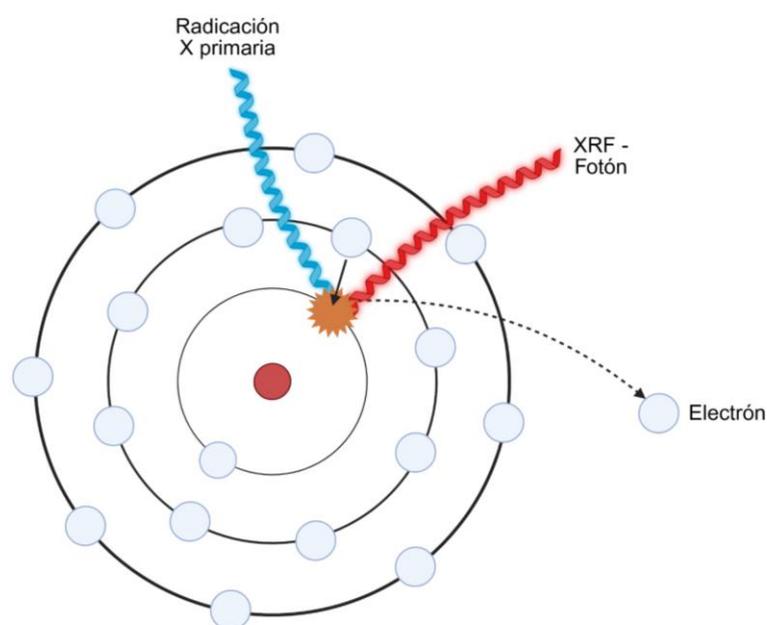


Figura 2.6 Esquema de radiación de un átomo con rayos X y emisión de fluorescencia ilustrando el principio de la fluorescencia de rayos X.

Los rayos X emitidos se detectan y miden mediante espectrómetros dispersivos de longitud de onda (WDXRF) o dispersivos de energía (EDXRF), los WDXRF separan los rayos X de diferentes longitudes de onda, mientras que los EDXRF miden la energía de los rayos X (Otsuki, 2023; Turner y Webber, 2025). En este trabajo se utilizó un dispositivo portátil de fluorescencia de rayos X (pXRF), que típicamente emplea espectrómetros EDXRF debido a su portabilidad, rapidez y bajo costo (Solé et al., 2007; Weindorf y Chakraborty, 2020).

2.6.2 Procedimiento experimental

Se recolectaron muestras verticales de suelo, cada 10 cm de profundidad, en los puntos de muestreo 2, 6, 24, 30 y 32 (Figura 2.1). Todas las muestras se almacenaron en bolsas de polietileno, se transportaron al laboratorio, se secaron al aire y se tamizaron a 2.0 mm para eliminar piedras, materiales gruesos y otros residuos utilizando un tamiz ASTM No. 10. Posteriormente, se molieron 20 g de muestra de suelo en un mortero de ágata. Esta operación se realizó hasta acumular aproximadamente 5.0 g del material, luego de esto se constató por pesaje en una balanza analítica marca Sartorius modelo M-power la cantidad requerida de 5.0 g y se empacó en bolsas plásticas transparentes con cierre hermético. Posteriormente, se determinaron las concentraciones de arsénico utilizando un analizador portátil de espectrometría de fluorescencia de rayos X (Niton XL3t GOLDD XRF Analyzer, Thermo Fisher Scientific) de acuerdo con el método estándar US-EPA 6200 (USEPA, 2007).

Para este trabajo, los datos del perfil 32 se obtuvieron de Gómez Hernández (2021) mientras que las muestras de los perfiles 2, 6, 24 y 30 fueron recolectadas y analizadas a través del Plan de Muestreo COC#75 del Laboratorio de Hidrogeoquímica de la División de Geociencias Aplicadas.

2.7 Resistividad aparente por horizonte

2.7.1 Fundamento teórico

La resistividad eléctrica ($\rho = \Omega \cdot m$) es una propiedad fundamental de los materiales que describe su resistencia al flujo de corriente eléctrica, siendo la inversa de la conductividad eléctrica ($\sigma = 1/\rho = S/m$) (Burger et al., 2006; Dobrin y Savit, 1988; Everett, 2013; Telford et al., 1990).

La resistividad aparente de los suelos depende de varios factores clave como:

- Fluido en los poros: Las rocas y suelos son generalmente malos conductores por sí mismos; su resistividad efectiva depende principalmente del agua que llena los poros, donde la corriente se propaga por conducción iónica (Dobrin y Savit, 1988; Telford et al., 1990).
- Salinidad: La salinidad del agua en los poros es el factor más crítico, ya que una alta salinidad aumenta la conductividad y reduce la resistividad (Dobrin y Savit, 1988; Everett, 2013), un aspecto relevante en Matehuala, donde la salinidad del agua es de 2.6 g/L.
- Porosidad: Una mayor porosidad en materiales saturados generalmente reduce la resistividad debido a una mayor cantidad de agua y iones (Dobrin y Savit, 1988; Everett, 2013).

- Temperatura y presión: A mayor profundidad, la influencia del agua disminuye, mientras que la temperatura y la presión ganan importancia, reduciendo la resistividad con el aumento de la temperatura (Telford et al., 1990).
- Contenido de arcilla/limo: El aumento del contenido de limo o arcilla, reduce la resistividad debido a su capacidad de intercambio iónico (Dobrin y Savit, 1988; Everett, 2013).

Un método ampliamente utilizado para medir la resistividad aparente es la configuración Wenner, un arreglo de cuatro electrodos (dos de corriente, A y B, y dos de potencial, M y N) colocados equiespaciados en una línea recta (Figura 2.7), con una distancia "a" entre electrodos adyacentes (Burger et al., 2006; Dobrin y Savit, 1988; Telford et al., 1990). Esta configuración permite evaluar la variación de la resistividad con la profundidad al ajustar el espaciado "a". En el contexto de Matehuala, la resistividad aparente se midió en los horizontes de suelo de los perfiles 2 y 32 utilizando un arreglo Wenner. Lo anterior, con el objetivo de poder calibrar los datos obtenidos de los horizontes de suelo con los obtenidos por el perfilaje electromagnético.

2.7.2 Procedimiento experimental

Para determinar los valores de resistividad eléctrica (ρ) presente en los horizontes de los perfiles 2 y 32 (Figura 2.1), se empleó el método geoelectrico de corriente continua con un arreglo Wenner, utilizando un dispositivo electrónico de cuatro electrodos (Loke y Barker, 1996). Las mediciones se realizaron con un equipo Terrimeter Saturn Geo LEM (Fluke Corp., 2005), configurado en un arreglo Wenner con una separación constante de 1 metro entre electrodos (Figura 2.7).

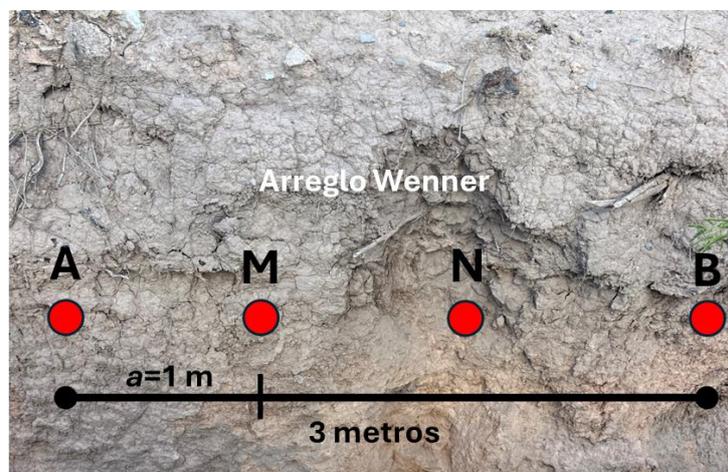


Figura 2.7 Arreglo Wenner para medición de resistividad eléctrica por horizonte en los perfiles de suelo 2 y 32.

En el arreglo Wenner, cuatro electrodos (A, M, N, B) se dispusieron en línea recta, equiespaciados $a = 1$ m, y se clavaron en la pared de los perfiles en cada horizonte de suelo. Los electrodos A y B se utilizaron para inyectar corriente (I), mientras que M y N midieron la diferencia de potencial (ΔV). La resistencia (R), en ohmios (Ω), fue medida directamente por el Terrimeter Saturn Geo LEM, basado en la relación $R = \Delta V / I$. Esta configuración permitió una profundidad de estudio aproximada de 0.5 por horizonte (Banerjee y Pal, 1986), adecuada para los espesores de las capas estudiadas.

La resistividad aparente (ρ_a) se calculó mediante la relación:

$$\rho_a = K \cdot \frac{\Delta V}{I}$$

donde I es la corriente inyectada (A) y K es el factor geométrico (m), que depende de la disposición de los electrodos. En el arreglo Wenner, K se calcula como:

$$K = \frac{2\pi}{\frac{1}{r_{AM}} - \frac{1}{r_{BN}} - \frac{1}{r_{AN}} + \frac{1}{r_{BM}}}$$

donde r_{AM} , r_{BM} , r_{AN} y r_{BN} son las distancias entre los electrodos A, B, M y N. Para el arreglo Wenner con $a=1$ m, estas distancias son: $r_{AM}=a$, $r_{BM}=2a$, $r_{AN}=2a$, $r_{BN}=a$. Sustituyendo:

$$K = \frac{2\pi}{\frac{1}{a} - \frac{1}{2a} - \frac{1}{2a} + \frac{1}{a}} = 2\pi a$$

Con $a=1$ m, el factor geométrico resulta:

$$K = 2\pi \cdot 1 = 6.28 \text{ m}$$

Por lo tanto, la resistividad aparente se obtuvo como:

$$\rho_a = 6.28 \cdot R$$

donde ρ_a está en $\Omega \cdot \text{m}$ y R en Ω . Este procedimiento permitió obtener valores de ρ_a para cada horizonte. Dado que la profundidad de estudio (~ 0.5 m) es igual o inferior al espesor de los horizontes, y considerando las diferencias litológicas entre ellos, los valores de ρ_a son comparables a la resistividad real (ρ) del suelo, ya que las mediciones no se ven significativamente afectadas por litologías adyacentes.

2.8 Perfilaje electromagnético

2.8.1 Fundamento teórico

Los métodos electromagnéticos (EM) son técnicas geofísicas que se enmarcan en la geofísica aplicada, una disciplina que utiliza la medición de propiedades físicas de la Tierra para explorar y caracterizar el subsuelo con fines científicos, económicos y de ingeniería (Burger et al., 2006; Telford et al., 1990). Estos métodos se basan en la detección de campos electromagnéticos naturales o inducidos artificialmente, siendo sensibles a las variaciones en propiedades eléctricas como la conductividad y la permitividad dieléctrica del subsuelo (Telford et al., 1990).

El perfilaje electromagnético (PEM), como método electromagnético, es una técnica geofísica no destructiva que permite mapear y caracterizar las propiedades eléctricas del subsuelo, principalmente la conductividad eléctrica (σ) o su inverso, la resistividad ($\rho=1/\sigma$), mediante la inducción electromagnética. Esta técnica es ampliamente utilizada en estudios hidrogeológicos, ambientales, geotécnicos y de exploración minera, ya que ofrece una aproximación eficaz para investigar el subsuelo sin alterarlo (Burger et al., 2006; Delgado-Rodríguez et al., 2021; Telford et al., 1990; Tezkan, 1999; Zhdanov, 2009). Este método se basa en la generación de un campo electromagnético primario (H_p) mediante una bobina transmisora (Tx) que inyecta una corriente alterna (Figura 2.8). Según la Ley de Ampère-Maxwell, esta corriente genera un campo magnético que, al variar con el tiempo, induce corrientes eléctricas circulantes, conocidas como corrientes de Foucault (*eddy currents*), en los materiales conductores del subsuelo, conforme a la Ley de Faraday (Burger et al., 2006; Dobrin y Savit, 1988). Estas corrientes generan un campo magnético secundario (H_s) que es detectado por una bobina receptora (Rx) (Figura 2.8). La diferencia entre los campos primario y secundario proporciona información sobre la geometría, tamaño y propiedades eléctricas del subsuelo (Everett, 2013; Telford et al., 1990).

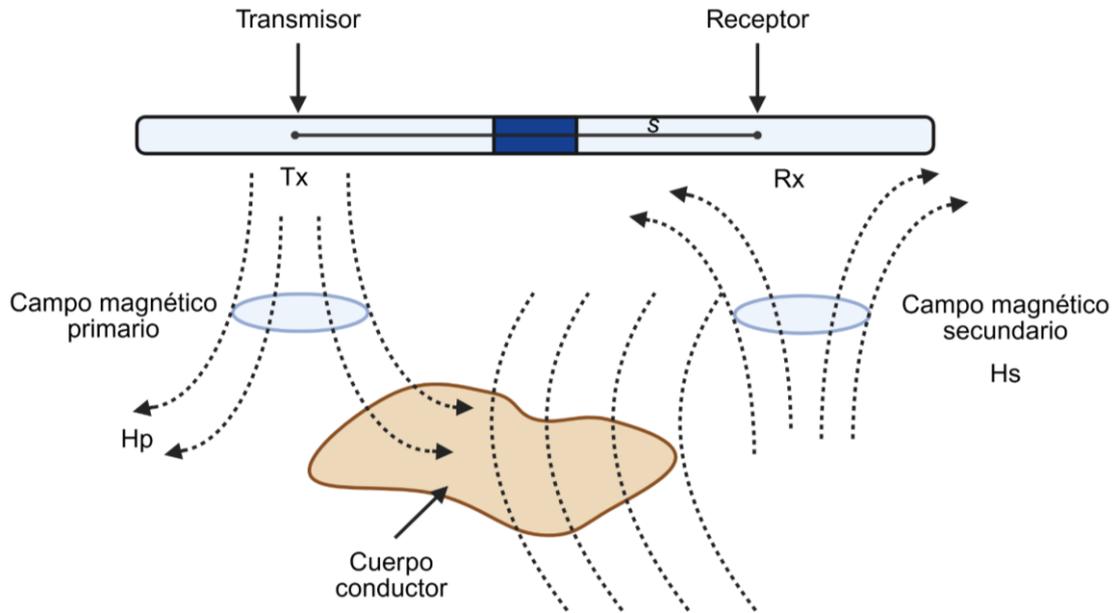


Figura 2.8. Configuración esquemática del perfilaje electromagnético (PEM).

El comportamiento de los campos electromagnéticos en el PEM está regido por las ecuaciones de Maxwell:

- Ley de Gauss (magnetismo): $\nabla \cdot B = 0$, describe cómo el campo eléctrico está relacionado con la densidad de carga eléctrica (ρ). En el subsuelo, usualmente se asume $\rho \approx 0$.
- Ley de Gauss (electricidad): $\nabla \cdot E = \frac{\rho}{\epsilon_0}$, indica que no existen monopolos magnéticos; es decir, el flujo magnético siempre es cerrado.
- Ley de Faraday: $\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t}$, explica cómo un campo magnético variable en el tiempo induce un campo eléctrico.
- Ley de Ampère-Maxwell: $\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t}$, relaciona el campo magnético con la densidad de corriente eléctrica $J = \sigma E$ y el campo eléctrico desplazado $D = \epsilon E$ (Telford et al., 1990).

Considerando las relaciones $D = \epsilon E$, $B = \mu H$, y $J = \sigma E$, donde ϵ es la permitividad dieléctrica, μ es la permeabilidad magnética, y σ es la conductividad eléctrica del medio, las ecuaciones de Maxwell pueden expresarse como:

$$\nabla \cdot B = 0, \quad \nabla \cdot E = 0; \quad \nabla \times E = -\mu \frac{\partial H}{\partial t}; \quad \nabla \times H = \sigma E + \epsilon \frac{\partial E}{\partial t}$$

La relación entre los campos magnéticos primario (H_p) y secundario (H_s) está dada por: $\frac{\partial E}{\partial t} = \frac{i\omega\mu_0\sigma s^2}{4}$, donde $\omega = 2\pi f$ es la frecuencia angular, μ_0 es la

permeabilidad magnética del vacío, σ es la conductividad eléctrica del subsuelo, y s es la separación entre las bobinas transmisora y receptora (Telford et al., 1990).

Las dos clases principales de técnicas para separar el campo secundario del primario son los métodos electromagnéticos en el dominio de la frecuencia (FDEM) y los métodos electromagnéticos en el dominio del tiempo (TDEM). Las técnicas FDEM separan los componentes del campo de respuesta que están en fase y fuera de fase (cuadratura) respecto al campo primario. Las técnicas TDEM observan el campo electromagnético transitorio presente después de apagar el transmisor (Burger et al., 2006). En TDEM, los voltajes de tiempos cortos proporcionan información sobre la resistividad somera, mientras que los tiempos largos reflejan propiedades a mayor profundidad (Burger et al., 2006; Dobrin y Savit, 1988).

El PEM se empleó en este trabajo para mapear variaciones en la conductividad del subsuelo asociados a estructuras y la identificación de cuerpos conductores asociados a la franja capilar.

2.8.2 Procedimiento experimental

En este estudio, se empleó el método PEM en el dominio de la frecuencia utilizando dos medidores de conductividad electromagnética de suelo, un CMD-MiniExplorer 6L de *Gf Instruments* y un EM31-MK2 Data Logging System de *Geonics*. El equipo CMD-MiniExplorer permitió obtener seis mediciones de conductividad aparente (σ_a) por punto de medición para los rangos de profundidad aproximados de 0.3 m, 0.5 m, 0.8 m, 1.1 m, 1.6 m, 2.3 m (GF Instruments, 2020). El equipo EM31-MK2, configurado en modo dipolar vertical, tiene una separación entre bobinas de 3.66 m, lo que permitió tener una profundidad de investigación máxima de aproximadamente 6 m (Geonics Limited, 2010). En ambos equipos, se utilizó la configuración Slingram, en la cual el transmisor (Tx) y el receptor (Rx) se mueven simultáneamente con una distancia fija entre ellos. El método Slingram fue seleccionado por su alta productividad, facilidad de uso y ausencia de contacto directo con el suelo, lo que permite mediciones rápidas en terrenos despejados (Telford et al., 1990).

El PEM se implementó en modo de perfilaje, desplazando el equipo a lo largo de líneas para mapear variaciones laterales en la conductividad, estos perfilajes se realizaron paralelos a los puntos de muestreo 2, 6, 24, 30 y 32 a una distancia de aproximadamente de 2 m (Figura 2.9a), a dos profundidades de estudio ~ 2.3 m y ~ 6 m con los equipos CMD-MiniExplorer y EM31-MK2, respectivamente. Lo anterior, con el objetivo de construir secciones geoeléctricas someras e identificar cuerpos conductores asociados a la franja capilar. Además, se realizaron 55 perfiles con el equipo CMD-MiniExplorer en la sección sureste del

área de estudio (Figura 2.9b) con el objetivo de realizar un mapa de la distribución espacial de la frontera de la franja capilar. Este mapa se realizó ajustando las profundidades de la frontera de la franja capilar según las características locales de cada perfil y su altitud correspondiente.

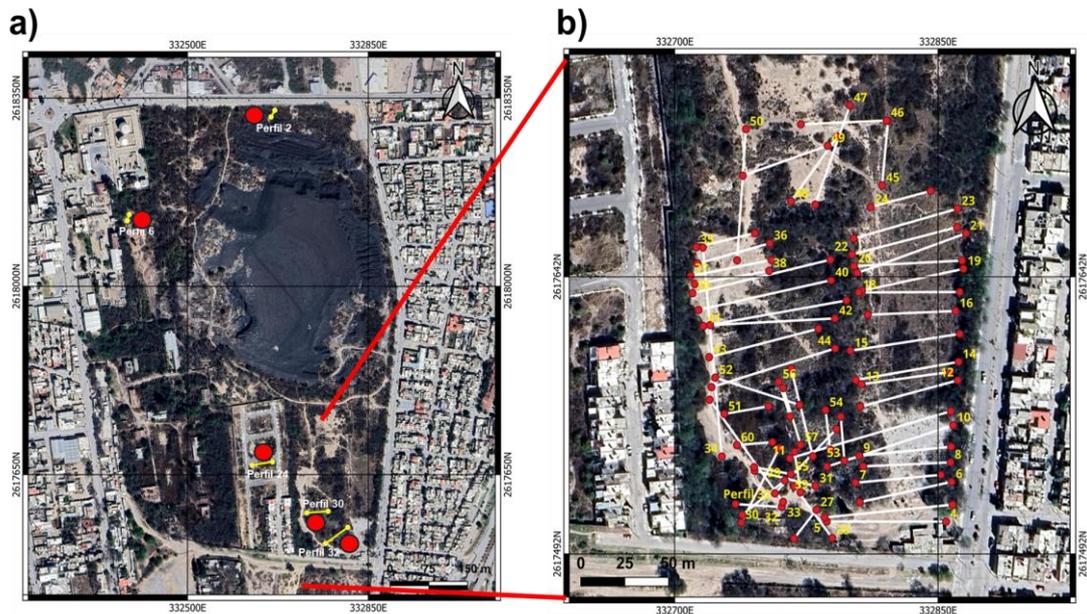


Figura 2.9 Ubicación de perfilajes electromagnéticos a) a una distancia aproximada de 2 m a los puntos de muestreo 2, 6, 24, 30 y 32 y b) en la sección sureste del área de estudio para identificar la frontera de la franja capilar.

En este trabajo, las mediciones de σ_a para construir las secciones geoelectricas a ~ 2.3 m y ~ 6 m se tomaron con una separación de 1 m entre puntos de medición a lo largo de los 5 perfiles. En contraste, las mediciones para construir el mapa de distribución de la frontera capilar se obtuvieron a partir de adquisición automática de datos georreferenciados de σ_a cada 7 s.

Para facilitar la interpretación de los resultados geoelectricos, los valores de σ_a en mS/m se convirtieron a valores de resistividad aparente (ρ_a) en $\Omega\cdot m$ mediante la fórmula: $\rho_a = 1000/\sigma_a$. En este caso, los equipos EM31-MK2 y CMD-MiniExplorer 6L tienen la capacidad de convertir una sección de valores de σ_a obtenidos a lo largo de un perfil en una sección de valores de ρ_a . La sección de ρ_a fue invertida para obtener una sección de resistividades reales utilizando el programa Res2DInv (Loke y Barker, 1996). Esto se realizó para las 65 secciones obtenidas en este trabajo.

Capítulo 3. Resultados

3.1 Horizontes de los perfiles del suelo

La figura 3.1 muestra la profundidad, los horizontes y el color en húmedo de los perfiles de suelo 2, 30 y 32, mostrando profundidades que variaron entre 200 cm y 235 cm, horizontes A y B y colores 7.5 YR de 3/1 a 7/6. Los datos recabados durante las campañas de muestreo se detallan en el Anexo 2, donde se describen las características de los horizontes de los perfiles 2, 30 y 32.

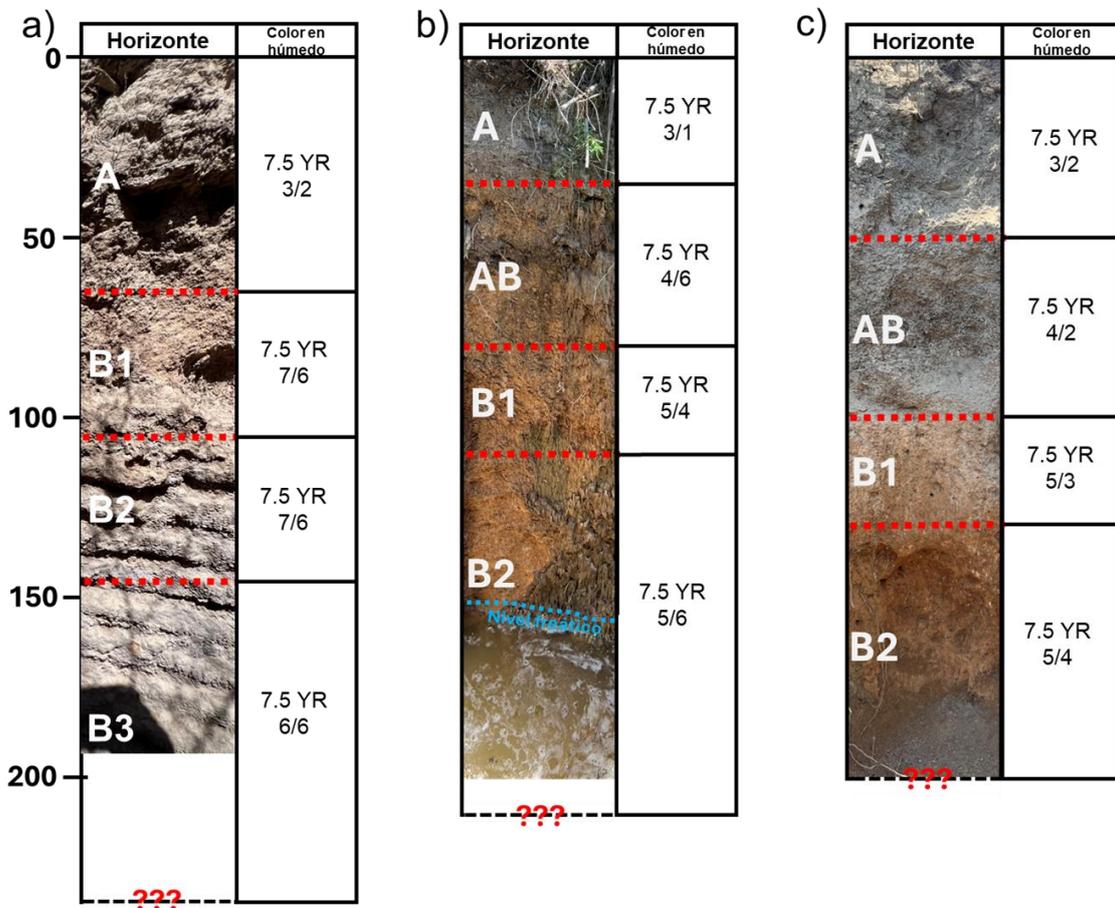


Figura 3.1 Horizontes y colores de los perfiles a) 2, b) 30, c) 32.

En el perfil 2 se identificaron cuatro horizontes (Figura 3.1 a). El horizonte más superficial (A) con un espesor de 65 cm, presentó una estructura angular en bloque con caras planas y vértices angulares, baja estabilidad de agregados, densidad de raíces entre 6 y 10 dm², contenido de carbonatos de 2 y 10 % y color en húmedo de 7.5 YR 3/2 según la escala (USDA, 2013). El segundo horizonte, B1, se extendió de 65 a 105 cm de profundidad, con un espesor de 40 cm, estructura granular sin muchos poros, muy baja estabilidad de agregados, contenido de carbonatos de 25 a 50% y color en húmedo de 7.5 YR 7/6 según

la escala (USDA, 2013). El tercer horizonte, B2, abarcó de 105 a 145 cm, con un espesor de 40 cm, estructura de migajón esferoidal, baja estabilidad de agregados, contenido de carbonatos de 25 a 50% y color en húmedo de 7.5 YR 7/6 según la escala (USDA, 2013). El cuarto horizonte, B3, se identificó de 145 cm a 235 cm, la profundidad máxima alcanzada por la excavadora. Este horizonte presentó una estructura angular en bloque, caras planas y vértices angulares, muy baja estabilidad de agregados que indica desintegración fácil al manipularse, contenido de carbonatos de 25 a 50% y color en húmedo de 7.5 YR 6/6 según la escala (USDA, 2013). Este horizonte presentó alta compactación, evidenciada por resistencia significativa al ser golpeado con una herramienta metálica. Además, en el horizonte B3 se identificó una capa gípsica, caracterizada por la acumulación de yeso secundario, con un contenido estimado superior al 5% en masa, cumpliendo los criterios del WRB (2022) para horizonte gípsico. La presencia de yeso se confirmó en campo por su textura y facilidad para rasgarse, típica de acumulaciones secundarias. Los horizontes gípsicos son característicos de los suelos de tipo Gypsisol (WRB, 2022), uno de los tipos de suelos principales de Matehuala según el INEGI (2010).

En el perfil 30 se identificaron cuatro horizontes (Figura 3.1 b). El horizonte A, con un espesor de 35 cm, mostró estabilidad de agregados de baja a moderada, densidad de raíces de 10 a 20 dm², contenido de carbonatos de 2-10% y color en húmedo de 7.5 YR 3/1 según la escala (USDA, 2013). El horizonte AB ubicado de 35 cm a 80 cm de profundidad, con un espesor de 45 cm, presentó estabilidad de agregados de mediana a moderada, densidad de raíces de 3 a 5 dm², contenido de carbonatos de 25 a 50% y color en húmedo de 7.5 YR 4/6 según la escala (USDA, 2013). El horizonte AB actuó como un horizonte de transición entre el horizonte A y el B. El horizonte B1 ubicado de 80 a 110 cm de profundidad presentó una estabilidad de agregados de mediana a moderada, densidad de raíces de 3 a 5 dm², contenido de carbonatos de 2 a 10% y color en húmedo de 7.5 YR 5/4 según la escala (USDA, 2013). El horizonte B2, de 110 a 210 cm (profundidad máxima), mostró una estabilidad de agregados de moderada a baja, densidad de raíces de 3 a 5 dm², contenido de carbonatos entre 0.5 y 2% y color en húmedo de 7.5 YR 5/6 según la escala (USDA, 2013). El horizonte B2 presentó alta humedad al tacto en comparación con los horizontes suprayacentes, esto se asoció a un proceso de capilaridad, relacionada con un nivel freático identificado a ~210 cm en la primera campaña de muestreo y a ~160 cm en la segunda campaña de muestreo (figura 3.1 b).

En el perfil 32 se identificaron cuatro horizontes (figura 3.1 c). El primer horizonte (A) con un espesor de 50 cm, presentó estructura en forma de terrones, estabilidad de agregados de baja a moderada, densidad de raíces de 10 a 20 dm², contenido de carbonatos de 2 a 25% y color en húmedo de 7.5 YR 3/2 según la escala (USDA, 2013). El horizonte AB ubicado de 50 a 100 cm de profundidad, mostró suelos muy compactos con estructura angular en bloques,

caras planas y vértices angulares, estabilidad de agregados moderada, densidad de raíces de 6 a 10 dm², contenido de carbonatos de 25 a 50% y color en húmedo de 7.5 YR 4/2 según la escala (USDA, 2013). El horizonte AB actuó como un horizonte de transición entre el horizonte A y el B. El horizonte B1 localizado de 100 a 130 cm de profundidad, tuvo estructura subangular en bloques con caras planas y redondeadas, una estabilidad de agregados media-baja, no presentó raíces, contenido de carbonatos entre 25 y 50% y color en húmedo de 7.5 YR 5/3 según la escala (USDA, 2013). El horizonte B2 se encontró de 130 a 200 cm (profundidad máxima alcanzada), presentó una estructura estructurada, granular esferoidal y porosa, estabilidad de agregados moderada-baja, no presentó raíces, contenido de carbonatos de 25 a 50% y color en húmedo de 7.5 YR 5/4 según la escala (USDA, 2013). Similar al perfil 30, el horizonte B2 del perfil 32 presentó una mayor humedad al tacto, asociada a ascenso capilar, donde el nivel freático se identificó a ~200 cm de profundidad en la primera campaña de muestreo y a ~160 cm en la segunda.

3.2 Textura y clases texturales

En la figura 3.2 se muestran los porcentajes de arenas y de finos (arcilla y limo), así como las clases texturales de los perfiles 2, 30 y 32.

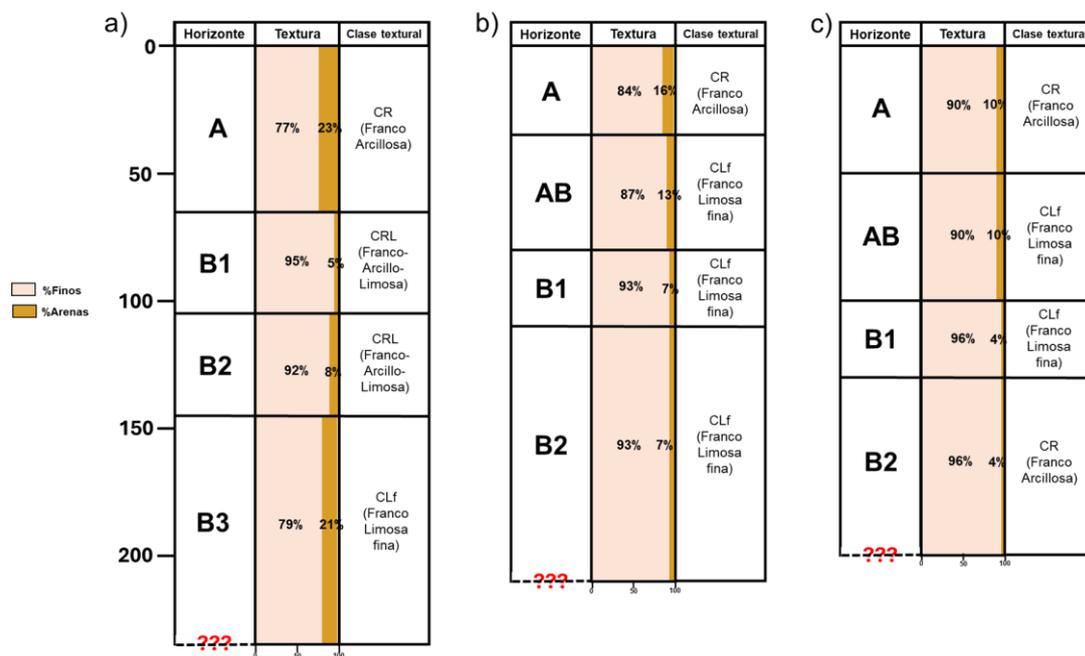


Figura 3.2 Distribución de finos y arenas y clases texturales de los horizontes de los perfiles: a) 2, b) 30 y c) 32.

En general, los perfiles de suelo analizados presentaron una textura dominada por partículas finas (limo y arcilla), con valores que variaron entre el 77% y el

96%, a lo largo de los horizontes estudiados, mientras que el porcentaje de arenas varió de 23% a 6%.

En el perfil 2 se observó variación en la proporción de arenas y finos entre los horizontes (Figura 3.2a). El horizonte A registró un 77% de finos, 23% de arenas y una clase textural franco arcillosa. El horizonte B1 presentó 95% de finos, 5% de arenas y una clase textural franco-arcillo-limosa. El horizonte B2 presentó un 92% de finos, 8% de arenas y una clase textural franco-arcillo-limosa. Mientras que el horizonte B3 presentó un 79% de finos, un 21% de arenas y una clase textural franco limosa fina. En el perfil 2 se identificó una mayor proporción de arenas (21-23%) en los horizontes A y B3 en comparación con los horizontes intermedios B1 y B2, donde el porcentaje de arenas varió entre 5% y 8%, mientras que la proporción de sedimentos finos superó el 92% en estos últimos.

Por su parte, el perfil 30 mostró un incremento de finos con la profundidad (Figura 3.2b). En el horizonte A, se observó un 84% de finos, un 16% de arenas y la clase textural fue franco arcilloso. En el horizonte AB se observó un 87% de finos, 13% de arenas y una clase textural franco limosa fina. En el horizonte B1 se observó un 93% de finos, 7% de arenas y una clase textural franco limosa fina. Mientras que en el horizonte más profundo (B2), el porcentaje de finos fue de 93%, el de arenas 7% y la clase textural franco limosa fina.

El perfil 32 presentó la mayor proporción de finos (Figura 3.2c) en todos sus horizontes comparado con los perfiles 2 y 30. En el horizonte A, los finos representaron el 90%, las arenas un 10% y se identificó una clase textural franco arcillosa. En el horizonte AB se observó un 90% de finos, 10% de arenas y una clase textural franco limosa fina. En el horizonte B1 se observó un 96% de finos, 4% de arenas y una clase textural franco limosa fina. Por último, en el horizonte B2 se observó un 96% de finos, 4% de arenas y una clase textural franco arcillosa. La Figura 3.3 muestra el diagrama ternario de clasificación de suelos, mostrando las clases texturales de los suelos de este estudio. La línea azul representa el contenido máximo de arenas encontrado en los horizontes de suelo por lo que se espera que, de determinar los contenidos específicos de arcillas y limos se esperarían que las muestras cayeran en las áreas punteadas por encima de la línea azul. Sin embargo, para una clasificación precisa, se recomienda desglosar los porcentajes de limo y arcilla individualmente, ya que la suma de finos incluye ambas fracciones, y su distribución específica podría influir en las propiedades de retención y flujo de agua de la franja capilar.

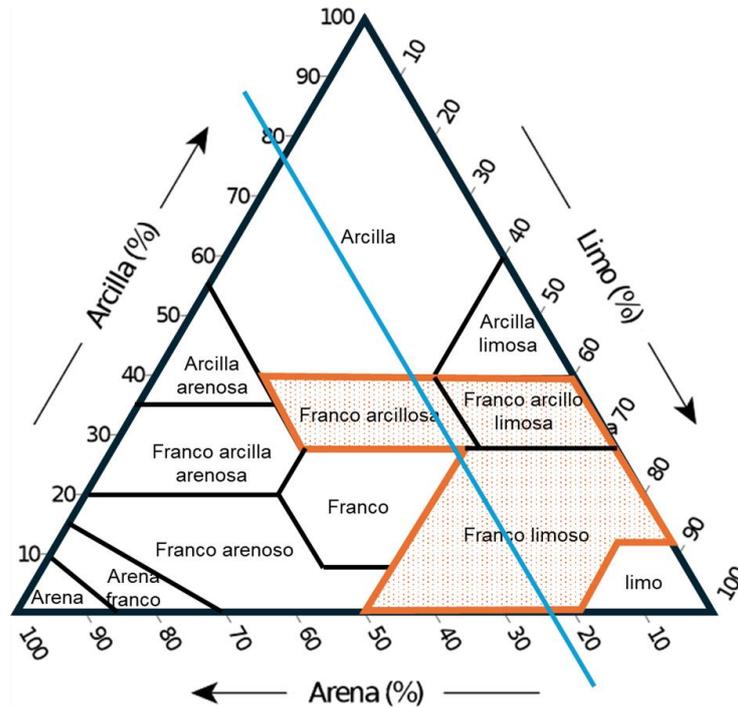


Figura 3.3 Clases texturales del suelo para los perfiles 2, 30 y 32.

En general, todos los perfiles de suelo mostraron porcentajes altos de finos (mayor al 70%). La textura fina aporta condiciones para el ascenso capilar del agua del manto freático hacia los suelos que le sobreyace. En suelos limosos la franja capilar puede alcanzar hasta los 2 metros (Ward y Robinson, 2000). No obstante, un cambio de textura en los horizontes del suelo podría frenar el frente capilar (Weil y Brady, 2017). En este estudio, en los perfiles de suelo, se observaron cambios de textura que podrían condicionar el ascenso capilar.

3.3 Humedad del suelo

La Figura 3.4 muestra los porcentajes de humedad volumétrica en función de la profundidad del suelo en los perfiles 2, 30 y 32, así como sus desviaciones estándar. En el Anexo 3 se muestran los datos de humedad gravimétrica y densidad aparente, a partir de los cuales se obtuvo la humedad volumétrica del suelo.

En general, la humedad de todos los perfiles aumentó con la profundidad, variando de 5 a 16 % en la superficie a valores mayores de 30 % a profundidades de 195 y 235 cm. Estos resultados son consistentes con la textura. En el horizonte B2 de los perfiles 30 y 32, un alto porcentaje de finos coincidió con un alto contenido de humedad (Figuras 3.2 y 3.4). Como se mencionó anteriormente, en campo fue posible observar el nivel freático en los perfiles 30 y 32 a ~160 y 210 cm de profundidad (Figura 3.1 b), indicando el ascenso capilar del agua, desde el acuífero somero de Mathuala hacia el suelo que le

sobreyace. En estudios previos, se ha demostrado que los suelos con mayor contenido de partículas finas facilitan la capacidad de retención de agua y el ascenso capilar, debido a su alta capacidad de adsorción y cohesión (Weil y Brady, 2017).

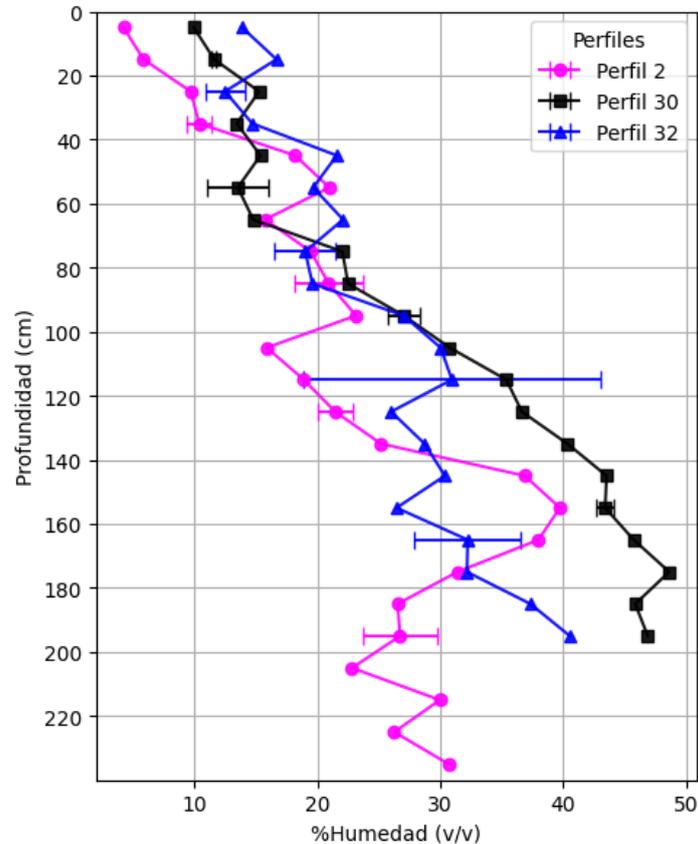


Figura 3.4 Humedad volumétrica del suelo en función de la profundidad para los perfiles 2, 30 y 32.

Durante el trabajo de campo no se logró identificar la franja capilar ni el nivel freático en el perfil 2, lo que podría explicar su contenido relativamente bajo de humedad en el horizonte B2. En este perfil, el contenido de humedad a mayores profundidades podría deberse a las fuerzas matriciales, responsables de la adsorción y retención del agua en las partículas del suelo (Weil y Brady, 2017). Entre los 145 y 165 m de profundidad se identificó un cambio de horizontes, una menor compactación y un mayor contenido de finos (Figura 3.1 y 3.2) que podrían explicar una mayor retención de humedad. Estudios previos han demostrado que los suelos con alta compactación pueden limitar la percolación del agua y reducir la movilidad del agua en el perfil del suelo (Nawaz et al., 2013; Weil y Brady, 2017). Asimismo, un cambio abrupto en el tamaño de los poros, causado por la estratificación de los horizontes del suelo, puede disminuir la movilidad del agua y generar un frente de humectación, (Weil y Brady, 2017). Ambos fenómenos podrían estar frenando la movilidad del agua y creando el frente de humectación que observamos entre los 145 y 165 m de profundidad en

el perfil 2. Este frente de humectación podría también deberse a la acumulación de yeso en el horizonte B3 (sección 3.1), misma que podría estar actuando como una barrera que también previene el movimiento del agua hacia una mayor profundidad del suelo.

3.4 Densidad aparente del suelo

La figura 3.5 muestra los valores de densidad aparente (g/cm^3) de los perfiles 2, 30 y 32. En general, la densidad de los suelos aumentó con la profundidad de 0.6 a $1.3 \text{ g}/\text{cm}^3$.

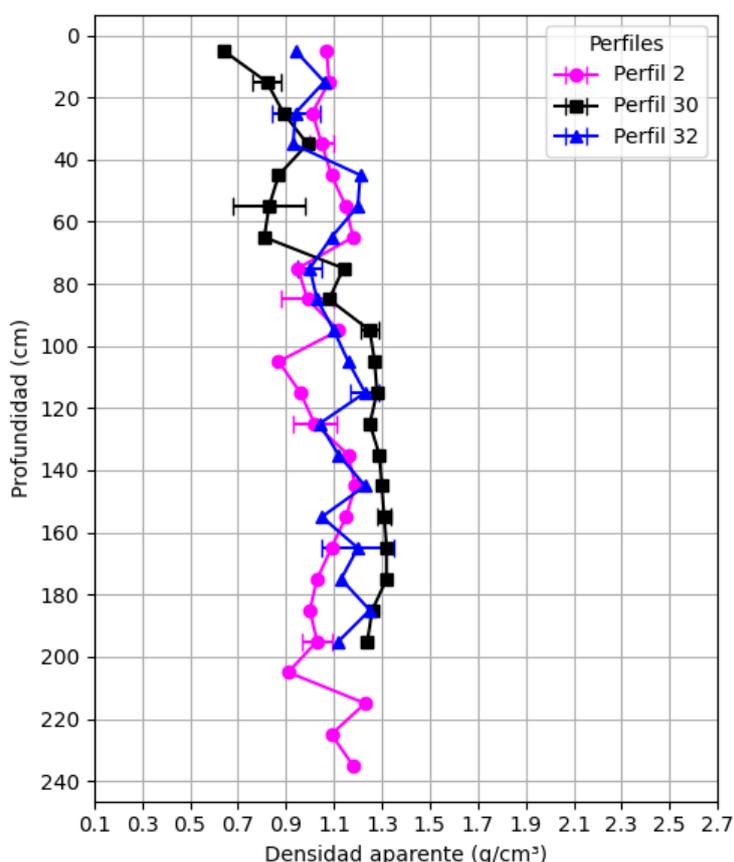


Figura 3.5 Densidad aparente del suelo en función de la profundidad para los perfiles 2, 30 y 32.

En el perfil 2 la densidad aparente del suelo varió de 0.8 a $1.2 \text{ g}/\text{cm}^3$. En el horizonte superficial A (0-65 cm) la densidad varió de 1 a $1.1 \text{ g}/\text{cm}^3$, en el horizonte B1 (65-105 cm) varió de 0.8 a $1.1 \text{ g}/\text{cm}^3$, en el horizonte B2 (105-145 cm) varió de 0.96 a $1.1 \text{ g}/\text{cm}^3$ y en el horizonte B3 (145-235 cm) la densidad varió de 0.9 a $1.2 \text{ g}/\text{cm}^3$.

En el perfil 30 la densidad aparente del suelo varió de 0.6 a $1.3 \text{ g}/\text{cm}^3$. La densidad más baja se identificó en superficie (0-25 cm), alrededor de $\sim 0.6\text{-}0.9$

g/cm³, lo cual puede estar relacionado a un mayor contenido de materia orgánica (Weil y Brady, 2017). En este caso, por la presencia de raíces (Figura 3.1b). De los 35 a los 65 cm de profundidad se observó una densidad que varió de ~0.8 a 1 g/cm³. En general, la densidad aumentó después de esta profundidad, alcanzando valores de ~1.3 g/cm³ entre 95 y 200 cm de profundidad, lo que sugiere una mayor compactación en los horizontes más profundos.

En el perfil 32 la densidad aparente del suelo varió de 0.9 a 1.25 g/cm³. En general, los valores de densidad más bajos se encontraron en el horizonte A del perfil, con valores que variaron de ~0.9 a 1 g/cm³. De 45 a 195 cm de profundidad, la densidad varió de 1 a 1.20 g/cm³. Esta tendencia ascendente con la profundidad indica una compactación progresiva, posiblemente influenciada por la presión de las capas superiores (Weil y Brady, 2017). La densidad de 1.20 g/cm³ a 195 cm se alinea con la humedad de ~40% (Figura 3.4) y una textura fina (96% de finos en B2, Figura 3.2), sugiriendo una retención de agua significativa influenciada por una porosidad reducida.

3.5 Porosidad y saturación del agua

La Figura 3.6 muestra los valores de porosidad total y saturación de agua de los perfiles de suelo 2 y 32 en función de la profundidad.

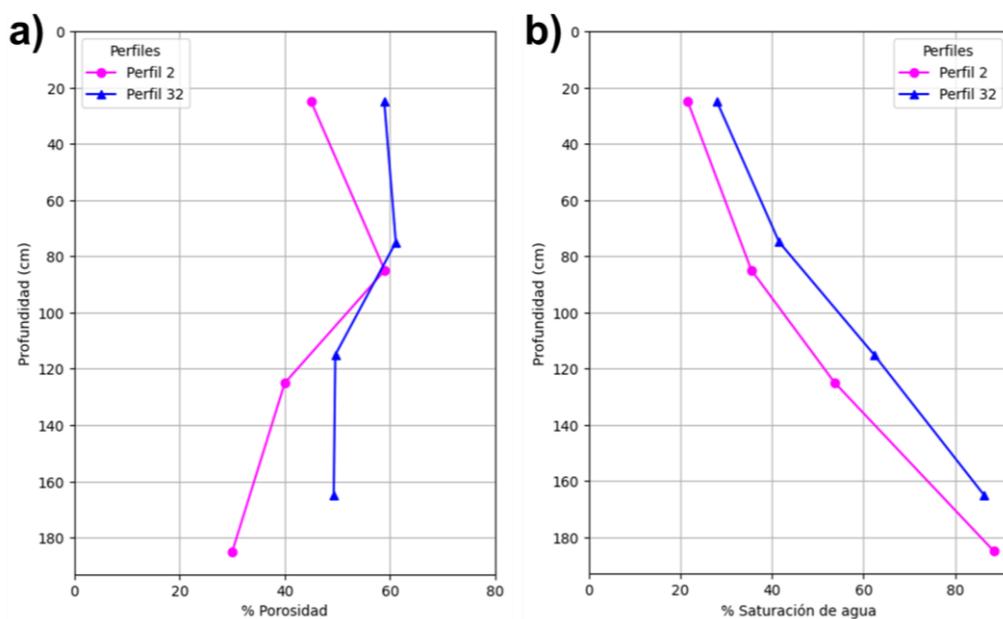


Figura 3.6 Porosidad total y saturación del suelo en función de la profundidad para los perfiles 2 y 32.

Los valores de porosidad (Figura 3.6a) para el perfil 2 variaron de 45% (25 cm de profundidad) a 30% (185 cm), reflejando en general una disminución con la

profundidad probablemente derivada de la compactación de los horizontes más profundos (B2 y B3) (sección 3.1). Para el perfil 32, la porosidad varió entre 59% (25 cm de profundidad) y 50% (165 cm), probablemente debido al contenido de partículas finas (~96%, sección 3.2), las cuales tienden a tener una mayor porosidad total que los suelos arenosos (Carter y Gregorich, 2008; Weil y Brady, 2017).

En contraste, los valores de saturación aumentaron con la profundidad en los perfiles 2 y 32 (Figura 3.6b). En el perfil 2, la saturación aumentó de 22% (25 cm de profundidad) a 88% (185 cm). En el perfil 32, la saturación varió de 28% (25 cm de profundidad) a 86% (165 cm), consistente con la humedad de ~33% observada a 165 cm de profundidad (sección 3.3) y la cercanía al nivel freático (~210 cm, sección 3.1, Figura 3.1c).

La variación en la porosidad y saturación refleja la influencia de la textura fina, la compactación, y/o los procesos de ascenso capilar de agua desde el acuífero somero de Matehuala. En este contexto, los cambios en la textura, densidad y los horizontes del suelo pudieron frenar el movimiento ascendente del agua por capilaridad en el perfil 2, especialmente entre los 145 y 165 cm, por la presencia del horizonte gypico observado a esta profundidad (sección 3.1 y 3.3), generando una mayor saturación de agua a esa profundidad. En contraste, en el perfil 32, la saturación cercana al 86% a profundidades mayores a ~150 cm indicaría una influencia significativa del nivel freático y el ascenso capilar, corroborando las observaciones realizadas en campo (sección 3.1).

3.6 Concentración de arsénico

La figura 3.7 muestra las concentraciones de arsénico de los perfiles 2, 6, 24, 30 y 32 en función de la profundidad, así como sus desviaciones estándar.

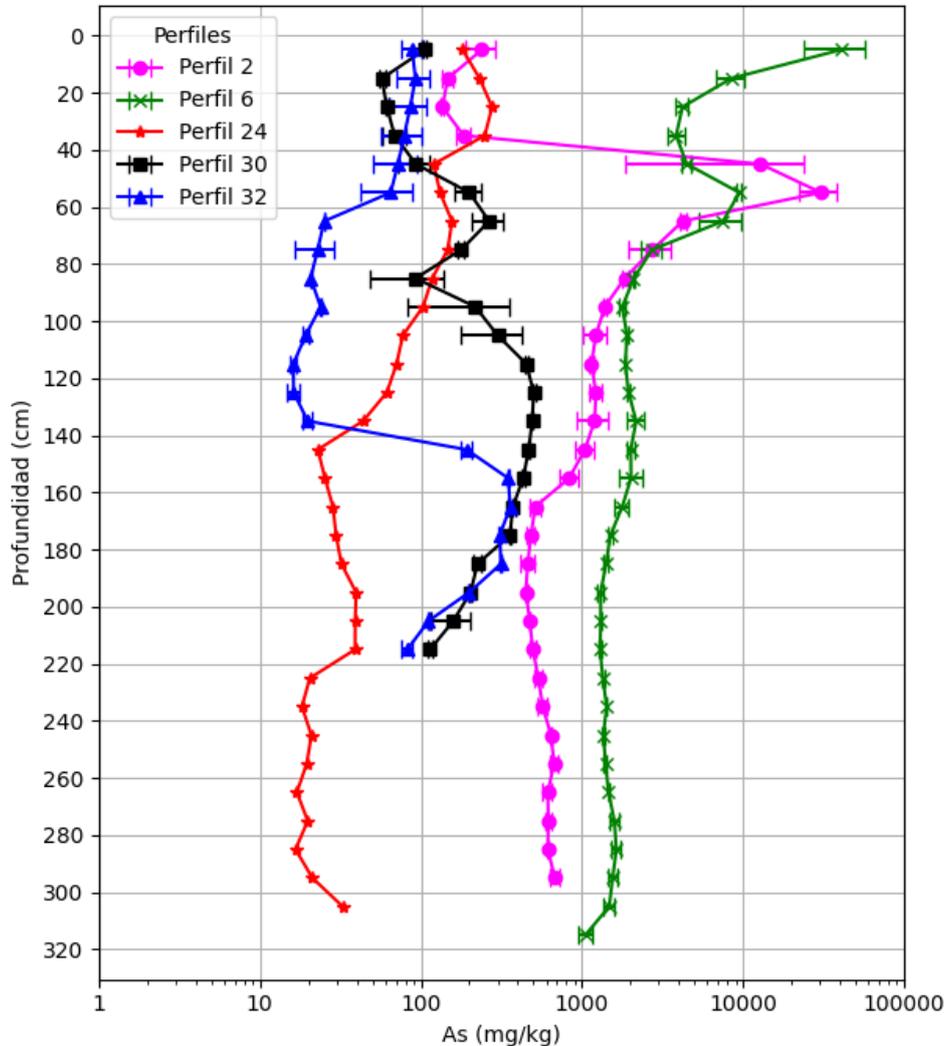


Figura 3.7 Concentraciones de arsénico del suelo en función de la profundidad para los perfiles 2, 6, 24, 30 y 32.

En general, las concentraciones de arsénico en los perfiles 2, 6 y 24 disminuyeron con la profundidad, con excepción del perfil 2 que mostró concentraciones relativamente bajas a menores profundidades, posiblemente derivadas de la deposición de suelo, material y basura menos contaminado sobre la superficie original del suelo. En contraste, las concentraciones de arsénico en los perfiles 30 y 32 mostraron incrementos de arsénico con la profundidad. Lo anterior evidencia el enriquecimiento de arsénico tanto por deposición superficial y lixiviación, en todos los perfiles de suelo, como por ascenso capilar, en los perfiles 30 y 32. Dicho enriquecimiento se debe a la deposición de residuos de arseniatos de calcio (Martínez-Villegas et al., 2013) así como al ascenso capilar de agua contaminada desde el acuífero (Gómez Hernández, 2021; Martínez-

Villegas et al., 2019). Las concentraciones de arsénico encontradas en los perfiles de suelo excedieron, en general, tanto los valores de fondo 4–35 mg/kg (Chiprés et al., 2009) como los límites máximos permisibles de arsénico en suelo de uso industrial 260 mg/kg (DOF, 2007), soportando la contaminación del sitio a nivel superficial, revelando la lixiviación de arsénico a lo largo del perfil del suelo y proveyendo evidencia adicional del ascenso capilar del arsénico desde el acuífero hacia los suelos que le sobreyacen.

3.7 Resistividad por horizonte

Los valores de resistividad eléctrica para los horizontes de los perfiles 2 y 32 se muestran en la figura 3.8. Los valores de resistividad variaron de ~17 a ~187 $\Omega\cdot\text{m}$ y disminuyeron con la profundidad.

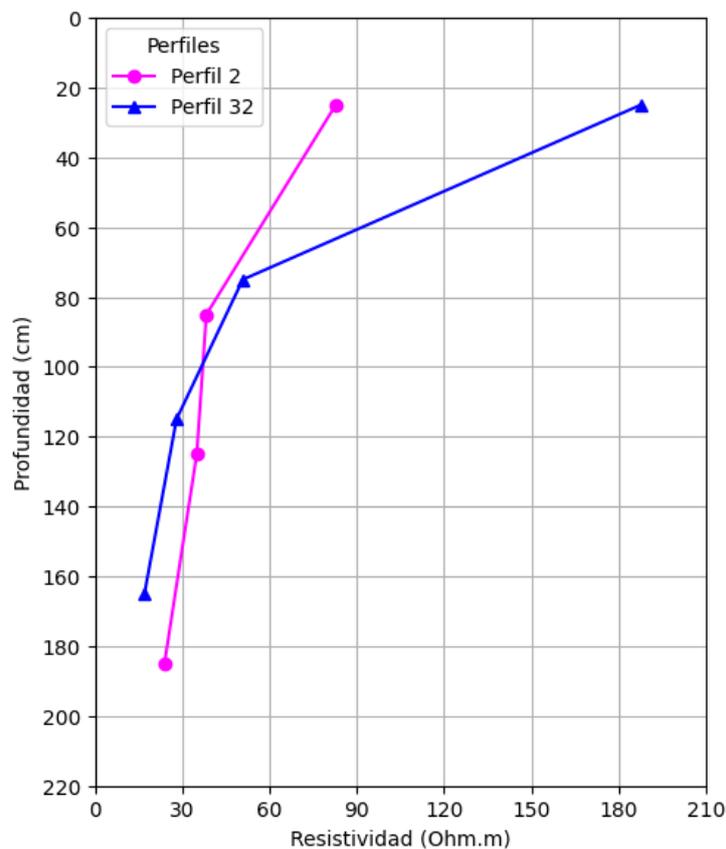


Figura 3.8 Resistividad aparente (pa) del suelo en función de la profundidad para los perfiles 2 y 32.

En el perfil 2, los valores de resistividad disminuyeron con la profundidad, con valores de ~83 $\Omega\cdot\text{m}$ a 30 cm (horizonte A), ~38 $\Omega\cdot\text{m}$ a 85 cm (horizonte B1), ~35 $\Omega\cdot\text{m}$ a 125 cm (horizonte B2) y ~24 $\Omega\cdot\text{m}$ a 190 cm (horizonte B3). La resistividad en el horizonte B3 se asoció a la alta saturación (88% a 185 cm, sección 3.5), que contribuye a disminuir la resistividad eléctrica y a la acumulación de yeso

(sección 3.1) que incrementa la conductividad eléctrica. Estudios previos han demostrado que el incremento de la conductividad eléctrica está asociado a una mayor saturación de agua (Burger et al., 2006; Everett, 2013; Telford et al., 1990).

En el perfil 32, la resistividad también disminuyó con la profundidad, con valores de $\sim 187 \Omega \cdot m$ a 25 cm (horizonte A), $\sim 50 \Omega \cdot m$ a 75 cm (horizonte AB), $\sim 28 \Omega \cdot m$ a 115 cm (horizonte B1) y $\sim 17 \Omega \cdot m$ a 170 cm (horizonte B2). Estos resultados fueron consistentes con la humedad volumétrica y la saturación de 86% a 165 cm (sección 3.3 y 3.5), el contenido de finos ($\sim 96\%$, sección 3.2) y el ascenso capilar desde el manto freático (sección 3.1) ubicado a ~ 210 cm de profundidad.

3.8 Perfiles TRE-PEM

En esta sección se presentan los resultados obtenidos de la aplicación de la técnica TRE-PEM realizado en la zona de Matehuala, donde se generaron diez secciones geoelectricas correspondientes a los puntos de muestreo de los perfiles 2, 6, 24, 30 y 32. Se elaboraron cinco secciones a una profundidad máxima de ~ 2.3 m y otras cinco de ~ 6 m, permitiendo caracterizar las variaciones de resistividad eléctrica en el subsuelo. Los valores de resistividad registrados variaron entre 9 y $150 \Omega \cdot m$, con capas de espesores entre ~ 2 m y >4 m, reflejando un subsuelo heterogéneo. Las resistividades observadas se compararon con los rangos de resistividad típicos de materiales del área, como arcillas, limos, arenas, gravas y yesos (Tabla 3.1), con la finalidad de inferir la presencia de posibles acuíferos y variaciones litológicas. Las condiciones locales, como la alta salinidad del agua subterránea (2.6 g/L), medida en una surgencia de agua a una distancia de 15 m del perfil 32, incrementó la conductividad eléctrica del subsuelo, especialmente en las zonas de mayor saturación.

Tabla 3.1 Rangos de resistividades eléctricas de materiales geológicos encontramos en Matehuala, S.L.P.

Material	Rango de Resistividad ($\Omega \cdot m$)	Fuente
Agua subterránea	1 – 20	Orellana (1982)
Arcilla	1 – 30 6.34	Arlandi (2005) Rodríguez Rodríguez (2016)
Gravas y arenas con potencial acuífero	12.1 – 38.7	Rodríguez Rodríguez (2016)
Limos y arcilla	41.7 – 65.1	Rodríguez Rodríguez (2016)
Limo	20 – 100	Arlandi (2005)
Arena	100 – 200	Arlandi (2005)

Arenas, yeso con arcillas	117 – 229	Rodríguez Rodríguez (2016)
Yeso con arcilla	150 – 500	Arlandi (2005)
Grava	100 – 300 377	Arlandi (2005) Rodríguez Rodríguez (2016)
Yeso	791 – 1300 1000 – 5000	Rodríguez Rodríguez (2016) Arlandi (2005)
Caliza	2000 – 100000	Goodman (1989)

A continuación, se describen las secciones geoelectricas obtenidas, destacando patrones y anomalías relevantes para el estudio.

3.8.1 Sección geoelectrica del perfil 2

La Figura 3.9 muestra las secciones geoelectricas del perfil 2 a ~2.3 m y ~6 m de profundidad, con resistividades que variaron entre 9 y 150 $\Omega \cdot m$.

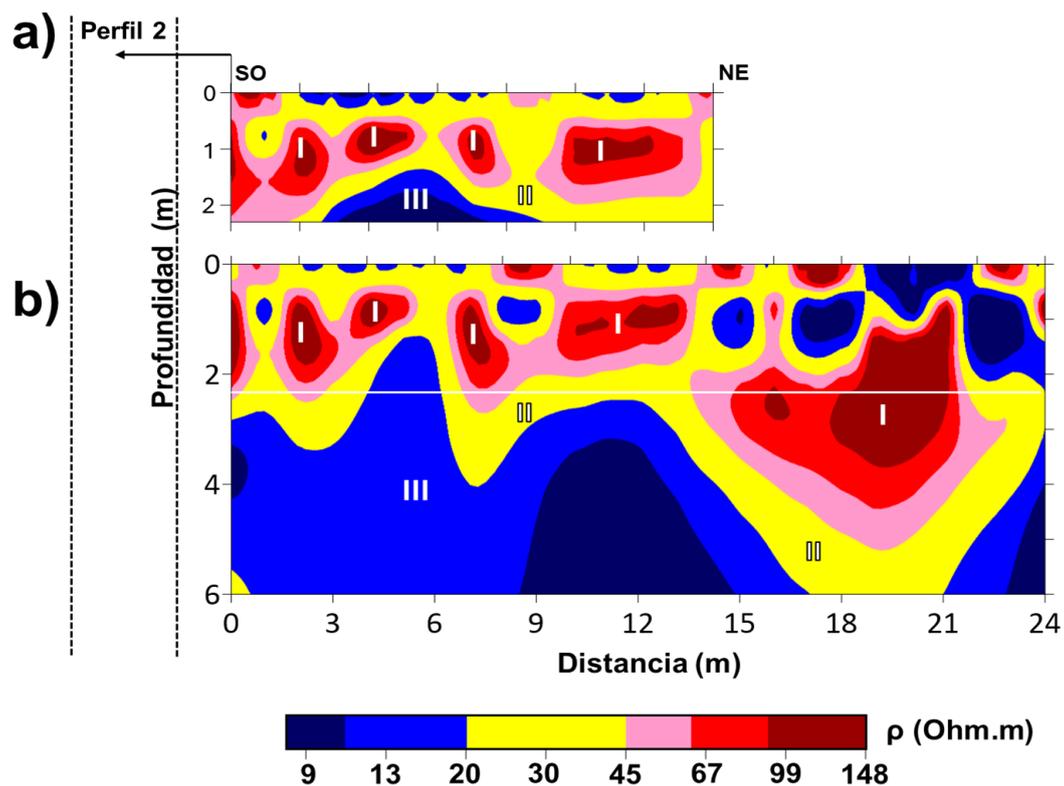


Figura 3.9 Secciones geoelectricas de 14 m y 24 m de longitud del perfil 2 a a) ~2.3 y b) ~6 m de profundidad, obtenidas mediante perfilaje electromagnético utilizando el CMD-MiniExplorer 6L y el EM31-MK2 Data Loggin System, respectivamente. Las líneas punteadas muestran la proyección de la ubicación del perfil de muestreo 2, localizado a 2.5 metros de distancia de los perfilajes electromagnéticos. La línea blanca indica la profundidad de trabajo del primer perfil.

En la sección de 2.3 m de profundidad (Figura 3.9a), se identificaron varios

cuerpos resistivos discontinuos etiquetados como I, con resistividades superiores a $45 \Omega \cdot m$, distribuidos a lo largo de los 14 m de longitud y desde los ~ 0.5 m hasta 2 m de profundidad. Estos cuerpos alcanzaron espesores mayores a ~ 1 m, con resistividades que en general son consistentes con los valores medidos en los horizontes de suelo del perfil 2 de $\sim 83 \Omega \cdot m$ a 30 cm y $\sim 38 \Omega \cdot m$ a 85 cm (Figura 3.8). Los valores de resistividad del cuerpo I ($45-150 \Omega \cdot m$) son consistentes con los rangos de resistividad característicos de materiales como limos y arcillas ($41.7-65.1 \Omega \cdot m$), arenas ($100-200 \Omega \cdot m$), gravas ($100-300 \Omega \cdot m$) o arenas con yeso y arcillas ($117-229 \Omega \cdot m$) (Tabla 3.1). Según los resultados de textura del perfil de suelo 2 (Figura 3.2), los horizontes B1 a B3, ubicados entre 0.5 y ~ 2.3 m de profundidad, presentan entre un 79% y un 95% de partículas finas (limos y arcillas) y un porcentaje de arenas que varió de 5% a 21%. Además, se observó una capa gípsica en el techo del horizonte B3, lo que sugiere que los cuerpos I podrían corresponder a depósitos de arenas con yeso, limos y arcillas. Asimismo, se observaron cuerpos con resistividades entre $20-35 \Omega \cdot m$ (cuerpo II) entre las discontinuidades del cuerpo I, sugiriendo transiciones a materiales con mayor contenido de arcillas. En general, el cuerpo II se extendió a lo largo de toda la sección y en algunas zonas hasta ~ 2.3 m de profundidad. Además, se observó un cuerpo menos resistivo etiquetado como III, con valores inferiores a $20 \Omega \cdot m$, ubicado entre los 2.5 y 8.5 m de distancia y a una profundidad aproximada de 1.5 m. Este cuerpo, de alta conductividad, probablemente corresponde a agua subterránea ($1-20 \Omega \cdot m$) o arcilla saturada ($1-30 \Omega \cdot m$) (Tabla 3.1), influenciada por la salinidad del agua en la zona (2.6 g/L, detectada en una noria a 15 m del perfil 32).

En la sección de ~ 6 m de profundidad (Figura 3.9b), se observaron también los cuerpos I con resistividades superiores a $45 \Omega \cdot m$, a lo largo de los 24 m de distancia de la sección geoelectrica, lo que indicaría continuidad vertical y horizontal, como es el caso la parte NE de la sección geoelectrica. En esta parte NE se observó un cuerpo resistivo (cuerpo I) que presentó un espesor significativo de hasta ~ 7 m de longitud y ~ 4.5 m de profundidad. Los cuerpos I podrían corresponder a depósitos más extensos de arenas con yesos, limos y arcillas, consistente con los datos texturales y los rangos de resistividad de los horizontes de suelo perfil de suelo 2 (Figura 3.2 y 3.8). Los cuerpos etiquetados como II se extendieron a lo largo de toda la sección, alcanzando profundidades de hasta ~ 6 m en el lado NE. Por otro lado, el cuerpo menos resistivo, el etiquetado como III, con resistividades menores a $20 \Omega \cdot m$, se observó a lo largo de 17 m de distancia, desde una profundidad de ~ 1.5 m, alcanzando espesores mayores a ~ 4.5 m. Esta capa conductiva podría corresponder a la franja capilar o al acuífero somero de Matehuala (Martínez-Villegas et al., 2019).

La heterogeneidad observada en el perfil 2, con cuerpos resistivos (I) intercalados con los cuerpos II y III, reflejó el típico ambiente de Matehuala, caracterizado por depósitos aluviales o lacustres con una compleja estratigrafía

(Grande López et al., 1967; Rodríguez Rodríguez, 2016; SGM, 2012). Asimismo, la alta salinidad del agua subterránea y por lo tanto de la franja capilar también pudo influir significativamente en las resistividades bajas del cuerpo III, mientras que los cuerpos resistivos (I y II) indican materiales menos saturados o más consolidados, probablemente enriquecidos con yeso.

Por otro lado, en el perfil 2, las concentraciones de arsénico disminuyeron con la profundidad (Figura 3.7), hasta alcanzar 679 mg/kg a 2.95 m, con un patrón típico de lixiviación de arsénico (de Menezes et al., 2020; Komonweeraket et al., 2015), desde la superficie del suelo, hacia el subsuelo. Derivado, en este caso, de la disolución de residuos de arseniatos de calcio (Martínez-Villegas et al., 2013). En el perfil 2, la franja capilar o acuífero somero se identificó a >3 m de profundidad, según la proyección cerca del perfil de suelo 2 (líneas punteadas, Figura 3.9b). Debido a que la información sobre concentraciones de arsénico sólo se pudo obtener, en este perfil, hasta los 2.95 m, no fue posible observar acumulación de arsénico en la franja capilar. De haber sido el caso, se posiblemente se podría haber observado un incremento del arsénico a partir de los 3 m de profundidad en el perfil 2. En esta zona del área de estudio la franja capilar alcanza hasta los ~6 m de profundidad en algunas regiones de la sección geoelectrica 2, lo que abre la posibilidad de encontrar incrementos de arsénico a estas profundidades, por ascenso capilar del contaminante, desde el acuífero somero contaminado de Matehuala, hacia el subsuelo que le sobreyace.

3.8.2 Sección geoelectrica del perfil 6

La Figura 3.10 muestra las secciones geoelectricas del perfil 6 a ~2.3 m y ~6 m de profundidad, con resistividades que variaron entre 9 y 150 $\Omega \cdot m$.

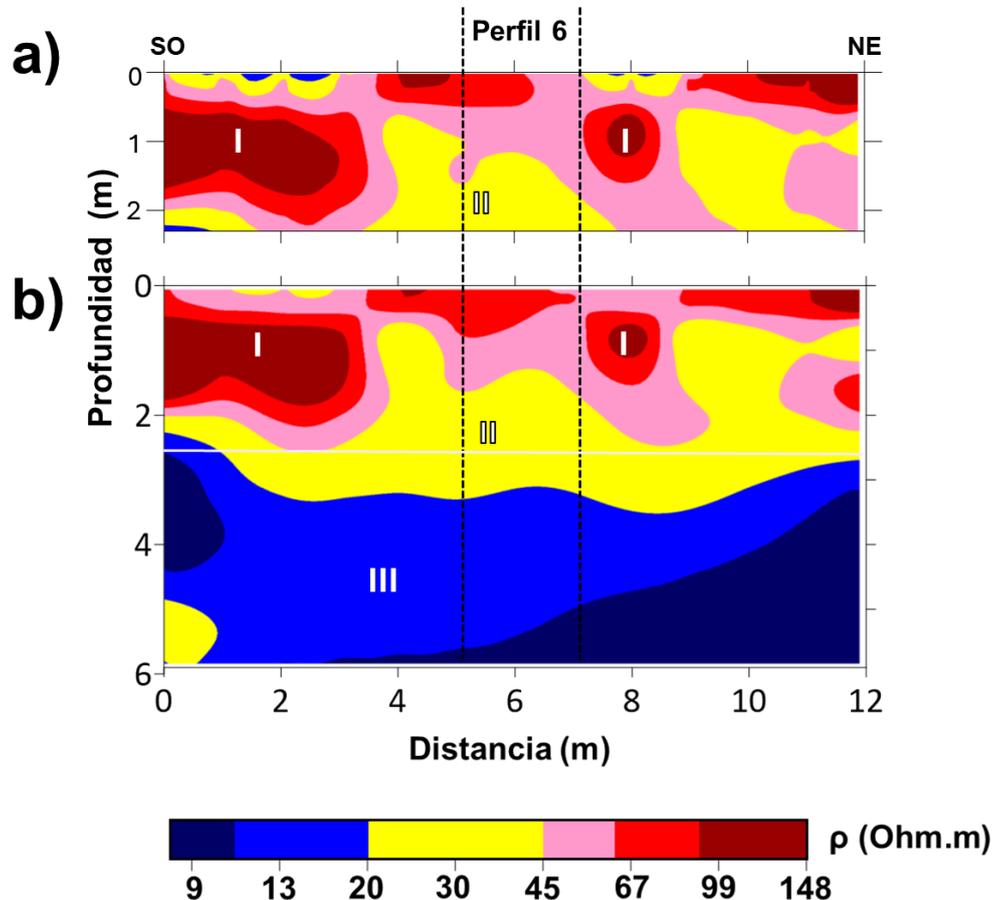


Figura 3.10 Secciones geoelectricas de 12 m de longitud del perfil 6 a a) ~2.3 y b) ~6 m de profundidad, obtenidas mediante perfilaje electromagnetico utilizando el CMD-MiniExplorer 6L y el EM31-MK2 Data Loggin System, respectivamente. Las líneas punteadas muestran la proyección de la ubicación del perfil de muestreo 6, localizado a dos metros de distancia de los perfilajes electromagneticos. La línea blanca indica la profundidad de trabajo del primer perfil.

En la sección de ~2.3 m de profundidad (Figura 3.10a), se identificaron cuerpos resistivos discontinuos etiquetados como I, con resistividades superiores a 45 $\Omega \cdot m$, ubicados de ~0.5 m a ~2 m de profundidad y distribuidos a lo largo de los 0 y los 3 m de longitud, así como a los 8 m de longitud. El cuerpo I, del lado SO alcanzó un espesor de ~1.5 m, mientras que el cuerpo del lado NE alcanzó un espesor de ~1 m. Las resistividades observadas en estos cuerpos (45-150 $\Omega \cdot m$) fueron más altas de lo esperado (1-30 $\Omega \cdot m$ para arcillas o 41-65 $\Omega \cdot m$ para limos y arcillas) (Tabla 3.1) para los horizontes AB, B1 y B2 (0-2.3 m de profundidad), compuestos principalmente de arcillas. Sin embargo, la presencia de arenas en la textura arcillo-arenosa del horizonte AB (Anexo 2) y posibles inclusiones de yeso, comunes en la zona de Matehuala (150-500 $\Omega \cdot m$, Tabla 3.1), podrían explicar estas resistividades más altas, sugiriendo que los cuerpos I podrían ser

lentes de arenas con yeso y arcillas, donde el yeso podría estar incrementando la resistividad, a pesar del contenido de arcilla y limos. Además, se observó un cuerpo menos resistivo etiquetado como II, con valores de resistividad entre 20 y 35 $\Omega \cdot m$, sugiriendo transiciones a materiales con mayor contenido de arcillas.

En la sección de ~ 6 m de profundidad (Figura 3.10b), se observaron también los cuerpos resistivos I, con resistividades superiores a 45 $\Omega \cdot m$, entre ~ 0.5 m y ~ 2.5 m de profundidad, y los cuerpos menos resistivos II, con resistividades entre 20 y 35 $\Omega \cdot m$ hasta ~ 3 m de profundidad, lo que indica continuidad vertical de estas unidades litológicas. Asimismo, se observó un cuerpo conductivo etiquetado como III, con resistividades entre 9 y 20 $\Omega \cdot m$, el cual se encontró a lo largo de todo el perfil (12 m) a una profundidad aproximada de ~ 3 m, extendiéndose hasta los 6 m de profundidad. Este cuerpo III, de alta conductividad, probablemente corresponde a un cuerpo con presencia de agua subterránea (1-20 $\Omega \cdot m$) o arcilla saturada (1-30 $\Omega \cdot m$) (Tabla 3.1), influenciada por la salinidad del agua en la zona (2.6 g/L). La extensión vertical y lateral de este cuerpo sugiere la presencia del nivel freático y por lo tanto una franja capilar amplia.

Por otro lado, y similar al perfil 2, en el perfil 6 las concentraciones de arsénico disminuyeron con la profundidad (Figura 3.7), hasta alcanzar 1,049 mg/kg a 3.15 m, profundidad máxima a la que se pudieron tomar datos de concentración de arsénico en el subsuelo. De acuerdo con la sección geoelectrica de este perfil, la franja capilar o acuífero somero se identificó a más de ~ 3 m de profundidad (Figura 3.10b), por lo que nuevamente el perfil de concentraciones de arsénico fue el típico de un proceso de lixiviación de arsénico desde la superficie hacia el subsuelo, derivado de la disolución de residuos de arseniatos de calcio (Martínez-Villegas et al., 2013). Nuevamente, en el perfil 6 no fue posible observar acumulación de arsénico en la franja capilar porque no se llegó a muestrear suelo a la profundidad de la franja capilar (>3 m) (Figura 3.10).

3.8.3 Sección geoelectrica del perfil 24

La Figura 3.11 muestra las secciones geoelectricas del perfil 24 a ~2.3 m y ~6 m de profundidad, con resistividades que variaron de 9 a 150 $\Omega \cdot m$.

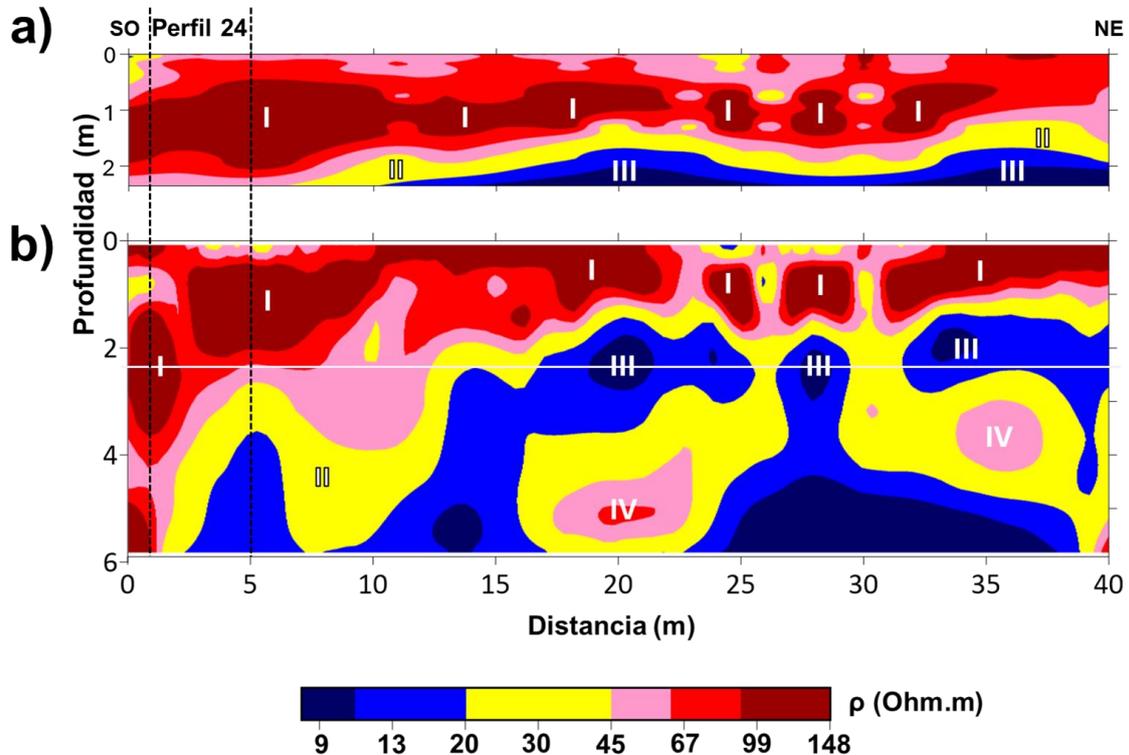


Figura 3.11 Secciones geoelectricas de 40 m de longitud del perfil 24 a a) ~2.3 y b) ~6 m de profundidad, obtenidas mediante perfilaje electromagnético utilizando el CMD-MiniExplorer 6L y el EM31-MK2 Data Logging System, respectivamente. Las líneas punteadas muestran la proyección de la ubicación del perfil de muestreo 24, localizado a dos metros de distancia de los perfilajes electromagnéticos. La línea blanca indica la profundidad de trabajo del primer perfil.

En la sección de ~2.3 m de profundidad (Figura 3.11a), se identificaron varios cuerpos resistivos con resistividades superiores a 45 $\Omega \cdot m$ etiquetados como I. Un cuerpo continuo ($>45 \Omega \cdot m$) que se extiende en la parte SO de la sección hasta los ~20 m de distancia, con un espesor mayor a ~1 m. Similarmente, en la parte NE se observaron tres cuerpos discontinuos ($>45 \Omega \cdot m$) con espesores aproximados de ~1 m. Estas resistividades (45-150 $\Omega \cdot m$) son consistentes con la presencia de materiales como limos y arcillas (41.7-65.1 $\Omega \cdot m$), arenas (100-200 $\Omega \cdot m$), gravas (100-300 $\Omega \cdot m$), o arenas con yeso y arcillas (117-229 $\Omega \cdot m$), comúnmente encontradas en Matehuala (Tabla 3.1). Basado en las texturas identificadas en el área de estudio (Figura 3.2 y Anexo 2), es posible que los cuerpos I representen depósitos de arenas con yeso, limos y arcillas. Debajo del cuerpo I, se observó un cuerpo continuo etiquetado como II con resistividades que variaron de 20 a 40 $\Omega \cdot m$, con espesores menores a ~0.5 m, posiblemente con mayor contenido de arcillas. También se observó un cuerpo conductor

etiquetado como III, con resistividades inferiores a $20 \Omega \cdot m$, localizado entre los ~ 10 m y 40 m de longitud, a una profundidad de ~ 2 m. Este cuerpo, de alta conductividad, probablemente corresponde a arcilla saturada ($1-30 \Omega \cdot m$) o agua subterránea ($1-20 \Omega \cdot m$) (Tabla 3.1).

En la sección de 6 m de profundidad (Figura 3.11b), los cuerpos resistivos I con resistividades superiores a $45 \Omega \cdot m$ se encontraron entre los ~ 0.5 m y hasta los ~ 4 m de profundidad, indicando continuidad vertical de estas unidades litológicas. De igual forma se observó el cuerpo menos resistivo II, a lo largo de toda la sección. El cuerpo conductor III, con resistividades inferiores a los $20 \Omega \cdot m$, mostró discontinuidades en su estructura. Entre estas discontinuidades aparecieron los cuerpos IV, con resistividades entre ~ 45 y $67 \Omega \cdot m$, sugiriendo la presencia de materiales de limos y arcillas ($41.7-65.1 \Omega \cdot m$) o gravas y arenas ($12.1-38.7 \Omega \cdot m$) (Tabla 3.1). Además, los valores de resistividad del cuerpo IV posiblemente están influenciados por la presencia de yeso en el área de estudio o una menor saturación de agua.

La heterogeneidad del perfil 24, con cuerpos resistivos (I) y cuerpos conductivos (III), junto con las discontinuidades y cuerpos intermedios (IV), refleja el ambiente heterogéneo y sedimentario típico de Matehuala, influenciado por la presencia de agua subterránea salinizada (Martínez-Villegas et al., 2019).

Por otro lado, en el perfil 24, se observó que las concentraciones de arsénico disminuyen con la profundidad (Figura 3.7), similar a lo que ocurre en los perfiles 2 y 6, hasta alcanzar 32.73 mg/kg a 3.05 m, profundidad máxima a la que se pudieron tomar datos de concentración de arsénico en el subsuelo. Asimismo, los valores de resistividad menores a $20 \Omega \cdot m$, asociados a la franja capilar, se identificaron a más de ~ 4 m de profundidad en la sección geoelectrica, teniendo como referencia la ubicación del perfil de suelo 24 (líneas punteadas, Figura 3.11b). Por lo anterior, nuevamente se observó un patrón de lixiviación de arsénico desde la superficie hacia el subsuelo, derivado de la disolución de residuos de arseniatos de calcio (Martínez-Villegas et al., 2013). Además, dado que los datos de arsénico no alcanzaron profundidades mayores a ~ 4 m, no fue posible observar nuevamente acumulación de arsénico en la franja capilar.

3.8.4 Sección geoelectrica del perfil 30

La Figura 3.12 muestra las secciones geoelectricas del perfil 30 a ~2.3 m y ~6 m de profundidad, con resistividades que variaron entre 9 y 150 $\Omega \cdot m$.

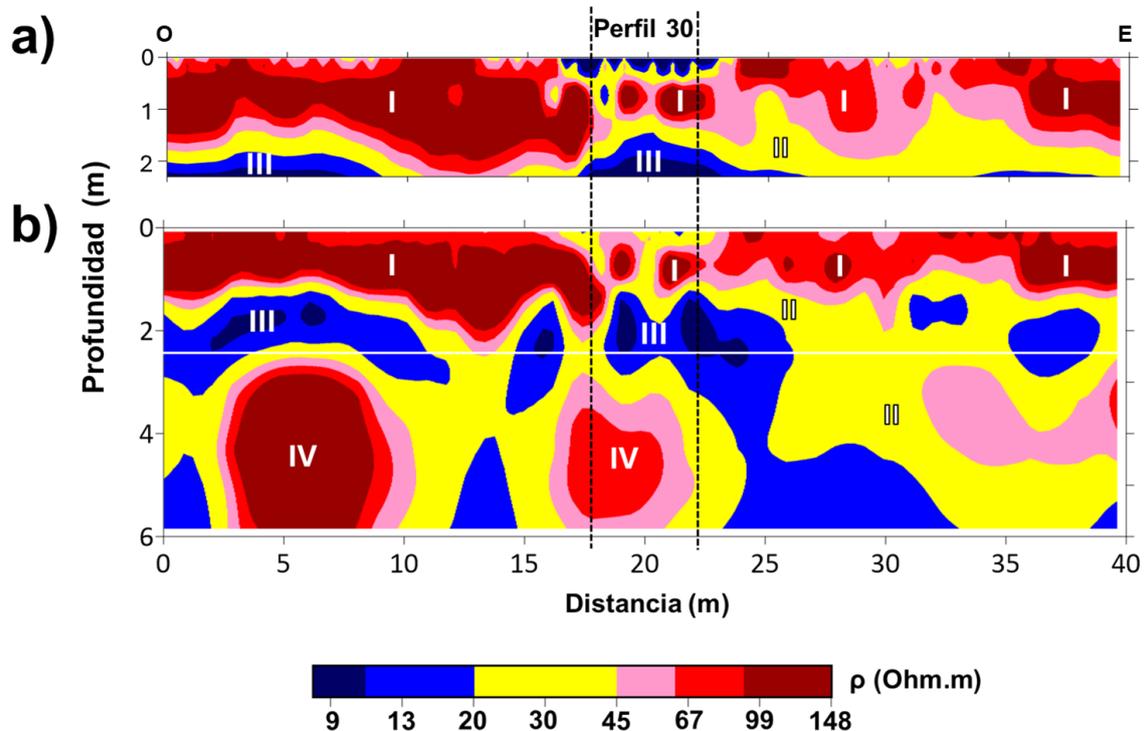


Figura 3.12 Secciones geoelectricas de 40 m de longitud del perfil 30 a a) ~2.3 y b) ~6 m de profundidad, obtenidas mediante perfilaje electromagnetico utilizando el CMD-MiniExplorer 6L y el EM31-MK2 Data Logging System, respectivamente. Las líneas punteadas muestran la proyección de la ubicación del perfil de muestreo 30, localizado a dos metros de distancia de los perfilajes electromagneticos. La línea blanca indica la profundidad de trabajo del primer perfil.

En la sección de ~2.3 m de profundidad (Figura 3.12a), en la parte más superficial se observan cuerpos resistivos etiquetados como I, con valores mayores a 45 $\Omega \cdot m$. Uno de los cuerpos se extendió desde la parte O de la sección hasta los ~16 m de longitud, alcanzando una profundidad de ~2.3 m. Adicionalmente, se observaron varios cuerpos discontinuos distribuidos entre los ~20 m y los 40 m de longitud y hasta una profundidad de ~2 m. Las resistividades encontradas (45-150 $\Omega \cdot m$) fueron consistentes con materiales como limos y arcillas (41.7-65.1 $\Omega \cdot m$), arenas (100-200 $\Omega \cdot m$) o arenas con yeso y arcillas (117-229 $\Omega \cdot m$), comúnmente encontradas en Matehuala (Tabla 3.1). Asimismo, la presencia de arenas (13%-16%, Figura 3.2b) y yeso, junto con una humedad moderada (9%-22%, Figura 3.4), explican las resistividades observadas en los cuerpos I. De igual forma se observó un cuerpo con menor resistividad (20-40 $\Omega \cdot m$) etiquetado como II, que se extiende a lo largo de la sección y alcanza espesores de hasta ~1 m. Las resistividades del cuerpo II fueron consistentes

con materiales con mayor contenido de arcillas. A una profundidad de ~2 m, se observaron cuerpos conductores etiquetados como III, con resistividades inferiores a 20 $\Omega\cdot m$. Estas resistividades fueron consistentes con la alta proporción de finos (93%, Figura 3.2b) observadas en el horizonte B2 (~1-2 m de profundidad) y el aumento de humedad (35%-47%) observada en este rango de profundidad (Figura 3.1b y 3.4). La humedad observada a estas profundidades se asoció al ascenso capilar desde el manto freático (Figura 3.1b y 3.4), que da lugar a la presencia de arcilla saturada (1-30 $\Omega\cdot m$) o agua subterránea salina (1-20 $\Omega\cdot m$) (Tabla 3.1).

En la sección de 6 m de profundidad (Figura 3.12b), se observaron varios cuerpos resistivos I (>45 $\Omega\cdot m$) hasta ~2 m de profundidad, un cuerpo continuo en la parte O hasta los ~20 m de distancia y varios cuerpos discontinuos en la parte E. Además, se observó un cuerpo II en toda la sección con valores de resistividad que variaron de 20 a 40 $\Omega\cdot m$. En la parte E, el cuerpo II tiene un espesor que alcanza más de 4 m de profundidad. De igual forma, se observaron los cuerpos conductores III, con resistividades inferiores a 20 $\Omega\cdot m$. Dentro de estos cuerpos III, se encontraron dos cuerpos resistivos IV, con valores de resistividad mayores a 45 $\Omega\cdot m$, ubicados a ~5 m y 20 m de distancia, respectivamente, y con espesores mayores a ~3 m. Estos cuerpos podrían corresponder a lentes de materiales como arenas o limos con yeso menos saturados (117-229 $\Omega\cdot m$) (Tabla 3.1).

La heterogeneidad del perfil 30, con cuerpos resistivos (I), capas conductivas (III) y cuerpos intermedios (II y IV), refleja, nuevamente, el ambiente sedimentario típico de Matehuala, caracterizado por depósitos aluviales o lacustres (Grande López et al., 1967; Rodríguez Rodríguez, 2016; SGM, 2012). En general, la alta salinidad del agua subterránea y el aumento de humedad con la profundidad influye significativamente en las resistividades bajas de las zonas III, mientras que los cuerpos resistivos I y los cuerpos II y IV sugieren materiales menos saturados, probablemente enriquecidos con yeso.

Por otro lado, en el perfil 30, las concentraciones de arsénico incrementaron a partir de los 0.85 m de profundidad (Figura 3.7), donde alcanzaron valores de hasta 501.5 mg/kg. Interesantemente, y a diferencia de los perfiles 2, 6 y 24, en este perfil, a ~1.4 m se observaron resistividades menores a 20 $\Omega\cdot m$ (Figura 3.12b), mismas que indican la presencia de la franja capilar y/o el nivel freático del acuífero somero de la ciudad de Matehuala. Lo anterior explica la presencia de valores elevados de arsénico a partir de los 0.85 m de profundidad derivados del ascenso capilar de agua contaminada con arsénico, desde el acuífero somero contaminado de Matehuala hacia el suelo que le sobreyace. Estos resultados confirman los hallazgos reportados por Martínez-Villegas et al., (2019) y proporcionan un segundo perfil donde se ha observado acumulación de arsénico en la la franja capilar asociado a ascenso capilar desde el acuífero somero contaminado. Si bien esto aún no permite generalizar el fenómeno, sí

proporciona evidencia de que ocurre atenuación natural.

3.8.5 Sección geoelectrica del perfil 32

La Figura 3.13 muestra las secciones geoelectricas del perfil 32 a ~2.3 m y ~6 m de profundidad, con resistividades que variaron entre 9 y 150 $\Omega\cdot m$.

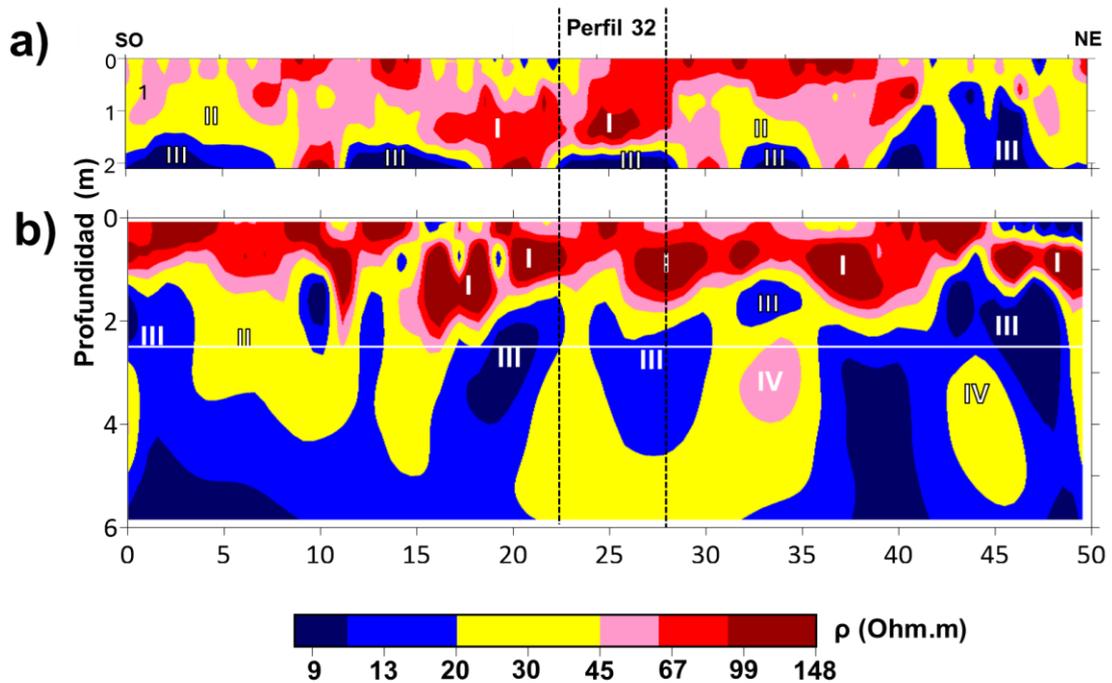


Figura 3.13 Secciones geoelectricas de 50 m de longitud del perfil 32 a a) ~2.3 y b) ~6 m de profundidad, obtenidas mediante perfilaje electromagnético utilizando el CMD-MiniExplorer 6L y el EM31-MK2 Data Loggin System, respectivamente. Las líneas punteadas muestran la proyección de la ubicación del perfil de muestreo 32, localizado a dos metros de distancia de los perfilajes electromagnéticos. La línea blanca indica la profundidad de trabajo del primer perfil.

En la sección de 2.3 m de profundidad (Figura 3.13a), en la parte más superficial se observaron cuerpos discontinuos resistivos etiquetados como I, con valores mayores a 45 $\Omega\cdot m$, distribuidos a lo largo de los 50 m de la sección y hasta profundidades de ~2.3 m. Estas resistividades (45-150 $\Omega\cdot m$) fueron consistentes con materiales de limos y arcillas (41.7-65.1 $\Omega\cdot m$), arenas (100-200 $\Omega\cdot m$) o arenas con yeso y arcillas (117-229 $\Omega\cdot m$), comunes en Matehuala (Tabla 3.1). Aunque se esperaba que las resistividades fueran menores (de 1-30 $\Omega\cdot m$ para arcilla o de 41.7-65.1 $\Omega\cdot m$ para limos y arcillas) (Tabla 3.1) por la alta proporción de partículas finas (Figura 3.2 c) observadas de los horizontes A (90%) al B1 (96%), la presencia de arenas (4%-10%) y posiblemente yeso, junto con una humedad moderada (12%-22%, Figura 3.4), explican las resistividades relativamente altas encontradas en los cuerpos I. Entre las discontinuidades del

cuerpo I, se observan capas menos resistivas etiquetadas como II, con valores de resistividad de 20 a 40 $\Omega\cdot\text{m}$. Los cuerpos II se observaron a lo largo de toda la sección y alcanzaron espesores de hasta ~ 2 m. Las resistividades identificadas en el cuerpo II, podrían indicar la presencia de un mayor contenido de arcilla en comparación al cuerpo I. De igual forma, se identificó la presencia de cuerpos con resistividades menores a 20 $\Omega\cdot\text{m}$ (cuerpos III), ubicados a lo largo de toda la sección y a profundidades de entre ~ 0.5 y 1.5 m. Los valores de resistividad de los cuerpos III son consistentes con la mayor proporción de partículas finas identificadas en el horizonte B2 (96%, Figura 3.2) y los valores de humedad (28%-41%, Figura 3.4) identificados a partir de ~ 1 m de profundidad, asociados al ascenso capilar desde el manto freático (sección 3.1). Por lo anterior, el cuerpo III se asoció a la presencia de arcilla saturada (1-30 $\Omega\cdot\text{m}$) o agua subterránea salina (1-20 $\Omega\cdot\text{m}$) (Tabla 3.1).

En la sección de 6 m de profundidad (Figura 3.13b), se observan cuerpos resistivos discontinuos I, con resistividades superiores a 45 $\Omega\cdot\text{m}$, distribuidos entre 0.5 m y 2.5 m de profundidad, indicando continuidad vertical de estas unidades litológicas. También se observan cuerpos menos resistivos II, con valores de resistividad de 20 a 40 $\Omega\cdot\text{m}$. De igual forma, se observan los cuerpos conductores discontinuos III, con resistividades inferiores a 20 $\Omega\cdot\text{m}$, extendiéndose a lo largo de los 50 m de la sección, ubicados desde ~ 1 m y hasta los 6 m de profundidad. En la parte centro-NE de la sección, se observan cuerpos más resistivos etiquetados como IV, con resistividades entre ~ 30 y 45 $\Omega\cdot\text{m}$, ubicados entre cuerpos más conductores III. Estas zonas intermedias podrían corresponder a lentes de materiales menos saturados, como limos y arcillas (41.7-65.1 $\Omega\cdot\text{m}$) o arenas con yeso (Tabla 3.1).

La heterogeneidad del perfil 32, con cuerpos resistivos discontinuos (I) en los horizontes superiores y capas conductivas (III) a mayor profundidad, así como cuerpos con resistividades intermedias (II y IV), refleja, nuevamente, un ambiente sedimentario típico de Matehuala, caracterizado por depósitos aluviales o lacustres (Grande López et al., 1967; Rodríguez Rodríguez, 2016; SGM, 2012). La alta salinidad del agua subterránea (2.6 g/L) y el aumento de humedad con la profundidad influyen significativamente en las resistividades bajas (cuerpos III), mientras que los cuerpos resistivos I y las zonas II y IV sugieren materiales menos saturados, probablemente enriquecidos con yeso y arcilla.

Por otro lado, y similar al perfil 30, en el perfil 32, las concentraciones de arsénico incrementaron a partir de los 1.35 m de la profundidad (Figura 3.7), donde alcanzaron valores de hasta 359.27 mg/kg derivado de la acumulación de arsénico que origina el ascenso capilar de agua contaminada con arsénico, desde el acuífero somero contaminado.

3.9 Delimitación de la frontera capilar

Dada la importancia de la franja capilar en la presencia de arsénico en el suelo que sobreyace el acuífero, en esta sección se utilizaron los datos de humedad volumétrica (sección 3.3), grado de saturación (sección 3.5) y de las secciones geoelectricas (sección 3.8) para delimitar la profundidad de la franja capilar. En general, el techo de la franja capilar se definió inicialmente con el perfil 32, donde la resistividad aparente (ρ_a) alcanzó un valor de $20 \Omega \cdot m$ a ~ 1.7 m, correspondientes al techo de la franja capilar (Figura 3.14). Esta definición “el techo de la franja capilar comienza a partir de una resistividad de $20 \Omega \cdot m$ ” se utilizó para delimitar el techo de la franja capilar en los demás perfiles y elaborar el mapa de la distribución del techo de la franja capilar en una sección del área de estudio (sección 3.10).

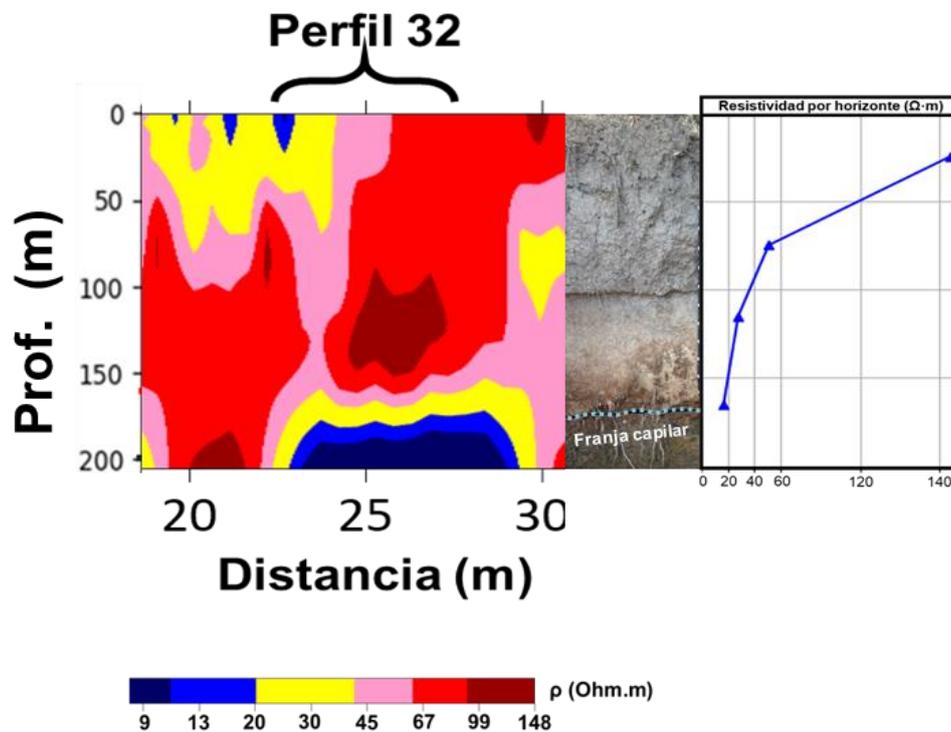


Figura 3.14 Comparación de la sección geoelectrica del perfil 32, la franja capilar observada en campo y los valores de resistividad medidos por horizonte, mostrando que la distribución del cuerpo conductor ($<20 \Omega \cdot m$) a ~ 1.7 m es concordante con la frontera capilar observada en campo, también a 1.7 m de profundidad, y la resistividad medida en el subsuelo (de $17 \Omega \cdot m$) a esta profundidad.

Como se mostró anteriormente, en el perfil 32, la saturación aumentó con la profundidad alcanzando hasta 86% a 165 cm (sección 3.5), mientras que la resistividad alcanzó $\sim 17 \Omega \cdot m$ a 170 cm (sección 3.7), lo anterior asociado con la presencia de la franja capilar a esta profundidad. La sección geoelectrica confirma que el techo de la franja capilar, definido a $20 \Omega \cdot m$, inicia aproximadamente a ~ 1.7 m, coincidiendo con la delimitación en campo a ~ 1.7 m (Figura 3.14), donde la humedad volumétrica alcanzó $\sim 33\%$ (sección 3.3) y la

alta proporción de finos (~96%, sección 3.2) favoreció el ascenso capilar desde el manto freático, mismo que se ve frenado por el cambio de textura de franco arcillosa a franco limosa fina (sección 3.2). Además, las concentraciones de arsénico más altas observadas en el perfil 32 (sección 3.6) se encontraron a esta profundidad (1.5-1.9 m) lo cual se asoció a la acumulación de arsénico en la franja capilar por ascenso capilar desde el acuífero somero contaminado. Lo anterior sugiere que la delimitación de una frontera de la franja capilar con un valor de 20 $\Omega\cdot\text{m}$ es factible.

En el perfil 2, el grado de saturación aumentó de 22% a 25 cm a 88% a 185 cm (sección 3.5), con una resistividad que disminuyó de ~35 $\Omega\cdot\text{m}$ a 125 cm a ~24 $\Omega\cdot\text{m}$ a 190 cm (sección 3.7). Dado que la resistividad no alcanzó 20 $\Omega\cdot\text{m}$, se estimó que la frontera capilar se encuentra a una profundidad mayor, misma que, de acuerdo con el perfilaje electromagnético, podría encontrarse a ~3 m de profundidad. Por lo anterior, la ausencia de la franja capilar antes de los ~3 m, profundidad máxima a la que se tomaron los datos de arsénico en el subsuelo, explica ausencia de altas concentraciones de arsénico en la franja capilar, y por lo tanto el valor de 20 $\Omega\cdot\text{m}$ que define la frontera de la franja capilar podría ser posible. Por otro lado, teniendo como referencia a los perfiles 6 y 24, el cuerpo conductor III (< 20 $\Omega\cdot\text{m}$) se identificó a más de 3 m de profundidad (secciones 3.8.2 y 3.8.3), en las cuales no fue posible observar acumulación de arsénico en la franja capilar, debido a que los datos de arsénico no abarcan más allá de los ~3 m. Por lo anterior, el valor de 20 $\Omega\cdot\text{m}$ que define la frontera de la franja capilar podría ser posible. Por su parte, teniendo como referencia al perfil 30 el cuerpo III (<20 $\Omega\cdot\text{m}$) se encontró a ~1.4 m (sección 3.8.5), influenciado por la humedad (35%-47%) en el horizonte B2 (sección 3.4) y por el ascenso capilar desde el manto freático definido a ~2.1 m (sección 3.1). Además, los valores de arsénico observados entre 1.3 y 1.6 m de profundidad se asociaron al ascenso capilar desde el acuífero somero contaminado de Matehuala (secciones 3.6 y 3.8.5), asumiendo de esta manera que el valor de 20 $\Omega\cdot\text{m}$ que define la frontera capilar podría ser posible.

3.10 Mapa de la distribución de la frontera de la franja capilar

La Figura 3.15 muestra los mapas de la zona de estudio y la elevación del techo de la franja capilar obtenido a partir de las 55 secciones geoelectricas realizadas en la zona SE, mostrando que el techo de la franja capilar se encontró entre 1,574.5 y 1,571.5 msnm, equivalentes a profundidades de 0.5 y 3.5 m, respectivamente (Figura 3.15b).

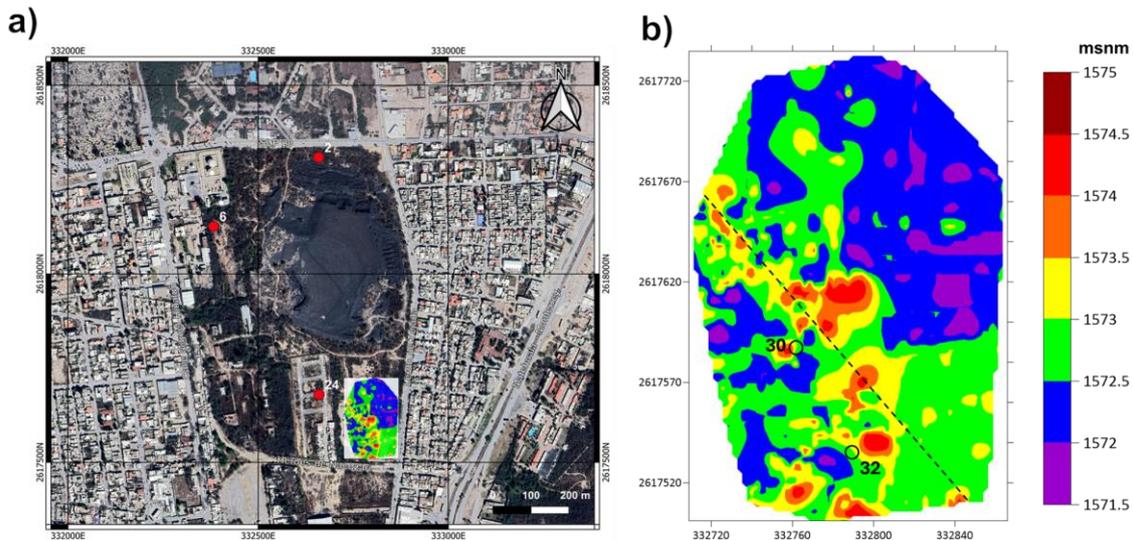


Figura 3.15 a) Área de estudio y b) mapa de las elevaciones del techo de la franja capilar determinadas a una resistividad de $20 \Omega \cdot m$ y asumiendo una superficie plana del suelo, a 1,575 m de elevación. Los mapas muestran las ubicaciones de los perfiles de suelo (2, 6, 24, 30 y 32). La línea negra punteada muestra un transecto en donde la franja capilar es, en general, más somera y donde se podría observar el fenómeno de ascenso capilar de As a profundidades menores a 2.5 m, fácilmente alcanzadas con una retroexcavadora.

Las variaciones observadas en el mapa reflejaron la heterogeneidad de la elevación del techo de la franja capilar de Matehuala. Las zonas donde las altitudes son más altas señalan áreas donde el techo de la franja capilar es más somero y, por lo tanto, se observaría el fenómeno de atenuación natural a una profundidad menor, mientras que las altitudes más bajas indican la presencia de una franja capilar a mayores profundidades.

El uso de la geofísica demostró ser de gran utilidad en la determinación de la franja capilar, ya que mide una propiedad física, la resistividad, que es altamente sensible al contenido de agua y saturación en el subsuelo (Burger et al., 2006; Everett, 2013; Telford et al., 1990). Esta técnica permitió determinar el techo de la franja capilar (Figura 3.15b), se observó que éste tiende a ser más somero (1574.5-1573 msnm) en un transecto con dirección NO-SE (línea negra punteada). Por lo tanto, en este transecto, se esperaría observar el proceso de atenuación natural a una profundidad más somera (~ 2.5 m), tal y como ocurrió con los perfiles 30 y 32, donde se encontró acumulación de arsénico a una profundidad entre ~ 1.4 y 1.7 m (secciones 3.6 y 3.8). Lo anterior, consistente con los resultados del mapa que muestran que el techo de la franja capilar comienza entre ~ 1.5 y 2.5 m de profundidad para las ubicaciones de los perfiles 30 y 32. En contraste, en la sección noreste (NE) el techo de la franja capilar se observó a una elevación más profunda, de 1,572 msnm, donde se espera que el fenómeno de atenuación natural se presente a profundidades mayores a ~ 2.5 m, tal y como ocurrió en los perfiles 2, 6 y 24 (secciones 3.6 y 3.8).

La atenuación natural es una opción de remediación de bajo costo y que cada

vez es más utilizada, que requiere previa caracterización exhaustiva y un monitoreo riguroso a largo plazo para asegurar su efectividad (Neuhauser et al., 2009; Wang y Mulligan, 2006; Yong y Mulligan, 2019).

3.11 Relación entre las concentraciones de arsénico en el suelo de la franja capilar y la resistividad del subsuelo

La Figura 3.16 muestra los datos de concentración de arsénico en el suelo y las resistividades aparentes correspondientes a los perfiles 2, 6, 24, 30 y 32. Como era de esperarse, no se observó una relación directa entre la concentración de arsénico y la resistividad, ya que el arsénico presente en el suelo no depende de la resistividad, ni esta última responde a la concentración de arsénico.

Sin embargo, se observó una relación aparente entre ambas variables dentro de la franja capilar del suelo (recuadro azul), resultado de un proceso indirecto mediado por la humedad del suelo. La resistividad del subsuelo es inversamente proporcional al contenido de humedad: a mayor humedad, menor resistividad. A su vez, la humedad en la franja capilar es el resultado del ascenso capilar de agua desde el acuífero somero subyacente. Dado que, en este sitio de estudio, el acuífero está contaminado con arsénico disuelto, el ascenso capilar no sólo incrementó el contenido de humedad del suelo, sino que también transportó y acumuló arsénico en él.

Lo anterior generó un acoplamiento entre variables: el ascenso capilar de agua contaminada incrementó simultáneamente la humedad (disminuyendo la resistividad) y la concentración de arsénico. Como resultado, a pesar de que no existe una relación causal directa entre resistividad y arsénico, ambas variables reflejaron un mismo fenómeno (atenuación natural de arsénico), que dio lugar a una correlación aparente entre concentración de arsénico y resistividad en el subsuelo de la franja capilar. Estas relaciones se manifestaron en el gráfico bivariado de la Figura 3.16, en donde las concentraciones de arsénico aumentaron conforme incrementó la resistividad dentro del recuadro azul, el cual representa la franja capilar.

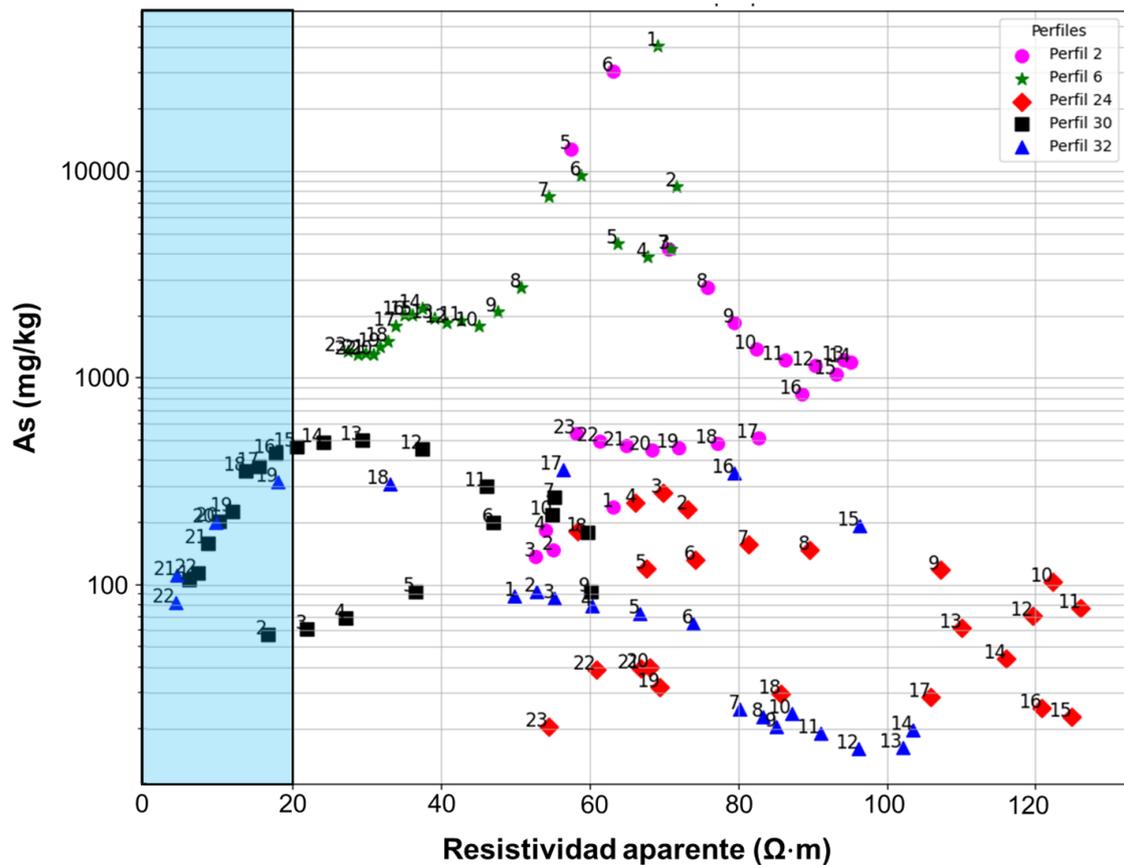


Figura 3.16. Concentración de arsénico y resistividad del subsuelo para los perfiles 2, 6, 24, 30 y 32. En la franja capilar (recuadro azul), las concentraciones de arsénico mostraron una relación con la resistividad, resultado de un proceso indirecto mediado por la humedad del suelo, con la excepción de la muestra 2 del perfil 30, correspondiente a una capa superficial que no pertenecía a dicha franja. Los números, multiplicados por 10, indicaron la profundidad representativa de cada muestra de suelo, en centímetros; por ejemplo, el número 22 indicó una muestra recolectada a 220 cm de profundidad.

Por lo anterior, la relación entre la contaminación por arsénico en el suelo y la resistividad sólo se observó en los perfiles de suelo en donde las excavaciones llegaron hasta la franja capilar (30 y 32) y se logró extraer muestras de suelo para determinar las concentraciones de arsénico. Como se mencionó antes, en estos perfiles, el incremento de la concentración de arsénico en el subsuelo se explica por un proceso de atenuación natural de arsénico, que remueve arsénico del acuífero somero, por capilaridad, para acumularlo en el subsuelo que sobreyace al acuífero. Este proceso da lugar a perfiles típicos de atenuación natural de contaminantes (Mulligan y Yong, 2004; National Research Council (U.S.), 2000; Siegel y Bryan, 2003), que sumado a los perfiles típicos de lixiviación de contaminantes (de Menezes et al., 2020; Komonweeraket et al., 2015), dan lugar a perfiles de lixiviación y atenuación como los que observamos en este estudio en los perfiles 30 y 32 (Figura 3.17).

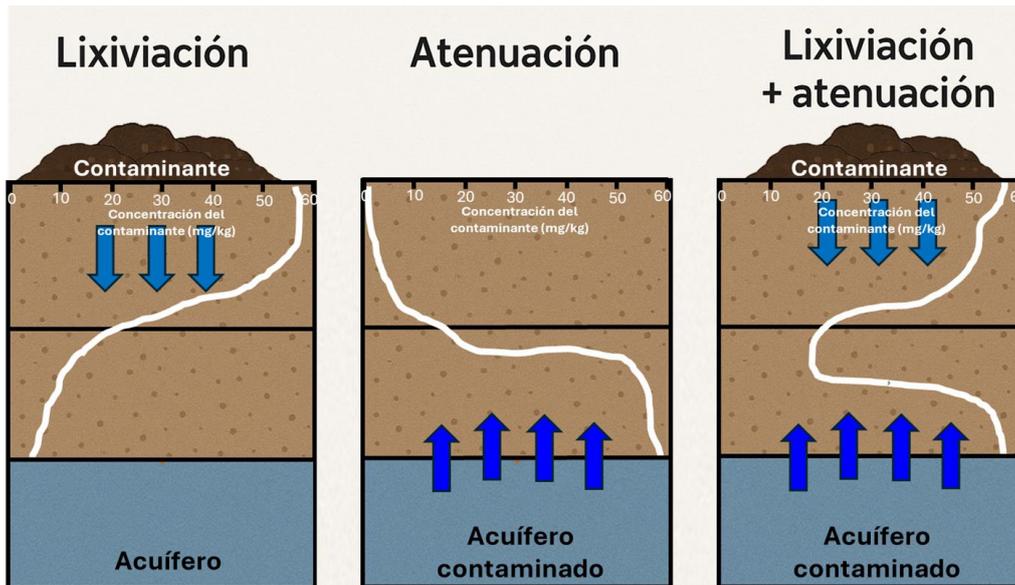


Figura 3.17 Perfiles hipotéticos de concentración de un contaminante en un perfil de suelo, derivados de procesos de: a) lixiviación del contaminante (desde la superficie del suelo), b) atenuación del contaminante (del acuífero hacia el suelo) y c) lixiviación + atenuación del contaminante (desde el suelo y el acuífero contaminados).

En este estudio, habría sido necesario excavar a mayores profundidades en los perfiles 2, 6 y 24 para lograr capturar, no solo los perfiles de lixiviación de arsénico, sino también los de atenuación natural. No obstante, excavaciones a mayores profundidades requerían de maquinaria con mayores capacidades, fuera del alcance de esta tesis. Más perfiles de lixiviación y atenuación natural de arsénico, en el área de estudio, podrían obtenerse a profundidades relativamente someras, como el caso de la sección NO-SE del mapa de la figura 3.15b, donde el techo de la franja capilar se encontró a partir de los ~1.5 m de profundidad. La relación entre el arsénico y la resistividad sólo se observa dentro de la franja capilar porque la segunda es una función de la saturación de agua (Burger et al., 2006; Dobrin y Savit, 1988; Everett, 2013; Telford et al., 1990). Por supuesto, dicha relación no se puede extrapolar a la zona no saturada, con resistividades mayores a 20 $\Omega \cdot m$, donde el arsénico no es una función de la resistividad.

Conclusiones

La investigación en la antigua fundidora abandonada de Matehuala, San Luis Potosí, permitió confirmar parcialmente la hipótesis de que la franja capilar del suelo actúa como una zona de acumulación de arsénico por ascenso capilar de agua contaminada desde el acuífero somero. Es decir, el movimiento ascendente del arsénico por capilaridad contribuye a su retención en la franja capilar. Esto se observó claramente en los perfiles 30 y 32, donde el techo de la franja capilar, definido por resistividades menores a $20 \Omega \cdot m$, con humedades volumétricas mayores al 40% y saturaciones de agua del 88%, presentó concentraciones de arsénico que alcanzaron hasta 501.5 mg/kg en la franja capilar, cuyo techo se registró a partir de ~1.4 y 1.7 m de profundidad, respectivamente. Lo anterior, derivado del ascenso capilar del agua desde el acuífero somero contaminado. En contraste, en los perfiles 2, 6 y 24, donde el techo de la franja capilar se encontró a más de 3 m de profundidad, las limitaciones en la profundidad de las excavaciones impidieron verificar la acumulación de arsénico por atenuación natural. Los resultados de esta tesis comprobaron que, en dos perfiles de suelo, existe acumulación de arsénico en la franja capilar por atenuación natural del suelo.

La acumulación de arsénico en la franja capilar puede disminuir su concentración en el agua subterránea, la exposición de las poblaciones afectadas y los riesgos para la salud, por lo que comprender los procesos de atenuación natural es fundamental. La integración de los resultados de resistividad eléctrica, humedad volumétrica y grado de saturación permitió delimitar la distribución espacial del techo de la franja capilar y explicar la acumulación de arsénico encontrada en el fondo de los perfiles de suelo a través de proceso de ascenso capilar del arsénico, desde el acuífero somero contaminado de Matehuala, hacia el suelo que le sobreyace. Esta acumulación se observó únicamente, en la zona saturada del fondo de los perfiles de suelo 30 y 32, con resistividades menores a $20 \Omega \cdot m$, mientras que, en la zona no saturada, con resistividades mayores a $20 \Omega \cdot m$, no se observó esta relación, confirmando que la franja capilar actúa como una zona de retención y acumulación de arsénico. Las limitaciones en la profundidad de las excavaciones en los perfiles 2, 6 y 24 impidieron evaluar las concentraciones de arsénico en la franja capilar. No obstante, si se hubiera podido excavar hasta el manto freático, como en los perfiles 30 y 32, habría sido posible comprobar la hipótesis de este trabajo en todos los perfiles de suelo muestreados. El proceso de ascenso capilar observado en los perfiles 30 y 32 podría servir para diseñar procesos naturales de remediación de arsénico en otros acuíferos contaminados.

La metodología aplicada para el mapeo del techo de la franja capilar en la porción sureste del sitio de estudio puede replicarse en otras áreas de la antigua fundidora. El conocimiento de la profundidad de la franja capilar es fundamental

para futuros trabajos de diagnóstico y/o remediación del suelo contaminado.

Se recomienda realizar excavaciones más profundas en los perfiles 2, 6 y 24 para recolectar muestras de suelo para la medición de concentraciones de arsénico. Alternativamente, realizar excavaciones igual de someras en el transecto NO-SE en la sección sureste del área de estudio, donde la franja capilar es somera (1.5 m), para la toma de muestras de suelo y su posterior análisis de arsénico. Esto permitiría generalizar el proceso de atenuación natural en la zona de estudio.

Bibliografía

- Alarcón-Herrera, M. T., Martín-Alarcon, D. A., Gutiérrez, M., Reynoso-Cuevas, L., Martín-Domínguez, A., Olmos-Márquez, M. A., y Bundschuh, J. (2020). Co-occurrence, possible origin, and health-risk assessment of arsenic and fluoride in drinking water sources in Mexico: Geographical data visualization. *Science of The Total Environment*, 698, 134168. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134168>
- Apostu, F., Dezsy, S., y Nicu, M. (2004). NATURAL ATTENUATION OF COD RELEASED FROM SAVINEȘTI CHEMICAL PLATFORM. *Environmental Engineering and Management Journal*, 3(4), 817-826. <https://doi.org/10.30638/eemj.2004.084>
- Arlandi, M. (2005). XII Curso De Geotecnia Aplicada. *Universidad De Jaén*.
- Asry, Z., Samsudin, A. R., Yaacob, W. Z., y Yaakub, J. (2012). Groundwater investigation using electrical resistivity imaging technique at Sg. Udang, Melaka, Malaysia. *Bulletin of the Geological Society of Malaysia*, 58, 55-58. <https://doi.org/10.7186/bgsm58201209>
- Ayolabi, E. A., Epelle, E. S., Lucas, O. B., y Ojo, A. (2015). Geophysical and geochemical site investigation of eastern part of Lagos metropolis, southwestern Nigeria. *Arabian Journal of Geosciences*, 8(9), 7445-7453. <https://doi.org/10.1007/s12517-014-1688-0>
- Banerjee, B., y Pal, B. P. (1986). A Simple Method For Determination of Depth of Investigation Characteristics in Resistivity Prospecting. *Exploration Geophysics*, 17(2), 93-95. <https://doi.org/10.1071/EG986093>
- Bano, M. (2007a). Modeling GPR reflections from the transition zone above the water table: Analytical approach in frequency domain. *SEG Technical Program Expanded Abstracts 2007*, 1192-1196. <https://doi.org/10.1190/1.2792719>
- Bano, M. (2007b). Reflection of GPR Waves from the Transition Zone above a Water Table. An Analytical Approach in Frequency Domain. *69th EAGE Conference and Exhibition incorporating SPE EUROPEC 2007*. 69th EAGE Conference and Exhibition incorporating SPE EUROPEC 2007, London, UK,. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201401801>
- Bhat, A., Ravi, K., Tian, F., y Singh, B. (2024). Arsenic Contamination Needs Serious Attention: An Opinion and Global Scenario. *Pollutants*, 4(2), 196-211. <https://doi.org/10.3390/pollutants4020013>
- Bing, Z., Ye-Xin, G., Xin, F., Ya-Zhe, Z., Ji-Chao, L., y Ying-Ping, Z. (2020). Experimental study on height simulation of capillary fringe. *Journal of*

Groundwater Science and Engineering, 8(2), 108-117.
<https://doi.org/10.19637/j.cnki.2305-7068.2020.02.002>

Bueno Pedroza, A. (2005). *Interpretación Hidrogeoquímica de los Sistemas de Flujo de la Parte Norte del Altiplano Potosino* [Tesis de Maestría]. Universidad Autónoma de Nuevo León.

Bundschuh, J., Litter, M. I., Parvez, F., Román-Ross, G., Nicolli, H. B., Jean, J.-S., Liu, C.-W., López, D., Armienta, M. A., Guilherme, L. R. G., Cuevas, A. G., Cornejo, L., Cumbal, L., y Toujaguez, R. (2012). One century of arsenic exposure in Latin America: A review of history and occurrence from 14 countries. *Science of The Total Environment*, 429, 2-35.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.06.024>

Burger, H. R., Sheehan, A. F., y Jones, C. H. (2006). *Introduction to applied geophysics: Exploring the shallow subsurface*. W. W. Norton.

Capozzoli, A., Paoletti, V., Cella, F., La Manna, M., y Piegari, E. (2025). Integrated Electromagnetic Mapping Through K-Means to Improve Identification of Areas of Archaeological Interest. *Archaeological Prospection*, arp.1996. <https://doi.org/10.1002/arp.1996>

Carter, M. R. (1993). *Soil sampling and methods of analysis*. Lewis publishers.

Carter, M. R., y Gregorich, E. G. (Eds.). (2008). *Soil sampling and methods of analysis* (2nd ed). Canadian Society of Soil Science ; CRC Press.

Castro-Larragoitia, J., Kramar, U., y Puchelt, H. (1997). 200 years of mining activities at La Paz/San Luis Potosí/Mexico—Consequences for environment and geochemical exploration. *Journal of Geochemical Exploration*, 58(1), 81-91. [https://doi.org/10.1016/S0375-6742\(96\)00054-4](https://doi.org/10.1016/S0375-6742(96)00054-4)

Chakrabarti, D., Singh, S. K., Rashid, M. H., y Rahman, M. M. (2019). Arsenic: Occurrence in Groundwater. En *Encyclopedia of Environmental Health* (pp. 153-168). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-409548-9.10634-7>

Chettri, A., Rabha, C., Malik, S. S., Chakravarty, D. M., Gumaa, A. A.-B., Lalremruata, A., Chakma, S., Ahmed-Laskar, S., Roy, D., Vikas, K. R., KRS, S. R., y Gurusubramanian, G. (2024). Insights on the assessment of the potential of phytochemical chelating, protective, and detoxifying properties in managing chronic arsenic toxicity. *Indian Journal of Biochemistry & Biophysics*. <https://doi.org/10.56042/ijbb.v61i7.10556>

Chiprés, J. A., Castro-Larragoitia, J., y Monroy, M. G. (2009). Exploratory and spatial data analysis (EDA–SDA) for determining regional background

- levels and anomalies of potentially toxic elements in soils from Catorce–Matehuala, Mexico. *Applied Geochemistry*, 24(8), 1579-1589. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2009.04.022>
- Chiprés, J. A., Salinas, J. C., Castro-Larragoitia, J., y Monroy, M. G. (2008). Geochemical mapping of major and trace elements in soils from the Altiplano Potosino, Mexico: A multi-scale comparison. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 8(3-4), 279-290. <https://doi.org/10.1144/1467-7873/08-181>
- Cordero Vázquez, C. Y. (2018). *Caracterización geoquímica y geofísica de suelos agrícolas en el área de Cerrito Blanco, Matehuala, San Luis Potosí* [Tesis de Maestría]. Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica.
- Cordero-Vázquez, C. Y., Delgado-Rodríguez, O., Cisneros-Almazán, R., y Peinado-Guevara, H. J. (2023). Determination of Soil Physical Properties and Pre-Sowing Irrigation Depth from Electrical Resistivity, Moisture, and Salinity Measurements. *Land*, 12(4), 877. <https://doi.org/10.3390/land12040877>
- de Menezes, M. D., Alves Bispo, F. H., Faria, W. M., Marcolino Goncalves, M. G., Curi, N., y Guimaraes Guilherme, L. R. (2020). Modeling arsenic content in Brazilian soils: What is relevant? *SCIENCE OF THE TOTAL ENVIRONMENT*, 712. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136511>
- Delgado-Rodríguez, O. (2017). Mapping of hydrocarbon- and scrap-metal-contaminated soil using volatile organic compounds and electromagnetic profiling methods. *Near Surface Geophysics*, 15(3), 312-321. <https://doi.org/10.3997/1873-0604.2017008>
- Delgado-Rodríguez, O., Ladrón de Guevara Torres, M., Shevnin, V., y Ryjov, A. (2012). Estimation of soil petrophysical parameters based on electrical resistivity values obtained from lab and in-field measurements. *Geofísica Internacional*, 51-1, 5-15.
- Delgado-Rodríguez, O., Mousatov, A., Nakamura Labastida, E. K., y Shevnin, V. (2021). Application of quantitative electromagnetic technology to assess coating integrity of pipelines in México. *Geofísica Internacional*, 60(3), 241-257. <https://doi.org/10.22201/igeof.00167169p.2021.60.3.2041>
- Díaz Barriga, F. (1999). Metodología de Identificación y Evaluación de Riesgos para la Salud en Sitios Contaminados. *Organización Panamericana de la Salud, Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente, Primera edición.*
- Dobrin, M. B., y Savit, C. H. (1988). *Introduction to geophysical prospecting* (4th

- ed). McGraw-Hill Book Co.
- DOF. (2007). *NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, Que establece criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y/o vanadio.*
- DOF. (2021). *NOM-127-SSA1-2021, Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua.* Secretaría de Salud.
- DOF. (2022). *NOM-001-SEMARNAT-2021, Que establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación.* Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Dupont, R. R. (2012). Natural Attenuation. En *Bioremediation and Sustainability* (1.^a ed., pp. 43-102). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781118371220.ch2>
- Essington, M. E. (2004). *Soil and water chemistry: An integrative approach.* CRC Press.
- Everett, M. E. (2013). *Near-Surface Applied Geophysics* (1.^a ed.). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139088435>
- Fiola, J. C., Rabenhorst, M. C., Scaduto, E., Seitz, C. R., y Rankin, K. M. S. (2020). Soil biogeochemistry of the capillary fringe in laboratory mesocosms with contrasting soil textures. *Soil Science Society of America Journal*, 84(3), 1011-1021. <https://doi.org/10.1002/saj2.20076>
- Fluke Corp. (2005). *Model Sturn Geo LEM.* Fluke Corporation.
- García-Rico, L., Meza-Figueroa, D., Jay Gandolfi, A., Del Rivero, C. I., Martínez-Cinco, M. A., y Meza-Montenegro, M. M. (2019). Health Risk Assessment and Urinary Excretion of Children Exposed to Arsenic through Drinking Water and Soils in Sonora, Mexico. *Biological Trace Element Research*, 187(1), 9-21. <https://doi.org/10.1007/s12011-018-1347-5>
- Geonics Limited. (2010). *EM31-MK2 Ground Conductivity Meter Data Logger Operating Instructions* (No. 2).
- GF Instruments, S. R. O. (2020). *Electromagnetic Conductivity Meters for Multi-Layer Survey.* http://www.gfinstruments.cz/version_cz/downloads/CMD_2020.pdf.
- Gómez Hernández, A. D. P. (2021). *Identificación de los procesos de atenuación de arsénico en el subsuelo de Matehuala (SLP), México* [Tesis de Doctorado]. Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica.
- González Herrera, R., Rodríguez Castillo, R., y Coronado Peraza, V. (2007).

Atenuación natural en el acuífero yucateco. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*.

González, M. F., Saadatkhan, N., y Patience, G. S. (2024). Experimental methods in chemical engineering: X-ray fluorescence. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 102(6), 2004-2018. <https://doi.org/10.1002/cjce.25218>

González Mille, D. J. (2006). *Riesgo Ecológico en la Zona Minera de Villa de la Paz, San Luis Potosí* [Tesis de Maestría]. Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

Goodman, R. E. (1989). *Introduction to rock mechanics* (2. ed). Wiley.

Grande López, R., Hernández Xolocotzi, E., Aguilera Herrera, Ni., y Boulaine, J. (1967). *Morfología y génesis de suelos yesíferos de Matehuala, SLP*. 1, 130-146.

Hanns, M. (2018). *Analysis of Airborne Particles by Physical Methods* (H. Malissa y J. W. Robinson, Eds.; 1.^a ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781351069649>

Hibbs, A. D., Petrov, T. R., Pendleton, J., Agundes, A., Kouba, S., Hall, T., Boyle, D., Martin, T., Schenkel, C., y Morrison, H. F. (2014). Advances in Electromagnetic Survey Instrumentation and the Use of a Cased Borehole for Imaging a Deep Formations. *Proceedings. 76th EAGE Conference and Exhibition - Workshops, Amsterdam, Netherlands*. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20140562>

Hoekstra, P. (2007). Twenty years of progress in electromagnetic exploration for near-surface geophysics. *Proceedings of the Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems, SAGEEP*.

Holladay, K. (2017). An overview of some airborne electromagnetic profiling work in the Gulf of Mexico. *Proceedings of Meetings on Acoustics*, 010002. <https://doi.org/10.1121/2.0000809>

Hurtado-Jiménez, R., y Gardea-Torresdey, J. L. (2006). Arsenic in drinking water in the Los Altos de Jalisco region of Mexico. *Revista Panamericana de Salud Pública*, 20(4). <https://doi.org/10.1590/s1020-49892006000900004>

INEGI. (2010). *Compendio de información geográfica municipal 2010. Matehuala, San Luis Potosí*.

Ingerov, I., Lozovoy, A., y Mendriy, Y. (2016). Frequency domain control source em technology for mining exploration. *Proceedings of the Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems*,

SAGEEP.

- Karathanasis, A. D., y Hajek, B. F. (2018). Elemental Analysis by X-Ray Fluorescence Spectroscopy. En D. L. Sparks, A. L. Page, P. A. Helmke, R. H. Loeppert, P. N. Soltanpour, M. A. Tabatabai, C. T. Johnston, y M. E. Sumner (Eds.), *SSSA Book Series* (pp. 161-223). Soil Science Society of America, American Society of Agronomy. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.3.c7>
- Khan, K. M., Chakraborty, R., Bundschuh, J., Bhattacharya, P., y Parvez, F. (2020). Health effects of arsenic exposure in Latin America: An overview of the past eight years of research. *Science of The Total Environment*, 710, 136071. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136071>
- Klisińska-Kopacz, A. (2024). X-ray fluorescence spectroscopy. En *Non-Destructive Material Characterization Methods* (pp. 487-523). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91150-4.00018-5>
- Komonweeraket, K., Cetin, B., Benson, C. H., Aydilek, A. H., y Edil, T. B. (2015). Leaching characteristics of toxic constituents from coal fly ash mixed soils under the influence of pH. *Waste Management*, 38, 174-184. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.11.018>
- Ladrón De Guevara-Torres, M., Peinado-Guevara, H., Delgado-Rodríguez, O., Shevnin, V., Herrera-Barrientos, J., Belmonte-Jiménez, S., y Peinado-Guevara, V. (2017). Geoelectrical and Geochemical Characterization of Groundwater in a Shallow Coastal Aquifer. *Polish Journal of Environmental Studies*, 26(4), 1511-1519. <https://doi.org/10.15244/pjoes/68423>
- Litter, M. I., Armienta, M. A., Villanueva Estrada, R. E., Villaamil Lepori, y Olmos, V. (2020). Arsenic in Latin America: Part II. En *Arsenic in Drinking Water and Food* (pp. 113-182). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-13-8587-2_5
- Liu, P., Wan, G., Mei, Q., Liu, Q., y Shao, S. (2025). Study on the release of LNAPLs in the capillary zone via ERT and GPR in an outdoor experiment. *Environmental Earth Sciences*, 84(1). <https://doi.org/10.1007/s12665-024-11997-1>
- Loke, M. H., y Barker, R. D. (1996). Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method¹. *Geophysical Prospecting*, 44(1), 131-152. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.1996.tb00142.x>
- Martens, K., y Walraevens, K. (2009). Tracing Soil and Groundwater Pollution with Electromagnetic Profiling and Geo-Electrical Investigations. En

Criminal and Environmental Soil Forensics (pp. 181-194). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-9204-6_12

Martínez-Villegas, N., Briones-Gallardo, R., Ramos-Leal, J. A., Avalos-Borja, M., Castañón-Sandoval, A. D., Razo-Flores, E., y Villalobos, M. (2013). Arsenic mobility controlled by solid calcium arsenates: A case study in Mexico showcasing a potentially widespread environmental problem. *Environmental Pollution*, 176, 114-122. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2012.12.025>

Martínez-Villegas, N., Gómez, A. D. P., Zamora-Morales, A., Hernández Martínez, J. L., Meza-Figueroa, D., y SenGupta, B. (2019). Role of unsaturated soil above a heavily contaminated aquifer in the natural attenuation of arsenic. *E3S Web of Conferences*, 98, 09017. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20199809017>

Masoudi, R., Abdul Halim, M. H., Karkooti, H., y Othman, M. (2011, noviembre 15). On the Concept and Challenges of Water Saturation Determination and Modeling in Carbonate Reservoirs. *International Petroleum Technology Conference*. International Petroleum Technology Conference, Bangkok, Thailand. <https://doi.org/10.2523/iptc-14588-ms>

Maurya, P. K., Foged, N., Madsen, L. M., y Christiansen, A. V. (2023). Comparison of towed electromagnetic with airborne electromagnetic and electrical resistivity tomography in a hydrogeophysical context. *Geophysical Journal International*, 235(1), 817-830. <https://doi.org/10.1093/gji/ggad276>

McCarty, K. M., Hanh, H. T., y Kim, K.-W. (2011). Arsenic geochemistry and human health in South East Asia. *Reviews on Environmental Health*, 26(1), 71-78. <https://doi.org/10.1515/reveh.2011.010>

Mccauley Whiteker, J. (2021). *Evaluación de Diferentes Materiales Geológicos para la Retención de Arsénico Acuoso de los Cuerpos de Agua Contaminados de Matehuala, San Luis Potosí, México* [Tesis de Doctorado]. Universidad Nacional Autónoma de México.

McClintock, T. R., Chen, Y., Bundschuh, J., Oliver, J. T., Navoni, J., Olmos, V., Lepori, E. V., Ahsan, H., y Parvez, F. (2012). Arsenic exposure in Latin America: Biomarkers, risk assessments and related health effects. *Science of The Total Environment*, 429, 76-91. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.08.051>

McLachlan, P., Blanchy, G., Chambers, J., Sorensen, J., Uhlemann, S., Wilkinson, P., y Binley, A. (2021). The Application of Electromagnetic Induction Methods to Reveal the Hydrogeological Structure of a Riparian Wetland. *Water Resources Research*, 57(6), e2020WR029221.

<https://doi.org/10.1029/2020WR029221>

- Mendoza Chávez, Y. J. (2016). *Especies de zooplancton presentes en agua contaminada con arsénico en Matehuala, San Luis Potosí, México* [Tesis de Maestría]. Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica.
- Mendoza-Cano, O., Sánchez-Piña, R. A., Barrón-Quintana, J., Cuevas-Arellano, H. B., Escalante-Minakata, P., y Solano-Barajas, R. (2017). Riesgos potenciales de salud por consumo de agua con arsénico en Colima, México. *Salud Pública de México*, 59(1), 34. <https://doi.org/10.21149/8413>
- Mulligan, C. N., y Yong, R. N. (2004). Natural attenuation of contaminated soils. *Environment International*, 30(4), 587-601. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2003.11.001>
- Natasha, Shahid, M., Imran, M., Khalid, S., Murtaza, B., Niazi, N. K., Zhang, Y., y Hussain, I. (2020). Arsenic Environmental Contamination Status in South Asia. En *Arsenic in Drinking Water and Food* (pp. 13-39). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-13-8587-2_2
- National Research Council (U.S.) (Ed.). (2000). *Natural attenuation for groundwater remediation*. National Academy Press.
- Nawaz, M. F., Bourrié, G., y Trolard, F. (2013). Soil compaction impact and modelling. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 33(2), 291-309. <https://doi.org/10.1007/s13593-011-0071-8>
- Neuhauser, E. F., Ripp, J. A., Azzolina, N. A., Madsen, E. L., Mauro, D. M., y Taylor, T. (2009). Monitored Natural Attenuation of Manufactured Gas Plant Tar Mono- and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Ground Water: A 14-Year Field Study. *Groundwater Monitoring & Remediation*, 29(3), 66-76. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6592.2009.01244.x>
- Orellana, E. (1982). *Prospección geoelectrónica en corriente continua* (2. ed. corregida y ampliada). Paraninfo.
- Osella, A., Vega, M. D. L., y Lascano, E. (2005). 3D electrical imaging of an archaeological site using electrical and electromagnetic methods. *GEOPHYSICS*, 70(4), G101-G107. <https://doi.org/10.1190/1.1993727>
- Otsuki, A. (Ed.). (2023). *Non-destructive material characterization methods*. Elsevier.
- Parsons, C., Margui Grabulosa, E., Pili, E., Floor, G. H., Roman-Ross, G., y Charlet, L. (2013). Quantification of trace arsenic in soils by field-portable X-ray fluorescence spectrometry: Considerations for sample preparation and measurement conditions. *Journal of Hazardous Materials*, 262, 1213-1222. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.07.001>

- Peinado-Guevara, H., Delgado-Rodríguez, O., Herrera-Barrientos, J., Ladrón De Guevara, M., Peinado-Guevara, V., Herrera-Barrientos, F., y Campista Leon, S. (2017). Determining Water Salinity in a Shallow Aquifer and Its Vulnerability to Coastline Erosion. *Polish Journal of Environmental Studies*, 26(5), 2001-2011. <https://doi.org/10.15244/pjoes/70177>
- Persson, M., Dahlin, T., y Günther, T. (2015). Observing Solute Transport in the Capillary Fringe Using Image Analysis and Electrical Resistivity Tomography in Laboratory Experiments. *Vadose Zone Journal*, 14(5), 1-11. <https://doi.org/10.2136/vzj2014.07.0085>
- Razo, I., Carrizales, L., Castro, J., Díaz-Barriga, F., y Monroy, M. (2004). Arsenic and Heavy Metal Pollution of Soil, Water and Sediments in a Semi-Arid Climate Mining Area in Mexico. *Water, Air, & Soil Pollution*, 152(1-4), 129-152. <https://doi.org/10.1023/B:WATE.0000015350.14520.c1>
- Reisinger, H. J., Burris, D. R., y Hering, J. G. (2005). Remediating Subsurface Arsenic Contamination with Monitored Natural Attenuation. *Environmental Science & Technology*, 39(22), 458A-464A. <https://doi.org/10.1021/es053388c>
- Ribeiro, B. T., Silva, S. H. G., Silva, E. A., y Guilherme, L. R. G. (2017). Portable X-ray fluorescence (pXRF) applications in tropical Soil Science. *Ciência e Agrotecnologia*, 41(3), 245-254. <https://doi.org/10.1590/1413-70542017413000117>
- Rodríguez Rodríguez, R. M. (2016). *Obtención de un modelo conceptual hidrogeológico de concentraciones de arsénico variables en agua superficial y subterránea en Matehuala, San Luis Potosí* [Tesis de Licenciatura]. Universidad de Sonora.
- Rosas-Castor, J. M., Guzmán-Mar, J. L., Alfaro-Barbosa, J. M., Hernández-Ramírez, A., Pérez-Maldonado, I. N., Caballero-Quintero, A., y Hinojosa-Reyes, L. (2014). Evaluation of the transfer of soil arsenic to maize crops in suburban areas of San Luis Potosi, Mexico. *Science of The Total Environment*, 497-498, 153-162. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.07.072>
- Ruíz-Huerta, E. A., Varela, A. D. L. G., Gómez-Bernal, J. M., Castillo, F., Avalos-Borja, M., SenGupta, B., y Martínez-Villegas, N. (2017). Arsenic contamination in irrigation water, agricultural soil and maize crop from an abandoned smelter site in Matehuala, Mexico. *Journal of Hazardous Materials*, 339, 330-339. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.06.041>
- Rylov, A. (1987). *Application of IP method for mineral deposits*. Research 5-23.
- Rylov, A., y Sudoplatov, A. D. (1990). *The calculation of specific electrical*

conductivity for sandy—Clayed rocks and the usage of functional cross-plots for the decision of hydro-geological problems. 27-41.

- Sánchez-Rodríguez, B. L., Castillo-Maldonado, I., Pedroza-Escobar, D., Delgadillo-Guzmán, D., y Soto-Jiménez, M. F. (2023). Association of obesity, diabetes, and hypertension with arsenic in drinking water in the Comarca Lagunera province (north-central Mexico). *Scientific Reports*, 13(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-36166-5>
- Santarato, G. (2022). Noninvasive Characterization and Monitoring of Building Elements: Electrical Resistivity Investigations. En *Handbook of Cultural Heritage Analysis* (pp. 831-858). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-60016-7_29
- Saxena, A. K., y Kumar, A. (2020). Effect of Arsenic Exposure in Reproductive Health. En *SpringerBriefs in Applied Sciences and Technology* (pp. 59-80). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-15-4700-3_5
- Servicio Geológico Mexicano (SGM). (2005). *Inventario físico de los recursos minerales del municipio Matehuala, S. L. P.*
- SGM. (2012). *Carta Minera F14-A25.*
- Siebe, C., Jahn, R., y Stahr, K. (1996). *Manual para la descripción y evaluación ecológica de suelos en el campo.* Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A.C.
- Siegel, M. D., y Bryan, C. R. (2003). Environmental Geochemistry of Radioactive Contamination. En *Treatise on Geochemistry* (pp. 205-262). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b0-08-043751-6/09049-6>
- Sindhu, R. K., Yadav, S. K., Chitkara, M., Sandhu, I. S., Arora, S., Verma, I., Yapar, E. A., y Singh, V. K. (2022). General Principle, Procedures and Detectors of X-Ray Fluorescence. En V. K. Singh, J. Kawai, & D. K. Tripathi (Eds.), *X-Ray Fluorescence in Biological Sciences* (1.^a ed., pp. 279-285). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119645719.ch18>
- Solé, V. A., Papillon, E., Cotte, M., Walter, Ph., y Susini, J. (2007). A multiplatform code for the analysis of energy-dispersive X-ray fluorescence spectra. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 62(1), 63-68. <https://doi.org/10.1016/j.sab.2006.12.002>
- Stauder, S., y Werner, P. (2012). Monitored natural attenuation for an arsenic contaminated industrial site with sulfate reducing aquifer conditions: A twelve year case study. En *Understanding the geological and medical interface of arsenic: As 2012: 4th International Congress: Arsenic in the Environment, Sebel Cairns International Hotel, Cairns, Australia, 22-27*

July 2012 (p. 2).

- Tchounwou, P. B., Centeno, J. A., y Patlolla, A. K. (2004). Arsenic toxicity, mutagenesis, and carcinogenesis – a health risk assessment and management approach. *Molecular and Cellular Biochemistry*, 255(1-2), 47-55. <https://doi.org/10.1023/b:mcbi.0000007260.32981.b9>
- Telford, W. M., Geldart, L. P., y Sheriff, R. E. (1990). *Applied geophysics* (2nd ed). Cambridge University Press.
- Tezkan, B. (1999). *A Review Of Environmental Applications Of Quasi-Stationary Electromagnetic Techniques*.
- Truskewycz, A., Gundry, T. D., Khudur, L. S., Kolobaric, A., Taha, M., Aburto-Medina, A., Ball, A. S., y Shahsavari, E. (2019). Petroleum Hydrocarbon Contamination in Terrestrial Ecosystems—Fate and Microbial Responses. *Molecules*, 24(18), 3400. <https://doi.org/10.3390/molecules24183400>
- Turner, K. E., y Webber, E. (2025). GGR Handbook of Rock and Mineral Analysis Chapter 6 (Part 2) Principles and Practice of X-Ray Fluorescence Spectrometry – 2: Wavelength Dispersive and Energy Dispersive Instrumentation. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 49(1), 51-130. <https://doi.org/10.1111/ggr.12597>
- USDA, (United States Department of Agriculture). (2013). *Munsell Soil Color Book*. Munsell Color, X-Rite.
- USEPA. (2007). *Method 6200. Field portable X-Ray fluorescence spectrometry for the determination of elemental concentrations in soil and sediment, United States Environmental Protection Agency*. United States Environmental Protection Agency.
- Wang, S., y Mulligan, C. N. (2006). Natural attenuation processes for remediation of arsenic contaminated soils and groundwater. *Journal of Hazardous Materials*, 138(3), 459-470. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.09.048>
- Ward, R. C., y Robinson, M. (2000). *Principles of hydrology* (4th ed). McGraw-Hill.
- Weil, R. R., y Brady, N. C. (2017). *The nature and properties of soils* (Fifteenth Edition, global edition). Pearson.
- Weindorf, D. C., y Chakraborty, S. (2020). Portable X-ray fluorescence spectrometry analysis of soils. *Soil Science Society of America Journal*, 84(5), 1384-1392. <https://doi.org/10.1002/saj2.20151>
- WHO. (2011). *Arsenic in Drinking-water. Background document for development of WHO Guidelines for Drinking-water Quality*.

- WRB. (2022). *World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps* (4th ed).
- Yadav, A., Sahu, P. K., Patel, K. S., Lata, L., Milosh, H., Corns, W. T., Allen, J., y Martín-Ramos, P. (2020). Assessment of Arsenic and Heavy Metal Pollution in Chhattisgarh, India. *Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste*, 24(1). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)hz.2153-5515.0000478](https://doi.org/10.1061/(asce)hz.2153-5515.0000478)
- Yong, R. N., y Mulligan, C. N. (2019). *Natural and enhanced attenuation of contaminants in soils* (Second edition). CRC Press/Taylor & Francis Group.
- Yu, S., Liao, W., Lee, C., Chai, C., Yu, C., y Yu, H. (2018). Immunological dysfunction in chronic arsenic exposure: From subclinical condition to skin cancer. *The Journal of Dermatology*, 45(11), 1271-1277. <https://doi.org/10.1111/1346-8138.14620>
- Zhdanov, M. S. (2009). *Geophysical electromagnetic theory and methods* (1st ed). Elsevier.

Anexos

1. Cadena de custodia #COC83 para la descripción de horizontes de suelo

División de Geociencias Aplicadas
PROCEDIMIENTO ESTANDARIZADO
Título: Hoja para la descripción y evaluación de suelos en campo
Elaboró: Dra. Jeanny Lucero Hernández Martínez

Pág: 1-2
Fecha: 17-06-2024
Versión: 1

COC#83 Laboratory sample number: 4
Site Reference Number: 34
Localidad: Matzahala
Names of Samplers: LHM, J.A.G., F.M.C.

Prof (cm)	Textura	Piedras (Vol %)	Color (húmedo)	pH	Salas C.E. 1:2.5 (mS/cm)	m.o. CaCO3 (%)	humedad pF	Estructura Tipo, tamaño, grado	Estab. agreg.	Poros abundancia, tamaño, forma, distribución	g.a. (g/cm3)	dens. raíces	Limite	Horizonte
0-50	CR	0%	7.5 YR 3-2			KS	5	Formas	Med	Pocos	Med			
50-100	CLF	0%	7.5 YR 3-2			KS	5	Angulosos, bloques, caras planas y redondeadas	Med	Pocos	Med			
100-130	CLF	2-3%	7.5 YR 3-2			KS	4	Subangulosos en bloques, caras planas y redondeadas	Med	Pocos	Med			
130-200	CR	0%	7.5 YR 3-2			KS	1	Suavemente laminado, granular y esponjoso de raíces	Med	Dentro de agregados por las raíces	Med			

Prof. de desarrollo cm: _____
Max. Prof. Raíces cm: _____
Princ. espacio radicular: a cm
Nivel piezométrico actual: _____
Nivel piezométrico medio: _____
Clasificación del suelo (WRB): _____
Fase: _____
Tipo de humus: _____

Rasgos pedológicos

Prof (cm)	Cutanes Tipo, localización, cantidad y grosor	Cementaciones Sustancia, grado	Concreciones Abundancia, color, tamaño (mm), forma, dureza, tipo	Manchas y motas Abundancia, color, tamaño, forma, localización	Otras Sickenadas Al activo

50-100 → 1º muy duro (CaCO₃ K3-K4)
100-130 → 2º horizonte más duro (micro poros)

* Estructura (100-130): mezclada con muchos vertices redondeados
* Estabilidad agregación (130-200): Mo de raíces b a j q

Muy (duro) compacto
Fonofacilidad clara y evidente

División de Geociencias Aplicadas
PROCEDIMIENTO ESTANDARIZADO
Título: Hoja para la descripción y evaluación de suelos en campo
Elaboró: Dra. Jeanny Lucero Hernández Martínez

Pág: 1-2
Fecha: 17-06-2024
Versión: 1

COC#83 Laboratory sample number: 4
Site Reference Number: 02
Localidad: Matzahala
Names of Samplers: LHM, J.A.G., F.M.C.

Prof (cm)	Textura	Piedras (Vol %)	Color (húmedo)	pH	Salas C.E. 1:2.5 (mS/cm)	m.o. CaCO3 (%)	humedad pF	Estructura Tipo, tamaño, grado	Estab. agreg.	Poros abundancia, tamaño, forma, distribución	g.a. (g/cm3)	dens. raíces	Limite	Horizonte
0-65	CR	0	7.5 YR 3-2			KS	5	Angulosos bloques, caras planas y redondeadas	Med	Pocos, micro	Med			
65-105	CRL	0	7.5 YR 3-2			KS	5	Angulosos bloques, caras planas y redondeadas	Med	Pocos, micro	Med			
105-145	CRL	0	7.5 YR 3-2			KS	3	Angulosos bloques, caras planas y redondeadas	Med	Medio-grosos	Med			
145-225	CLF	0	7.5 YR 3-2			KS	3	Angulosos bloques, caras planas y redondeadas	Med	Pocos (grosos) medianos	Med			

Prof. de desarrollo cm: _____
Max. Prof. Raíces cm: _____
Princ. espacio radicular: a cm
Nivel piezométrico actual: _____
Nivel piezométrico medio: _____
Clasificación del suelo (WRB): _____
Fase: _____
Tipo de humus: _____

Rasgos pedológicos

Prof (cm)	Cutanes Tipo, localización, cantidad y grosor	Cementaciones Sustancia, grado	Concreciones Abundancia, color, tamaño (mm), forma, dureza, tipo	Manchas y motas Abundancia, color, tamaño, forma, localización	Otras Sickenadas Al activo

0-65 → distribuidos en forma fragmentos
105-145 → mayoría de poros dentro de los agregados

2. Descripción de los horizontes de suelo de los perfiles 2, 6*, 30 y 32

Perfil 2									
Profundidad (cm)	Horizonte	Clase textural	Color (Húmedo)	Estructura	Estabilidad de agregados	Contenido de carbonatos (%)	Humedad actual	Densidad de raíces (dm ²)	Abundancia de poros (dm ²)
0-65	A	CR	7.5 YR 3/2	Angular en bloques	Baja	6.00	5.00	8.00	25.00
65-105	B1	CRL	7.5 YR 7/6	Granular	Muy baja	37.50	5.00	1.50	25.00
105-145	B2	CRL	7.5 YR 7/6	Migajón	Baja	37.50	3.00	4.00	100.00
145-235	B3	CLf	7.5 YR 6/6	Angular en bloques	Muy baja	37.50	3.00	1.50	5.00
Perfil 6*									
0-80	AB	CRA	7.5 YR 4/3	No tiene	Nula	—	4.00	0.00	0.00
80-162	B1	CA	7.5 YR 3/4	Subangular en bloques	Alta	—	5.00	0.00	25
162-230	B2	CLf	7.5 YR 6/4	Angular en bloques	Baja	—	5.00	0.00	35
230-306	B3	CLf	7.5 YR 6/4	Angular en bloques	Baja	—	5.00	0.00	25
Perfil 30									
0-35	A	CR	7.5 YR 3/1	Terrones	Baja	6.00	5.00	10.00	0.00
35-80	AB	CLf	7.5 YR 4/6	Angular en bloques	Mediana	37.50	5.00	4.00	25.00
80-110	B1	CLf	7.5 YR 5/4	Subangular en bloques	Mediana	6.00	4.00	4.00	50.00
110-210	B2	CLf	7.5 YR 5/6	Suelo estructurado	Moderada	2.00	1.00	4.00	10.00
Perfil 32									
0-50	A	CR	7.5 YR 3/2	Terrones	Baja	10.00	5.00	10.00	0.00
50-100	AB	CLf	7.5 YR 4/2	Angular en bloques	Moderada	37.50	5.00	7.50	25.00
100-130	B1	CLf	7.5 YR 5/3	Subangular en bloques	Mediana	37.50	4.00	1.50	30.00
130-200	B2	CR	7.5 YR 5/4	Suelo estructurado	Moderada	37.50	1.00	0.00	10.00

3. Datos de humedad gravimétrica y densidad aparentes de los perfiles 2, 30 y 32, a partir de los cuales se obtuvo la humedad volumétrica del suelo

Perfil	Horizonte	Profundidad (cm)	%Humedad gravimétrica (m/m)	Densidad aparente (pb)
2	A	5	3.98	1.07
2	A	15	5.45	1.08
2	A	25	9.61	1.01
2	A	35	9.88	1.05
2	A	45	16.67	1.09
2	A	55	18.28	1.15
2	A	65	13.40	1.18
2	B1	75	20.60	0.95
2	B1	85	21.06	0.99
2	B1	95	20.74	1.12
2	B1	105	18.36	0.87
2	B2	115	19.73	0.96
2	B2	125	21.11	1.02
2	B2	135	21.64	1.16
2	B2	145	30.95	1.19
2	B3	155	34.65	1.15
2	B3	165	34.84	1.09
2	B3	175	30.46	1.03
2	B3	185	26.64	1.00
2	B3	195	25.84	1.03
2	B3	205	25.00	0.91
2	B3	215	24.46	1.23
2	B3	225	24.10	1.09
2	B3	235	26.02	1.18
30	A	5	15.58	0.64
30	A	15	14.20	0.82
30	A	25	17.11	0.89
30	A	35	13.58	0.99
30	AB	45	17.66	0.87
30	AB	55	16.24	0.83
30	AB	65	18.36	0.81
30	AB	75	19.40	1.14
30	B1	85	20.92	1.08
30	B1	95	21.72	1.25
30	B1	105	24.17	1.27
30	B2	115	27.71	1.28
30	B2	125	29.41	1.25
30	B2	135	31.36	1.29
30	B2	145	33.55	1.30
30	B2	155	33.04	1.31
30	B2	165	34.55	1.32
30	B2	175	36.72	1.32
30	B2	185	36.49	1.26
30	B2	195	37.72	1.24
32	A	5	13.89	0.94
32	A	15	16.69	1.06
32	A	25	12.51	0.94
32	A	35	14.72	0.93
32	A	45	21.59	1.21
32	AB	55	19.68	1.20
32	AB	65	22.10	1.09
32	AB	75	19.03	1.00
32	AB	85	19.61	1.03
32	AB	95	27.02	1.10
32	B1	105	30.03	1.16
32	B1	115	30.95	1.23
32	B1	125	26.01	1.04

32	B2	135	28.73	1.12
32	B2	145	30.38	1.23
32	B2	155	26.45	1.05
32	B2	165	32.24	1.20
32	B2	175	32.17	1.13
32	B2	185	37.33	1.25
32	B2	195	40.53	1.12