



IPICYT

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

POSGRADO EN GEOCIENCIAS APLICADAS

**Caracterización geofísica del subsuelo al norte del
municipio de Matehuala, San Luis Potosí.**

Tesis que presenta

Andrés Del Ángel Ríos

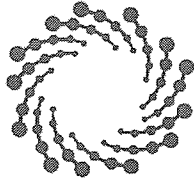
Para obtener el grado de

Maestro(a) en Geociencias Aplicadas

Directores de la Tesis

**Dr. Omar Delgado Rodríguez
Dra. Nadia Valentina Martínez Villegas**

San Luis Potosí, S.L.P., 31 / Enero/ 2020



IPICYT

Constancia de aprobación de la tesis

La tesis "**Caracterización geofísica del subsuelo al norte del municipio de Matehuala, San Luis Potosí**" presentada para obtener el Grado de Maestro en Geociencias Aplicadas, fue elaborada por **Andrés Del Angel Ríos** y aprobada el treinta y uno de enero del dos mil veinte por los suscritos, designados por el Colegio de Profesores de la División de Geociencias Aplicadas del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C.

Dr. Omar Delgado Rodríguez
Codirector de la tesis

Dra. Nadia Valentina Martínez Villegas
Codirector de la tesis

Dr. Vsevolod Yutsis
Miembro del Comité Tutorial

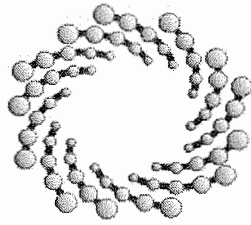
Dr. José Alfredo Ramos Leal
Miembro del Comité Tutorial



Créditos Institucionales

Este trabajo fue financiado con fondos del proyecto NA140182 (Royal Society) y el proyecto 7073 (CONACyT). Durante la realización del trabajo el autor recibió una beca académica del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (865135).

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



IPICYT

Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C.

Acta de Examen de Grado

El Secretario Académico del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C., certifica que en el Acta 053 del Libro Primero de Actas de Exámenes de Grado del Programa de Maestría en Geociencias Aplicadas está asentado lo siguiente:

En la ciudad de San Luis Potosí a los 31 días del mes de enero del año 2020, se reunió a las 11:00 horas en las instalaciones del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C., el Jurado integrado por:

Dr. José Alfredo Ramos Leal	Presidente	IPICYT
Dr. Vsevolod Yutsis _	Secretario	IPICYT
Dra. Nadia Valentina Martínez Villegas	Sinodal	IPICYT
Dr. Omar Delgado Rodríguez	Sinodal	IPICYT

a fin de efectuar el examen, que para obtener el Grado de:

MAESTRO EN GEOCIENCIAS APLICADAS

sustentó el C.

Andrés Del Angel Ríos

sobre la Tesis intitulada:

Caracterización geofísica del subsuelo al norte del municipio de Matehuala, San Luis Potosí

que se desarrolló bajo la dirección de

Dra. Nadia Valentina Martínez Villegas
Dr. Omar Delgado Rodríguez

El Jurado, después de deliberar, determinó

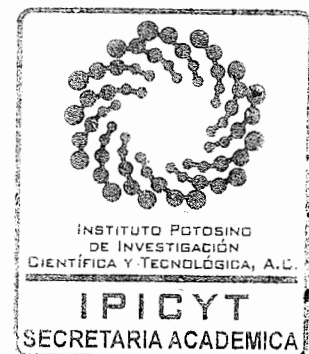
APROBARLO

Dándose por terminado el acto a las 12:15 horas, procediendo a la firma del Acta los integrantes del Jurado. Dando fe el Secretario Académico del Instituto.

A petición del interesado y para los fines que al mismo convengan, se extiende el presente documento en la ciudad de San Luis Potosí, S.L.P., México, a los 31 días del mes de enero de 2020.

Dr. Marcial Bonilla Marín
Secretario Académico

Mtra. Ivonne Lizette Cuevas Vélez
Jefa del Departamento del Posgrado



Dedicatorias

**Este trabajo se lo dedico a DIOS,
A mis Padres,
A mis hermanas
y a todas esas personas
que siempre me apoyaron
y creyeron en mí.**

Agradecimientos

En primer lugar, quiero agradecer a DIOS porque me dio la oportunidad de terminar este gran reto para mí.

Quiero agradecer infinitamente a mis padres y hermanas por su apoyo incondicional, sin ellos no tendría el ánimo y fuerzas para seguir adelante con los retos que se me presentan en la vida

Gracias al Dr. Omar Delgado Rodríguez y la Dra. Nadia Valentina Martínez Villegas por brindarme grandes conocimientos en estos 2 años de maestría.

Gracias al Dr. José Alfredo Ramos y al Dr. Vsevolod Yutsis por sus asesorías en mi estancia en el IPICYT, siempre me apoyaron cuando más lo necesite.

Agradezco enormemente a mi tía Michaela, tía Alicia, tía Laura, Orlando, Sandori, que amablemente me brindaron su hospitalidad durante toda mi estancia en la capital potosina. Les agradezco de todo corazón, ya que sin ustedes mi estancia hubiera sido dura y corta.

A mis compañeros Jonathan, Candelaria, Alberto y Rodrigo que siempre estuvieron apoyándome con mucho esfuerzo en los duros trabajos de campo.

Contenido

Constancia de aprobación de la tesis.....	ii
Créditos institucionales.....	iii
Acta de examen.....	iv
Dedicatorias.....	v
Agradecimientos.....	vi
Indice de figuras.....	x
Indice de tablas.....	xv
Resumen.....	xvi
Abstract.....	xvii
1.0 Introducción.....	1
1.1 Antecedentes.....	2
1.2 Objetivo general.....	12
1.3 Objetivos específicos.....	13
1.4 Hipótesis.....	13
1.5 Planteamiento del problema.....	14
1.6 Justificación de la investigación.....	15
1.7 Localización del área de estudio.....	15
2.0 Marco Geológico.....	17
2.1 Geología Regional.....	17
2.2 Geología Local.....	19

2.2.1 Formación Cupido.....	21
2.2.2 Formación La Peña.....	21
2.2.3 Formación El Abra.....	21
2.2.4 Formación Indidura.....	22
3.0 Marco Teórico.....	23
3.1 Métodos eléctricos.....	24
3.2 Resistividad eléctrica	24
3.3 Resistividad aparente.....	26
3.4 Método de resistividad eléctrica.....	26
3.5 Propiedades eléctricas de las rocas.....	26
3.6 Sondeo Eléctrico Vertical (SEV)	27
3.7 Configuración electródica.....	29
3.7.1 Configuración Wenner.....	29
3.7.2 Configuración Schlumberger.....	30
3.7.3 Configuración Dipolo - Dipolo.....	31
3.8 Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE)	31
4.0 Metodología.....	35
4.1 Sondeos Eléctricos Verticales (SEV).....	35
4.2 Sección Geoeléctrica.....	39
4.3 Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE).....	41
5.0 Resultados.....	44
5.1 Sondeos Eléctricos Verticales (SEV).....	44
5.2 Sección Geoeléctrica	47

5.3	Perfiles de las Tomografías de Resistividad Eléctrica	48
5.3.1	Perfil TRE I.....	48
5.3.2	Perfil TRE II.....	49
5.3.3	Perfil TRE III.....	50
5.3.4	Perfil TRE IV.....	51
5.4	Secciones y columnas geológicas dadas por SEV y TRE	52
5.4.1	Sección Geológica Oeste-Este.....	53
5.4.2	Columnas geológicas a partir de los SEV.....	56
5.4.3	Sección Geológica I.....	58
5.4.4	Sección Geológica II.....	59
5.4.5	Sección Geológica III.....	60
5.4.6	Sección Geológica IV.....	61
5.5	Acuífero somero.....	62
6.0	Modelo conceptual.....	65
7.0	Conclusiones.....	68
8.0	Bibliografía.....	69

Índice de Figuras

<i>Figura 1. Mapa de elevación del nivel estático del acuífero regional, el cual muestra una dirección del flujo subterráneo NW – SE (Tomada de Rodríguez Rodríguez, 2016).....</i>	<i>4</i>
<i>Figura 2. Unidades Fisiográficas del área de estudio, donde se observan la MC, colindando al oriente con SMOr, al poniente con SMOc y al sur con FVTM. Tomada y editada de (Tomada de Tristán González, 2008).....</i>	<i>5</i>
<i>Figura 3. Geología local de la Subcuenca de Matehuala, en la que se observan principalmente rocas carbonatadas del Cretácico, así como depósitos sedimentarios Terciarios y Cuaternarios, lacustres y aluviales respectivamente Carta F14-A25 Servicio Geológico Mexicano, 2012 (Tomada de Rodríguez Rodríguez, 2016).....</i>	<i>7</i>
<i>Figura 4. Ubicación de las secciones geológicas (A-A', B-B'), así como las columnas estratigráficas que las componen y la ubicación de la sección geoeléctrica (C-C'). (Tomada de Rodríguez Rodríguez, 2016).....</i>	<i>9</i>
<i>Figura 5. Sección geoeléctrica de C - C', en la que se muestra el número de unidades, espesor e interpretación geológica, así como sobrepuestos los SEV'S a una escala logarítmica (color rojo) (Tomada de Rodríguez Rodríguez, 2016).....</i>	<i>10</i>

<i>Figura 6. Ejemplo visual del objetivo.....</i>	<i>13</i>
---	-----------

<i>Figura 7. Porción de la carta minera F14-A25 del Servicio Geológico Mexicano, donde muestra nuestra área de estudio en la zona de transición de dos litologías diferentes, Aluvión de lado Oeste y Lacustre de lado Este.....</i>	<i>14</i>
--	-----------

<i>Figura 8. Ubicación del área de estudio, al norte del municipio de Matehuala, San Luis Potosí, México.....</i>	<i>16</i>
---	-----------

<i>Figura 9. Ubicación del territorio denominado “El Graseo” y de la fundidora minera antigua, principal responsable de la contaminación por arsénico dentro del área de estudio.....</i>	<i>16</i>
---	-----------

<i>Figura 10. Unidades Fisiográficas del área de estudio, donde se observan la Sierra Madre Oriental (SMOr), Sierra Madre Occidental (SMOc), Mesa Central (MC), y Cinturón Volcánico Mexicano (FVTM) (Tomada de Tristán-González, 2008).....</i>	<i>17</i>
--	-----------

<i>Figura 11. Geología local de la subcuenca de Matehuala, en la que se observan los materiales de las formaciones que afloran, resaltando la litología Lacustre al Este de nuestra área de estudio (marcada por cuadro rojo) y la litología Aluvión al Oeste. (Tomada de Rodríguez Rodríguez, 2016)</i>	<i>20</i>
--	-----------

<i>Figura 12. La caída de potencial V entre 2 puntos por los que circula una corriente eléctrica de intensidad I, es proporcional a esta y a la resistencia R que ofrece el medio al flujo de la corriente (Auge, 2008).....</i>	<i>25</i>
---	-----------

<i>Figura 13. Muestra la resistividad promedio que manejan los diferentes tipos de materiales del subsuelo (Tomada de López-Hidalgo, 2004).....</i>	<i>27.</i>
<i>Figura 14. Metodología del sondeo eléctrico vertical (SEV) (Tomada de Rodríguez-Rodríguez, 2016).....</i>	<i>28</i>
<i>Figura 15. Configuración geométrica del arreglo Schlumberger.....</i>	<i>30</i>
<i>Figura 16. Configuración geométrica del arreglo Wenner</i>	<i>30</i>
<i>Figura 17. Configuración geométrica del arreglo Dipolo-Dipolo.....</i>	<i>31</i>
<i>Figura 18. Pseudosección de Resistividad aparente obtenida con dispositivo Wenner (Loke, 2003)</i>	<i>33</i>
<i>Figura 19. Perfil de Tomografía de Resistividad Eléctrica con configuración Wenner – Schlumberger</i>	<i>34</i>
<i>Figura 20. Ubicación de los SEV realizados en el área de estudio, al norte del municipio de Matehuala.....</i>	<i>37</i>
<i>Figura 21. Material para la ejecución de los SEV. (Syscal R2, batería de 12 V, tres mazos, dos cintras métricas, cuatro carretes de cable y varillas de acero inoxidable).....</i>	<i>38</i>
<i>Figura 22. Ubicación de la sección geoelectrica de 3700 m de longitud con orientación Oeste- Este (abarcando 11 SEV)</i>	<i>40</i>
<i>Figura 23. Ubicación de las cuatro TRES dentro del área de estudio, tres en la litología de Aluvión y una de la litología Lacustre.....</i>	<i>42</i>

Figura 24. Sección geoelectrica con orientación Oeste – Este de 3700 m de longitud, donde se muestran diferentes contrastes de resistividad a diferentes profundidades. Esta sección abarca un total de 11 SEV a diferentes profundidades de alcance..... 48

Figura 25. Perfil TRE I con orientación Norte-Sur, manifiesta diferentes contrastes de resistividad a una profundidad de 40 m y una distancia de 220 m..... 49

Figura 26. Perfil TRE II con orientación Norte-Sur, manifiesta diferentes contrastes de resistividad a una profundidad de 40 metro y una distancia de 180 m..... 50

Figura 27. Perfil TRE III con orientación Norte-Sur, manifiesta diferentes contrastes de resistividad a una profundidad de 40 metro y una distancia de 630 m..... 51

Figura 28. Perfil TRE IV manifiesta diferentes contrastes de resistividad a una profundidad de 40 metro y una distancia de 220 m, en el cual resalta la presencia de materiales con resistividad alta..... 52

Figura 29. Sección geológica con orientación Oeste – Este de 3700 m de longitud, donde se manifiesta la presencia de diferentes materiales pertenecientes a las dos litologías presentes en el área de estudio, de acuerdo con información del Servicio Geológico Mexicano (2012)..... 56

Figura 30. Columnas estratigráficas derivadas del resultado de los SEV, de acuerdo con la información geológica del sitio..... 57

Figura 31. Sección geología I, manifiesta la presencia de tres materiales diferentes a una profundidad de 40 m y 220 m de distancia lineal en superficie. Se presume que el acuífero está asentado en un material más impermeable (Grava-Arena-Limo) 58

Figura 32. Sección geología II, manifiesta la presencia de tres materiales diferentes en una forma homogénea a una profundidad de 40 m y 180 m de distancia lineal en superficie. Se presume que el acuífero está presente en el material permeable (Gravas-Arenas-Limos) 59

Figura 33. Sección geología III, manifiesta la presencia de cuatro materiales diferentes pertenecientes a las litologías Aluvión y Lacustre a una profundidad de 40 m y 630 m de distancia lineal en superficie..... 61

Figura 34. Sección geología IV, manifiesta la presencia de cuatro materiales diferentes a una profundidad de 40 m y 220 m de distancia lineal en superficie. Donde se observa una gran cantidad de yeso perteneciente a la litología Lacustre..... 62

Figura 35. El acuífero somero Matehuala-Cerrito Blanco se distribuye en forma de paleocanales o canales subterráneos en dirección Oeste-Este en el área donde se ubica la antigua fundidora y al Noreste de esta..... 63

Figura 36. El material permeable por el cual fluye el acuífero somero, se presenta de forma laminar al sur del área de estudio, al norte de la ciudad de Matehuala..... 64

Figura 37. Modelo conceptual..... 67

Índice de Tablas.

Tabla 1. Unidades eléctricas, rango de resistividad y su posterior correlación con los materiales geológicos (Tomada de Rodríguez Rodríguez, 2016) 11

Tabla 2. Resistividades típicas de los materiales presentes en el área de estudio..... 11

Tabla 3. Clave de identificación del SEV, coordenadas (X, Y) y altitud..... 36

Tabla 4. Nombre de la tomografía de resistividad eléctrica, ubicación (punto inicial, punto final), longitud (m) y altitud..... 41

Tabla 5. Resultado del procesado de los SEV (Numero de SEV, coordenadas, numero de capas, profundidad, espesor y resistividad eléctrica)..... 44

Resumen
**“Caracterización geofísica del subsuelo al norte del municipio de
Matehuala, San Luis Potosí”**

En el municipio de Matehuala, al Noreste del estado de San Luis Potosí, se han reportado altas concentraciones de arsénico (As) provenientes de la lixiviación de los desechos de una antigua fundidora en un acuífero somero. No obstante, la presencia de este acuífero somero no ha sido bien esclarecido hasta la fecha. Lo anterior es, sin embargo, importante comprender el mecanismo de transporte del As en el sistema acuífero Matehuala-Cerrito Blanco, debido a la incertidumbre que hay actualmente sobre la configuración somera del subsuelo (<50 m) en el área donde se encuentra la principal fuente de contaminación de As.

La manera más eficiente de elucidar la distribución del acuífero somero es mediante métodos indirectos como los geofísicos, específicamente, los métodos geoeléctricos, los cuales recolectan información importante para ubicar la(s) zona(s) saturada(s) en el subsuelo mediante mediciones de resistividad eléctrica. Los resultados de los estudios geofísicos, así como la información sobre niveles estáticos y estudios previos geológicos sugieren la presencia de dos sistemas acuíferos, uno regional con flujo de agua subterránea en dirección NW - SE y un segundo acuífero somero con dirección O - E. Este último acuífero se distribuye por cuerpos permeables (Gravas-Arenas-Limos) en forma de paleocanales en el área donde se ubica la antigua fundidora y en forma lenticular al Suroeste de la misma área. Así mismo, existen zonas donde el subsuelo no manifiesta la existencia de un acuífero, las cuales se proponen como áreas en superficie posibles a realizar una solución o estabilización de la contaminación *in situ*.

Abstract

“Caracterización geofísica del subsuelo al norte del municipio de Matehuala, San Luis Potosí”

In the municipality of Matehuala, in the Northeast part of the state of San Luis Potosí, high arsenic (As) in a shallow aquifer have been reported from the leaching of waste from an old smelter. However, the presence of this shallow aquifer has not been well clarified. This is important to clarify it in order to understand the transport way of As in the Matehuala-Cerrito Blanco aquifer, due to the uncertainty that there is currently on the configuration of the subsoil (<50 m) in the area where the main source of As contamination is.

The most efficient way to elucidate the distribution of the shallow aquifer is through indirect methods such as geophysicists, as geoelectrics methods, which collect important information to locate the saturated zone (s) in the subsoil through the specifications electrical resistivity The results of the geophysical studies, as well as the information on static levels and previous geological studies that affect the presence of two aquifer systems, first, a regional aquifer with groundwater flow in NW - SE direction and a second one, a shallow aquifer, with W - E direction. The shallow aquifer is distributed through permeable bodies (Gravas-Arenas-Limos) as paleochannels in the area of old smelter is located, meanwhile and lenticular aquifer is located in the Southwest of the same area. Likewise, there areas proposed to perform a stabilization of pollution where the subsoil does not manifest the existence of an aquifer.

1.0 Introducción

Diversos casos de contaminación por arsénico (As) se han registrado en aguas subterráneas en todo el mundo. En ocasiones, estos han provocado daños severos a la flora y fauna que están en contacto con estas aguas (Panca, 2014).

En México se han reportado eventos similares de contaminación en aguas subterráneas. En las zonas áridas del norte de este país, existen depósitos minerales con niveles elevados de As, el cual se ha disuelto por el agua subterránea. Por ejemplo; en el estado de Chihuahua, la información hidrogeológica muestra el origen natural geogénico del As relacionado con el flujo de recarga procedente de depósitos minerales de arsenopirita de las sierras circundantes en el acuífero Meoqui-Delicias, que es el principal abastecedor de agua para los municipios de Julimes, Meoqui, Rosales y Delicias (Herrera-Peraza et al., 2009).

En el municipio de Matehuala, San Luis Potosí también existe un problema de contaminación por As en aguas subterráneas, debido a los residuos de una antigua fundidora abandonada la cual representa un gran peligro para la población (Razo et al., 2004; Bueno Pedroza, 2005; González-Grijalva, 2009; Martínez-Villegas et al., 2013; Lara Del Río, 2015; Rodríguez Rodríguez, 2016). El As es un elemento tóxico para el organismo humano, que en concentraciones altas causa efectos agudos que pueden llegar a ser letales (OMS, 2016).

Estudios anteriores han propuesto, además del acuífero regional Cedral – Matehuala ampliamente reportado por el INEGI y CONAGUA (CONAGUA, 2015) en la porción norte del Estado de San Luis Potosí cubriendo un total de 1954 km^2 , la presencia de un acuífero somero contaminado con As al norte del municipio de Matehuala que fluye a través de un cuerpo permeable compuesto por Gravas y Arenas con una dirección de flujo preferencial O

- E (Rodríguez Rodríguez., 2016). No obstante, la presencia de este acuífero somero no ha sido contundentemente esclarecido hasta la fecha. Lo anterior es, sin embargo importante de elucidar a fin de comprender el transporte de arsénico en el sistema acuífero Matehuala-Cerrito Blanco, cuyo transporte, a su vez ha sido particularmente difícil de comprender debido a la incertidumbre que hay actualmente sobre la configuración somera del subsuelo (<50 m) en el área donde se encuentra la principal fuente de contaminación de As (Martínez-Villegas et al., 2013), así como confirmar la evidencia de fenómenos geológicos en el contacto litológico entre sedimentos Aluviales y sedimentos Lacustres, que podrían incluir fracturas o canales que faciliten el flujo preferencial del agua así como el transporte del arsénico en el sitio y que está generando un impacto negativo en el ambiente y en la población (Lara Del Río, 2015, Martínez-Villegas et al., 2017).

Esclarecer el comportamiento y la composición geológica del subsuelo y del acuífero somero (Matehuala-Cerrito Blanco) en el área donde se encuentra la principal fuente de contaminación, es importante en la hora de la toma de decisiones respecto a la solución o estabilización de la contaminación del sitio.

1.1 Antecedentes

Se han realizado distintos estudios geológicos, geofísicos, hidrogeológicos y ambientales en el área que comprende el municipio de Matehuala y sus alrededores por Raisz (1959); Grande López et al. (1967); López Ramos (1974); Carrillo Bravo (1982); Barboza-Gudiño (1998); Razo et al., (2004); Tristán González (2008); Martínez-Villegas et al., (2013); Lara Del Río (2015); Servicio Geológico Mexicano (2012); Rodríguez Rodríguez, 2016).

Razo y colaboradores (2004), evaluaron el impacto ambiental por contaminación de As en un área de 105 km^2 , que comprende desde el municipio de Villa de la Paz hasta el municipio de Matehuala. Reportaron la existencia de una elevada contaminación por As (265 mg/L) en estanques de almacenamiento de agua pluvial excediendo la norma oficial mexicana NOM-127-SSA1-1994, la cual establece un límite máximo permisible de arsénico en agua para consumo humano de 0.025 mg/L (NOM-127, 2005). Basándose en estos resultados, sugirieron que la dispersión de este contaminante, es mediante el transporte por corrientes fluviales que cruzan el área en dirección Oeste – Este.

Martínez Villegas y colaboradores (2013), demostraron el origen de la contaminación por arsénico en un acuífero somero al norte del municipio de Matehuala (Matehuala-Cerrito Blanco), estableciendo que dicha contaminación es producto de la disolución de arseniatos de calcio en los residuos de una fundidora minera abandonada que se ubica dentro de la ciudad de Matehuala, alcanzando valores de hasta 158 mg / L de arsénico disueltos en el acuífero somero.

De acuerdo con estas investigaciones, se puede presumir la existencia de un acuífero somero contaminado con As al norte del municipio de Matehuala, con escasa información de su distribución, localización y composición geológica. Es aquí donde radicó la necesidad de investigar en la literatura con el fin de conocer la composición geológica del subsuelo del Municipio de Matehuala, la dinámica de las aguas subterráneas, la morfología y la geología del acuífero somero (Matehuala-Cerrito Blanco).

El área se localiza en la Región Hidrológica No. 37 El Salado, en la Subcuenca Hidrográfica RH37Ba (INEGI, 2007), la cual se caracteriza por presentar cuencas cerradas con pocas elevaciones y escasas corrientes superficiales (Campos, 2007).

El drenaje superficial presenta una dirección casi Oeste – Este manifestando patrones dendríticos y paralelos, siendo estos últimos los más abundantes. Estos escurren desde las laderas montañosas más altas como la Sierra el Catorce y Sierra Azul hasta las zonas de más baja elevación topográfica de la cuenca.

Los resultados del cálculo de la elevación del nivel estático para el acuífero regional, se muestran en la Figura 1, en la que se observa que las elevaciones máximas se encuentran en la zona noroeste de la Subcuenca presentando valores de entre 1650 a 1630 msnm en la cercanía de la localidad de Cedral, mientras que en la zona sureste se observan las menores elevaciones presentando valores de entre 1470 a 1450 msnm, con una dirección de flujo NW-SE. (Rodríguez Rodríguez, 2016).

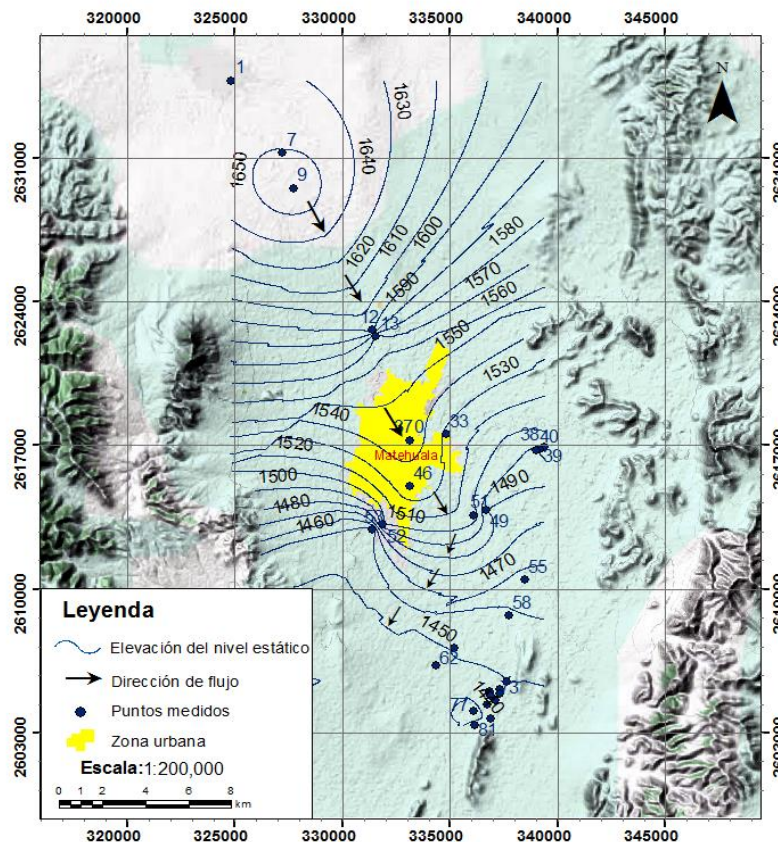


Figura 1. Mapa de elevación del nivel estático del acuífero regional, el cual muestra una dirección del flujo subterráneo NW – SE. (Tomada de Rodríguez Rodríguez, 2016).

Este acuífero se comporta como de tipo libre tomando como base el concepto de que un acuífero libre es aquel donde el nivel freático se encuentra a presión atmosférica a través del aire en los poros de la zona no saturada (Singhal & Gupta, 1999).

De acuerdo con Tristán González (2008), el municipio de Matehuala se encuentra en la unidad fisiográfica de la Mesa Central (MC) (Figura 2), la cual Raisz (1959) la reconoció como una Provincia Fisiográfica que se localiza en la región central de la República Mexicana y colinda con el Río Nazas y Durango al norte, el Cinturón Volcánico Mexicano (FVTM) al Sur, Sierra Madre Occidental (SMOc) al poniente y la Sierra Madre Oriental (SMOr) al Oriente, comprendiendo parte de los estados de Durango, Zacatecas, San Luis Potosí, Aguascalientes y Guanajuato.

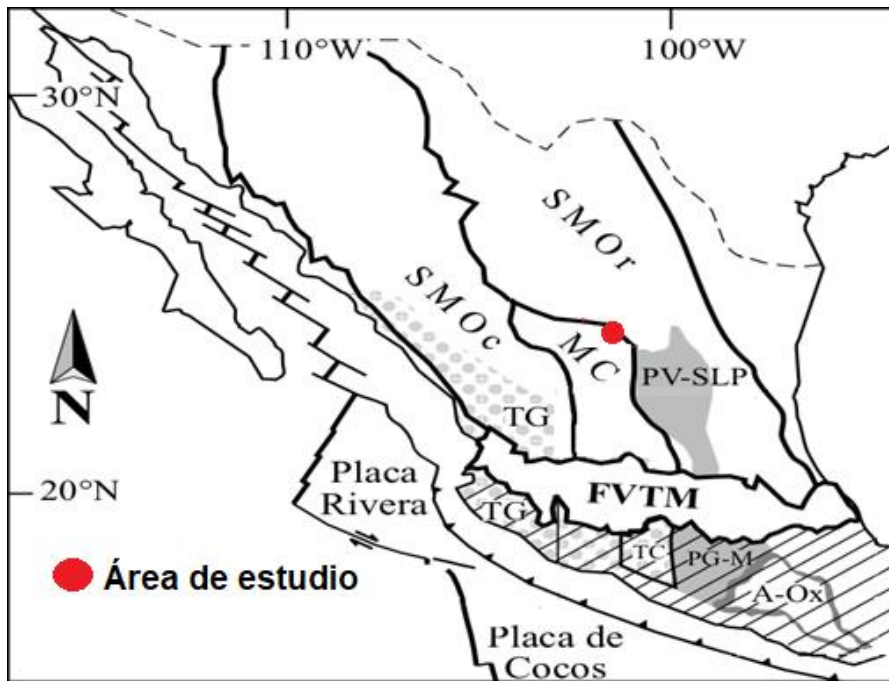


Figura 2. Unidades Fisiográficas del área de estudio, donde se observan la MC, colindando al oriente con SMOr, al poniente con SMOc y al sur con FVTM. (Tomada de Tristán González, 2008)

López Ramos (1974) reconoció la parte oriental de la MC como provincia geológica y le dio el nombre de Cuenca Sedimentaria Central, la cual corresponde a lo que Carrillo Bravo (1982) nombro como Cuenca Mesozoica del Centro de México, definiéndola como una gran cuenca sedimentaria que contiene unos 700 000 km^3 de sedimentos marinos de edad Jurásico al Cretácico.

Barboza-Gudiño (1998) reportó que la geología inicio con el depósito de la Formación Zacatecas del Triásico Tardío constituido por secuencias marinas turbidíticas. Sobre la Formación Zacatecas, se depositó la Formación Nazas la cual corresponde a una secuencia vulcano-sedimentaria en forma de flujos piroclásticos y lavas con asociación de lechos rojos.

La subsidencia de la cuenca continúa en el Cretácico Temprano con el depósito de sedimentos calcáreo-arcillosos y calizas con pedernal correspondientes a las Formaciones La Peña, Cuesta del Cura y Cupido (Barboza-Gudiño, 1998).

El Servicio Geológico Mexicano (2012) reportó que la Subcuenca de Matehuala está delimitada por calizas muy deformadas, plegadas y falladas que subyacen un paquete de conglomerados de edades del Cretácico Inferior al Cretácico Superior, en la que se encuentran cuatro formaciones geológicas principales; como son la Formación El Abra, la Formación La Peña, la Formación Indidura y la Formación Cupido (Figura 3). De igual forma reportó que cerca del municipio de Matehuala existe una laguna que se rellenó con detritos Lacustres constituidos por Arcilla, Limo y Yeso, a los cuales se les asigno edad del Terciario, del mismo modo que los conglomerados polimicticos constituidos por clastos principalmente caliza y pedernal empaquetados en una matriz calcáreo-arcilloso, los cuales se depositaron en los taludes al pie de las Sierras. Por último, el depósito de material Aluvial como Limo, Arena y Grava en el Cuaternario.

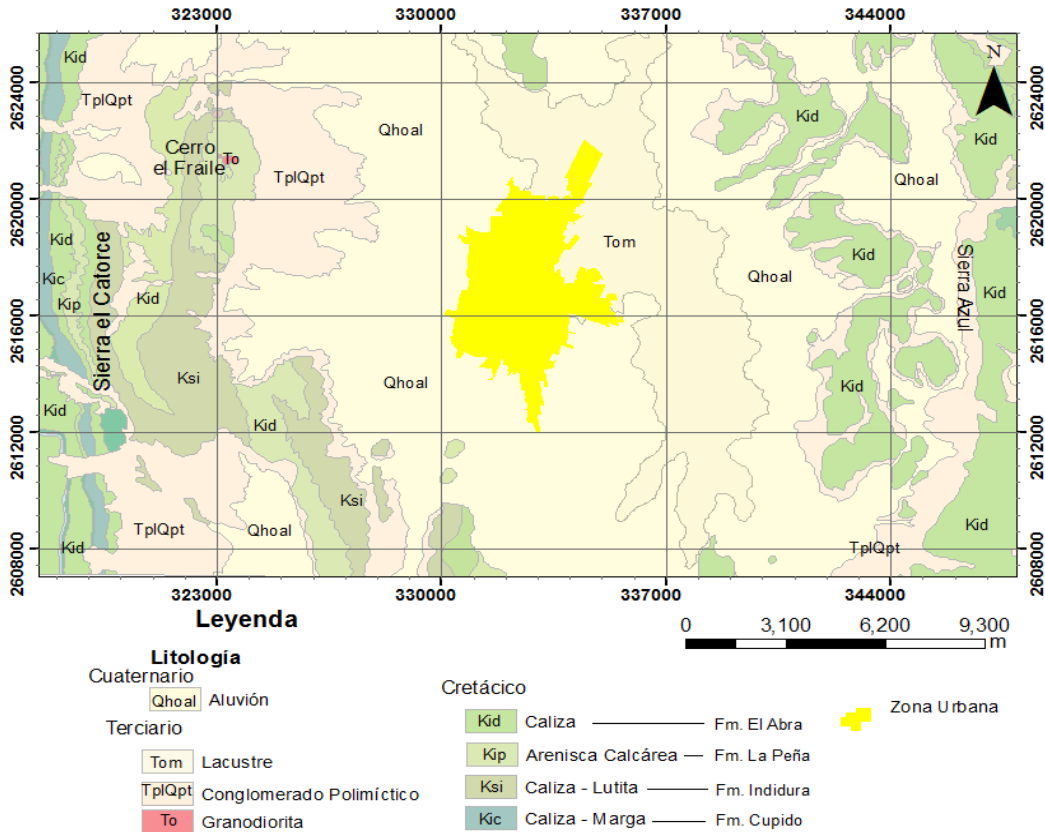
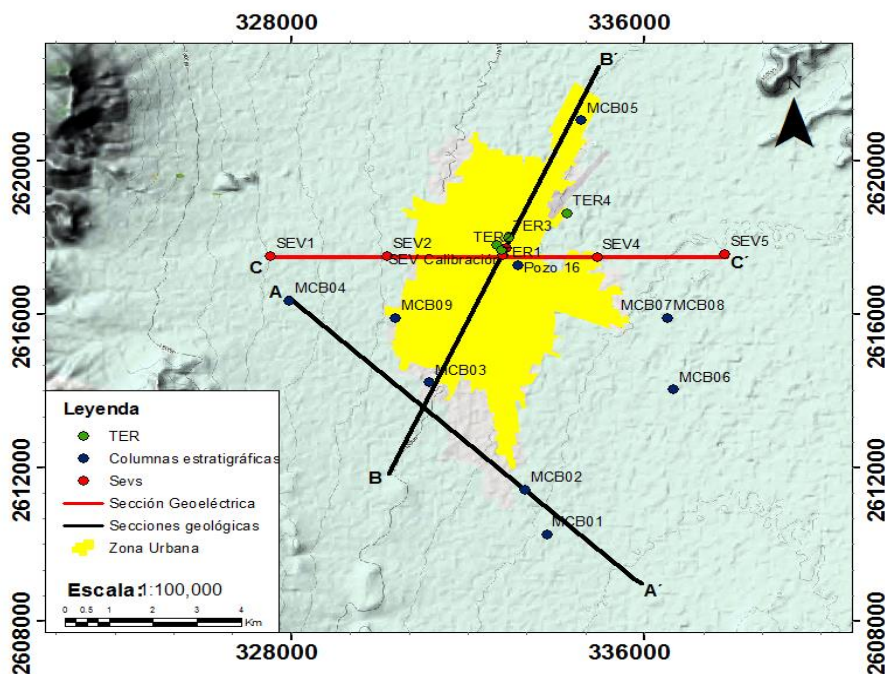


Figura 3. Geología local de la Subcuenca de Matehuala, en la que se observan principalmente rocas carbonatadas del Cretácico, así como depósitos sedimentarios Terciarios y Cuaternarios, Lacustres y Aluviales respectivamente Carta F14-A25 Servicio Geológico Mexicano, 2012 (Tomada de Rodríguez Rodríguez, 2016).

Con la finalidad de recolectar información litológica directa de la composición estratigráfica del subsuelo del municipio de Matehuala, Rodríguez Rodríguez (2016) visitó 9 afloramientos, donde describió la litología observada y midió los espesores para, posteriormente generar columnas estratigráficas, así como la obtención de la información litológica de 1 pozo de perforación con una profundidad de 200 m documentado por Ferrendiz (2010).

Para entender la distribución espacial de los materiales geológicos del subsuelo, así como posibles contactos litológicos, materiales susceptibles a contener agua y ambientes de

depósito, Rodríguez Rodríguez correlaciono algunas de las columnas estratigráficas en 2 trazados de secciones geológicas (Figura 4). La primera sección geológica (A-A') se realizó con la correlación de 4 columnas estratigráficas con dirección NW a SE, donde observó una distribución heterogénea de cuerpos compuestos por diferentes materiales como los son, Gravas, Gravilla, Limos, algunas presencias de Caliche, Arcilla y Arenas. La segunda sección geológica con dirección SW a NE compuesta por 2 columnas estratigráficas y la información litológica de 1 pozo etiquetado "Pozo #16" (B – B'), mostró que la geología manifiesta un contraste litológico presentándose material aluvial en la zona Suroeste y material Yesífero al Noreste de la subcuenca de Matehuala.



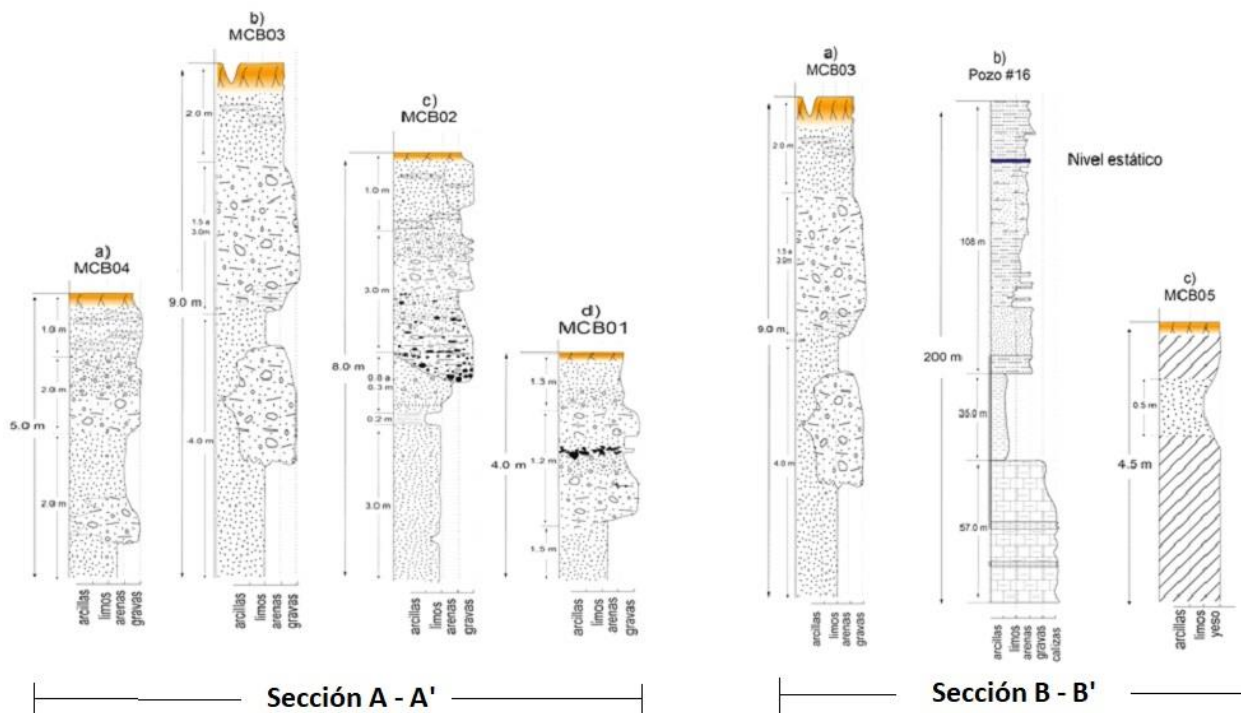


Figura 4. Ubicación de las secciones geológicas (A-A', B-B'), así como las columnas estratigráficas que las componen y la ubicación de la sección geoelectrica (C-C'). (Tomada de Rodríguez Rodríguez, 2016).

Adicionalmente a este trabajo, realizó una sección geoelectrica C-C' (Figura 4) con una distancia de 10 km, derivada de la correlación de los resultados de 5 Sondeos Eléctricos Verticales (SEVs), donde se manifestaron resistividades que va de 18.1 a 42160 Ohm.m. y seis unidades eléctricas delimitadas. De acuerdo con los valores típicos de resistividades que presentan las rocas (Orellana, 1982; Goodman, 1989; Arlandi, 2005), así como el resultado del sondeo de calibración del pozo #16 (en la cual dicha calibración sugiere que al menos los primeros 108 m son susceptibles a contener agua, lo cual concuerda con los dos sistemas acuíferos reportados, un acuífero somero y un acuífero regional Gonzalez-Grijalva, 2009; CONAGUA, 2007), correlacionó estos valores con los cuerpos geológicos presentes en el subsuelo (Figura 5).

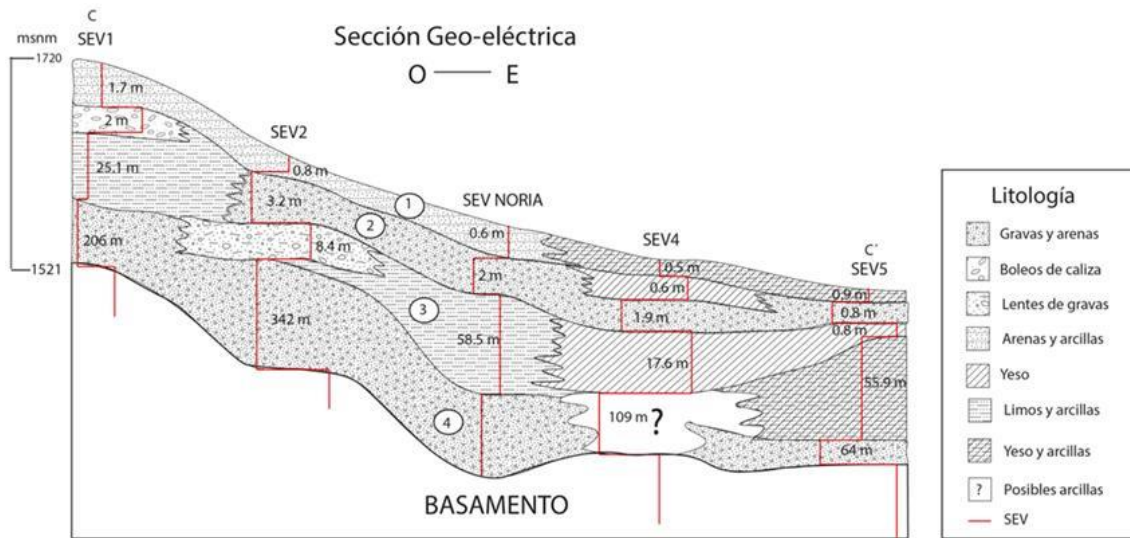


Figura 5. Sección geoelectrónica de C - C', en la que se muestra el número de unidades, espesor e interpretación geológica, así como sobrepuestos los SEV'S a una escala logarítmica (color rojo) (Tomada de Rodríguez Rodríguez, 2016).

El resultado de esta investigación nos muestra que existe un contraste litológico en la zona Oeste y Este de la subcuenca, presentando intercalación de material aluvial semiconsolidado como Gravas, Arenas, Limos y Arcillas en la zona Oeste, en el cual se definió claramente un paquete de Gravas en el que se propone se encuentra el acuífero somero. En la zona Este, sin embargo, se encuentra un depósito de Yesos, el cual se presenta en algunas capas con contenido de Arcillas y se propone que el acuífero somero interactúa con esta capa de Yesos, disolviendo y formando cavernas que permiten la continuación de este acuífero somero en esta última capa.

De igual forma correlacionó las resistividades promedio pertenecientes al material del subsuelo presentes en su área de estudio (Tabla 1).

Tabla 1. Unidades eléctricas, rango de resistividad y su posterior correlación con los materiales geológicos (Tomada de Rodríguez Rodríguez, 2016)

Unidades eléctricas	Resistividad (Ohm.m)	Material geológico
I	117 - 229	Arena, yeso con arcilla
II	791 - 1300	Yeso
III	41.7 – 65.1	Limos y arcilla
IV	377	Gravas
V	6.34	Arcilla

Por otro lado, se han realizado investigaciones en las cuales, de acuerdo con sus resultados, se han asignado un rango de resistividades a los materiales similares que se encuentran en la subcuenca de Matehuala (Tabla 2).

Tabla 2. Resistividades típicas de los materiales presentes en el área de estudio.

Cita Bibliográfica	Resistividad (Ω m)	Material
Arlandi, M. (2005)	150 – 500	Yeso con arcillas
	1000 – 5000	Yeso
	1 – 30	Arcillas
	20 – 100	Limos
	100 – 200	Arenas
Goodman R. (1989)	100 – 300	Gravas
	2000 – 100000	Caliza
Orellana E. (1982)	1- 20	Agua subterránea

Estas investigaciones nos han proporcionado información que nos ayudan a entender la composición geológica del subsuelo del municipio de Matehuala y el comportamiento del

acuífero somero (Matehuala-Cerrito Blanco) en una forma regional. No obstante, aún no es clara la distribución de los materiales geológicos y del acuífero somero (<50m) en el área donde se encuentra la principal fuente de contaminación (Martínez-Villegas et al., 2013). Información que nos ayudaría a elucidar y comprender el transporte del contaminante en el sistema acuífero Matehuala-Cerrito Blanco, así como la confirmación de fenómenos geológicos presentes en el contacto litológico entre sedimentos Aluviales y sedimentos Lacustres, como fracturas o canales que faciliten el flujo preferencial del agua, así como el transporte del arsénico en el sitio.

Estos antecedentes marcan la necesidad de realizar un estudio como el presente trabajo, para conocer la geología del subsuelo somero y la distribución del acuífero somero (Matehuala – Cerrito blanco) a través de métodos indirectos como la geofísica en el área donde se ubica de principal fuente de contaminación, con el objetivo de recolectar información importante a contemplar en la toma de decisiones respecto a la solución o estabilización de la contaminación del lugar.

1.2 Objetivo general

Establecer un modelo conceptual de la litología del subsuelo somero que incluya el acuífero somero (Matehuala - Cerrito Blanco) al norte del municipio de Matehuala.

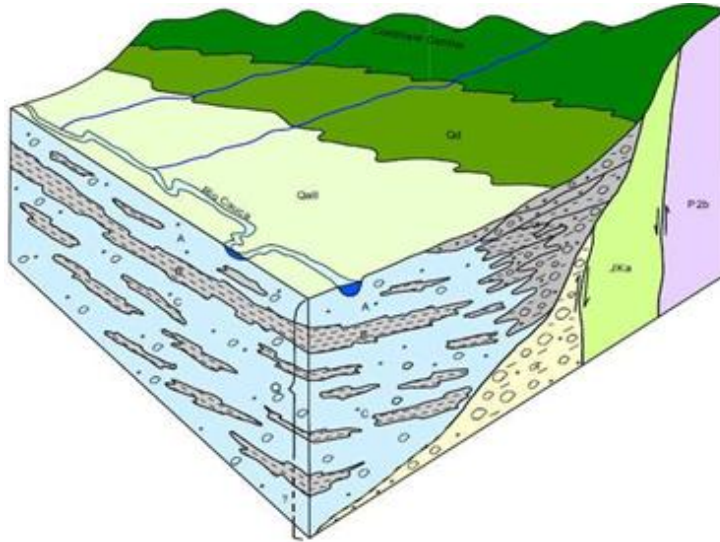


Figura 6. Ejemplo visual del objetivo

1.3 Objetivos específicos

- Ratificar la presencia de un acuífero somero adicional al acuífero regional.
- Conocer la geometría y distribución del acuífero somero en el área donde se ubica la antigua fundidora a través de sondeos eléctricos verticales y tomografías de resistividad eléctrica.
- Proponer un modelo litológico del subsuelo al norte del municipio de Matehuala, en un área que incluya la fuente principal de contaminación del acuífero somero Matehuala – Cerrito Blanco.

1.4 Hipótesis

En la ciudad de Matehuala existe un acuífero somero contaminado con As que fluye en una dirección Oeste - Este en el contacto de dos litologías diferentes (Aluvión y Lacustre) y que se diferencia del acuífero regional.

1.5 Planteamiento del problema

De acuerdo con la carta minera F14-A25 del Servicio Geológico Mexicano (2012), el área donde se ubica la antigua fundidora (principal fuente de contaminación de As), se encuentra en el contacto litológico entre sedimentos Aluviales y sedimentos Lacustres. Estas litologías están compuestas por materiales similares; como Arcilla, Limo y Arenas. Además, existe la presencia de material Yesífero en la litología Lacustre y material compuesto por Grava en la litología Aluvión (Servicio Geológico Mexicano, 2012).

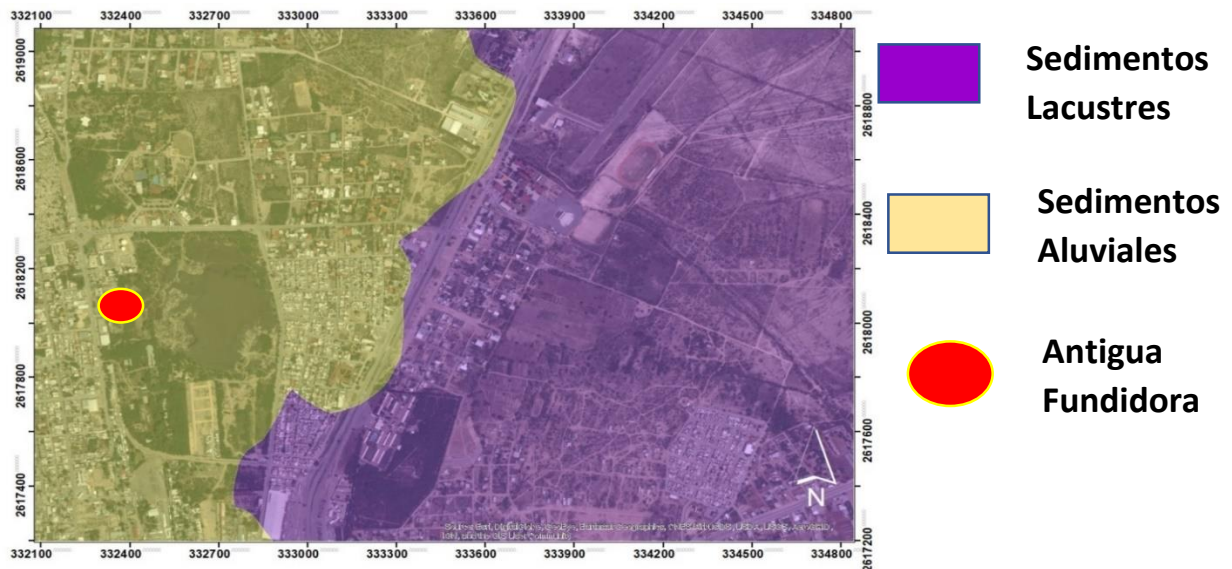


Figura 7. De acuerdo con la Carta Minera F14-A25 del Servicio Geológico Mexicano, existe un contacto de dos litologías (Aluvión – Lacustre) cerca del área donde se ubica la antigua fundidora.

Debido a que el área donde se ubica la antigua fundidora se encuentra cerca de la interdigitación de materiales Aluviales y Lacustres, se prevé la existencia de una litología compleja en donde el acuífero somero puede presentar diferente geometría, distribución u orientación a la antes reportada por Rodríguez Rodríguez (2016). Por ello se derivan las siguientes preguntas a resolver:

¿Existe un acuífero somero en el área donde se encuentra la antigua fundidora?

En caso de que exista, ¿Cómo es la distribución de este acuífero somero?

¿Cómo es el comportamiento litológico del subsuelo somero (<50m) del área donde se ubica la antigua fundidora?

¿Cuál sería el área más segura geológicamente hablando, para realizar una solución o estabilización del contaminante insitu?

1.6 Justificación de la investigación

Conocer la litología del subsuelo, incluyendo la modelación del acuífero somero del área donde se ubica la principal fuente de contaminación, es de suma importancia en la toma de decisiones respecto a la solución o estabilización de la contaminación por arsénico.

1.7 Localización del área de estudio

El área de estudio se encuentra dentro del valle localizado entre la Sierra Azul y Sierra el Catorce, dentro de los paralelos 23°27' - 24°08' y los meridianos 100°29' - 100°50' a 150 Km al norte de la capital del estado de San Luis Potosí. Esta área se encuentra en la parte norte del municipio de Matehuala, cuyo municipio presenta una altitud central de 1570 m.s.n.m. (Figura 8).

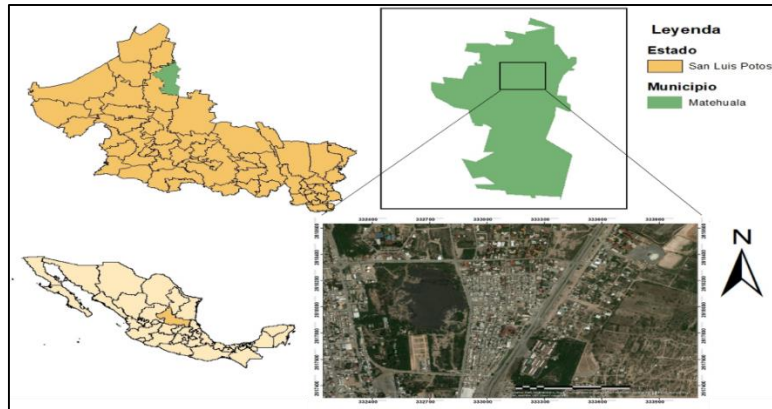


Figura 8. Ubicación del área de estudio en la parte norte del municipio de Matehuala, San Luis Potosí, México

Al Noreste de la ciudad de Matehuala, dentro de un territorio denominado “El Grasero”, se encuentra una antigua fundidora minera, principal responsable de la contaminación por arsénico en el área de estudio (Martínez-Villegas et al., 2013) y se ubica en las coordenadas latitud: 23° 39' 57" longitud: 100° 37' 46" (Figura 9).



Figura 9. Ubicación del territorio denominado “El Grasero” y de la antigua fundidora, principal responsable de la contaminación por arsénico dentro del área de estudio.

2.0 Marco Geológico

2.1 Geología Regional

Matehuala se ubica dentro de las unidades fisiográficas de la Mesa Central y la Sierra Madre Oriental (Figura 10).

La Mesa Central fue reconocida como provincia fisiográfica por Raisz (1959), quien la definió como: “Una cuenca rodeada por montañas elevadas, más alta y más plana que la provincia cuencas y sierras”. La Mesa Central es una provincia fisiográfica caracterizada por ser una región elevada que internamente puede subdividirse en dos regiones. La región sur tiene cotas que se encuentran por encima de los 2 000 m.s.n.m. (con excepción del valle de Aguascalientes), es una zona montañosa cubierta en su mayor parte por rocas volcánicas cenozoicas. La región norte que es de mayor extensión, muestra un estado de erosión más avanzado que la región sur, tiene grandes cuencas continentales rellenas de sedimentos Aluviales y Lacustres, presentando cotas por debajo de los 2 000 m.s.n.m. (Nieto-Samaniego et al., 2005).



Figura 10. Unidades Fisiográficas del área de estudio, donde se observan la Sierra Madre Oriental (SMOr), Sierra Madre Occidental (SMOc), Mesa Central (MC), y Cinturón Volcánico Mexicano (FVTM) (Tomada de Tristán-González, 2008).

Como se muestra en el recuadro rojo de la Figura 10, nuestra área de estudio comprende parte de la provincia de la Sierra Madre Oriental dentro de la subprovincia denominada Sierras de Bajas: así como, en la parte noreste de la provincia de la Mesa central, ambas provincias manifiestan rocas con edades que varían del Paleozoico al Holoceno.

En el Paleozoico Superior aflora una secuencia de filitas, esquistos de talco y sericitas sin espesor determinado debido a que no están expuestas en su base (Baker, 1922). Después en el Triásico Superior aflora una secuencia de areniscas y lutitas conocida como Formación Zacatecas (Burckhardt y Scalia, 1906); sobreyaciéndola discordantemente una secuencia de limonitas y conglomerado polimíctico, constituido por fragmentos de andesitas y riolitas con espesor aproximado de 120 m, perteneciente a la Formación Nazas (Pantoja-Alor, 1972).

En el Jurásico superior se manifiesta un conglomerado polimíctico constituido por fragmentos de arenisca y lutita, con espesor aproximado de 50 m correspondiente a la Formación la Joya (Mixon et al., 1958), descansando concordante y transicionalmente una secuencia calcárea marina de 150 m de espesor de aguas tranquilas perteneciente a la Formación Zuloaga (Imlay, 1938). Por encima de esta Formación, nos encontramos con una secuencia calcárea marina, depositada en un ambiente de escasa energía correspondiente a la Formación La Caja con espesor de 50 m (Imlay, 1938). Se tiene además las facies de plataforma que consisten en una secuencia calcárea depositada en una cuenca de evaporación y de aguas profundas pertenecientes a las formaciones Olvido con espesor de 64 m (Heim, 1940), la Formación Casita con 765 m de espesor, la Formación Cupido con 300 m de espesor y Formación Cuesta del Cura con el mismo espesor (Imlay, 1936). Por

otro lado, las facies de plataforma constituidas por una secuencia carbonatada y terrígena depositada en un ambiente marino son representadas por las formaciones Tamaulipas inferiores con 280 m de espesor, la Formación Otates con espesor de 20 m, la Formación Tamaulipas Superior con 300 m de espesor y la Formación el Abra con un espesor promedio de 2 000 m (tomado de la carta minera F14-1 Servicio Geológico Mexicano).

El Cretácico superior corresponde una secuencia carbonatada y terrígena depositada en aguas poco profundas y serenas que corresponde a la Formación Indidura con 353 m de espesor (Kelly, 1936).

2.2 Geología Local

El área de estudio se encuentra en el contacto litológico de dos litologías diferentes dentro de la subcuenca de Matehuala (Figura 11), esta cuenca está delimitada por calizas muy deformadas, plegadas y falladas. Estos paquetes de calizas comprenden una orientación preferencial casi Norte - Sur de edades del Cretácico Inferior al Cretácico Superior, en la que se encuentran cuatro formaciones geológicas principales (Servicio Geológico Mexicano, 2012), como lo son la Formación El Abra, la Formación La Peña, la Formación Indidura y la Formación Cupido, así como también depósitos terciarios de conglomerados polimictico con espesor de 130 m (Monragon y Albarran, 1983), en las bases de las Sierras el Catorce y Sierra Azul, además de un depósito lacustre principalmente de yesos (Servicio Geológico Mexicano, 2012).

En la parte Este, nos encontramos con la presencia de una antigua laguna que se rellenó con detritos lacustres constituidos por Arcilla, Limo y mayormente Yeso, a los cuales se les asigna edad del Oligoceno-Mioceno que se depositaron en los taludes al pie de las sierras etiquetado como litología Lacustre (Servicio Geológico Mexicano, 2012).

Por otro lado, en la parte Oeste, nos encontramos con un material Aluvión de edad Plioceno-Pleistoceno donde se depositaron Limos y Gravas no consolidados en las planicies y en los valles que, junto con los materiales Limos, Arenas y Gravas constituyen más del 50% de superficie del área de estudio, a este territorio se etiquetó como litología Aluvión (Servicio Geológico Mexicano, 2012).

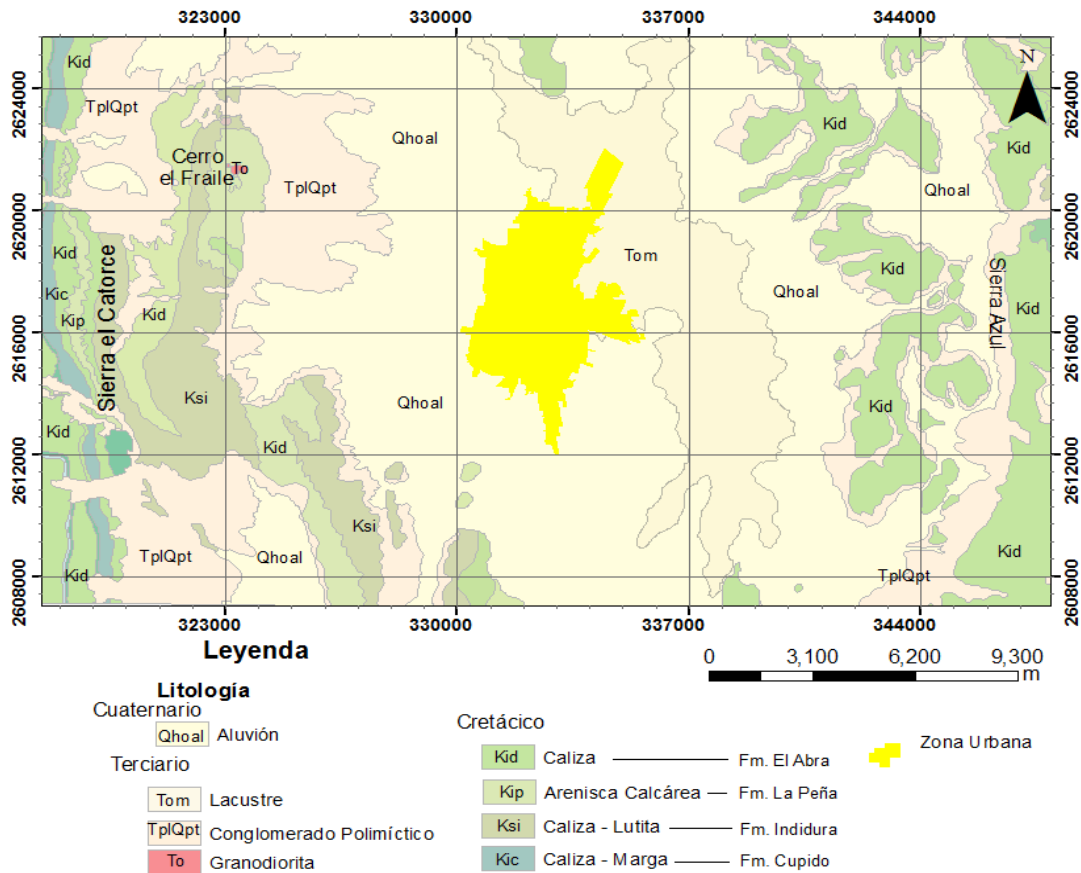


Figura 11. Geología local de la subcuenca de Matehuala, en la que se observan los materiales de las formaciones que afloran, resaltando la litología Lacustre al Este de nuestra área de estudio (marcada por cuadro rojo) y la litología Aluvión al Oeste. (Tomada de Rodríguez Rodríguez, 2016).

Las cuatro formaciones que se encuentran dentro de los paquetes de calizas que corresponden al Cretácico, se describen por más autores con más detalle a continuación:

2.2.1 Formación cupido

Tristán-González y Torres-Hernández (1992), estudiaron la Formación Cupido y demostraron que en la base de esta formación existe una secuencia de capas de caliza microcristalina de color gris claro en capas de 10, 20 y hasta 40 cm de espesor, intercaladas con lentes esporádicos y bandas de pedernal negro, y capas aisladas de limonita de color violáceo.

2.2.2 Formación La Peña

Imlay (1936) le dio el nombre de Formación La Peña y la describió como un grupo de estratos calcáreo-arcilloso que afloran en el oriente de la Sierra de Parras, Coahuila. Su base se interpretó como una secuencia de capas de caliza de estratificación delgada de 10 a 12 cm de color gris claro. Hacia la parte media, la roca caliza presenta cantidades variables de arcilla y en algunos estratos es posible observar laminación cruzada y gradación. Hacia la cima de la secuencia, predominan nuevamente las capas calcáreas y se observa una alternancia de caliza arcillosa de 5 a 10 cm de espesor con caliza micrítica de depósito autóctono que presenta espesores de 10, 20 Y hasta 40 cm, con bandas y lentes de pedernal negro y estratificación ondulada (Tristán-González y Torres-Hernández, 1992).

2.2.3 Formación el Abra

Se encuentra delimitando la subcuenca en la zona Oeste por la Sierra El Catorce y al Este por la Sierra Azul, así como algunos lomeríos en la planicie aluvial. Esta Formación está compuesta por calizas de color gris de estratificación masiva y ligeramente recristalizada con presencia de moliólidos y pellets, considerada de edad del Vanganiano al Santoniano de acuerdo a la fauna presente (Basañez-Loyola et al., 1993), la cual ha sido depositada en un ambiente de plataforma interna como son las arenas de playa, canal, y delta de marea.

2.2.4 Formación Indidura

Esta Formación fue descubierta por primera vez en la región de Las Delicias, Coahuila por Kelly (1936), donde estudió una secuencia de 30 m de lajas de caliza, que cubren directamente a la caliza Aurora, encontrando fósiles indicativos del Albiano tardío, Cenomaniano y Turoniano. Imlay (1936), dividió a la Formación Indidura en cinco miembros, constituidos en general por una alternancia de caliza y lutita en capas delgadas. El nombre de Formación Indidura se ha extendido para nombrar a esa serie de capas de caliza arcillosa depositada sobre la Formación Cuesta del Cura en la Cuenca Mesozoica del Centro de México (Carrillo-Bravo, 1982).

3.0 Marco Teórico

Los primeros ensayos de los métodos eléctricos iniciaron en el siglo XVIII, cuando en 1720 Gray y Wheeler descubrieron la propiedad resistiva de las rocas y posteriormente en 1746 Watson descubrió que el suelo es conductor. En 1815, Fox descubrió el fenómeno de Polarización Espontanea o Natural (SP). Este fenómeno fue utilizado en 1830 en Cornwell Inglaterra para estudiar extensiones de depósitos de cobre. En 1883 diversos investigadores dirigieron su atención a campos producidos artificialmente y, en ese mismo año, Brown creó un sistema de prospección eléctrica con 2 electrodos.

En 1912, Schlumberger considerado como el “Padre de la prospección eléctrica”, presenta la idea de usar mediciones de resistividad eléctrica para estudiar los cuerpos del subsuelo. Este método fue adoptado primero en geología por compañías petroleras para la búsqueda de reservorios petroleros y delimitar las formaciones geológicas (Meyer de Stadelhofen, 1991). Posteriormente en 1913 nuevamente Schlumberger, descubre el yacimiento de sulfuro en Borl, Servia por medio de SP, siendo el primer hallazgo geofísico de mineral no metálico. A partir de este momento los métodos geoelectricos de campo artificial se desarrollaron notablemente hasta nuestros días. En 1915 Schlumberger y el americano Wenner idean independientemente dispositivos tetraelectreodicos simétricos para la aplicación del método Sondeo Eléctrico Vertical (SEV).

Entre los años 1950 y 1970 se desarrolló la metodología de interpretaciones de SEV sobre medios estratificados tanto para campo constante como variable (Orellana and Mooney, 1996). A partir de los años ochenta aparecieron algoritmos inversos que generan imágenes eléctricas del suelo con adecuada resolución, destacando el algoritmo

desarrollado por (Loke and Barker, 1996) siendo altamente efectivos para estudios geoelectricos someros.

3.1 Métodos Eléctricos

El método eléctrico por corriente continua se basa en la medición de un parámetro físico característico de las rocas o suelos investigados, que es la resistividad eléctrica. La aplicación de esta metodología está orientada hacia los ambientes en que los distintos estratos pueden diferenciarse a partir del conocimiento de su resistividad, o expresados de otra forma, “Los límites geológicos que interesan al investigador deben ser al mismo tiempo los límites de separación de las rocas con diferente resistividad” (Iaakubovskii y Liajov, 1980).

El propósito de los estudios de resistividad eléctrica como se mencionó anteriormente, es determinar la distribución de resistividad en los cuerpos del subsuelo. Las corrientes eléctricas generadas artificialmente, se inyectan al suelo y se mide la diferencia de potencial resultante. Los valores de resistividad medidos proporcionan información sobre la forma de las heterogeneidades del subsuelo y de sus propiedades eléctricas (Kearey y Brooks, 1991). Cuanto mayor es el contraste de resistividad entre el(los) cuerpo(s), objeto(s) de estudio y las rocas circundantes, más fácil es su detección (Banton et al., 1997).

3.2 Resistividad eléctrica

La resistividad eléctrica es una propiedad física que caracteriza el comportamiento de un material ante el paso de una corriente eléctrica. Cuando circula una corriente a través de un material, este le ejerce una resistencia que depende de sus propiedades eléctricas. Si

ofrece mucha resistencia al paso de la corriente estamos en presencia de un material mal conductor y si ofrece baja resistencia es un buen conductor.

Para cuerpos simples, la resistividad ρ (Ohm.m) es definida por la siguiente ecuación:

$$\rho = R(S/L) \quad \text{Ec. 1}$$

Donde R es la resistencia eléctrica (Ohm), L la longitud del cuerpo (m) y S es la sección cruzada del área (m^2)

La resistencia eléctrica del cuerpo R (Ohm), , es definido por la ley de Ohm dada por la siguiente formula:

$$R = \frac{V}{I} \quad \text{Ec. 2}$$

Donde " V " es el voltaje (Volts) e " I " es la intensidad de corriente (Amper).

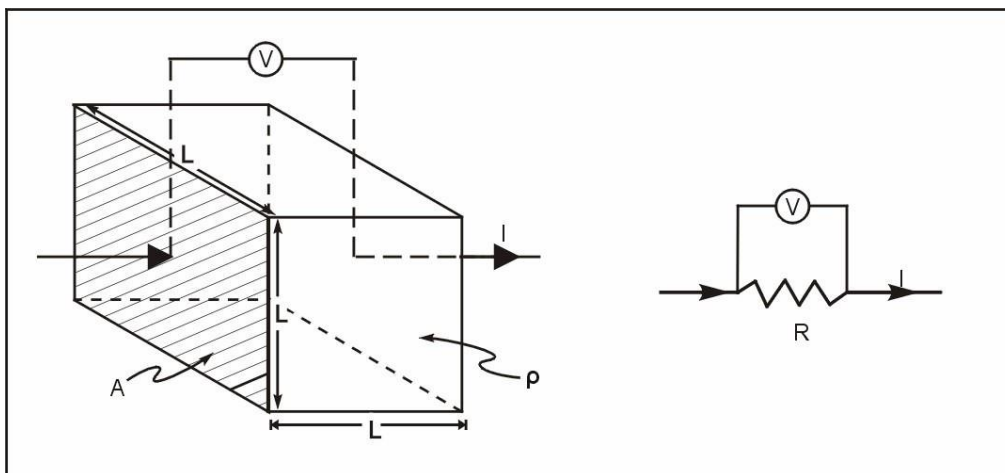


Figura 12. La caída de potencial V entre 2 puntos por los que circula una corriente eléctrica de intensidad I , es proporcional a esta y a la resistencia R que ofrece el medio al flujo de la corriente (Auge, 2008).

3.3 Resistividad aparente

El terreno sobre el cual se realizan las mediciones eléctricas puede ser definido como un semi-espacio infinito, considerando el aire como aislante. Si un semi-espacio infinito es homogéneo e isótropo desde el punto de vista eléctrico, éste será caracterizado por un solo valor de resistividad medido desde la superficie. Si el medio es heterogéneo, el valor de resistividad medido en superficie incluye la contribución de todos los materiales, con sus respectivas resistividades, por donde circula la corriente. Este valor, medido en superficie, se denomina resistividad aparente.

3.4 Método de resistividad eléctrica

El método de resistividad eléctrica mide la diferencia de potencial en puntos sobre la superficie de la tierra que es producida directamente por flujos de corriente eléctrica en el subsuelo. Esto conduce a la determinación de distribución de resistividad en el subsuelo y en una interpretación de los materiales de la tierra. (Principles of Applied Geophysics, 1996).

3.5 Propiedades eléctricas de las rocas

Los métodos geoelectricos se basan en el análisis de la respuesta que el suelo ofrece a un estímulo eléctrico inducido artificialmente o de origen natural, es por ello que después de aplicar dichos métodos se pueden conocer las propiedades eléctricas de las rocas y de los minerales que componen el medio de estudio, lo cual es necesario para hacer una buena interpretación geológica.

La resistividad eléctrica (Ohm.m) de un material describe la dificultad que encuentra la corriente a su paso por él. De igual manera se puede definir la conductividad (σ) como la facilidad que encuentra la corriente eléctrica al atravesar el material (Orellana, 1982). La literatura le ha asignado valores de resistividad de los diferentes tipos de rocas Ohm.m.

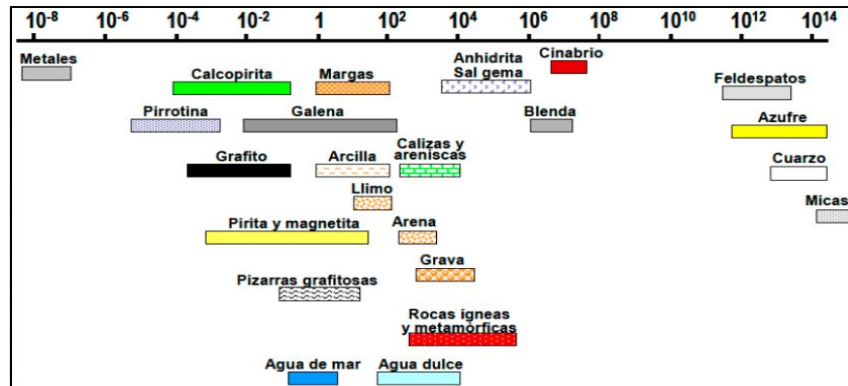


Figura 13. Muestra la resistividad promedio que manejan los diferentes tipos de materiales del subsuelo (Tomada de López-Hidalgo, 2004).

La resistividad eléctrica de una roca no depende solo de su litología, también depende de las características físicas que presenta la roca del subsuelo como su porosidad, contenido de agua, estructura, forma de las partículas, orientación, distribución de tamaño de las partículas, capacidad de intercambio catiónico y composición de cationes (Friedman 2005).

Son pocos los componentes geológicos saturados o secos que presentan baja resistividad o alta conductividad entre los que pueden mencionarse a minerales metálicos como calcopirita, pirita, magnetita, galena, pirrotina, etc. El grafito también presenta elevada conductividad eléctrica, pero la mayoría de los minerales no metálicos, al igual que las rocas tienen resistividades significativamente mayores en general entre 2 y 6 órdenes de magnitud superiores (tomado de Auge, 2008).

3.6 Sondeo Eléctrico Vertical

El Sondeo Eléctrico Vertical (SEV) es una de las técnicas tradicionales más utilizadas en la prospección geofísica, cuyo objetivo de dicho método es la investigación de la distribución vertical de la resistividad eléctrica en el medio de estudio. Es aplicado en

diferentes disciplinas geológicas; como la minería, la exploración petrolera, pero fundamentalmente en la hidrogeología (Orellana, 1982).

El método eléctrico SEV es una aplicación práctica de la ley de Ohm que en general consta de cuatro electrodos, dos de ellos (A y B) por los que se inyecta una corriente eléctrica "I" al terreno, y los otros dos (M y N), que miden la diferencia de potencial "ΔV" creada por los electrodos A y B. (Orellana, 1980). Los electrodos A y B están unidos por medio de cables aislados a un generador eléctrico, mientras que los electrodos M y N se conectan a un equipo receptor capaz de medir la diferencia de potencial.

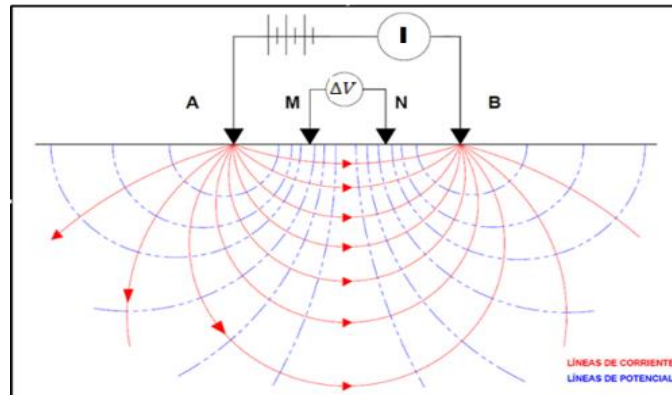


Figura 14. Metodología del sondeo eléctrico vertical (SEV) (Tomada de Rodríguez-Rodríguez, 2016).

La diferencia de potencial ΔV se mide entre los electrodos M y N y es dada por la ecuación:

$$\Delta V = \frac{\rho I}{2\pi} \left[\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right] \text{ Ec. 3}$$

Donde AM, BM, AN y BN representan la distancia geoelectrica entre los electrodos A y M, B y M, A y N, B y N respectivamente. La resistividad eléctrica es calculada usando:

$$\rho = \left[\frac{2\pi}{\left(\frac{1}{AM}\right) - \left(\frac{1}{BM}\right) - \left(\frac{1}{AN}\right) - \left(\frac{1}{BN}\right)} \right] \frac{\Delta V}{I} \quad \text{Ec. 4}$$

$$= K \frac{\Delta V}{I} \quad \text{Ec. 5}$$

Donde K es el coeficiente geométrico que depende de las distancias mutuas entre los cuatro electrodos A, B, M y N.

3.7 Configuración electródica

La configuración electródica o arreglo geométrico se refiere al arreglo o disposición geométrica y las distancias de separación que adoptan los electrodos de corriente y de potencial sobre la superficie del terreno, siendo también conocido como modalidad (Olsen et al., 1999). Los arreglos geométricos más utilizados en mediciones de resistividad eléctrica son: Schlumberger, Wenner y Dipolo – Dipolo.

3.7.1 Configuración Wenner

En la configuración Wenner se utilizan cuatro electrodos alineados y simétricos con respecto al centro distribuidos de la siguiente manera: **A**, **M**, **N** y **B** haciendo que la distancia entre **M** – **N** sea igual en **A** – **M** y la misma entre **N** – **B**. La profundidad de estudio se incrementa aumentando la distancia mutua entre todos los electrodos (Mussett and Khan, 2000).

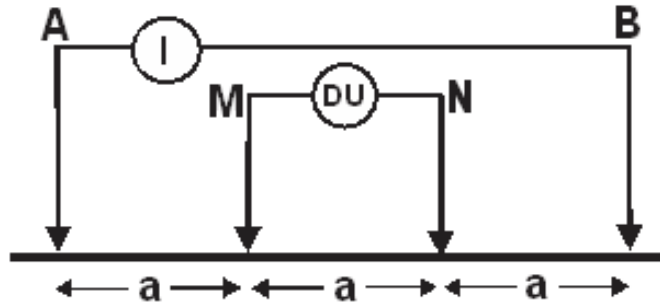


Figura 15. Configuración eléctrica del arreglo tipo Wenner.

3.7.2 Configuración Schlumberger

La configuración Schlumberger es un arreglo tetraelectródico simétrico igual que el Wenner, pero la distancia entre los electrodos de corriente **A** y **B** es mucho mayor (al menos 5 veces) que entre los electrodos de potencial **M** y **N**, por lo que manteniendo invariable la separación **M – N** se aumenta la distancia entre **A** y **B** para incrementar la profundidad de estudio (Orellana, 1982).

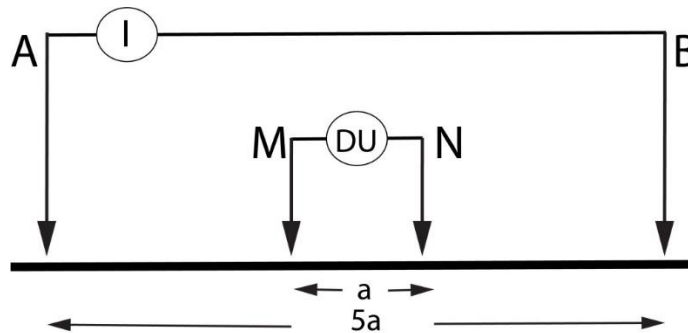


Figura 16. Configuración geométrica del arreglo Schlumberger

3.7.3 Configuración Dipolo - Dipolo

En el arreglo Dipolo – Dipolo la distribución de los electrodos es **M**, **N**, **A** y **B**. En este arreglo, una mayor profundidad de la penetración de la corriente se obtiene aumentando la distancia entre los centros de los dipolos **A – B** y **M – N** (Mussett and Khan, 2000).

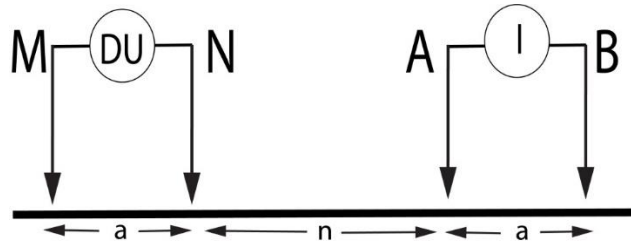


Figura 17. Configuración geométrica del arreglo Dipolo - Dipolo

La combinación arreglo - espaciamiento muestra diferentes detalles en la observación del perfil que pueden ser más o menos relevantes de acuerdo al objetivo del estudio y a las particularidades que se pretenden definir (Weinzettel y Dietrich, 2009), donde la diferencia de potencial eléctrico en la vecindad del flujo de corriente, así como también la corriente inyectada hacen posible determinar la resistividad aparente del subsuelo (Telford et al., 1990).

3.8 Tomografía Eléctrica Resistiva (TRE)

Un método comúnmente utilizado para la investigación de resistividades en el subsuelo de la tierra, es la Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE) que permite interpretar la estructura del subsuelo a varios metros de profundidad (Schrott y Sass, 2008, Perrone et al., 2015, Zarroca et al., 2012). Este tipo de método se ha aplicado para la investigación de diversos problemas geológicos, ambientales, geofísicos, hidrogeológicos y caracterizar la estructura interna del subsuelo (Jomard et al., 2007) donde se miden las propiedades físicas

que incluyen, resistividad, humedad, espesor, pluma de contaminación, densidad, conductividad, y tienen una influencia directa sobre la disponibilidad de recursos hídricos subterráneos. Su fundamento teórico está basado en la ley de Ohm similar al de los sondeos eléctricos verticales, el cual se ejecuta mediante una configuración electródica o un arreglo geométrico de electrodos.

La TRE calcula la distribución de las resistividades del subsuelo a través de mediciones de resistencia eléctrica con el uso de electrodos acomodados con un patrón específico en el suelo (Daily et al, 2005), así como dividir las secciones en un número determinado de capas, espesores y bloques. Para la ejecución de este método, consta de cuatro electrodos, A - B que son los electrodos de corriente, positivo y negativo respectivamente conectados a una fuente artificial de corriente, y M - N que son los electrodos de potencial entre los cuales se mide la diferencia de potencial del campo eléctrico creado por A y B (al igual que los SEVs). Estos electrodos se colocan de forma equiespaciados de tal forma que se pueda obtener un barrido en el eje de las X y eje de las Y en valores de resistividad aparente (Griffiths y Barker, 1993).

A diferencia del SEV, la técnica de la TRE muestra un modelo bidimensional de resistividades del subsuelo a mejor resolución, pero menor profundidad (Figura 18). Además, el uso de la configuración adecuada, el espacio entre los electrodos y la longitud suficiente de los perfiles, permite obtener perfiles eficientes en la exploración geofísica (Loke, 1996, Jomard et al., 2007, Schrott y Sass, 2008, Le Roux et al., 2011).

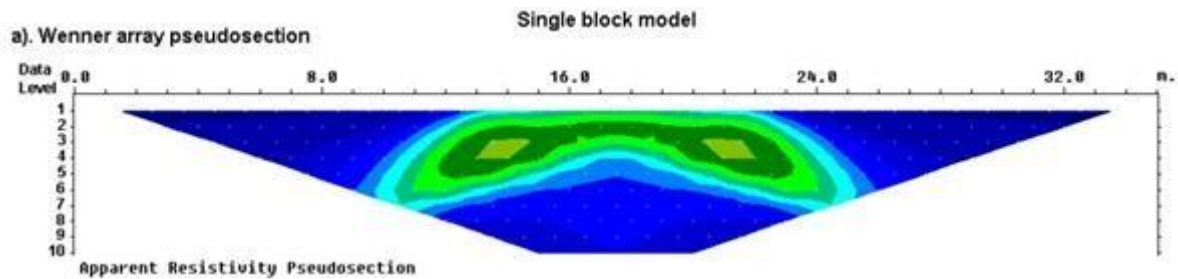


Figura 18. Pseudosección de Resistividad aparente obtenida con dispositivo Wenner (Loke, 2003).

Los primeros resultados obtenidos a partir de la TRE son aparentes, por lo tanto, es necesario realizar un proceso de inversión de datos que permita tener el valor real de resistividad del subsuelo. El proceso de inversión de los datos, permite crear un modelo que se ajuste con los datos obtenidos en campo, es decir, que el resultado del procesado sea lo más aceptable de acuerdo con las condiciones geológicas presentes. Para ese proceso numérico, Daily y colaboradores (2005), señalan que se requiere de tres elementos: un modelo directo en 2D o 3D que representa la distribución de las resistividades obtenidas, es decir, una pseudosección; una función que ajuste el modelo de los datos obtenidos; y un algoritmo de búsqueda que determine de qué forma puede encontrarse un modelo de resistividad óptimo.

Los valores de resistividad se expresan en escala logarítmica y el modelo se presenta en un mapa a escala de colores donde convencionalmente los valores de menor resistividad se encuentran en tonos azules y los de máxima resistividad en tonos rojo/morado (Figura 19).

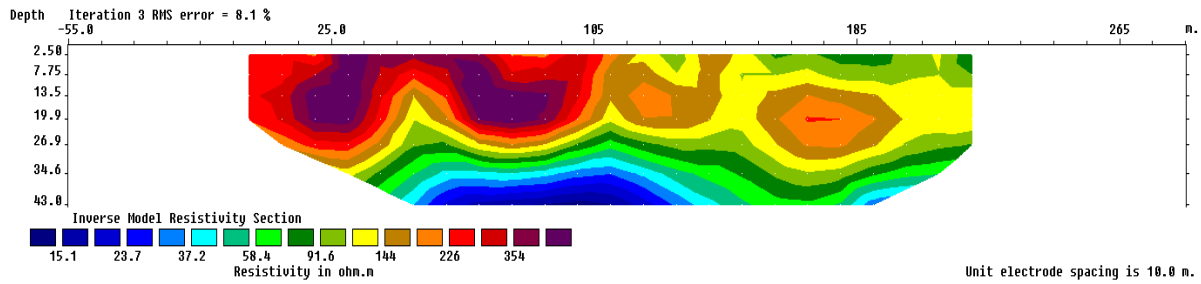


Figura 19. Perfil de Tomografía de Resistividad Eléctrica con configuración Wenner–Schlumberger

Cada uno de los colores en la figura anterior (Figura 19), indica un pequeño rango de resistividad en escala logarítmica y se basa con las diferentes litologías o situaciones hidrogeológicas y tectónicas según la información a priori que se tenga del sitio objeto de estudio.

4.0 Metodología

Con la intención de cumplir nuestros objetivos generales y específicos, se realizaron diversas campañas geoelectricas en el municipio de Matehuala, las cuales fueron planeadas estratégicamente con el fin de obtener datos relevantes que nos ayudaran con nuestra investigación aplicando los métodos Sondeos Eléctricos Verticales (SEV) y Tomografías de Resistividad Eléctrica (TRE).

4.1 Sondeos eléctricos verticales

Se realizaron veinte-cuatro SEV (Tabla 3) distribuidos estratégicamente en el área de estudio (Figura 20) con el objetivo de conocer mejor la distribución y conexión del acuífero somero en diferentes puntos de nuestra área de estudio, abarcando las dos litologías presentes (Aluvión – Lacustre) de acuerdo con la información geológica del Servicio Geológico Mexicano (2012).

Los veinte-cuatro SEV se realizaron utilizando la configuración Schlumberger, la cual es bastante simple y también más económica en comparación con otras técnicas geofísicas aplicadas en la prospección de aguas subterráneas (Anomohanran, 2014). La separación entre electrodos receptores de corriente $AB/2$ fue de 1.5, 2 ,3 ,4 ,6 ,9 ,13 ,20 ,30 ,45 ,70 ,100 ,150 ,200 ,300 ,450 ,600 m (la separación máxima $AB/2$ varió en algunos SEV de acuerdo al nivel de acceso al punto de medición y el grado de urbanización del sitio), alcanzando una profundidad de estudio entre los 50 y 200 m. Esta separación de electrodos garantiza el estudio del comportamiento de las resistividades en partes más someras del corte geológico donde debe encontrarse el acuífero somero contaminado por arsénico (Martínez-Villegas et al., 2013; Rodríguez Rodríguez, 2016).

Tabla 3. Clave de identificación del SEV y coordenadas (X, Y)

Clave de identificación del SEV	X	Y	Altitud (m.s.n.m.)
SEV - 1	330355	2618160	1631
SEV - 2	330962	2618059	1618
SEV - 3	331429	2617978	1607
SEV - 4	332010	2617889	1594
SEV - 5	332354	2617716	1588
SEV - 6	332457	2617745	1586
SEV - 7	332603	2617772	1585
SEV - 8	332895	2617822	1574
SEV - 9	333306	2617925	1567
SEV - 10	333675	2617999	1560
SEV - 11	333992	2618133	1556
SEV - 12	332622	2618338	1583
SEV - 13	332411	2618016	1588
SEV - 14	332866	2618177	1579
SEV - 15	332621	2617635	1586
SEV - 16	332821	2617646	1575
SEV - 17	332588	2617508	1587
SEV - 18	332721	2617491	1578
SEV - 19	333847	2618319	1566

SEV - 20	334150	2618494	1555
SEV - 21	334340	2618745	1557
SEV - 22	333763	2617784	1560
SEV - 23	333424	2617389	1565
SEV - 24	332423	2617824	1587

La ejecución de estos SEV distribuidos por el área de estudio (Figura 20), nos proporcionara información acerca de la geometría y distribución del acuífero somero, así como el grosor de este en diferentes puntos al norte del municipio de Matehuala.

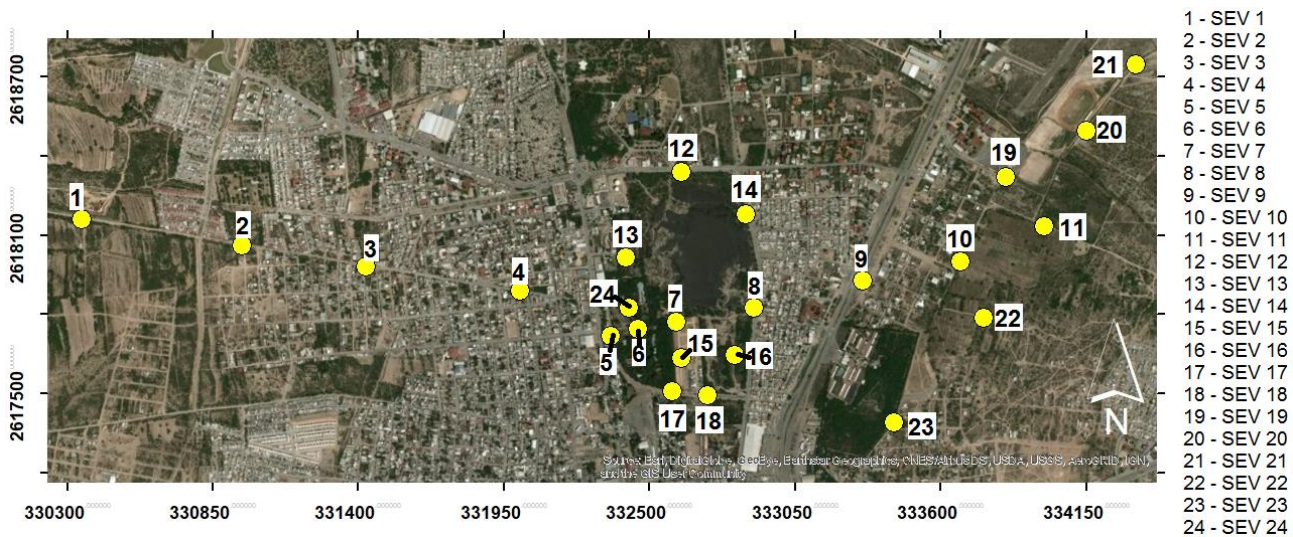


Figura 20. Ubicación de los SEV realizados en el área de estudio, al norte del municipio de Matehuala.

Para la ejecución de los métodos geoelectricos SEV se utilizó el equipo Syscal R2 (IRIS Instruments, 2016), que cuenta con una unidad de amplificación de potencia con capacidad para generar una corriente máxima de 2.5 A a 800 V, una batería recargable de 12 V, tres mazos, dos cintras métricas de 100m c/u, cuatro carretes de cables con conectores banana-caimán y 50 varillas de acero inoxidable como electrodos (Figura 21).

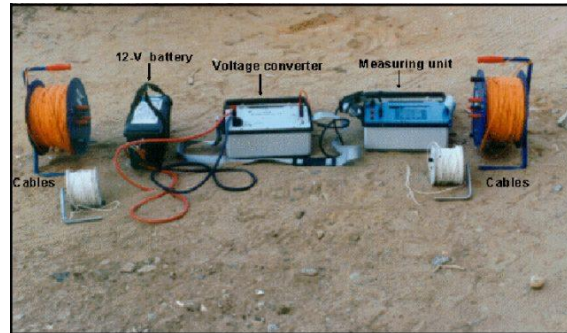


Figura 21. Material para la ejecución de los SEV. (Syscal R2, batería de 12 V, tres mazos, dos cintras métricas, cuatro carretes de cable y varillas de acero inoxidable).

Para el procesamiento de los datos obtenidos en campo por este método, se utilizó el software IPI2Win 3.0.1e (Bobachev A., 2000), el cual está diseñado para la interpretación automática o semiautomática de datos de los SEVs obtenidos con varios arreglos utilizados. Este software está diseñado para la interpretación 1D de las curvas del sondeo eléctrico vertical a lo largo de un perfil donde debido a la variación de la solución dado por el criterio del interpretador, es posible elegir la solución que mayor se ajuste tanto a los datos geofísicos como a los datos geológicos (Bobachev A., 2000).

Este software consiste en introducir los datos adquiridos para producir las curvas de campo en resistividad aparente y generar las curvas teóricas para cada sondeo. Posteriormente se hace el ajuste de la curva teórica a la de campo para generar un corte geoeléctrico (Bobachev, 2000).

La interpretación de cada perfil constituye la base de la creación del IPI2Win, esto significa que los datos para un perfil son tratados como una unidad que representa la estructura geológica del área estudiada. Este principio es implementado principalmente mediante el uso de técnicas de interpretación interactiva / semi – interactiva. IPI2Win es

capaz de realizar interpretación 1D interactiva e inversión, con variedad de configuraciones electrónicas comúnmente utilizados para secciones verticales con constante de resistividad en el rango de 0.0001 a 10000 Ohm.m. El proceso interactivo es resuelto utilizando filtrado lineal, los cuales, junto con la implementación del algoritmo, provee una solución rápida y precisa para una amplia gama de modelos que cubren todas las situaciones geológicas razonables. El problema inverso es resuelto usando una variante de algoritmo de Newton para el número mínimo de capas o el algoritmo regularizado de minimización del error de ajuste que utiliza la aproximación de Tikhonov para resolver el problema de la ambigüedad en la solución de la tarea inversa (Bobachev A., 2000).

4.2 Sección Geoeléctrica

Con la agrupación de los sondeos eléctricos verticales número; 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 (Cada SEV con diferentes profundidades máximas de estudio), se realizó una sección geoeléctrica con orientación Oeste – Este con longitud de 3700 m y un rango de altitud de 1631 a 1556 m.s.n.m., abarcando las dos litologías que afloran en el área de estudio (Aluvión - Lacustre), según con la información de la carta F14-A25 del Servicio Geológico Mexicano (2012) (Figura 22).

El propósito principal de la sección geoeléctrica es mostrar la litología del material por el cual se distribuye el acuífero somero contaminado (Martínez-Villegas et al., 2013, Rodríguez Rodríguez, 2016), con orientación paralela a la dirección de flujo de dicho acuífero somero propuesta por Rodríguez Rodríguez (2016), en el contacto litológico de sedimentos Aluviales y sedimentos Lacustres.



Figura 22. Ubicación de la sección geoelectrica de 3700 m de longitud con orientación Oeste- Este (abarcando 11 SEV).

Los datos de resistividad obtenidos a partir de los SEVs de dicha sección, se procesaron y correlacionaron en el software IPI2Win 3.0.1e. (Bobachev A., 2000) el cual permite una relación optima de cada modelo 1D generado en cada punto del SEV, facilitando la creación de una sección de resistividades interpretada que puede ser procesada en el software Surfer 12 (Golden Software, 2014), con algoritmo de interpolación “mínima curvatura”. Una vez procesada la sección geoelectrica, se convertirá en una sección geológica de acuerdo con la información del área (Imley, 1936; Mujica-Mondragón y Jacobo-Albarrán 1983; Basáñez-Loyola, 1993; Tristán–González y Torres-Hernández, 1992; Tristán-González 2008; Servicio Geológico Mexicano, 2012; Rodríguez Rodríguez, 2016), y con ayuda del software Adobe Illustrator CC 2015 (Adobe, 2015)

Las variaciones del nivel topográfico fueron tomadas en cuenta utilizando el Modelo de Elevación Digital (MED) con un 15 m x 15 m de precisión.

4.3 Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE)

Se realizaron un total de 4 Tomografías de Resistividad Eléctrica (TRE) con diferentes longitudes (Tabla 4). Se hicieron tres perfiles de TRE con dirección S-N en la litología Aluvión dentro del territorio denominado “El Grasero”, y un cuarto perfil con dirección NNE-SSW en la parte de la litología Lacustre, siendo en cada caso perpendicular al flujo del agua subterránea somera (E-W) (Rodríguez Rodríguez, 2016). Cada tomografía se ejecutó con una distancia entre electrodos de corriente (AB/2) de 15 a 105 m utilizando la configuración Wenner-Schlumberger, asegurando una profundidad de estudio máxima de 40 m. Estas TREs se realizaron con el objetivo de conocer la distribución del material por el cual fluye el acuífero somero contaminado Matehuala-Cerrito blanco (Martínez-Villegas et al., 2013, Rodríguez Rodríguez, 2016).

Tabla 4. Nombre de la tomografía de resistividad eléctrica, ubicación (Punto inicial, Punto final, Longitud y Altitud).

Perfil	Punto inicial	Punto final	Longitud (m)	Altitud (m.s.n.m)
TRE I	x: 332445 y: 2617599	x: 332426 y: 2617819	220	1587
TRE II	x: 332409 y: 2617927	x: 332374 y: 2618103	180	1587
TRE III	x: 332849 y: 2618231	x: 332875 y: 2617610	630	1576
TRE IV	x: 333960 y: 2618167	x: 334049 y: 2618368	220	1557

La TRE I se realizó a 270 m al Sur de la antigua fundidora (principal fuente de contaminación) dentro de un territorio denominado “La Forestal”, con una longitud de 220 m y una altitud de 1587 m.s.n.m. La TRE II se realizó en el territorio de la antigua fundidora con una longitud de 180 m y a la misma altitud de la TRE I. La TRE III se realizó a 490 m al Este de la antigua fundidora sobre la avenida “Lerdo de Tejada “, con una longitud de 630 m y una

altitud promedio de 1576 m.s.n.m. Por último, la TRE IV se realizó a 130 m al Este del Instituto Tecnológico de Matehuala con una longitud de 220 m y una altitud de 1557 m.s.n.m. (Figura 23).

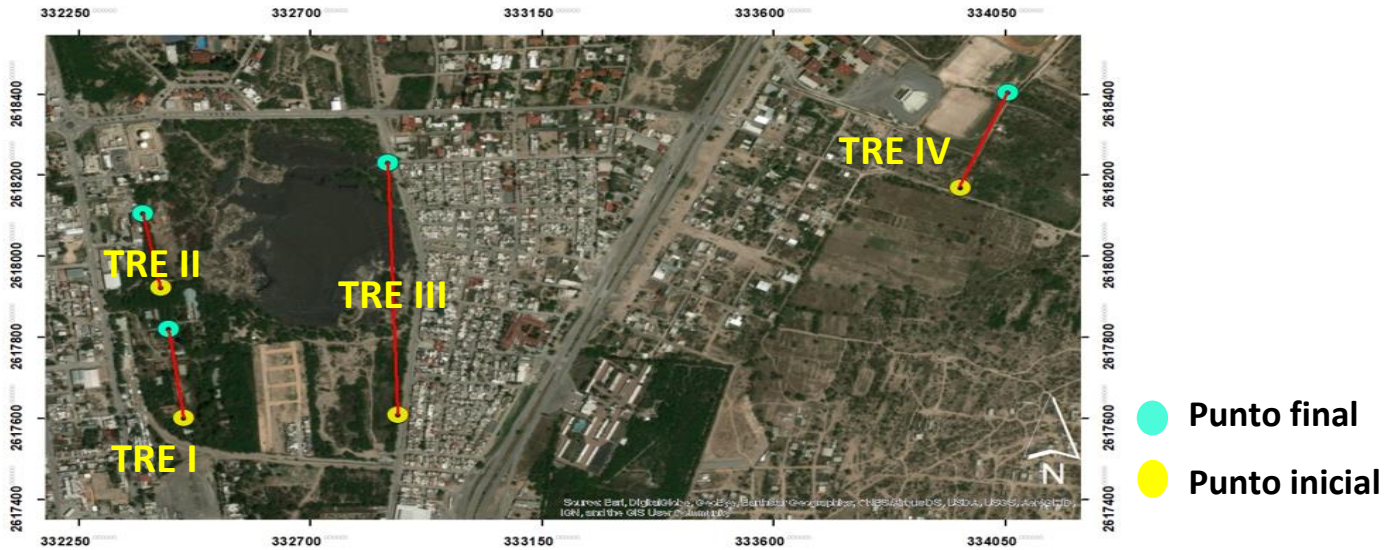


Figura 23. Ubicación de los cuatro perfiles de TRE dentro del área de estudio; I, II y III sobre el Aluvión y IV sobre los sedimentos Lacustre.

Para el procesamiento de los datos de resistividad obtenidos por este método, se utilizó el software RES2DINV.EXE 3.56.22 de la compañía Geotomo Software © 1995 - 2006, desarrollado por (Loke and Barker, 1996). Este software determina automáticamente un modelo de resistividad en 2D del subsuelo base a los resultados de resistividad adquiridos en campo (Griffiths y Barker, 1993).

Este Software cuenta con varios procesos de inversión de datos y ajustes; suavizado de resistividad del modelo, método de inversión combinada, inversión robusta, logaritmo de resistividad aparente, método de optimización y la inversión de mínimos cuadrados la cual es utilizada en este estudio para realizar los modelos de TRE. Esta inversión utiliza una restricción de resistividad en la perturbación del modelo y no directamente en los valores de

resistividad, produciendo en la mayoría de los casos una leve variación en los valores de resistividad. Esta inversión se realiza mediante la fórmula;

$$(J^T J + uF) d = J^T g - uF r \quad \text{Ec. 6}$$

Donde r representa un vector conteniendo, el logaritmo de los valores de resistividad modelo, como generalmente este produce un modelo con un error mayor en la resistividad aparente, sin embargo, esta modificación asegura que el modelo final tenga una variación suave en los valores de resistividad

Una vez procesados los datos de las cuatro tomografías de resistividad eléctrica, el resultado se correlacionó con la geología presente en el área de estudio (Imley, 1996; Mujica-Mondragon y Jacobo-Albarran 1983; Besañez-Loyola, 1993; Tristán-González y Torres-Hernández, 1992; Tristán-González 2008; Servicio Geológico Mexicano, 2012; Rodríguez-Rodríguez, 2016), la cual fue indispensable para realizar unas secciones de interpretación geológica con ayuda del Adobe Illustrator CC 2015 (Adobe, 2015)

5.0 Resultados

Los resultados de los métodos geofísicos anteriormente mencionados, son el producto del procesado de los datos de resistividad eléctrica aparente que se adquirieron en campo; tanto de los Sondeos Eléctricos Verticales como de las Tomografías de Resistividad Eléctrica, utilizando los softwares correspondientes.

5.1 Sondeos Eléctricos Verticales (SEV)

Los Sondeos Eléctricos Verticales (SEV) que se realizaron dentro del área de estudio, manifestaron capas con valores de resistividad eléctrica que varía de 2.1 a 1018 Ohm.m, y espesores de 0.7 m a espesor indefinido, siendo el error de ajuste entre curvas de resistividad aparente obtenida en campo y experimental menor al 6% en los 24 SEVs (Tabla 3).

Tabla 5. Resultado del procesado de los SEV (Numero de SEV, coordenadas, numero de capas, profundidad, espesor y resistividad eléctrica)

	SEV 1			SEV 2			SEV 3		
	X = 330355		Y = 2618160	X = 330962		Y = 2618059	X = 331429		Y = 2617978
	Profundidad	Espesor	Resistividad	Profundidad	Espesor	Resistividad	Profundidad	Espesor	Resistividad
	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)
Capa 1	1.5	1.5	23.5	32	32	37.4	1	1	120.7
Capa 2	22.5	21	32	145	113	8.6	20	19	46
Capa 3	66	49	8.2		?	198	34	14	4.5
Capa 4		?	48					?	35.5
Capa 5									
Capa 6									

	SEV 4			SEV 5			SEV 6		
	X = 332010		Y = 2617889	X = 332354		Y = 2617716	X = 332457		Y = 2617745
	Profundidad	Espesor	Resistividad	Profundidad	Espesor	Resistividad	Profundidad	Espesor	Resistividad
	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)
Capa 1	5	2	22.3	3	3	22.3	1	1	28.1
Capa 2	20	18	5.1	13	10	7.6	6	5	9.2
Capa 3		?	62		?	47.2	9	3	2.1
Capa 4							14	5	22.7
Capa 5								?	12
Capa 6									

	SEV 7			SEV 8			SEV 9		
	X = 332603		Y = 2617772	X = 332895		Y = 2617822	X = 333306		Y = 2617925
	Profundidad	Espesor	Resistividad	Profundidad	Espesor	Resistividad	Profundidad	Espesor	Resistividad
	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)
Capa 1	13	13	34.7	1	1	90.5	2	2	99.8
Capa 2	19	6	59.3	2	1	195	4	2	981
Capa 3	55	36	20	8	6	244.3	27	23	93.2
Capa 4		?	28.8	10	2	13	60	33	234
Capa 5					?	76.5	119	59	34.8
Capa 6								?	75.7

	SEV 10			SEV 11			SEV 12		
	X = 333675		Y = 2617999	X = 333992		Y = 2618133	X = 332622		Y = 2618338
	Profundidad	Espesor	Resistividad	Profundidad	Espesor	Resistividad	Profundidad	Espesor	Resistividad
	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)
Capa 1	2	2	174.2	13	13	502.3	1.6	1.6	51.7
Capa 2	3	1	1042	25	12	61.5	2.66	1.06	19.5
Capa 3	15	12	64.7	36	11	432.8	6.06	3.4	89.6
Capa 4	60	45	170.5	38	2	30.5	8.23	2.17	3.83
Capa 5	82	22	25.4	92	54	16.4		?	37.3
Capa 6		?	112		?	146			

	SEV 13			SEV 14			SEV 15		
	X = 332411		Y = 2618016	X = 332866		Y = 2618177	X = 332621		Y = 2617635
	Profundidad	Espesor	Resistividad	Profundidad	Espesor	Resistividad	Profundidad	Espesor	Resistividad
	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)
Capa 1	2.64	2.64	183	0.9	0.9	117.6	1.28	1.28	23.54
Capa 2	7	4.36	46.7	4.47	3.57	119.4	3.85	2.57	5.45
Capa 3	37.6	30.6	17	13.83	9.36	40.27	23.85	20	14.9
Capa 4		?	42.1		?	27.4		?	34
Capa 5									
Capa 6									

	SEV 16			SEV 17			SEV 18		
	X = 332821 Y = 2617646			X = 2612588 Y = 2617508			X = 332721 Y = 2617491		
	Profundidad	Espesor	Resistividad	Profundidad	Espesor	Resistividad	Profundidad	Espesor	Resistividad
	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)
Capa 1	1	1	96.1	1.71	1.71	69.7	0.92	0.92	17.22
Capa 2	5.02	4.02	111.5	9.99	8.28	5.9	7.94	7.02	5.3
Capa 3	52.02	47	57.6		?	26.69	30.11	22.17	107.8
Capa 4		?	27.5					?	9
Capa 5									
Capa 6									

	SEV 19			SEV 20			SEV 21		
	X = 333847 Y = 2618319			X = 334150 Y = 2618494			X = 334340 Y = 2618745		
	Profundidad	Espesor	Resistividad	Profundidad	Espesor	Resistividad	Profundidad	Espesor	Resistividad
	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)
Capa 1	0.75	0.75	978	2	2	560	0.75	0.75	261
Capa 2	1.84	1.09	1018	3.73	1.73	119.32	41.95	41.2	133
Capa 3	2.54	0.7	6.6	38.68	34.95	251.73	120.8	79.6	17
Capa 4		?	53.9	147.35	108.67	17		?	5709
Capa 5					?	114.73			
Capa 6									

	SEV 22			SEV 23			SEV 24		
	X = 333763 Y = 2617784			X = 333424 Y = 2617989			X = 332869 Y = 2618169		
	Profundidad	Espesor	Resistividad	Profundidad	Espesor	Resistividad	Profundidad	Espesor	Resistividad
	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)
Capa 1	1.41	1.41	90	0.6	0.6	92.62	0.46	0.46	80.8
Capa 2	3.61	2.2	36.4	3.2	2.6	68.82	3.23	2.77	6.97
Capa 3	41.8	39.6	58.5	58.5	55	49.42	9.78	6.55	14.91
Capa 4		?	28.2		?	19.5		?	25.02
Capa 5									
Capa 6					-				

Como se mencionó anteriormente (cap. 4.1 Sondeos Eléctricos Verticales), los SEVs se realizaron en lugares estratégicos dentro de nuestra área de estudio, abarcando las dos litologías presentes de acuerdo con la información de la carta F14-A25 del Servicio Geológico Mexicano (2012). Tomando en cuenta lo anterior, podemos observar que las capas de los SEVs que se realizaron sobre la superficie de la litología Lacustre (Este), manifiestan resistividades eléctricas más altas (<80 Ohm.m) que las resistividades que resultaron de los SEVs en la litología Aluvión (Oeste). Esto se debe a que el subsuelo de la litología

evaporítica, contiene materiales con alto grado de dificultad en la propagación de la corriente eléctrica.

5.2 Sección Geoeléctrica

De acuerdo con los resultados obtenidos a partir del procesado de los primeros once SEV's (Tabla 3), se realizó una sección geoeléctrica con dirección Oeste-Este, con longitud de 3700 m y un rango de altitud variable entre 1631 a 1557 m.s.n.m. (Figura 24).

En general encontramos que la resistividad varió de 5 a 1050 Ohm.m aproximadamente, dentro de un máximo de seis capas que van de 1 a 132 m de espesor y fronteras geoeléctricas de hasta 166 m de profundidad. De lado Oeste del área de estudio (entre I y I'), se muestran valores de resistividad relativamente bajos (<80 Ohm.m), manifestándose un cuerpo conductor menor a los 30 Ohm.m **(1)** con un espesor entre los 25 m y 75 m aproximadamente, este cuerpo se presenta desde el inicio de la sección geoeléctrica hasta los 2300 m de distancia aproximadamente (del SEV 1 al SEV 7), el cual esta limitado por materiales más resistivos (30-80 Ohm.m) **(2)**, que se manifiestan tanto a nivel somera como a profundidad.

En el lado Este (entre I' y I'') nos encontramos con materiales con un rango de resistividad mucho más amplio que en los sedimentos aluviales, que va de los 8 a 1042 Ohm.m. Aquí se observan cuerpos resistivos en el cual uno de ellos **(3)** se presenta desde los 2400 m hasta final de la sección geoeléctrica (del SEV 8 al SEV 11) con un espesor variable entre 40 a 70 m aproximadamente. Debajo de este cuerpo resistivo, nos encontramos con un cuerpo de mayor conductividad **(4)**, que abarca gran parte del lado Este de la sección geoeléctrica. Al Este de esta capa nos encontramos con un material conductor **(5)**, con valores de resistividad menores a 30 Ohm.m y a una profundidad aproximada de 40

m. Por último, debajo de estos cuerpos conductores, observamos un cuerpo resistivo (>80 Ohm.m) de espesor indefinido **(6)**.

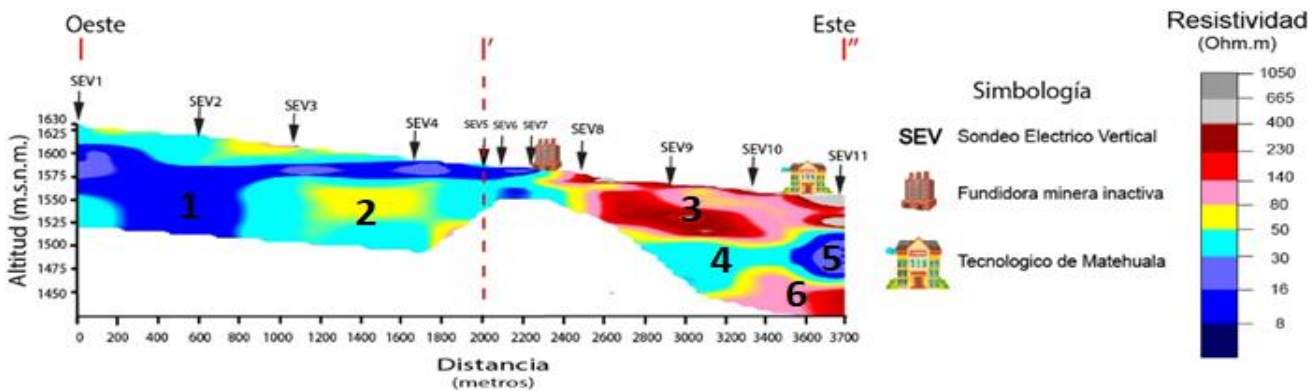


Figura 24. Sección geoelectrica con orientación Oeste – Este de 3700 m de longitud, donde se muestran diferentes contrastes de resistividad a diferentes profundidades. Esta sección abarca un total de 11 SEV a diferentes profundidades de alcance.

5.3 Perfiles de las Tomografías de Resistividad Eléctrica.

De acuerdo con los resultados de los procesados de las TREs en el software RES2DINV 3.0.1e (Loke and Barker, 1996) con un rango de error entre de 3.1% a 9.4%, encontramos un contraste de resistividades que varía entre 5 a 1000 Ohm.m aproximadamente, a una profundidad máxima de 40 m donde se puede apreciar la presencia de cuerpos con diferentes grosores. Los valores de resistividad eléctrica de los perfiles, son congruentes con los valores de resistividad eléctrica de los SEVs.

5.3.1 Perfil TRE I

El perfil TRE I (Figura 25) presenta un cuerpo conductor (<18 Ohm.m) hasta una profundidad aproximada de 30 m. Este cuerpo de muy baja resistividad **(1)** presenta una orientación Norte - Sur y tiene una resistividad similar desde su inicio hasta el final de la TRE

I, presentando pequeñas intercalaciones de cuerpos más resistivos a una distancia de 170 m y un rango de profundidad de 0 a 10 m aproximadamente.

Conforme se profundiza el perfil, se manifiesta un cuerpo más resistivo **(2)** con una orientación y espesor similar a la capa que le subyace. Este cuerpo está presente a lo largo de todo el perfil y manifiesta resistividades entre los rangos 18 – 40 Ohm.m. Por último, resalta la presencia de un cuerpo más resistivo comparado con los antes mencionados **(3)**, dicho cuerpo está presente entre los 120 y 180 m de distancia a una profundidad aproximada de 30 m y presenta una resistividad mayor a los 40 Ohm.m.

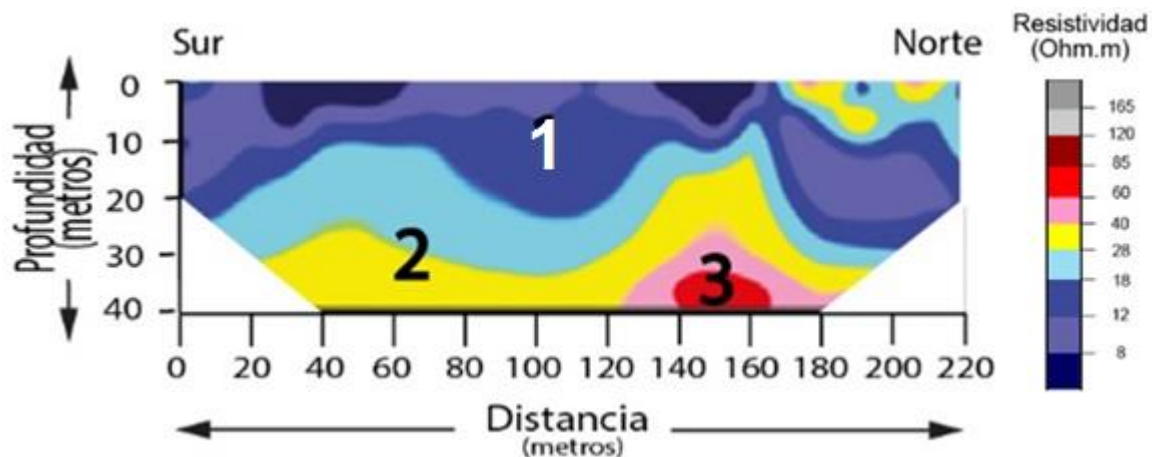


Figura 25. Perfil TRE I con orientación Norte-Sur, manifiesta diferentes contrastes de resistividad a una profundidad de 40 m y una distancia de 220 m.

5.3.2 Perfil TRE II

El perfil TRE II (Figura 26), con una longitud de 180 m y una profundidad de 40 m, presenta un rango de resistividades similares al perfil TRE I pero con diferente distribución. El perfil TRE II no presenta cuerpos conductores continuos (a diferencia del TRE I), sino que tiene una distribución de cuerpos muy heterogéneo, en la cual de acuerdo con el objetivo de esta investigación destacan tres de ellos.

La presencia de estos cuerpos conductores con resistividad menor a los 18 Ohm.m (4, 5, 6 Figura 26), se presentan entre los 30 a 170 m de distancia a una profundidad promedio de 7 m, alcanzando espesores mayores a 30 m como es el caso del cuerpo (5). Las distribuciones de estos cuerpos conductores se presentan de forma paralela a la orientación del flujo del acuífero somero reportado por Rodríguez Rodríguez (2016), que a la vez están cubiertos por materiales más resistivos con valores entre 18 y 85 Ohm.m. sin seguir un patrón en específico.

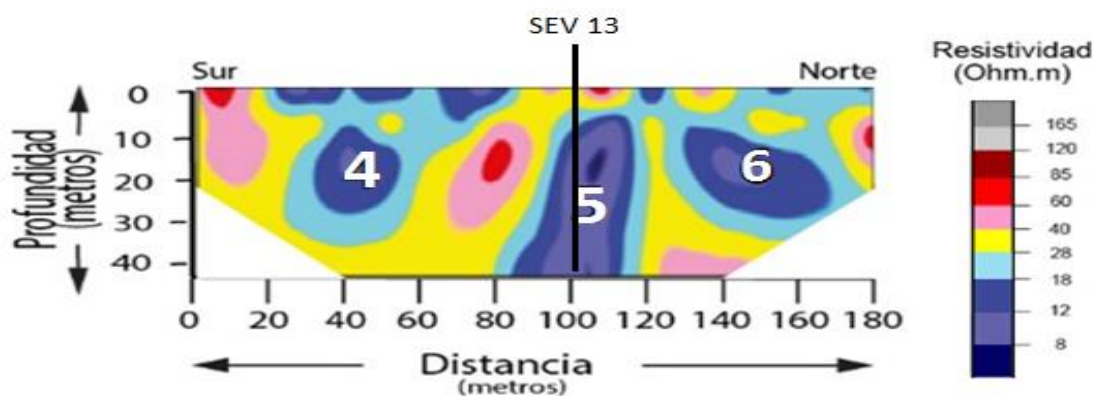


Figura 26. Perfil TRE II con orientación Norte-Sur, manifiesta diferentes contrastes de resistividad a una profundidad de 40 m y una distancia de 180 m.

5.3.3 Perfil TRE III

El perfil TRE III (Figura 27) presenta rangos de resistividades que superan los 80 Ohm.m (en comparación con los perfiles antes mencionados) a lo largo de 630 m de distancia (el perfil más largo) y 40 m de profundidad. Este perfil es el más cercano a la zona de contacto litológico presente en el área de estudio, donde se pueden apreciar cuerpos más resistivos (<85 Ohm.m) que en los perfiles TRE I y TRE II en diferentes partes de él. El perfil TRE III manifiesta diversos contrastes de resistividades de forma heterogénea sin seguir ningún patrón en particular, en los cuales gran porcentaje de cuerpos resistivos se presentan tanto a poca profundidad como a los 40 m.

Los cuerpos conductores del perfil TRE III presentan valores de resistividad bajos (<18 Ohm.m) rodeados por materiales con valores de resistividad altos (>18 Ohm.m). Dichos cuerpos conductores manifiestan resistividades similares a los cuerpos conductores del perfil TRE I y TRE II, en los cuales resalta la presencia de tres de ellos con orientación, profundidad y simetría similar a los cuerpos **4, 5 y 6** del perfil TRE II. Estos cuerpos (**7, 8, 9**, Figura 27) se observan entre los 300 y 480 m de distancia en el perfil a una profundidad aproximada de 10 m. Estos cuerpos (**7, 8 y 9**) se ubican a 180 m al Este de los cuerpos **4, 5 y 6** del perfil TRE II, presumiendo que son los mismos cuerpos conductores con una orientación paralela al flujo de la corriente del acuífero somero dada por Rodríguez Rodríguez (2016).

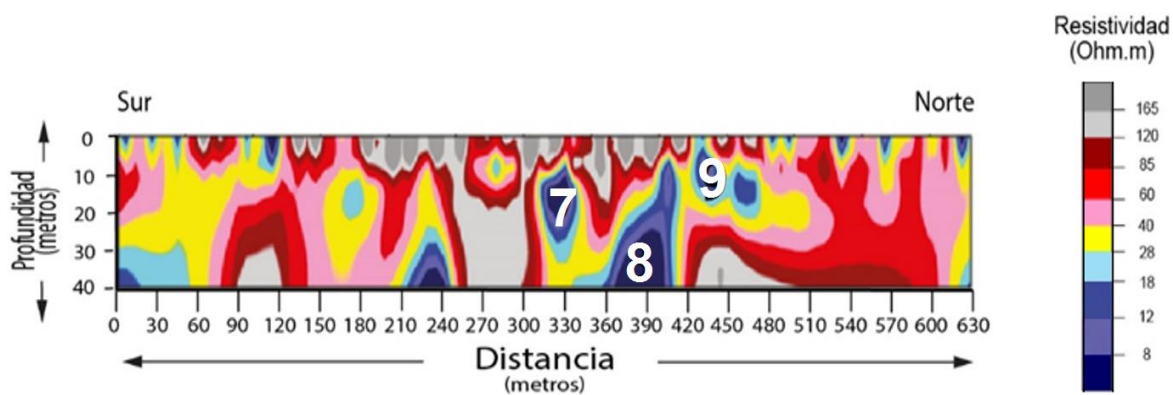


Figura 27. Perfil TRE III con orientación Norte-Sur, manifiesta diferentes contrastes de resistividad a una profundidad de 40 metro y una distancia de 630 m.

5.3.4 Perfil TRE IV

El perfil TRE IV de 220 m de longitud y 40 m de profundidad (Figura 28), presenta cuerpos mas resistivos que los perfiles antes mencionados, siendo que aproximadamente el 85% del perfil presenta resistividades mayores a los 80 Ohm.m., donde resalta la presencia de un gran cuerpo resistivo (>140 Ohm.m) que se extiende a lo largo de todo el perfil (**10**). Conforme se profundiza, la resistividad decrece resaltando la presencia de un cuerpo

conductor (<18 Ohm.m), que se encuentra a una profundidad aproximada de 35 m entre las distancias 80 y 170 m del perfil (11).

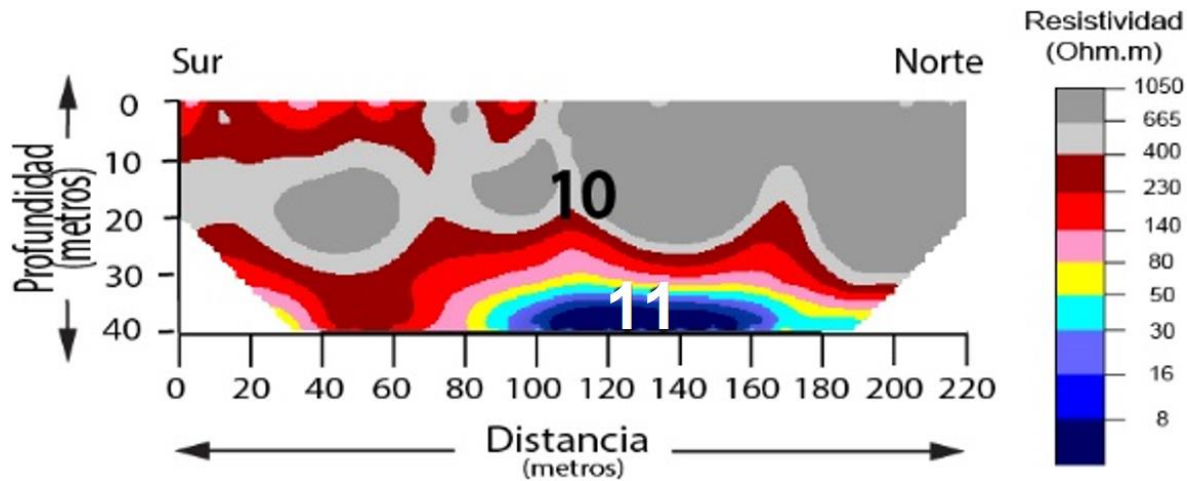


Figura 28. Perfil TRE IV manifiesta diferentes contrastes de resistividad a una profundidad de 40 m y una distancia de 220 m, en el cual resalta la presencia de materiales con resistividad alta.

5.4 Secciones y columnas geológicas a partir de los SEV y las TRE

Se han realizado diversas investigaciones geológicas en la fisiografía que corresponde al municipio de Matehuala, que ayudan a entender el comportamiento y la composición del subsuelo (Raisz, 1959; Grande López et al., 1967; Ramos, 1974; Bravo, 1982; Mujica-Mondragón y Jacobo-Albarrán 1983; González y Hernández, 1992; Besañez-Loyola, 1993; Imley, 1996; Barboza-Gudiño 1998; Tristán González 2008; Servicio Geológico Mexicano, 2012; Rodríguez-Rodríguez 2016, además de los valores de resistividad típicos que manifiesta los materiales similares con los del subsuelo del municipio de Matehuala en la literatura (Orellana, 1982; Goodman, (989 y Arlandi, 2005). Esta información es de gran importancia al momento de realizar una interpretación geológica de los procesados geofísicos en el área de estudio, al norte del municipio de Matehuala.

Por otro lado, se observó la composición geológica de un banco de material (intercalación de Arena-Limo-Arcilla) a una profundidad de 20 m, en donde se realizó 1 SEV (SEV 1, Tabla 1) a 30 m al Sur, con el objetivo de correlacionar estos materiales con las resistividades obtenidas del SEV 1. Además, analizamos la salinidad del agua de un pozo que se encuentra a 270 m al Sur de la antigua fundidora dentro de un territorio privado llamado “La Forestal”. La salinidad de esta agua fue de 2.1 gr/L, haciendo muy conductora al agua subterránea. En este pozo el nivel estático se encuentra a 7.3 m de profundidad, en donde se presume se encuentra la capa permeable del acuífero somero.

Toda esta información publicada (Raisz, 1959; Grande López et al., 1967; Ramos, 1974; Bravo, 1982; Orellana, 1982; Mujica-Mondragón y Jacobo-Albarrán 1983; Goodman, 1989;González y Hernández, 1992; Besañez-Loyola, 1993; Imley, 1996; Barboza-Gudiño, 1998; Arlandi, 2005; Tristán González, 2008; Servicio Geológico Mexicano, 2016; Rodríguez-Rodríguez, 2016), más la información que recolectamos del banco de material y el pozo, ha sido indispensable al momento de correlacionar las resistividades obtenidas a partir de los SEVs y los perfiles TREs con el material presente en el subsuelo.

A continuación, se muestran las secciones geológicas y columnas geológicas derivadas de los SEV y TRE.

5.4.1 Sección Geológica Oeste-Este

La sección geológica Oeste-Este es derivada de la interpretación de resistividades de la sección geoelectrica. En esta sección nos encontramos con la presencia de cinco tipos de cuerpos (los más notables) compuestos por diferentes materiales hasta una profundidad de 1425 m.s.n.m. y una distancia lineal en superficie de 3700 m, en donde se pueden observar

diferentes cuerpos constituidos por diferentes materiales, así como diferentes tamaños de espesores, profundidades y ubicaciones (Figura 29).

De lado Oeste (izquierdo) entre I y I' de la sección geológica nos encontramos en la litología Aluvión, donde podemos observar un gran cuerpo permeable constituido por intercalaciones de materiales como Gravas-Arenas-Limos, con un espesor de 20 m hasta más de 75 m aproximadamente **(1)** y se presenta desde el inicio de la sección geológica hasta los 2300 m de distancia aproximadamente, en donde se presume se encuentra el acuífero somero (Matehuala – Cerrito Blanco).

De acuerdo con el lado antes mencionado de esta sección, podemos observar que el material por donde fluye el acuífero somero, presenta gran espesor (> 50 m). Conforme se avanza hacia la dirección Este, este material disminuye su tamaño del grosor drásticamente (< 30 m) a los 800 m., además a partir de este punto, el acuífero empieza a manifestarse a profundidades más someras.

Como se puede observar en esta sección, la presencia del acuífero somero se manifiesta hasta el contacto con el material yesífero (cerca del área donde se ubica la antigua fundidora), donde el agua subterránea disuelve este material formando cavernas que permiten la continuación de este en los yesos (Rodríguez Rodríguez, 2016). Este cuerpo permeable hace fácil la fluidez del agua subterránea y se encuentra en contacto tanto en la parte superior como en la parte inferior con materiales menos permeables como lo son Arenas-Limos-Arcillas **(2)**, además estos materiales ayudan a que el agua del acuífero somero (Matehuala-Cerrito Blanco) no migre en su totalidad hacia la parte inferior.

En la parte Este (derecha) entre (I' y I'') nos encontramos dentro de la litología Lacustre, en donde podemos observar la presencia de materiales un poco diferentes con los del lado Oeste. En este lado se manifiestan cuerpos compuestos por materiales Yesos-Limosos y Yesos puros, a una profundidad somera entre las distancias 2300 y 3700 m **(3)**. Debajo de estos cuerpos yesíferos, observamos la presencia de una capa compuesta por interdigitación de materiales Arenas-Limos-Arcillas **(4)**, en donde se manifiesta un cuerpo compuesto por material permeable de lado Este de esta misma capa **(5)**, casi al final de la sección geológica. Este cuerpo permeable compuesto por materiales como Gravas-Arenas, se manifiesta con un grado de saturación y con una distribución perpendicular a la dirección de flujo del acuífero somero. Esta información es contundente con la información publicada de la hidrogeología del acuífero regional Cedral – Matehuala (Rodríguez Rodríguez, 2016; CONAGUA, 2015), presumiendo que este cuerpo permeable es parte de este acuífero.

Por último, nos encontramos con un material compuesto por Arenisca-Lutita **(6)** que se encuentra por debajo de los materiales antes mencionados. Este cuerpo al igual que el de Arena-Limo-Arcilla es menos permeable, mismo que podría funcionar como cama o base del acuífero regional.

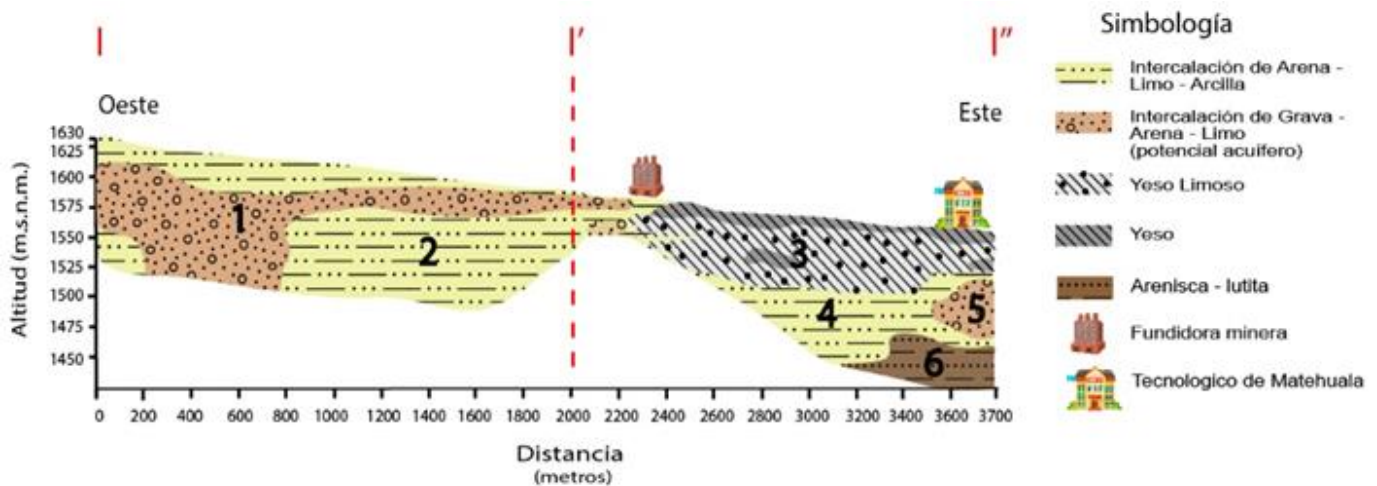


Figura 29. Sección geológica con orientación Oeste – Este de 3700 m de longitud, donde se manifiesta la presencia de diferentes materiales pertenecientes a las dos litologías presentes en el área de estudio, de acuerdo con información del Servicio Geológico Mexicano (2012).

5.4.2 Columnas geológicas a partir de los SEV

Se realizaron trece columnas geológicas para los SEV 12 al SEV 24, donde se presenta el tipo de material que componen las capas del subsuelo (Figura 30). Como se mencionó anteriormente (Capítulo 4.1), los SEV alcanzaron profundidades diferentes entre ellos, de acuerdo al nivel de acceso al punto de medición y la urbanización del sitio. Es por ello que las columnas geológicas no presentan un patrón de escala definido, ya que la diferencia de profundidades y espesores son grandes y no se podría apreciar el material de las capas con menor espesor.

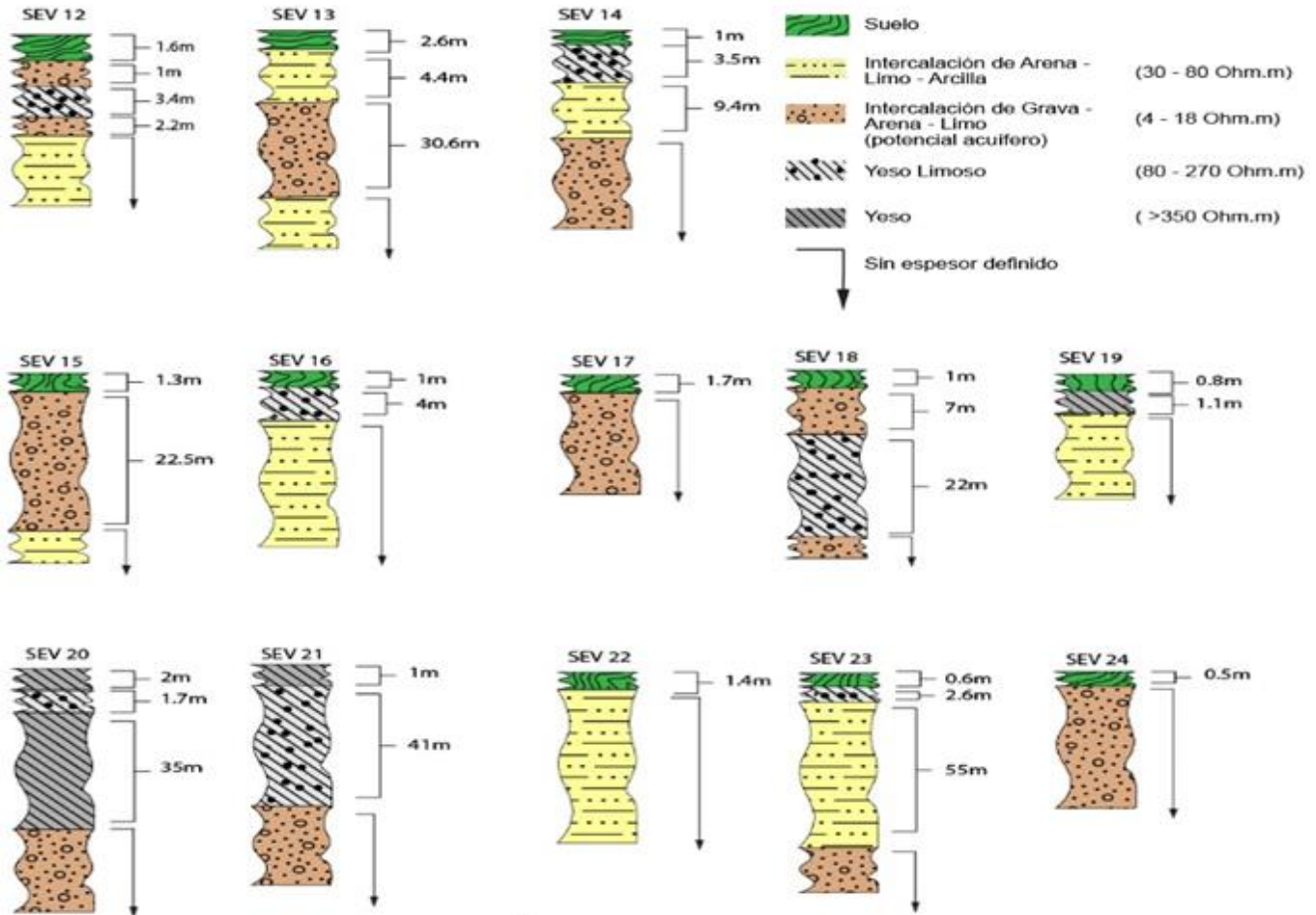


Figura 30. Columnas estratigráficas derivadas del resultado de los SEV, de acuerdo con la información geológica del sitio.

Estas columnas geológicas muestran capas compuestas por diferentes materiales pertenecientes a la litología Aluvión (grava, arena, limo y arcilla) y materiales pertenecientes a la litología evaporítica (yeso), así como su rango aproximado de resistividades, lo cual refuerza aún más la información del S.G.M. de que nos encontramos en la zona de contacto litológico. Estas capas también muestran diferentes espesores (>1m), ubicaciones y profundidades de los materiales antes mencionados.

5.4.3 Sección Geológica I

La sección geológica I se deriva de la interpretación de resistividades del perfil TRE I.

En esta sección nos encontramos con la presencia de tres tipos cuerpos compuestos de diferentes materiales (los más notables) a una profundidad de 40 m y una distancia lineal en superficie de 220 m (Figura 31). El cuerpo más somero está compuesto de intercalaciones de materiales Gravas-Arenas-Limos con presunto potencial acuífero en gran parte de ella, alcanzando una profundidad máxima de 30 m y abarcando los 220 m de distancia. El segundo cuerpo está compuesto por intercalaciones de materiales Arenas-Limos-Arcillas y es más profundo que el anterior, este cuerpo empieza a partir de los 10 m aproximadamente hasta los 40 m de profundidad abarcando todo lo largo de la sección geológica.

El ultimo cuerpo se manifiesta a una profundidad de 35 m y en un rango de distancias entre 140 y 160 m. Este está compuesto por un material Yeso-Limoso, lo que refuerza la información de que nos encontramos en la división entre sedimentos Lacustres y Aluviales (Servicio Geológico Mexicano, 2012), encontrando material perteneciente a la litología vecina.

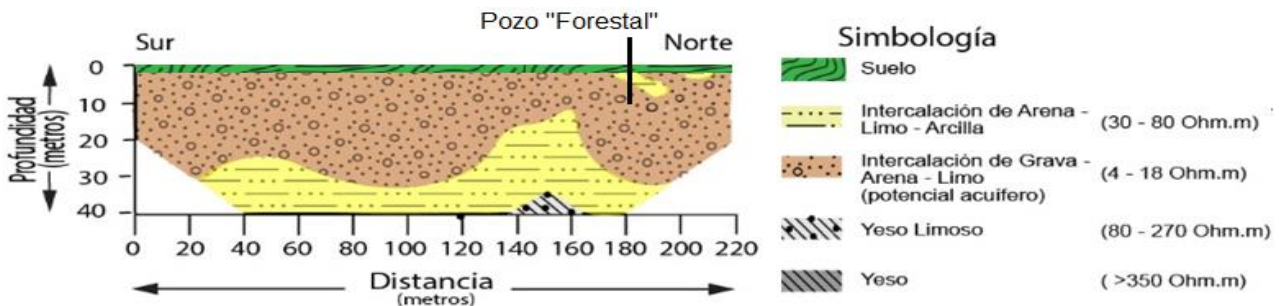


Figura 31. Sección geológica I, manifiesta la presencia de tres materiales diferentes a una profundidad de 40 m y 220 m de distancia lineal en superficie. Se presume que el acuífero está asentado en un material más impermeable (Grava-Arena-Limo).

5.4.4 Sección Geológica II

La sección geológica II (Figura 32) es derivada de la interpretación de las resistividades del perfil TRE II. Esta sección (la más cercana a la antigua fundidora), se manifiestan diversos materiales (similares a la sección geológica I), a una profundidad aproximada de 40 m y una distancia lineal en superficie de 180 m. Estos materiales (Arenas, Limos, Arcillas, Gravas y Yesos) se comportan de forma heterogénea con ubicaciones y rangos de espesores variables sin seguir algún patrón en específico.

La sección geológica II demuestra la existencia de cuerpos compuestos de intercalaciones de materiales Gravas-Arenas-Limos destacando 3 de ellos. Estos cuerpos (1, 2, 3) se encuentran a 10 m de profundidad aproximadamente, un espesor que va de los 15 a más de 30 m aproximadamente y son importantes para el objetivo de nuestra investigación en relación a la ubicación del acuífero somero en nuestra área de estudio.

Tomando en cuenta que es una sección geológica 2-D con orientación Norte-Sur, estos cuerpos se encuentran rodeados por cuerpos compuesto por materiales menos permeables como Arena-Limo-Arcilla, que de acuerdo con la geológica natural de un acuífero, el agua difícilmente podría fluir.

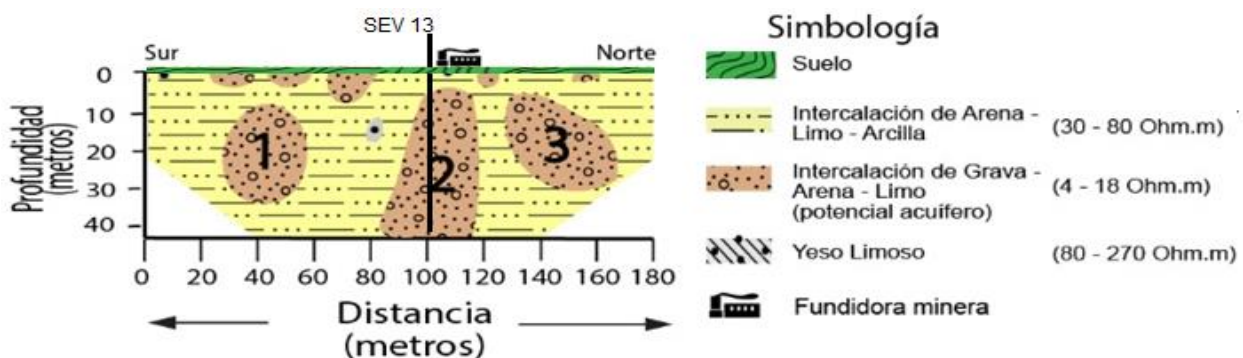


Figura 32. Sección geológica II, manifiesta la presencia de tres materiales diferentes en una forma homogénea a una profundidad de 40 m y 180 m de distancia lineal en superficie. Se presume que el acuífero está presente en el material permeable (Grava-Arena-Limo).

5.4.5 Sección geología III

La sección geológica III (Figura 33), es derivada de la interpretación geológica de las resistividades de la TRE III. En esta sección se manifiestan mayormente cuatro tipos de cuerpos a una profundidad aproximada de 40 m y una distancia lineal en superficie de 630 m. Estos cuerpos se distribuyen de forma heterogénea con ubicaciones y tamaños de espesores variables sin seguir un patrón en específico.

A diferencia de las secciones geológica I y II, en esta sección se observa más la presencia de material Yeso-Limoso y Yeso, esto se debe a que la sección geología III se encuentra en el contacto litológico, manifestando la presencia de materiales pertenecientes a ambas litologías.

En esta sección se manifiestan cuerpos compuestos de intercalaciones de material Grava-Arena-Limo con potencial acuífero con diferentes espesores distribuidos a lo largo de la sección geológica. Tres de estos cuerpos (**4, 5, 6** Figura 33) se ubican a 490 m al Este de los cuerpos **1, 2 y 3** de la sección geológica II, entre los rangos 300 y 480 m de distancia a una profundidad aproximada de 10 m, los cuales son importantes para el objetivo de nuestro estudio. Estos cuerpos (**1, 2, 3, 4, 5, 6**) manifiestan características similares como lo son; tamaño de espesor, tipo de material, forma, profundidad, etc. De esta forma podemos presumir que los 6 cuerpos de las secciones geológicas II y III están conectados entre sí, explicando la distribución y dirección de flujo Oeste-Este del acuífero somero Matehuala-Cerrito Blanco. Además de acuerdo con esta información, podemos observar que la configuración de estos cuerpos permeables, donde se presume fluye el acuífero somero, ocurre en forma de paleocanales o canales subterráneos con dirección Oeste--Este.

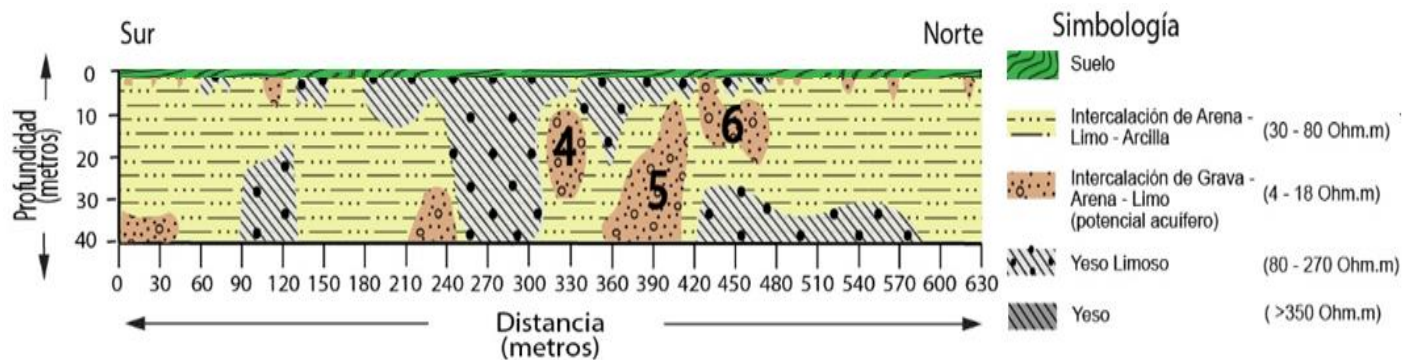


Figura 33. Sección geología III, manifiesta la presencia de cuatro materiales diferentes pertenecientes a las litologías Aluvión y Lacustre a una profundidad de 40 m y 630 m de distancia lineal en superficie.

5.4.6 Sección geológica IV

La sección geológica IV (Figura 34) es derivada de la interpretación geológica de las resistividades del perfil TRE IV. Esta sección geológica tiene una profundidad máxima de 40 m y una distancia lineal en superficie de 220 m.

A diferencia de las secciones geológicas antes mencionadas, esta sección se ubica en el área Lacustre de acuerdo con la información geológica de la carta minera F14-A25 del Servicio Geológico Mexicano (2012), en donde se puede observar la presencia de cuerpos Yesíferos que se presentan a lo largo de toda la sección geológica hasta una profundidad máxima de 35 m (7).

Por debajo del material yesífero, se observa la presencia de 1 cuerpo saturado compuesto de intercalaciones de materiales Gravas-Arenas (8), el cual se ubica a una profundidad de 35 m y entre las distancias 10 y 160 m, donde le sobreyace un material más impermeable de poco espesor (Arena-Limo-Arcilla).

Este cuerpo permeable saturado (8), se encuentra a una profundidad y ubicación similar del cuerpo 5 de la Sección Geológica Oeste – Este. Así mismo, de acuerdo con la

información publicada de la hidrogeología del acuífero regional Cedral – Matehuala (Rodríguez Rodríguez, 2016; CONAGUA, 2015), se presume que este cuerpo permeable es parte de este acuífero.

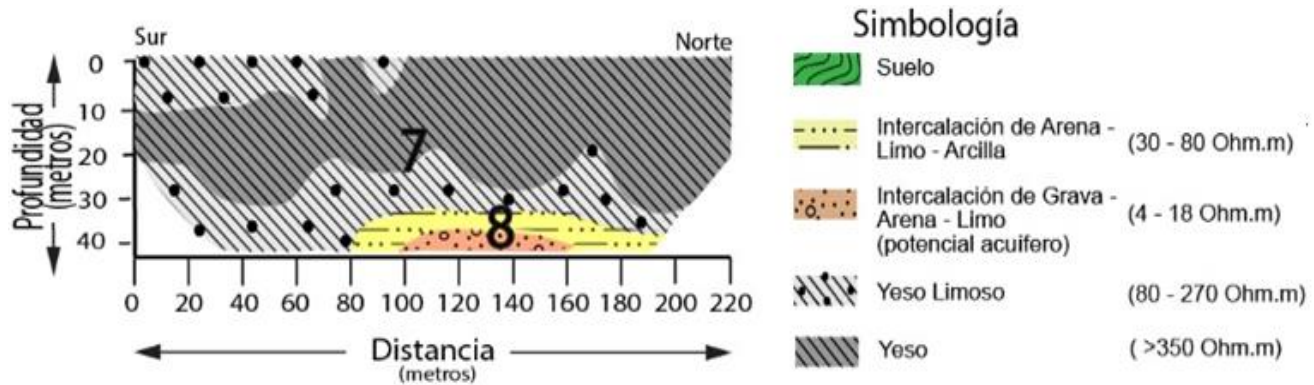


Figura 34. Sección geológica IV, manifiesta la presencia de cuatro materiales diferentes a una profundidad de 40 m y 220 m de distancia lineal en superficie. Donde se manifiesta una gran cantidad de yeso perteneciente a la litología Lacustre.

5.5 Acuífero somero

La información que obtuvimos a partir de los resultados de los SEVs y TREs confirman la existencia de un material permeable en el subsuelo por el cual fluye el acuífero somero Matehuala-Cerrito Blanco con una dirección de flujo de Oeste – Este en el área donde se ubica la antigua fundidora.

De acuerdo con la información de las secciones geológicas I y II (Figura 35) con una distancia de 500 m entre ellas, se puede observar que los cuerpos permeables por donde fluye dicho acuífero somero Matehuala-Cerrito Blanco (cuerpos 1, 2, 3, 4, 5 y 6) que al mismo tiempo están rodeados por materiales más impermeables, presentan diferentes tamaños de espesores y son distribuidos en forma de paleocanales o canales subterráneos en el subsuelo del área donde se ubica la antigua fundidora y desechos mineros (escoria).

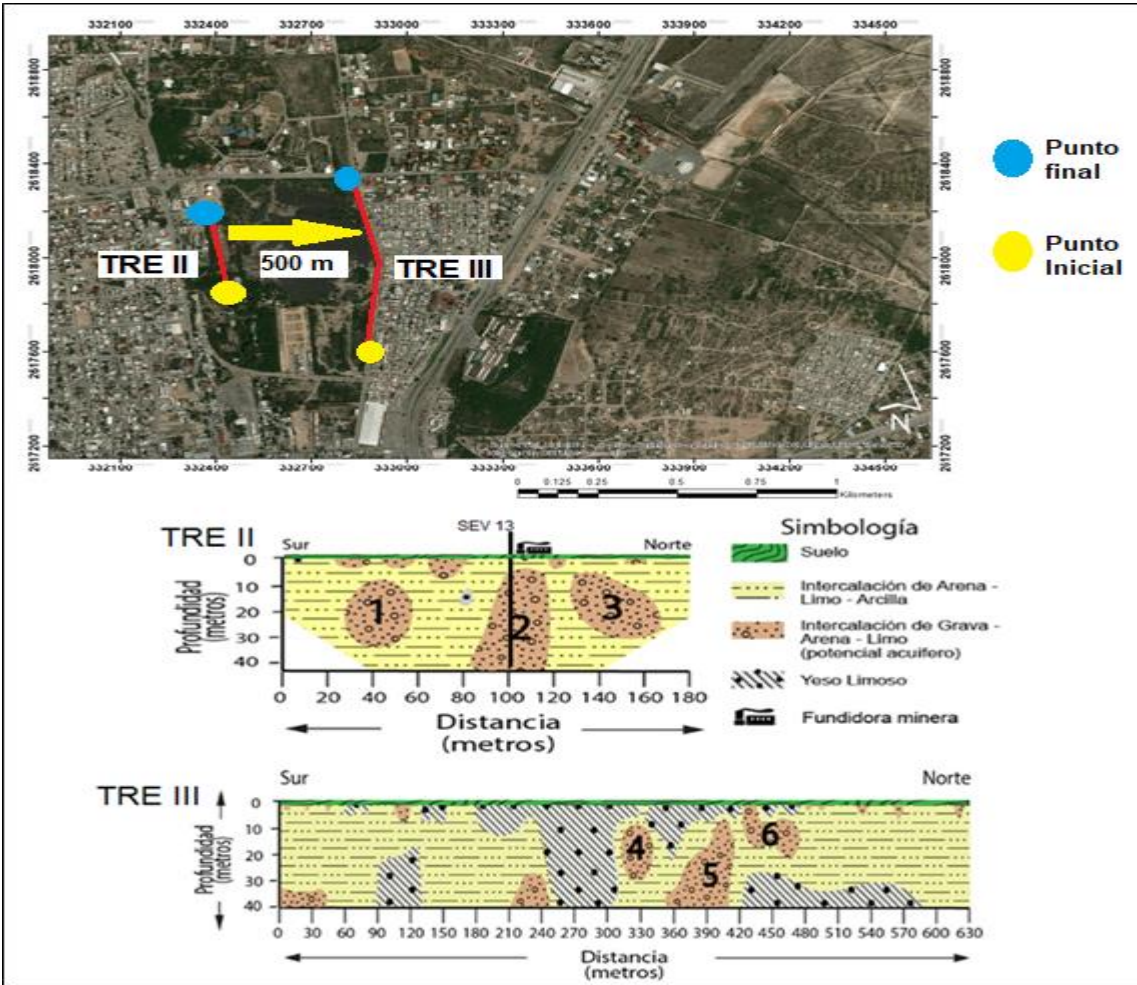
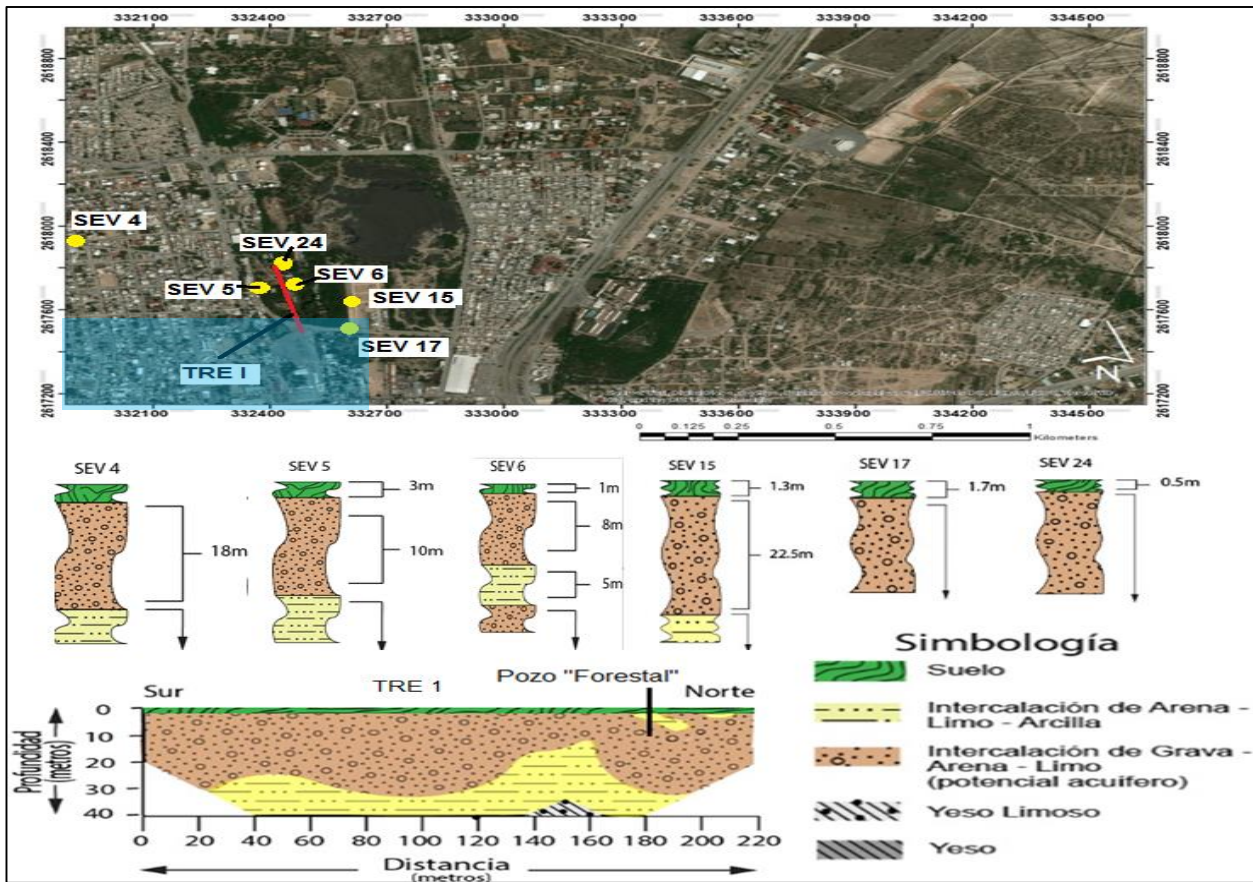


Figura 35. El acuífero somero Matehuala-Cerrito Blanco se distribuye en forma de paleocanales o canales subterráneos en dirección Oeste-Este en el área donde se ubica la antigua fundidora y al Noreste de esta.

Por otro lado, al Sur-Oeste del área donde se ubica la antigua fundidora, el material permeable por el cual fluye el acuífero somero, se distribuye de diferente forma.

De acuerdo con la correlación de los resultados de la sección geología I y los SEVs que se realizaron al Sur-Oeste del área en cuestión (SEV 4, 5, 6, 15, 17 y 25), podemos observar que el material permeable por el cual fluye el acuífero somero, se distribuye en forma lenticular, presentando diferentes tamaños de espesores (< 40 m) a lo largo de él (Figura 36). Rechazando la posibilidad de que, en esta área, el acuífero somero se distribuya en forma de paleocanales.



Área donde el acuífero somero se distribuye en forma lenticular

Figura 36. El material permeable por el cual fluye el acuífero somero, se distribuye en forma lenticular al Sur-Oeste del área de estudio.

6.0 Modelo Conceptual

De acuerdo con la información obtenida en los estudios geofísicos, se propone un modelo conceptual (Figura 37) que explica de manera lógica la distribución y geometría del acuífero somero contaminado a fin de comprender el transporte de arsénico en el sistema acuífero Matehuala-Cerrito Blanco, la ubicación del acuífero regional y la litología de los materiales geológicos del subsuelo en el área donde se ubica la antigua fundidora y sus alrededores.

En la ciudad de Matehuala existe una antigua fundidora abandonada con presencia de arseniatos de calcio en sus suelos (Martínez-Villegas et al., 2013). En dicha fundidora ocurre la lixiviación de arsénico alcanzando niveles freáticos del acuífero somero Matehuala-Cerrito Blanco, produciendo la contaminación en él.

Este acuífero contaminado fluye por un cuerpo aluvial, compuesto de las intercalaciones de materiales como Gravas-Arenas-Limos, con distribución en forma de paleocanales en el área donde se ubica la antigua fundidora, mientras que al Sur-Oeste del área en cuestión, el acuífero somero se distribuye en forma lenticular hasta llegar a la capa de Yesos en el Este de la subcuenca. En este punto, se presume que el agua del acuífero somero reacciona con el yeso provocando una disminución de las concentraciones de arsénico y dando lugar a la formación de cavernas que permiten la continuidad lateral y horizontal de este acuífero (Rodríguez Rodríguez, 2016), donde el agua es captada artificialmente en el complejo hidráulico “Las lumbrera Cerrito Blanco” al Este del Tecnológico de Matehuala. Agua que está concesionada al ejido del mismo nombre y es aprovechada en

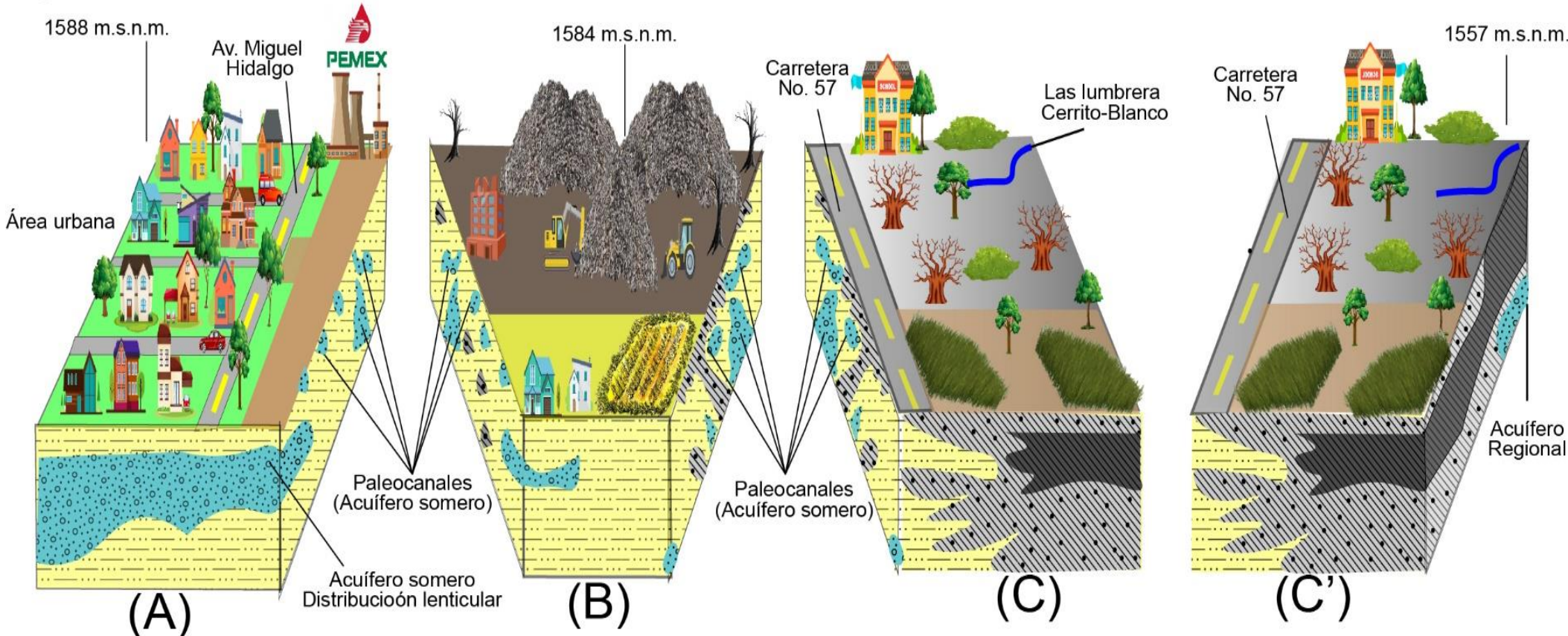
actividades como agricultura (Martínez-Villegas et al, 2017), ganadería, recreación y uso personal.

Una parte del acuífero regional se manifiesta en la litología Lacustre, debajo de una gran capa de yesos (35 m).

Este modelo provee una explicación a las interrogantes de cómo se distribuye el material por el cual fluye el acuífero somero Matehuala-Cerrito Blanco y acepta la hipótesis de la existencia de dos sistemas acuíferos, uno somero en dirección O – E y uno regional en dirección NW – SE (Martínez-Villegas et al., 2013; CONAGUA, 2015,) y confirma la existencia de un contacto litológico entre sedimentos Aluviales y sedimentos Lacustres (Servicio Geológico Mexicano, 2012). Además, abre pautas a futuros trabajos que prueben las hipótesis de la presencia de cavernas en los Yesos y la continuidad de este acuífero somero en dichos Yesos.

Por último, en el área donde se presentan los paleocanales (subsuelo del área donde se ubica la escoria), el modelo demuestra la existencia de zonas donde la presencia del acuífero somero es escasa, información importante a considerar como posibles áreas para la realización de la solución o estabilización de la contaminante *in situ*.

Figura 37. Modelo Conceptual



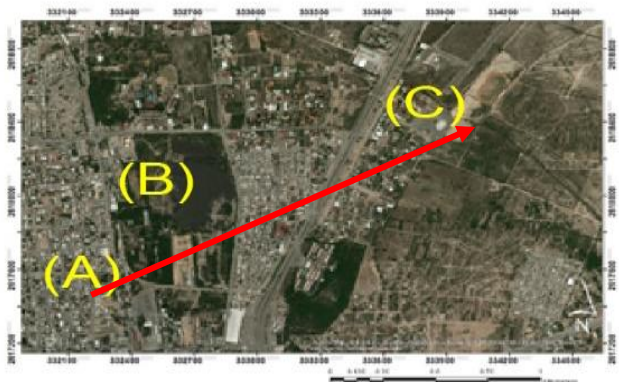
Simbología

- | | | | |
|--|--------------------------|--|-------------------------|
| | Antigua Fundidora | | Escoria |
| | Tecnológico de Matehuala | | Cultivos |
| | Casas | | Cultivos secos |
| | Maquinaria móvil | | Arboles / Arboles secos |

Litología

- | | |
|--|-------------------------------------|
| | Intercalación Arenas-Limo - Arcilla |
| | Intercalación Gravas-Arenas-Limo |
| | Yeso - Limoso |
| | Yeso |

Mapa



7.0 Conclusiones

Existe un acuífero somero adicional al acuífero regional que fluye a través de un cuerpo permeable compuesto por la interdigitación de materiales como Gravas-Arenas-Limos con una dirección preferencial Oeste a Este en el área donde se ubica la antigua fundidora (principal fuente de contaminación). Este acuífero (Matehuala – Cerrito Blanco) se distribuye en forma de paleocanales o canales subterráneos de diferentes tamaños de espesores en el área antes mencionada, mientras que al Sur-Oeste de esta misma área, el acuífero somero se distribuye de forma lenticular.

La correlación de la información geológica del sitio y los resultados geofísicos confirman la existencia de un contraste litológico en el subsuelo (<50 m) en la zona Oeste y Este del municipio de Matehuala, presentando intercalaciones de material Aluvial como Gravas, Arenas Limos y Arcillas en la zona Oeste y material Yesífero con algunas intercalaciones de Limo al Este, en donde se presume que el agua del acuífero somero disuelve este material y forma cavernas que permiten la continuación de este acuífero en los sedimentos lacustres.

En el subsuelo del área donde se ubica la escoria, existen partes compuestas por cuerpos menos permeables (Yesos, Yesos-Limosos, Limos-Arcillas) donde la presencia del acuífero somero es escasa. Por tal motivo, estas áreas se proponen como posibles lugares para la realización de la confinación o estabilización del contaminante insitu, previniendo el contacto con el agua subterránea por lixiviación del As.

8.0 Bibliografía

- Anomohanran, O. 2014. «Hydrogeophysical and Hydrogeological Investigation of Groundwater Resources in Delta Central District of Nigeria».
- Apaza Panca, R. 2014. «Contaminación natural de aguas subterráneas por arsénico en la zona de carancas y huata, puno». *Revista Investigaciones Altoandinas* 51-58.
- Arlandi, M. 2005. «XII Curso De Geotecnia Aplicada». *Universidad De Jaén*, 65.
- Auge, M.2008. «Métodos geoelectricos para la prospección de agua subterránea». *Universidad de Buenos Aires*
- Baker, C., 1922 «General geology of Catorce mining district: Am. Inst. Min. Mat. Eng. Trans». v. 66, p. 42-48.
- Banton, O., Cimon, M.A. and Seguin, M.K.1997. «Mapping field-scale physical properties of soil with electrical resistivity». *Soil Science Society of America Journal* 61.4, 1010-1017.
- Barboza-Gudino. 1998. «The Late Triassic - Early Jurassic Active Continental Margin Of Western North America In North Eastern Mexico». 37, 283–292.
- Basañez-Loyola, M.A., Fernández-Turner, R., and Rosales-Domínguez, C. 1993. «Cretaceous platform of Valles-San Luis Potosí, northeastern central Mexico». in Simo, J. A.; Scott, R., Masse, J. P. (eds.), *Cretaceous Carbonate Platforms: Tulsa, American Association of Petroleum Geologists, Memoir* 56: 51-19
- Bobachev A. 2000. Ipi2win Guía De Usuario. Moscú: Universidad Estatal De Moscú.
http://geophys.geol.msu.ru/demo_exe/WIPI_OM2.PDF

- Bueno Pedroza, A. 2005. «Interpretación hidrogeoquímica de los sistemas de flujo de la parte norte del altiplano potosino».
- Burckhardt, C. and Scalia, S. 1906. «Géologie des environs de Zacatecas». 10th Int. Geol. Cong., *Guide des Excursions* no. 16: 26p.
- Carrillo-Bravo, J. 1982. «Exploración petrolera de la cuenca mesozoica del centro de México» Pp. 21–46.
- CONAGUA. 2015. «Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Cedral – Matehuala (2407), Estado de San Luis Potosí».
- Daily, W., Ramirez, A., Binley, A., and LaBrecque, D.J., 2005. «Electrical resistance tomography — theory and practice. Society of Exploration Geophysicists». (SEG) 525–547 (Ch. 17).
- Ferrendiz, T. 2010. *Litología Del Pozo #16*.
- Friedman, S.P., 2005. «Soil properties influencing apparent electrical conductivity»: A review. *Comput. Electron. Agr.*46, 45-70.
- Golden Software, 2014 *Manual Using*
- González-Grijalva, M. 2009. «Evolución espacio-temporal de la calidad del agua subterránea en el acuífero Cedral-Matehuala: alternativas de uso».
- Goodman R. 1989. «Introduction To Rock Mechanics (Second) ». *University Of California At Berkely*.
- Grande-López, Xolocotzi, H. E., Herrera, N. A., y Boulaine, J. 1967. «Morfología Y Génesis De Suelos Yesíferos De Matehuala, S.L.P. », 1, 130 – 146.

- Griffiths, D. H., and Barker, R. D. 1993. «Two-dimensional resistivity imaging and modelling in areas of complex geology». *Journal of applied Geophysics*, 29(3-4), 211-226.
- Heim. 1940. «The front ranges of the Sierra Madre Oriental, México from C. Victoria to Tamazunchale». *Eclogae Geologicae Helvetiae* 33: 313-362
- Herrera-Peraza E., Espino-Valdés, M.S., y Barrera-Prieto, Y. 2009 «Presencia de arsénico en la sección norte del acuífero Meoqui-Delicias del estado de Chihuahua, México.»
- Iakubovskii, Iu V., and L. L. Liajov. Exploración eléctrica. Reverté, 1980.
- Imlay, R.W. 1936. «Evolution of the Coahuila peninsula, México; part 4. geology of the western part of the Sierra de Parras». *Geological Society Of American Bulletin* 1091–1152.
- Imlay, R. W. 1938. «Studies of the mexican geosyncline». *Bulletin of the Geological Society of America* 49: 1651-1694
- INEGI. 2007. «Estudio Hidrológico Del Estado De San Luis Potosí». México: *Instituto Nacional De Estadística Geografía E Informática*. (P. 136).
- INEGI. 2013. Continuo de Elevaciones Mexicano (CEM), Continúo de Elevaciones Mexicano (CEM). <http://www.beta.inegi.org.mx/app/geo2/elevacionesmex/>
- Jomard, H., Lebourg, T., Binet, S., Tric, E., and Hernandez, M. 2007. «Characterization of an internal slope movement structure by hydrogeophysical surveying». *Terra Nova*, 19(1), 48-57.
- Kearey, P., and Brooks, M., 1991. An introduction to geophysics exploration. Oxford: Blackwell Scientific, Oxford. 254p.

- Kelly, W.A. 1936. «Geology of the mountains bordering the Valleys of Acatita and Las Delicias». *Bulletin of Geological Society of America* 46: 1009–1038.
- Lara Del Río, A. 2015. «Evaluación de acumulación de arsénico en cabello de poblaciones expuestas a este contaminante en el complejo hidráulico Matehuala-Cerrito Blanco».
- Le Roux, O., Jongmans, D., Kasperski, J., Schwartz, S., Potherat, P., Lebrouc, V., and Meric, O. 2011. «Deep geophysical investigation of the large Séchillienne landslide (Western Alps, France) and calibration with geological data». *Engineering Geology*, 120 (1-4), 18-31.
- Loke, M. H., Acworth, I., and Dahlin, T. 2003. A comparison of smooth and blocky inversion methods in 2D electrical imaging surveys, *Exploration Geophysics* 34 (3) 182-187
- Loke, M. H., and Barker, R.D., 1996. «Rapid Least-Squares Inversion of Apparent Resistivity Pseudosections Using a Quasi-Newton Method» *Geophysical Prospecting*. 44 (1996) 131–152.
- López Ramos, E. 1974. «Estratigrafía Cretácica Y Tectónica De Una Porción Del Centro Y Noreste De México».
- Martínez-Villegas, N., Briones-Gallardo, R., Ramos-Leal, J.A., Avalos-Borja, M., Castañón-Sandoval, A.D., Razo-Flores, E., and Villalobos. M. 2013. «Arsenic mobility controlled by solid calcium arsenates: A case study in Mexico showcasing a potentially widespread environmental problem». *Environmental Pollution* 176:114-22.

- Martínez-Villegas, N. Ruíz-Huerta, E. A., Gomez-Bernal, J.M., Castillo, F., De La Garza, A., Avalos-Borja, M., and SenGupta. B. 2017. «Arsenic contamination in irrigation water, agricultural soil and maize crop from an abandoned smelter site in Matehuala, Mexico». *Journal of hazardous materials* 339 (2017): 330-339.
- Meyer de Stadelhofen, C. (1991). «Applications de la géophysique aux recherches d'eau». *Techniques & Doc.*
- Mixon, R.B., Murray, G.E., and Diaz, T.G. 1959. «Age and correlation of Huizachal Group (Mesozoic), state of Tamaulipas, Mexico». *American Association of Petroleum Geologists Bulletin* 43: 757–771.
- Mujica-Mondragón, M. R., y Jacobo-Albarrán, J. 1983. «Estudio petrogenético de las rocas ígneas y metamórficas del Altiplano Mexicano». México, *Instituto Mexicano del Petróleo* Proyecto C-1156, 78 p.
- Musset, A. E. and Khan, M. A. 2000 «Looking into the Earth: An Introduction to Geological Geophysics Cambridge University Press Cambridge»
- Nieto-Samaniego, Á. F., Alaniz-Álvarez, S.A, y Camprubí í Cano, A. 2005. «La Mesa Central de México: estratigrafía, estructura y evolución tectónica cenozoica». *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana* 57(3):285-318.
- NOM 127, 2005. "Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, Salud ambiental, agua para uso y consumo humano-Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización."
- Olsen P. and Kent, D. 1999 «Astronomically tuned geomagnetic polarity timescale for the Late Triassic». *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 104.B6 12831-12841.

- Oms. 2016. Arsénico. Recuperado El 8 De Junio De 2015, A Partir De [Http://Www.Who.Int/Mediacentre/Factsheets/Fs372/Es/](http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs372/es/)
- Orellana E. 1982. «Prospección geoelectrica en corriente continua». (2a Ed.).
- Orellana, E. and Mooney, H.M. 1996. «Master tables and curves for electrical sounding over layered structures». *Interciencia, Madrid, Spain*.
- Pantoja-Alor, J. 1972. «La Formación Nazas del levantamiento de Villa Juárez, estado de Durango». México, *segunda Convención Nacional de la Sociedad Geológica Mexicana* 25–31.
- Perrone, A., Giocoli, A., Stabile, T. A., Adurno, I., Gallipoli, M. R., Gueguen, E., and Piscitelli, S. 2015. «Geological and geophysical characterization of the southeastern side of the High Agri Valley (southern Apennines, Italy)». *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 15(2), 315-323.
- Principles of Applied Geophysics Springer; Edición: 5th 1996 ed. (31 de Diciembre de 1996), Pp. 456
- Raisz, E. 1959. Landforms of México, scale ca. 1:3 000 000: Cambridge, Massachussets, U. S. Office of Naval Research, Geography Branch, 1 map.
- Razo, I., Carrizales, L., Castro, J., Díaz-Barriga, F., and Monroy, M. 2004. «Arsenic and heavy metal pollution of soil, water and sediments in a semi-arid climate mining area in México». *water, air, and soil pollution*. 152(1-4): 129–152.
- 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».

Schrott, L., and Sass, O. 2008. «Application of field geophysics in geomorphology: advances and limitations exemplified by case studies». *Geomorphology*, 93(1-2), 55-73.

Servicio Geológico Mexicano. 2012. «Carta Minera F14-A25».

Telford, W.M., Geldart, L.P., Sheriff, R.E. and Keys, D.A.1990. Applied Geophysics, Cambridge University Press, Cambridge, 770 pp.

Tristán González, M., y Torres-Hernández, J.R., 1992. Cartografía geológica 1:50 000 de la hoja Charcas, estado de San Luis Potosí. *Universidad Autónoma de San Luis Potosí, instituto de geología*, folleto técnico 115-94.

Tristán González, M. 2008. «Evolución tectono-volcánica durante el paleógeno en la porción sur-oriental de la mesa central». *Universidad Nacional Autónoma de México, Juriquilla, Qro.*

Weinzettel, P., Dietrich, S., and Varni, M. 2009. «Utilización de tomografía eléctrica con distintas configuraciones y espaciamientos electródicos para la caracterización de la zona no saturada». *J. Ed. Jornadas de Investigación de La Zona No Saturada Del Suelo*, 9, 253-260.

Zarroca, M., Gutiérrez, F., Linares, R., Roqué, C., Rosell, J., Galve, J. P., and Carbonel, D. 2012. Investigating gravitational grabens related to lateral spreading and evaporite dissolution subsidence by means of detailed mapping, trenching, and electrical resistivity tomography (Spanish Pyrenees). *Lithosphere*, 4(4), 331-353.

