



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

**POSGRADO EN GEOCIENCIAS APLICADAS**

**ESTUDIO GEOFÍSICO PARA LA DETERMINACIÓN DE LA  
DISPONIBILIDAD DE AGUA SUBTERRÁNEA SOMERA EN LA  
LOCALIDAD EL RODEO, MEXQUITIC DE CARMONA, S.L.P.**

Tesis que presenta  
**Anayeli Pineda Román**

Para obtener el grado de  
**Maestra en Geociencias Aplicadas**

Director de la Tesis:  
**Dr. Omar Delgado Rodríguez**

San Luis Potosí, S.L.P., 06 de agosto de 2021



## **Constancia de aprobación de la tesis**

La tesis “**Estudio geofísico para la determinación de la disponibilidad de agua subterránea somera en la localidad El Rodeo, Mexquitic de Carmona, S.L.P.**” presentada para obtener el Grado de Maestra en Geociencias Aplicadas fue elaborada por **Anayeli Pineda Román** y aprobada el **06 de agosto de 2021** 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**  
Director de la tesis

---

**Dr. Héctor José Peinado Guevara**  
Miembro del Comité Tutorial

---

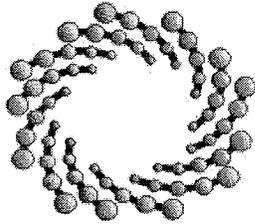
**Dr. Vsevolod Yutsis**  
Miembro del Comité Tutorial



## **Créditos Institucionales**

Esta tesis fue elaborada con ayuda del Laboratorio de Geofísica de la División de Geociencias Aplicadas del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C., bajo la dirección del Dr. Omar Delgado Rodríguez.

Durante la realización del trabajo el autor recibió una beca académica del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (667436) y del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A. C.



**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 072 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 6 días del mes de agosto del año 2021, se reunió a las 12:00 horas en las instalaciones del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C., el Jurado integrado por:

**Dr. Vsevolod Yutxis**  
**Dr. Omar Delgado Rodríguez**

**Presidente**  
**Secretario**

**IPICYT**  
**IPICYT**

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

**MAESTRA EN GEOCIENCIAS APLICADAS**

sustentó la C.

**Anayeli Pineda Román**

sobre la Tesis intitulada:

*Estudio geofísico para la determinación de la disponibilidad de agua subterránea somera en la localidad El Rodeo, Mexquitic de Carmona, S.L.P.*

que se desarrolló bajo la dirección de

**Dr. Omar Delgado Rodríguez**

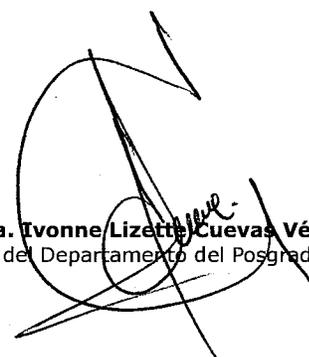
El Jurado, después de deliberar, determinó

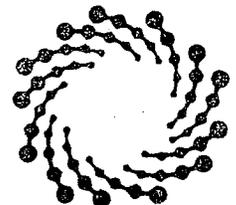
**APROBARLA**

Dándose por terminado el acto a las 13:05 horas, procediendo a la firma del Acta los integrantes del Jurado. Dando fe el Secretario Académico del Instituto.

A petición de la interesada y para los fines que a la misma convengan, se extiende el presente documento en la ciudad de San Luis Potosí, S.L.P., México, a los 6 días del mes de agosto de 2021.

  
**Dr. Marcial Bonilla Marín**  
Secretario Académico

  
**Mtra. Ivonne Lizette Cuevas Vélez**  
Jefa del Departamento del Posgrado



**IPICYT**

SECRETARÍA ACADÉMICA  
INSTITUTO POTOSINO DE  
INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA  
Y TECNOLÓGICA, A.C.

## **Dedicatorias**

A mi madre (Minerva Román), por el gran apoyo que me ha dado para lograr todas mis metas y mis sueños, por estar siempre a mi lado, por ser una mujer ejemplar a seguir y sobre todo por el gran AMOR que me ha demostrado.

A mi esposo (Christian Y. Cordero), por el gran apoyo incondicional que ha dado en esta estancia, por su paciencia y comprensión.

A mis hijos (Amitza y Santiago), por su amor, paciencia y sobre todo comprensión ya que han sido parte de esta nueva y maravillosa etapa en mi vida (LOS AMO).

## Agradecimientos

Agradezco profundamente a mi madre Minerva Román y a mis hermanos Gloria y Fernando, por su gran apoyo y amor incondicional, porque siempre han creído en mí y estado a mi lado en todo momento

A Christian Cordero, por su cariño, por creer en mí, motivarme a seguir creciendo profesionalmente y sobre todo por apoyarme con sus conocimientos académicos y su disponibilidad en todas las campañas de campo. Aparte de ser mi compañero de vida, también fuiste mi compañero y colega académico.

A mis hijos Amitza y Santy, por acompañarme en esta maravillosa etapa de mi vida, por su paciencia, comprensión y amor y sobre todo porque también salieron en varias campañas de campo conmigo.

Agradezco al Dr. Omar Delgado, por todo el aprendizaje brindado en esta etapa, como también su confianza, comprensión y apoyo incondicional.

Al Dr. Héctor Peinado y al Dr. Vsevolod Yutsis, por su asesoramiento, apoyo, contribución, observaciones y recomendaciones que contribuyeron a enriquecer el contenido de este trabajo.

A mis compañeros de la División de Geociencias, Nadia Vite, Claudia Rocha y Krishia Acosta por su apoyo en las campañas de campo, por ser compañeras de clases, por su apreciables y sincera amistad.

A los chicos de verano y practicantes del laboratorio de Geofísica, Javier Anaya y J. Iván Hernández por su disponibilidad, apoyo incondicional y su energía en cada campaña de campo.

# Contenido

|   |             |
|---|-------------|
| <i>Lista de tablas</i> .....                                    | <i>x</i>    |
| <i>Lista de figuras</i> .....                                   | <i>xi</i>   |
| <i>Resumen</i> .....  | <i>xv</i>   |
| <i>Abstract</i> .....   | <i>xvii</i> |
| <i>Generalidades</i> .....                                      | <i>1</i>    |
| Introducción .....  | 1           |
| Hipótesis .....   | 3           |
| Objetivo general .....  | 3           |
| Objetivos específicos .....                                     | 3           |
| Antecedentes .....  | 4           |
| <i>Capítulo 1. Marco geológico</i> .....                        | <i>8</i>    |
| 1.1 Área de estudio .....                                       | 8           |
| 1.2 Acceso a la zona de estudio .....                           | 8           |
| 1.3 Fisiografía .....   | 9           |
| 1.4 Clima .....   | 10          |
| 1.5 Geología .....  | 11          |
| 1.6 Edafología .....  | 12          |
| 1.7 Hidrografía .....   | 13          |
| 1.8 Uso y vegetación del suelo .....                            | 14          |
| 1.9 Geología regional .....                                     | 15          |
| 1.10 Geología Local .....                                       | 16          |
| 1.10.1 Rocas Sedimentarias Marinas del Cretácico Superior ..... | 17          |
| 1.10.2 Rocas ígneas extrusivas .....                            | 19          |
| 1.11 Conceptualización de parámetros .....                      | 23          |
| <i>Capítulo 2. Marco Teórico</i> .....                          | <i>26</i>   |
| 2.1 Fundamentos de los métodos potenciales .....                | 26          |
| 2.2 Método Magnético .....                                      | 26          |
| 2.2.1 Reseña .....  | 26          |
| 2.2.2 Campo magnético terrestre .....                           | 27          |
| 2.2.3 Componentes del campo magnético terrestre .....           | 28          |
| 2.2.4 Propiedades magnéticas de las rocas .....                 | 28          |

|   |           |
|---|-----------|
| 2.2.5 Tipos de magnetismo .....   | 30        |
| 2.2.6 Susceptibilidad magnética.....  | 31        |
| 2.2.7 Temperatura magnética .....   | 32        |
| 2.2.8 Permeabilidad magnética .....   | 33        |
| 2.2.9 Fuerza magnética .....  | 33        |
| 2.2.10 Anomalías magnéticas .....   | 34        |
| 2.2.11 Campo Geomagnético Internacional de Referencia (IGFR) .....                    | 34        |
| 2.2.12 Reducción a polo magnético .....   | 35        |
| 2.2.13 Señal Analítica .....  | 36        |
| 2.2.14 Primera y segunda derivada vertical .....                                      | 37        |
| 2.2.15 Variaciones de campo magnético .....   | 38        |
| 2.3 Métodos geoelectrico .....  | 40        |
| 2.3.1 Reseña .....  | 40        |
| 2.3.2 Principios básicos .....  | 40        |
| 2.3.2.1 Resistencia y Resistividad.....   | 40        |
| 2.3.3 Resistividad de las rocas.....  | 43        |
| 2.3.4 Factores que intervienen en la resistividad.....                                | 44        |
| 2.3.5 Modelos Geoelectricos del subsuelo .....  | 44        |
| 2.3.6 Sondeos Eléctricos Verticales (SEV).....  | 45        |
| 2.3.6.1 Dispositivo electródicos principales .....                                    | 46        |
| 2.3.6.1.1 Wenner .....  | 46        |
| 2.3.6.1.2 Schlumberger .....  | 47        |
| 2.3.6.1.3 Dipolo – Dipolo.....  | 48        |
| 2.3.6.2 Clasificación de los Cortes Geoelectrico .....                                | 48        |
| 2.3.6.2.1 <i>Tipos de curvas</i> .....  | 49        |
| 2.3.7 Tomografías de Resistividad Eléctrica (TRE) .....                               | 49        |
| 2.3.7.1 <i>Dispositivo electródicos principales utilizados en el método TRE</i> ..... | 50        |
| 2.3.7.1.1 <i>Arreglo Wenner-Schlumberger</i> .....                                    | 50        |
| 2.3.5.2.1 Arreglo Dipolo – Dipolo .....   | 51        |
| <b>Capítulo 3. Metodología .....</b>  | <b>52</b> |
| 3.1 Métodos magnéticos .....  | 52        |
| 3.1.1 Magnetometría aérea .....   | 52        |
| 3.1.1.1 Características del equipo .....  | 52        |
| 3.1.1.2 Procesamiento de magnetometría aérea.....                                     | 52        |
| 3.1.2 Magnetometría terrestre.....  | 53        |

|   |           |
|---|-----------|
| 3.1.2.1 Características del equipo .....  | 54        |
| 3.1.2.2 Procesamiento de magnetometría terrestre .....  | 54        |
| 3.2 Métodos geoelectricos .....   | 55        |
| 3.2.1 Sondeo eléctrico vertical (SEV's).....  | 55        |
| 3.2.1.1 Características del equipo .....  | 56        |
| 3.2.1.2 Procesamiento de datos de SEV.....  | 57        |
| 3.2.2 Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE).....   | 58        |
| 3.2.2.1 Características del equipo .....  | 58        |
| 3.2.2.2 Procesamiento .....   | 58        |
| 3.3 Determinación del contenido de finos y de la conductividad hidráulica.....  | 59        |
| 3.3.1 Modelo teórico del suelo de Ryjov.....  | 59        |
| 3.3.2 Estimación del contenido de finos y de la K .....   | 61        |
| <i>Capítulo 4. Resultados y Discusión.....</i>  | <i>63</i> |
| 4.1 Resultados de Magnetometría.....  | 63        |
| 4.1.1 Magnetometría Aérea: Dominios magnéticos .....  | 63        |
| 4.1.2 Señal Analítica .....   | 64        |
| 4.1.3 Magnetometría Terrestre: Dominios magnéticos .....  | 65        |
| 4.1.4 Señal Analítica .....   | 66        |
| 4.2 Resultados de mediciones de salinidad, contenido de finos y conductividad hidráulica en muestras de agua y de material no consolidado. .... | 67        |
| 4.3 Resultados de las Tomografías de Resistividad Eléctrica .....   | 72        |
| 4.3.1 Modelos geoelectricos-geológicos .....  | 72        |
| 4.3.2 Mapas de resistividad eléctrica .....   | 74        |
| 4.2 Resultados de Sondeos Eléctricos Verticales .....   | 77        |
| 4.2.1 Secciones de los Sondeos Eléctricos Verticales .....  | 81        |
| 4.2.2 Sección 1 .....   | 84        |
| 4.2.3 Sección 2 .....   | 84        |
| <i>Conclusiones.....</i>  | <i>85</i> |
| <i>Propuesta.....</i>   | <i>87</i> |
| <i>Recomendaciones.....</i>   | <i>88</i> |
| <i>Bibliografía .....</i>   | <i>89</i> |

## Lista de tablas

|  |    |
|--|----|
| Tabla 1. Características del diseño del pozo El Rodeo. ....  | 7  |
| Tabla 2. Susceptibilidad magnética de las rocas (Telford, et al., 1990). ....  | 32 |
| Tabla 3. Valores de resistividad de algunos materiales (Orellana, 1982; J. A. Porres Benito, 2007). ....   | 43 |
| Tabla 4. Distribución y orientación por secciones de N-S y W-E de los SEV's. ....  | 56 |
| Tabla 5. Descripción del equipo y materiales que se utilizaron para realizar ....  | 57 |
| Tabla 6. Resultados de contenido de finos en muestras no consolidadas. ....  | 67 |
| Tabla 7. Resultado de salinidad en muestras de agua. ....  | 70 |
| Tabla 8. Estimación de resistividad eléctrica de las diferentes litologías representadas en las muestras S1 a S2, para diferentes niveles de humedad, tomando en cuenta una salinidad de 0.215 g/L. .... | 71 |
| Tabla 9. Sondeos Eléctricos Verticales en la zona central del área de estudio. ....  | 82 |

## Lista de figuras

|  |    |
|--|----|
| Fig. 1. Localización del municipio de Mexquitic de Carmona, San Luis Potosí (SGM, 2006).....                                   | 4  |
| Fig. 2. Diseño del pozo de la comunidad El Rodeo, Mexquitic de Carmona, S.L.P. (SGM,.....                                      | 6  |
| Fig. 3. Mapa del municipio de Mexquitic de Carmona S.L.P. que ubica el área de estudio delimitada en el poblado El Rodeo. .... | 8  |
| Fig. 4. Vías de acceso al municipio de Mexquitic de Carmona, San Luis Potosí (INEGI, 2009).....                                | 9  |
| Fig. 5. Fisiografía del municipio de Mexquitic de Carmona, San Luis Potosí (INEGI, 2009).....                                  | 10 |
| Fig. 6. Clima predominante en el municipio de Mexquitic de Carmona, San Luis Potosí (INEGI, 2009).....                         | 11 |
| Fig. 7. Suelos dominantes en el municipio de Mexquitic de Carmona, San Luis Potosí (INEGI, 2009).....                          | 12 |
| Fig. 8. Suelos dominantes en el municipio de Mexquitic de Carmona, San Luis Potosí (INEGI, 2009).....                          | 13 |
| Fig. 9. Uso del suelo y vegetación en el municipio de Mexquitic de Carmona, San Luis Potosí (INEGI, 2009).....                 | 14 |
| Fig. 10. Columna estratigráfica de la carta geológica mexicana F14-A83 (SGM, 2007).<br>.....                                   | 15 |
| Fig. 11. Mapa de dominio de rocas volcánicas y sedimentarias marinas de El Rodeo, Mexquitic de Carmona, S.L.P.....             | 17 |
| Fig. 12. Afloramiento de conglomerados polimícticos observados en la localidad El Rodeo, Mexquitic de Carmona, S.L.P. ....     | 19 |
| Fig. 13. Afloramiento de Toba Riolítica en la localidad El Rodeo, Mexquitic de Carmona, S.L.P. ....                            | 21 |
| Fig. 14. Afloramiento de Ignimbrita Riolítica en la localidad El Rodeo, Mexquitic de Carmona, S.L.P.....                       | 21 |

|  |    |
|--|----|
| Fig. 15. Tipos de acuíferos y niveles piezométricos. ....  | 24 |
| Fig. 16. Dunas de filtración.....  | 25 |
| Fig. 17. Ilustración del Campo magnético terrestre. ....   | 27 |
| Fig. 18. Componentes del campo geomagnético (Pérez Hernández, 2019). ....  | 28 |
| Fig. 19. Magnetización resultante de la suma de las componentes de magnetización inducida, $M_i$ , y remanente, $M_r$ . (Butler, 1992).....  | 30 |
| Fig. 20. Distribución de spines magnéticos. ....   | 31 |
| Fig. 21. Se observa el levantamiento aeromagnético el sensor registra la suma del vector del campo magnético ambiente y la contribución anómala de fuentes locales (Reeves, 2005).....           | 34 |
| Fig. 22. Relación que existe entre el campo magnético medido (A), reducido al polo (B). ....   | 36 |
| Fig. 23. Mapa de isóporas Z (en gammas) para el año 1942 (Logachev & Zajarov, 1977).....   | 38 |
| Fig. 24. (a) muestra las variaciones del campo magnético con respecto a latitud y variación en tiempo. La figura (b) se observa la señal de micro-pulsaciones modificada de Breiner (1999). .... | 39 |
| Fig. 25. Se muestran las variaciones del campo magnético registrada a decenas de kilómetros observándose las micro-pulsaciones, la variación de un lugar a otro (Reeves, 2005).....              | 39 |
| Fig. 26. Representación de medición de resistencia en un cuerpo. ....  | 41 |
| Fig. 27. Configuración de un Sondeo Eléctrico Vertical (SEV). ....   | 46 |
| Fig. 28. Arreglo Wenner. ....  | 47 |
| Fig. 29. Arreglo Schlumberger.....   | 47 |
| Fig. 30. Arreglo Dipolo-Dipolo. ....   | 48 |
| Fig. 31. Tipos de curvas de tres capas de resistividad aparente.....   | 49 |
| Fig. 32. Arreglo Wenner - Schlumberger TRE.....  | 51 |
| Fig. 33. Arreglo Dipolo – Dipolo para TRE. ....  | 51 |
| Fig. 34. Mapa de levantamiento de datos magnéticos en área de estudio (primera campaña). ....  | 53 |
| Fig. 35. Levantamiento de datos magnéticos terrestre en área de estudio. ....  | 54 |

|   |    |
|---|----|
| Fig. 36. Mapa de levantamiento de datos magnéticos terrestre en área de estudio (segunda campaña). .....  | 54 |
| Fig. 37. Mapa de ubicación de los SEV's formando dos secciones (N-S y W-E) en El Rodeo, Mexquitic de Carmona, S.L.P, utilizando el arreglo Schlumberger. ....   | 56 |
| Fig. 38. Mediciones eléctricas con equipo Syscal R2.....  | 57 |
| Fig. 39. Mapa de TRE realizadas en El Rodeo Mexquitic de Carmona S.L.P, utilizando el arreglo Wenner – Schlumberger.....  | 58 |
| Fig. 40. (A) Se muestra el campo magnético aéreo residual con reducción al polo con delimitaciones de dominios magnéticos regionales. (B) Se muestra la geología local del área de estudio El Rodeo. .... | 63 |
| Fig. 41. Señal analítica con lineamientos magnéticos.....   | 64 |
| Fig. 42. Dominios de campo magnéticos con reducción a polo del área de estudio El Rodeo (magnetometría terrestre).....  | 65 |
| Fig. 43. Señal analítica (SA) del área de estudio El Rodeo (Magnetometría Terrestre).<br>.....  | 66 |
| Fig. 44. Ubicación de toma de muestra de material poco consolidados en El Rodeo, Mexquitic de Carmona. ....   | 68 |
| Fig. 45. Se muestra las norias sin agua existentes en la comunidad El Rodeo, con afloramiento de riolitas, tobas y tepetate.....  | 68 |
| Fig. 46. Mapa topográfico del área de estudio El Rodeo, Mexquitic de Carmona. ....  | 69 |
| Fig. 47. Ubicación de toma de muestra de agua en El Rodeo, Mexquitic de Carmona.<br>.....   | 70 |
| Fig. 48. Se muestra de izquierda a derecha, la laguna (época de seca) y las norias productivas N2 y N1, existentes en la comunidad El Rodeo. ....   | 70 |
| Fig. 49. Escala de resistividad eléctrica asociada a tipos litológicos y grado de humedad. ....   | 71 |
| Fig. 50. Tomografías de resistividad eléctrica (TRE) en el área de estudio El Rodeo, Mexquitic de Carmona, S.L.P.....   | 72 |
| Fig. 51. Modelos geoelectricos de perfiles de tomografía de resistividad eléctrica en el área de estudio (El Rodeo).....  | 73 |

|  |    |
|--|----|
| Fig. 52. Mapas geoelectrico obtenidos de los modelos de las tomografías de resistividad eléctrica.....   | 75 |
| Fig. 53. Modelo esquemático del acuífero somero en la zona de estudio.....   | 76 |
| Fig. 54. Muestran los 8 sondeos eléctricos verticales que se realizaron en el área de estudio (El Rodeo).....  | 77 |
| Fig. 55. Sondeos eléctricos verticales pertenecientes a la sección 2 con dirección de N-S, SEV 4, SEV 1, SEV 2, SEV 3 y SEV 5.....   | 79 |
| Fig. 56. Sondeos eléctricos verticales pertenecientes a la sección 1 con dirección de W-E, SEV 8, SEV 7, SEV 2 y SEV 6.....  | 80 |
| Fig. 57. Distribución estadística de valores de resistividad aparente medidos en los 8 SEV's que conforman los perfiles E-W y N-S. ....                                    | 81 |
| Fig. 58. Se muestra la curva representativa de los 8 SEV's de acuerdo a la distribución estadística de los valores de resistividad aparente y el modelo 1D resultante..... | 82 |
| Fig. 59. SEV del pozo El Rodeo, Mexquitic de Carmona, S.L.P.....   | 83 |
| Fig. 60. Sección 1 (Modelo geoelectrico). ....   | 84 |
| Fig. 61. Sección 2 (Modelo geoelectrico). ....   | 85 |
| Fig. 62. Mapa con propuesta de perforación de dos norias y pozo en la comunidad El Rodeo, Mexquitic de Carmona.....  | 87 |

## Resumen

La geofísica es una ciencia multidisciplinaria que ha sido ampliamente aplicada para la solución de problemas que afectan a la sociedad y el desarrollo económico de una región.

En el presente trabajo se realiza un estudio acerca de la disponibilidad de agua subterránea somera en la localidad del El Rodeo, en el municipio Mexquitic de Carmona, SLP, utilizando los métodos magnetométricos y geoelectricos de prospección geofísica. Específicamente, se utilizaron los métodos de magnetometría aérea, terrestre y Tomografías de Resistividad Eléctrica (TRE) para la determinación de los tipos de materiales y sus espesores existentes en el área de estudio, así como también conocer la estructura geológica y presencia de zona de saturación (acuífero) somera que permitan la extracción de agua mediante la perforación de norias.

Anomalías magnéticas residuales positivas resaltaron la presencia de material volcánico formado por espesores de tobas riolíticas sobre yaciendo a horizontes de tepetate a lo largo de la cuenca del antiguo cauce de arroyo seco, disminuyendo su extensión y espesor de norte a sur, en descenso topográfico. De acuerdo a los NE de las tres norias de baja productividad en el sitio de estudio y los resultados de las TRE, este cuerpo se encuentra saturado y, siendo su techo muy somero al norte del área de estudio, en las inmediaciones de la laguna, aumentando su profundidad de manera gradual a su techo en dirección al sur, hasta alcanzar una profundidad de aproximadamente 14 m, proporcionando una alternativa para la perforación efectiva de norias para satisfacer necesidades de riego en parcelas agrícola. De acuerdo a los resultados del levantamiento de TRE, se propone profundizar tres norias productivas existentes y construir una nueva con el propósito aumenta la disponibilidad de agua para riego de parcelas e invernaderos.

Con el propósito de estudiar las condiciones hidrogeológicas más profundas del sitio, un levantamiento de SEV fue realizado, dando como resultado dos secciones geoelectricas (norte-sur y este-oeste) hasta una profundidad de estudio de 220 m, mostrando grandes espesores (> 100 m) de material detrítico como tobas y conglomerados riolíticas, siendo, por debajo de la línea de saturación, potenciales

acuíferos. De acuerdo a estos resultados, se propone una subzona de aproximadamente 14,000 m<sup>2</sup> ubicada en la porción norte del área de estudio, como la de mejor perspectiva para la perforación de un pozo profundo. No obstante, a este resultado, son necesarios estudios geoelectrónicos hasta una profundidad de 400 m para proponer la perforación de un pozo de 350 m de profundidad que garantice un mejor abastecimiento de agua para consumo humano a las seis comunidades (incluyendo El Rodeo) dependientes del pozo actual en operación.

Palabras clave: Aguas subterránea, acuífero somero, magnetometría aérea, magnetometría terrestre, campo magnético residual con reducción al polo, señal analítica, tomografía de resistividad eléctrica, sondeo eléctrico vertical, Mexquitic de Carmona.

## **Abstract**

Geophysics is a multidisciplinary science that has been widely applied to solve problems that affect society and the economic development of a region.

In the present work, a study of the availability of shallow groundwater in the locality El Rodeo, in the municipality of Mexquitic de Carmona, SLP, is carried out using the magnetometric and geoelectric methods of geophysical prospecting. Specifically, the methods of aerial and terrestrial magnetometry and Electrical Resistivity Tomography (ERT) were used to determine the types of materials and their thicknesses in the study area, as well as to know the geological structure and presence of shallow saturation zone (aquifer) that allow the extraction of water through the drilling of shallow wells.

Positive residual magnetic anomalies highlighted the presence of volcanic material formed by thicknesses of rhyolitic tuffs overlying tepetate horizons along the basin of the old dry creek bed, decreasing its extension and thickness from north to south, in topographic descent. According to the SWL of the three low productivity shallow wells in the study site and the results of the ERT, this body is saturated and, being its roof very shallow to the north of the study area, near to lagoon, increasing its depth gradually in a southward direction, until reaching a depth of approximately 14 m, providing an alternative for the effective drilling of shallow wells to satisfy irrigation needs in agricultural plots. Based on the results from ERT survey, it is proposed to deepen three existing low productive shallow wells and construct a new one in order to increase the availability of water for irrigation of plots and greenhouses.

In order to study the deeper hydrogeological conditions of the site, a VES survey was carried out, resulting in two geoelectric sections (north-south and east-west) up to a study depth of 220 m, showing large thicknesses (> 100 m) of detrital material such as tuffs and rhyolitic conglomerates, being, below the saturation line, potential aquifers. According to these results, a sub-zone of approximately 14,000 m<sup>2</sup> is proposed as the best prospect for the drilling of a deep well; however, future geoelectric studies up to a depth of 400 m are necessary to project the drilling of a 350 m well to guarantee a better water supply for human consumption to the six communities (including El Rodeo) dependent on the current well in operation.

KEY WORDS.

Groundwater, shallow aquifer, airborne magnetometry, ground magnetometry, residual magnetic field with pole reduction, analytical signal, electrical resistivity tomography, vertical electrical sounding, Mexquitic de Carmona

## Generalidades

### Introducción

Como es de gran saber, el agua es un líquido vital para la vida y esencial para las actividades diarias que realiza el ser humano (uso doméstico, agrícola e industrial). En la actualidad, muchas personas sufren por la escases de agua tanto por su calidad y disponibilidad, como es el caso del norte del país de México; Pérez-Hernández (2019) menciona que existe 653 acuíferos que administran agua subterráneas y el 38.9% aportar un volumen total de consumo, 105 de estos acuíferos se encuentran en estado de sobreexplotación y 32 de estos se encuentran en suelos salinizados.

En el estado de San Luis Potosí se encuentra el acuífero con clave 2411, localizado en la porción suroeste del estado, cubriendo un área de 2, 064 Km<sup>2</sup>, abarcando los municipios de Soledad de Graciano, San Luis Potosí, Cerro de San Pedro, así como pequeñas fracciones de los municipios de Mexquitic de Carmona, Ahualulco y Villa de Arriaga.

CONAGUA realiza estudios y actualizaciones sobre la disponibilidad de agua subterránea cada 3 años en el estado de San Luis Potosí. El Valle de San Luis Potosí pertenece a la zona geohidrológica que comprende el río Santiago, la cual se formó por pequeños escurrimientos de la sierra situada hacia el W y SW de la ciudad de San Luis Potosí. En el año 2014 CONAGUA vuelve a señalar que, entre los años 1962 a 1985 el Diario Oficial de la Federación declaró zona de veda al Valle de San Luis Potosí causado por la sobreexplotación existente en este acuífero y sus alrededores, incluyendo las zonas de recargas de los acuíferos en el estado. Dichas vedas, restringieron la extracción de aguas del subsuelo para cualquier uso, excepto para fines doméstico y abrevadero, por ello no se ha permitido extracciones adicionales, excepto para uso público-urbano en zonas rurales donde no se cuenta con este servicio (CONAGUA, 2018).

Como ejemplo de escasez de agua, tenemos la afectación que sufre el Grupo de Mujeres Emprendedores de Mexquitic de Carmona, en la comunidad El Rodeo, perteneciente al municipio de Mexquitic de Carmona, S.L.P. La comunidad El Rodeo

es una zona urbana que no cuentan con servicio regular de agua, siendo que se les proporciona, de manera limitada, agua proveniente del único pozo profundo de la región. Este pozo cuenta con una concesión otorgada en el año 1996 y se encuentra perforado hasta 350 m de profundidad aproximadamente. Actualmente posee un nivel estático de 252 m y suministra agua a seis comunidades cercanas, entre ellas El Rodeo (una vez por semana a cada comunidad), lo que ha traído problemas a los habitantes del El Rodeo, ya que no es suficiente la cantidad de agua que les suministran para uso doméstico, siendo imposible utilizarla para la agricultura y ganadería. Esta comunidad cuenta con una pequeña laguna artificial y cinco norias, de las cuales solo tres contienen agua. Estas norias se ubican cerca de un antiguo cauce de un arroyo intermitente que actualmente se encuentra seco durante todo el año.

En época de lluvia, los niveles estáticos (NE) fueron medidos y sus resultados fueron los siguientes: La laguna, como cuerpo superficial, se encuentra a nivel de suelo con altitud de 1985 m.s.n.m., la noria 1 (N1) a 1984 m.s.n.m. con nivel estático de 4.4 m; la noria 2 (N2) a 1981 m.s.n.m. con nivel estático de 1 m; la noria 3 (N3) a 1980 m.s.n.m. con nivel estático de 0.9 m; la noria 4 (N4) y la noria 5 (N5, localizada cerca del pozo del pueblo) fueron perforadas hasta una profundidad de 11.5 m y 45 m, respectivamente, siendo que ambas no tienen agua. Estas tres norias (N1, N2 y N3) con sus tirantes de agua en promedio entre 2.5 y 3.5 m según la estación del año, son insuficientes para satisfacer las necesidades agropecuarias de la comunidad. Es por ello, que se decidió realizar las investigaciones que se describen en el documento, con el propósito de proponer sitios prospectivos para la perforación y/o ampliación de norias existente y, proponer la perforación de un pozo en profundo en esta comunidad, aumento así la disponibilidad de agua subterránea para la localidad del El Rodeo y otras localidades aledañas.

## **Hipótesis**

Por medio de estudios geofísicos (magnetométricos y geoelectricos) y de laboratorio, es posible obtener un modelo hidrogeológico en el área de estudio con fines de ubicar de manera óptima las zonas de perforación viables para la extracción de agua subterránea somera.

## **Justificación**

Debido a la escases y falta de agua en las comunidades aledañas al poblado El Rodeo, siendo su actividad económica principal la agricultura, se decidió realizar estudios de magnetometría y geoelectricos en la zona de interés con el fin de proponer las zonas más óptimas y prospectivas para la perforación de norias y extracción de agua para uso agrícola.

## **Objetivo general**

Obtener el modelo hidrogeológico del área de interés con fines de definir las zonas más óptimas y prospectivas de la perforación para extracción de agua subterránea.

## **Objetivos específicos**

1. Definir las características geológicas generales y particulares del sitio de estudio que puedan regir el comportamiento de flujo de agua subterránea en el área de interés, mediante el procesamiento de datos magnéticos aéreos y terrestres.
2. Análisis de muestras de agua subterránea y formaciones no-consolidadas en laboratorio. Definición de escala geoelectrica-litológica.
3. Caracterización de acuíferos someros mediante la campaña de TRE para profundidades de estudios de 70 m. Selección de zonas prospectivas y profundidades óptimas de perforación de norias.
4. Obtener un modelo geoelectrico del subsuelo en el área de interés hasta una profundidad de estudio de 200 m, mediante la aplicación del método de Sondeo Eléctrico Vertical (SEV). Definición de zonas prospectiva para la perforación de un pozo.

## Antecedentes

El municipio de Mexquitic de Carmona se encuentra localizado en la zona centro del estado de San Luis Potosí, corresponde a las coordenadas de latitud norte  $22^{\circ} 16'$ ; y longitud oeste  $101^{\circ} 07'$ , con una altura aproximada de 2020 metros sobre el nivel del mar (Gobierno del Estado, 2009).

El municipio de Mexquitic de Carmona tiene como límite al norte el municipio de Ahualulco, al este el municipio de San Luis Potosí, al sur los municipios de San Luis Potosí y Villa de Arriaga y, por último, al oeste los municipios de Villa de Arriaga y Ahualulco, así como también el estado de Zacatecas (ver Fig. 1) (INEGI, 2009). La cabecera municipal de Mexquitic de Carmona se encuentra aproximadamente a 21 Km de la capital potosina, localizada en la carretera 049 San Luis Potosí – Zacatecas (H. Ayuntamiento de Mexquitic de Carmona, 1999).



Fig. 1. Localización del municipio de Mexquitic de Carmona, San Luis Potosí (SGM, 2006).

De acuerdo con el Sistema Integral de Información Geográfica y Estadística de INEGI la extensión del municipio es alrededor de 882.36 Km<sup>2</sup> de superficie total, representando el 1.46 % del territorio estatal de San Luis Potosí (Jiménez Ramírez, 2009).

Mexquitic de Carmona es un municipio agrario con aprovechamiento de canteras y cultivos, siendo la principal actividad económica es la agricultura, la cual cuenta con una gran superficie de riego de cultivos principalmente maíz, frijol, nopal y maguey; algunas hortalizas se cultivan en huertas (coliflor, calabacitas, cebolla, repollo, jitomate, chile poblano, pepito, flor de calabaza, brócoli, entre otros). Estos productos son comercializados localmente y dentro del estado. También se cosechan y se comercializan algunas plantas medicinales y de condimentos como es el caso del tomillo, manzanilla, perejil y hierba buena (H. Ayuntamiento de Mexquitic de Carmona, 1999).

Dicho municipio se caracteriza por presencia de rocas volcánicas perteneciente de edad terciaria a los que se asocian yacimientos minerales metálicos (estaño) y minerales no metálicos (zeolita, caolín, fosforita, pumicita y calcita), así como agregados pétreos aprovechados en la industria de la construcción (SGM, 2006).

Dentro de este municipio se encuentra la comunidad El Rodeo, la cual es la zona de estudio de interés. Su principal actividad económica es la agricultura, cuenta con una gran superficie de suelo de uso agrícola de cultivos variados como: maíz, frijol, nopal, maguey y algunas hortalizas, mayormente en invernaderos y algunas en parcelas tipo cultivo de temporal, mayormente administradas por el GRUPO DE MUJERES EMPRENDEDORAS DE MEXQUITIC. La principal problemática que tiene la comunidad El Rodeo, es la escasa disponibilidad de agua para uso doméstico y agrícola. Existe un solo pozo dentro de la inmediación de El Rodeo el cual tiene un título de concesión que corresponde al número 07SLP105915/37HSGE99 otorgado por la Presidencia Municipal de Mexquitic de Carmona, S.L.P. (CONAGUA, 1999).

La concesión, otorgada en el año 1999; menciona que el pozo beneficia a tres comunidades como son:

Comunidad El Rodeo con un volumen de 9,234 m<sup>3</sup> anuales.

Comunidad La Campana con un volumen de 26,788 m<sup>3</sup> anuales.

Comunidad Los Reyes con un volumen de 22,475 m<sup>3</sup> anuales.

Sin embargo, este pozo suministra de manera limitada agua a seis comunidades. De acuerdo a la información aportada por los habitantes de estas comunidades y con el operador del pozo, de las seis comunidades conectadas al pozo, tres son las más beneficiadas con el suministro, y estas son: Los López, Hernández y Reyes. El Pozo tiene una profundidad de perforación de 320 m, con un diámetro de perforación constituye a 45.72 cm, el diámetro de ademe es de 30.48 cm y un nivel estático de 226 m cuando fue otorgada la concesión (ver Fig. 2 y Tabla 1 de características del diseño del pozo). Después de veinte años de estar operando el pozo su nivel estático corresponde a 252 m.

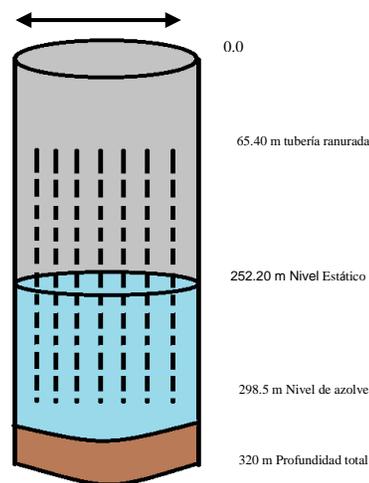


Fig. 2. Diseño del pozo de la comunidad El Rodeo, Mexquitic de Carmona, S.L.P. (SGM,

Tabla 1. Características del diseño del pozo El Rodeo.

| Características de concesión                        | Características del pozo             |
|---|--------------------------------------|
| Volumen de consumo (m <sup>3</sup> /año): 58,497    | Profundidad del pozo: 320 m          |
| Volumen de extracción (m <sup>3</sup> /año): 58,497 | Diámetro de la perforación: 45.72 cm |
| Gasto requerido (l/seg): 0.290                      | Diámetro de ademe: 30.48 cm          |
| Gasto máximo (l/seg): 0.290                         | Nivel estático: 226 m                |

De acuerdo al operador del pozo sólo se suministra agua una vez a la semana a cada comunidad. El pozo se encuentra en constante extracción de agua de lunes a sábado de 5 am a 1 pm (8 h diarias) y recupera en el transcurso de la tarde. Los días domingo no opera. Esto ha generado problemática entre las comunidades ya que el agua que utilizan no es suficiente ni para satisfacer sus necesidades domésticas, creando no solo un problema económico, también ocasionando un problema de índole social.

Existe una laguna artificial dentro de la comunidad El Rodeo, la cual fue excavada sobre el cauce de un antiguo arroyo intermitente el cual se encuentra permanente seco por varias décadas. Los habitantes comentan que esta laguna fue construida por ellos mismos hace aproximadamente veinticinco años, y que el agua que se concentra en octubre, la cual utilizan para riegos de los cultivos, además de ser utilizada por el ganado vacuno y ovino existente en la zona.

Se localizan cinco norias dentro del área de estudio, de las cuales sólo tres de ellas tienen agua a un nivel estático entre 1 y 4.4 m y tirantes de agua variable entre 2.5 y 3.5 m a lo largo del año. El agua de esas norias es ocupada sólo para uso agropecuario.

# Capítulo 1. Marco geológico

## 1.1 Área de estudio

La zona de estudio se encuentra en la localidad El Rodeo perteneciente al municipio de Mexquitic de Carmona, San Luis Potosí. Mexquitic de Carmona colinda al norte con el municipio de Aqualulco (Rodríguez-Ríos et al., 2013), al oriente con San Luis Potosí, al sur con Villa de Arriaga, y al poniente con el estado de Zacatecas.

El Rodeo es ubicado en dirección hacia el sur a 4.5 Km del municipio de Mexquitic de Carmona, hacia el noroeste a 6.8 Km se encuentra la localidad de San Marcos (Rodríguez-Ríos et al., 2013). El Rodeo se localiza entre las coordenadas de latitud Norte ( $22^{\circ} 14' 8.9''$ ) y longitud Este ( $101^{\circ} 3' 37.90''$ ). (ver Fig. 3).

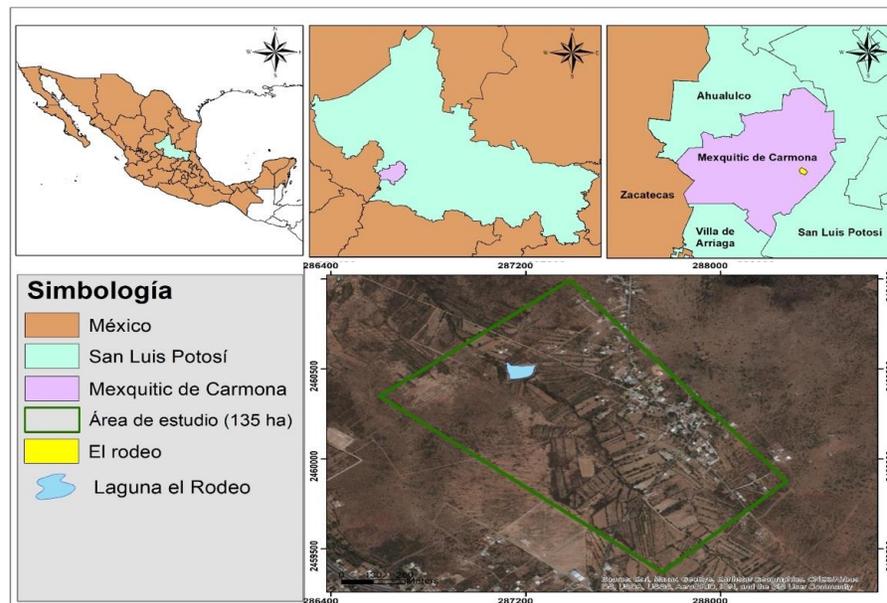


Fig. 3. Mapa del municipio de Mexquitic de Carmona S.L.P. que ubica el área de estudio delimitada en el poblado El Rodeo.

La Fig. 3 muestra el área de estudio delimitada que abarca una superficie de 134 ha, tiene una altitud entre 1990 m y 1950 m.s.n.m.

## 1.2 Acceso a la zona de estudio

Desde la ciudad de San Luis Potosí se accede al municipio de Mexquitic por la carretera Federal No. 49 hasta llegar al kilómetro 22 (esta carretera también enlaza al

estado de Zacatecas). Cuenta con diferentes carreteras, caminos de terracerías y veredas que comunican los diferentes ejidos y comunidades dentro del municipio (ver Fig. 4) (INEGI, 2009).

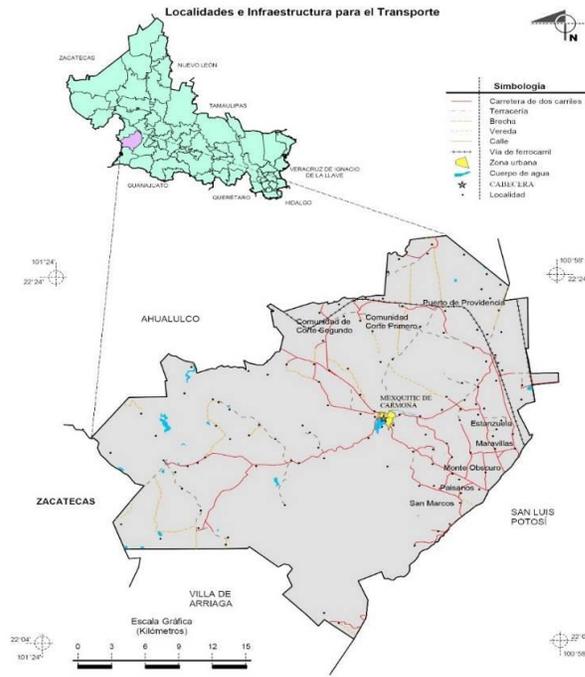


Fig. 4. Vías de acceso al municipio de Mexquitic de Carmona, San Luis Potosí (INEGI, 2009).

### 1.3 Fisiografía

Una de las características que tiene el municipio de Mexquitic de Carmona es que se localizan tres subprovincias fisiográficas como son: Llanuras y Sierras Potosino-Zacatecanas, Sierras y Llanuras del Norte de Guanajuato y Subprovincia de Llanuras de Ojuelos-Aguascalientes (ver Fig. 5) (INEGI, 2009).

*Subprovincia de Sierras y Llanuras Potosino-Zacatecanas.* Se encuentra en el centro-norte de Mexquitic de Carmona. Sus tierras tienden a ser extensas y áridas, con lomeríos y sierras bajas. En zonas planas predomina la llanura aluvial desértica potosino-zacatecana. La litología es de rocas volcánicas, con afloramientos de rocas sedimentarias.

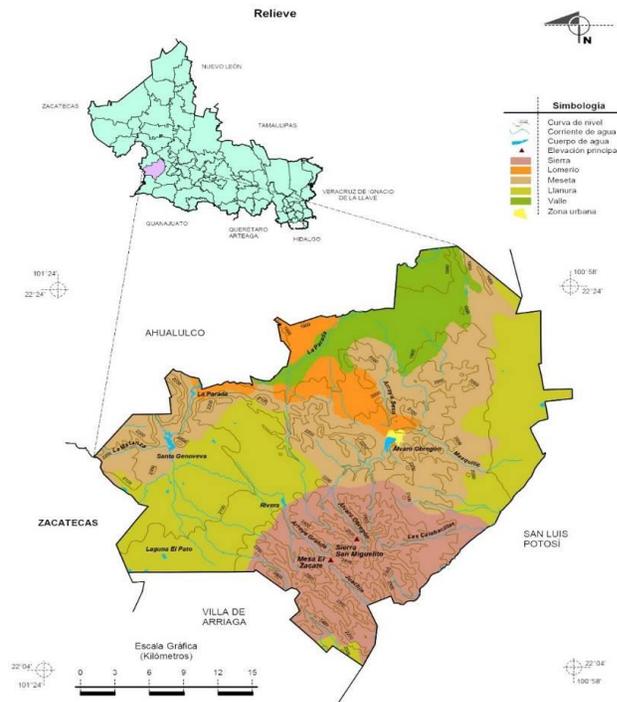


Fig. 5. Fisiografía del municipio de Mexquitic de Carmona, San Luis Potosí (INEGI, 2009).

*Subprovincia Fisiográfica de Sierras y Llanuras del norte de Guanajuato.* La Sierra de San Miguelito se localiza en la zona sur del municipio con montañas que tienden a ser muy elevadas (con una altura máxima de 2630 m) y sus barrancas muy profundas. La sierra de San Miguelito se clasifica como sierra alta con mesetas.

*Subprovincia Llanuras de Ojuelos-Aguascalientes.* Se localiza al occidente del municipio y se caracteriza por sus extensas llanuras con caliche y rocas ígneas ácidas en forma de mesetas (SGM, 2006).

## 1.4 Clima

El clima que se presenta en el municipio de Mexquitic de Carmona es muy variado, presentando una temperatura media anual entre 14° a 18° C. Es un clima desde templado semi-seco (53.9%), seco templado (14.4%) y muy seco templado (31.7%) , con un rango de precipitación entre 200 a 500 mm (INEGI, 2009). El mes más frío presenta una temperatura promedio entre -5.9° y 18°C y el mes más cálido presenta

una temperatura mayor a 28°C. El mes de septiembre se considera como la estación más húmeda del año en este municipio llegando a 87.7 mm, mientras que el mes de noviembre corresponde a una precipitación entre 3 y 5 mm. Junio, agosto y septiembre son los meses en que las plantas tienden a crecer más rápido debido al incremento de la humedad del suelo (INEGI, 2009) (ver Fig. 6).

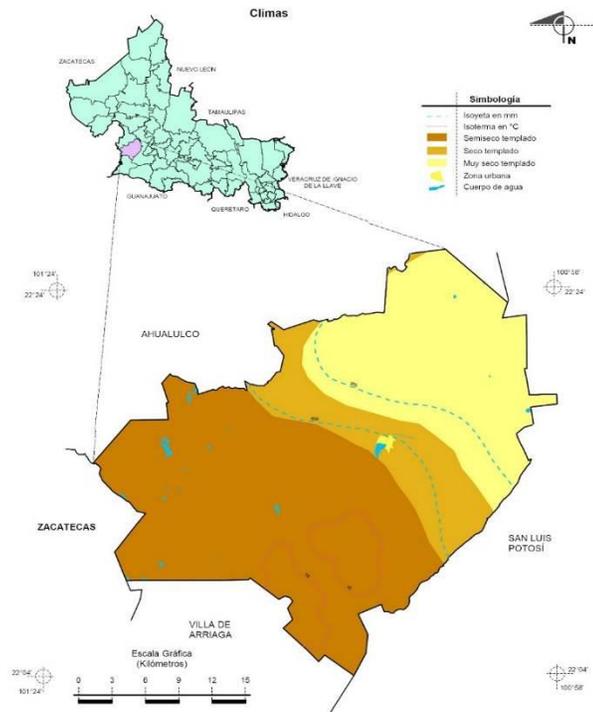


Fig. 6. Clima predominante en el municipio de Mexquitic de Carmona, San Luis Potosí (INEGI, 2009).

## 1.5 Geología

Las rocas que más predominan en el municipio de Mexquitic de Carmona son rocas ígneas extrusivas y sedimentarias. Cabe mencionar, que la presencia de rocas ígneas predomina frente a las sedimentarias ya que existe poco afloramiento de estas últimas de origen marino. Las rocas ígneas son exclusivamente volcánicas, las cuales pertenecen a las edades de Terciario Oligoceno-Mioceno como son: la riolita-toba ácida con un porcentaje de existencia del 57.8% y riolita con un porcentaje de existencia del 4.6%. Las rocas sedimentarias que se presentan son conglomerados con un porcentaje del 5.5% (su edad pertenece al Neógeno), lutitas y areniscas con el 5.3%. Además, se observan calizas de edad Cretácico Superior, gravas y boleos no consolidados pertenecientes a la edad del Cuaternario. En zonas muy extensas hay

existencia de depósitos de aluvión con diferente granulometría (ver Fig. 7) (INEGI, 2009; SGM, 2006).

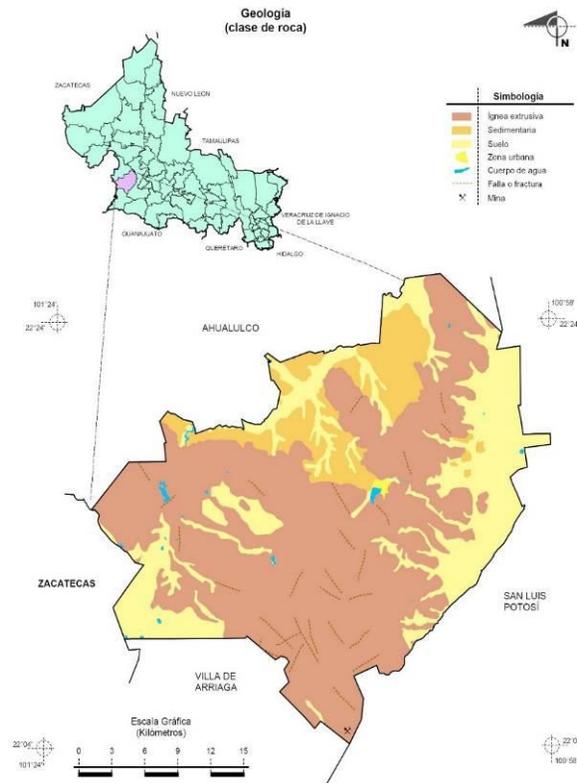


Fig. 7. Suelos dominantes en el municipio de Mexquitic de Carmona, San Luis Potosí (INEGI, 2009).

## 1.6 Edafología

Los suelos predominantes en esta región son de Fluvisol de composición dúrica, con presencia de tepetates o duripan que son observados a profundidades menores a los 50 cm. Esta clasificación se presenta en la zona urbana actual del municipio. Los tipos de suelo que se presentan rodeando a la zona urbana son suelos clasificados en unidades de litosol de composición de fase lítica con lecho rocosos, los cuales se encuentran a una profundidad entre 25 y 50 m (ver Fig. 8) (H. Ayuntamiento de Mexquitic de Carmona, 1999; INEGI, 2009).

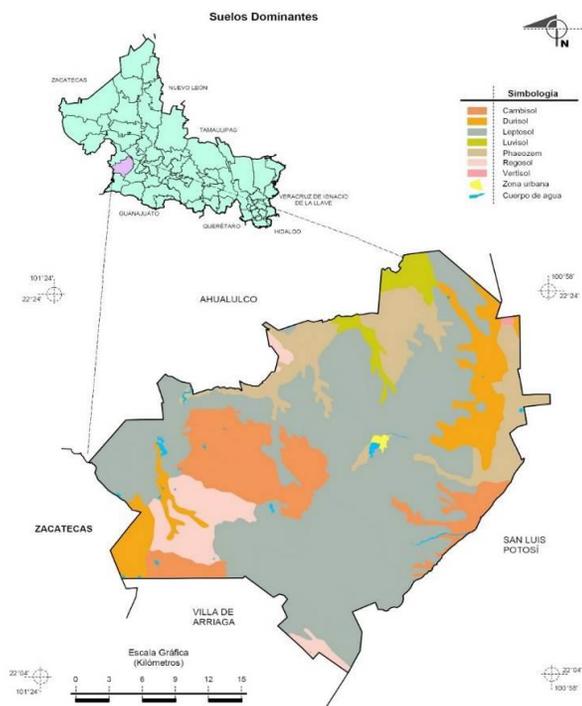


Fig. 8. Suelos dominantes en el municipio de Mexquitic de Carmona, San Luis Potosí (INEGI, 2009).

## 1.7 Hidrografía

En el municipio de Mexquitic de Carmona se encuentra en la región hidrológica “El Salado”, la cual se considera como una de los vértices más importantes del país y ocupa parte de la altiplanicie septentrional. Este municipio cuentan con dos cuencas: Cuenca San Pablo y Cuenca Presa San José-Los Pilares (INEGI, 2009).

### *Cuenca San Pablo y otras*

Se ubica al norte del municipio de Mexquitic de Carmona limitando con las cuencas: Camacho Gruñidora (al norte), Matehuala (al norponiente), San José los Pilares (al suroriente) y Fresnillo-Yesca (al poniente). La temperatura media anual en esta zona es de 16°C con una precipitación de 400 mm. Esta cuenca se ubican corrientes intermitentes debido a que la región se encuentra limitada por diferentes sierras, en las corrientes intermitentes tenemos a los arroyos: La Parada, Álvaro Obregón, Arroyo Seco, Las Calabacillas, Juachín, La Matanza, Arroyo Grande y Mexquitic. Tiene un rango de escurrimiento entre 10 a 20 mm.

### *Cuenca Presa San José-Los Pilares*

Se ubica en la porción nororiental del municipio limitando con las cuencas: Sierra Madre (al oriente), Matehuala (al norte), hidrológica Pánuco (al sur y suroriente) y San Pablo (al poniente-surponiente). La temperatura media anual en esta zona es entre 16° a 22 °C con una precipitación de 500 mm al norte de la cuenca y 200 mm al sur. Tiene un rango de escurrimiento de 10 mm al norte de la cuenta (SGM, 2006).

## 1.8 Uso y vegetación del suelo

El área se encuentra cubierta por vegetación típica de esta zona, como tipo matorrales (matorral espinoso, nopalera, izotal, cardonal) con el 23%, pastizal con el 26.2% y bosques con el 13.7%.

En el municipio de Mexquitic de Carmona el uso del suelo para la agricultura asciende a un porcentaje del 32.3%, mientras que la zona urbana ocupa un 0.2% (ver Fig. 9) (INEGI, 2009).

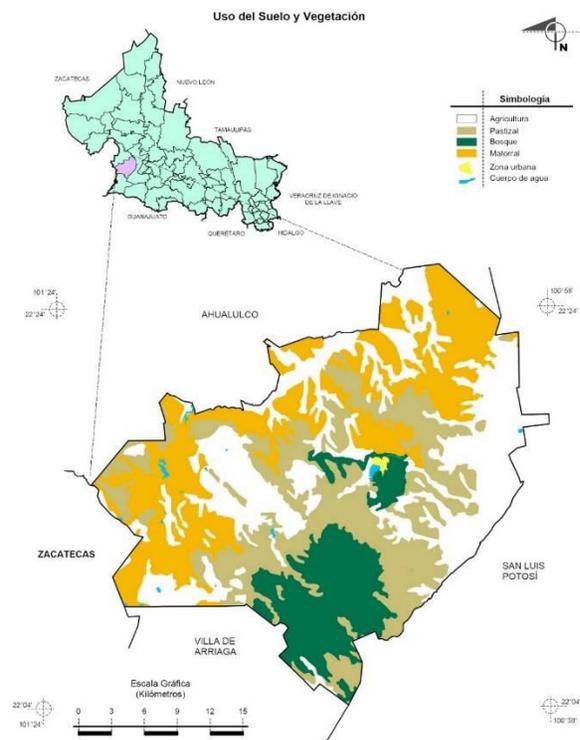


Fig. 9. Uso del suelo y vegetación en el municipio de Mexquitic de Carmona, San Luis Potosí (INEGI, 2009).

## 1.9 Geología regional

El municipio de Mexquitic de Carmona se encuentra dentro de la Cuenca Mesozoica del Centro de México, de acuerdo a las cubiertas Mesozoicas y Cenozoicas de México y en base a la disposición de los terrenos tectonoestratigráficos. El Terreno Sierra Madre es el elemento más extenso el cual contiene rocas de edades comprendida del Cretácico Inferior al Reciente; hay presencia de rocas sedimentarias pertenecientes al Cretácico Inferior tales como las areniscas, lutitas y calizas de origen marino, definidas como unidad lito estratigráfica perteneciente a la Formación Caracol del Cretácico Superior (SGM, 2006).

La columna estratigráfica está conformada por rocas que comprenden edades del Cretácico Inferior al Reciente, rocas clásticas continentales de origen Lacustre pertenecientes al Holoceno, rocas volcánicas del Terciario y también depósitos de aluvión del Cuaternario (ver Fig. 10).

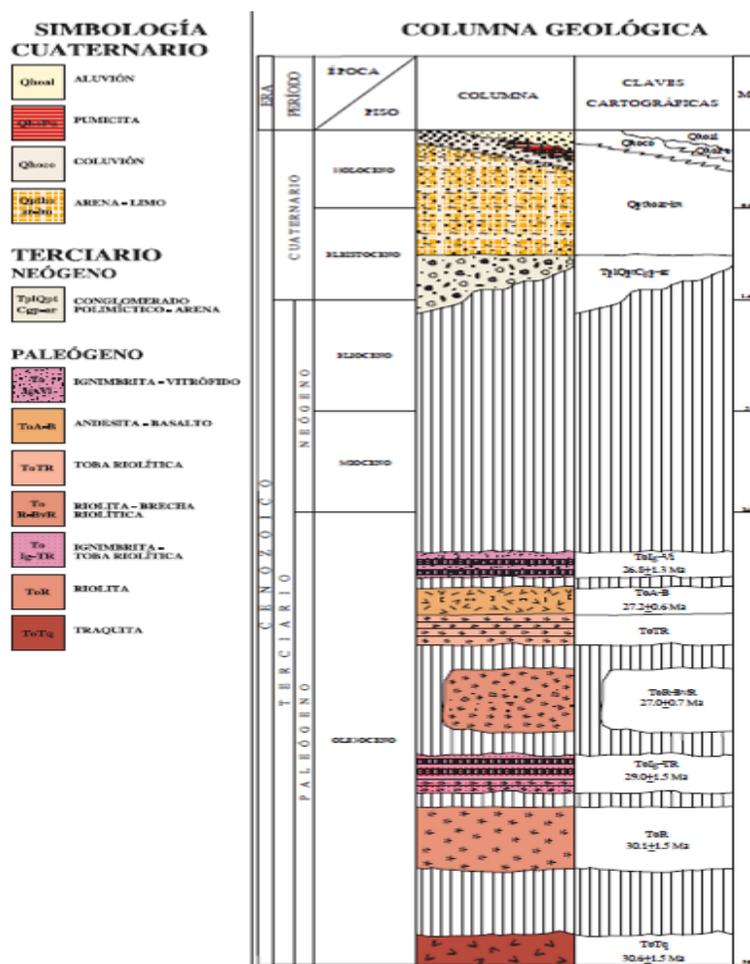


Fig. 10. Columna estratigráfica de la carta geológica mexicana F14-A83 (SGM, 2007).

Las rocas mesozoicas se encuentran cubiertas por rocas del Terciario, como también por derrames de lavas y conglomerados polimícticos. Existe una variación en la composición de las rocas volcánicas, como es el caso de la andesita, latita, riolita, traquita e ignimbrita. En el Cuaternario se compone de conglomerados polimícticos; la columna estratigráfica se encuentra cubierta parcial y equitativamente por formaciones de aluviones.

Los afloramientos geológicos que más se pueden observar son del periodo Terciario, como son rocas ígneas extrusivas ácidas (Riolita y Toba volcánicas), también se observan rocas sedimentarias del cretácico superior (Lutitas arenosas y Areniscas), los minerales que se han encontrado en esta región son estaño, cuarzo, cinabrio, ópalo lechoso, entre otros. Los afloramientos de rocas ígneas son únicamente rocas volcánicas pertenecientes a la edad del Terciario Oligoceno-Mioceno (H. Ayuntamiento de Mexquitic de Carmona, 1999; SGM, 2006).

### **1.10 Geología Local**

La Cuenca Mesozoica del Centro de México es el ambiente geológico en el cual se encuentra la localidad El Rodeo, perteneciente al municipio de Mexquitic de Carmona (área de estudio), en donde su ambiente geológico se encuentra bien definido por unidades paleogeográficas. El afloramiento de rocas volcánicas del Terciario como las traquitas son las que predominan en comparación a los afloramientos de rocas sedimentarias de origen marino como las arenas – limos (ver Fig. 11).

En la zona de estudio, las gravas y boleos no consolidados son pertenecientes al Cuaternario, con zonas extensas de depósitos de aluvión con diferentes granulometrías, las cuales son productos de rocas ígneas extrusivas preexistentes. Mientras que las rocas sedimentarias marinas corresponden a las lutitas, areniscas y calizas pertenecientes a la edad del Cretácico Superior definida por Formación Caracol, las cuales se encuentran dentro de una provincia geológica de rocas volcánicas. La mayor parte de estas rocas son félsicas del Oligoceno y Mioceno. La dirección de éstas va desde el eje volcánico en el sur hasta los Estados Unidos de América en el norte, con dirección al noroeste (SGM, 2006).

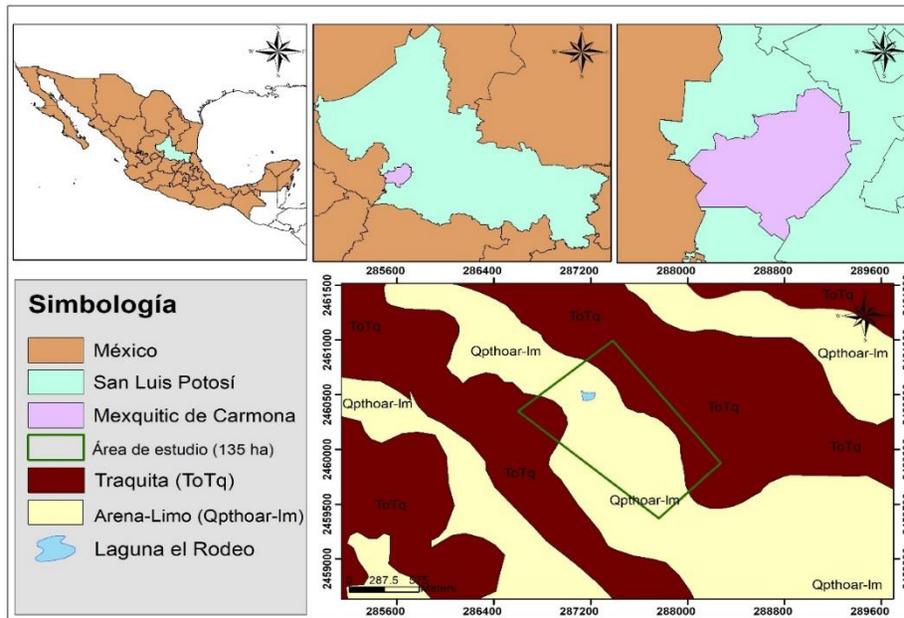


Fig. 11. Mapa de dominio de rocas volcánicas y sedimentarias marinas de El Rodeo, Mexquitic de Carmona, S.L.P.

### 1.10.1 Rocas Sedimentarias Marinas del Cretácico Superior

El Sistema Cretácico es el que tiene una mejor distribución a nivel regional y está representado por rocas sedimentarias marinas, principalmente por las calizas, calizas arcillosas, limonitas calcáreas, lutitas arenosas y areniscas.

Su secuencia estratigráfica va desde el Neocomiano Basal (Formaciones Taraises) hasta el Coniaciano (Formación Caracol). La columna estratigráfica del Cuaternario se compone de cuatro unidades litoestratigráfica bien definidas. De acuerdo a su estructura, las formaciones del Jurásico forman los núcleos de los anticlinales y las rocas cretácicas forman las crestas y laderas de estas estructuras anticlinales erosionadas (SGM, 2006).

A continuación se describen las formaciones pertenecientes al Cretácico que se encuentran en el municipio de Mexquitic de Carmona, S.L.P.

#### *Formación Caracol (Kse Lu-Ar)*

Imlay (1938) fue quien definió originalmente a la formación Caracol ubicada en el lado Oeste del Arrollo Caracol, al oriente de la sierra de San Ángel, en la sierra de Parras, Coahuila. Fue descrita como una sucesión compuesta por toba devitrificada y en

menor proporción la lutita y caliza (Gonzalez Arrollo & Salas Vazquez, 1996). De acuerdo con Barboza-gudiño *et al.* (2004), esta unidad se distribuye en la Cuenca Mesozoica del Centro de México, abarcando el norte de Durango y el sur de Coahuila hasta la parte sur de la Mesa Central, en Zacatecas y la parte occidental de San Luis Potosí. Los afloramientos de esta formación suelen ser aislados, escasos y reducidos, se limitan al noroeste del municipio de Mexquitic, en los alrededores de las localidades Rincón del Porvenir, Guadalupe y Las Barrancas (SGM, 2006).

Ramírez Díaz (2012) menciona que la formación Caracol se distribuye en el sector este y centro oeste de la Cuenca Mesozoica del Centro de México, como también en la porción sur-media del sector transversal de la Sierra Madre Oriental y al sur del estado de Coahuila. Consiste en una alternancia de lutita calcárea de color verde a gris, arenisca de coloración marrón, grano de medio a fino, su estratificación es graduada (SGM, 2006). El espesor de las capas no se observa en el poblado El Rodeo, Mexquitic de Carmona, ya que sólo se puede apreciar su afloramiento en la superficie del área de estudio.

Rodríguez León (2012) menciona que la edad de esta formación está dada por la posición estratigráfica y de acuerdo a lo descrito por Carrillo-Bravo (1982) (quien le asignó la edad a esta formación), el cual corresponde al Coniaciano – Maastrichtiano, mientras que Imlay (1936) la consideró de edad Coniaciano. La formación Caracol se ha correlacionado con las formaciones Cárdenas y Méndez de la Plataforma Valle-San Luis Potosí, y con formación de San Felipe de la Cuenca Tampico-Mizantla.

#### *Conglomerado Polimícticos (TeCgp)*

Se definen a esta formación como un paquete grueso de depósitos de conglomerados. Su formación consiste en clastos redondos de diferentes tamaños que va de 1 a 80 cm, siendo los clastos principales de caliza y rocas volcánicas dacítica, cementados en matriz de caliche y/o arcilla. La distribución de estos clastos se encuentra principalmente hacia al norponiente del municipio de Mexquitic de Carmona, al surponiente del poblado Ojo Zarco (SGM, 2006).

En el poblado El Rodeo afloran estos conglomerados tienen una coloración entre rojillo y marrón, como también de color gris a cenizo y están compuestos por fragmentos subredondeados con diferente composición (ver Fig. 12), los más predominan son las rocas volcánicas cementados en matriz calcáreo-arcillosa. El espesor de estos conglomerados es difícil de estimar ya que sólo se puede observar en afloramiento, principalmente los terrenos extremos Este y Oeste de la comunidad del El Rodeo. Tristan & Torres (1992) mencionan que hacia el oriente de a Charcas estos afloramientos se han encontrado a mayor espesor de aproximadamente de 130 m.



Fig. 12. Afloramiento de conglomerados polimícticos observados en la localidad El Rodeo, Mexquitic de Carmona, S.L.P.

### 1.10.2 Rocas ígneas extrusivas

Las rocas ígneas extrusivas son aquellas que se llegan a formar en la superficie de la tierra cuando el materia fundido se solidifica, también son llamadas como rocas volcánicas, y son predominantes en la costa occidental del continente americano (Tarbuck & Lutgens, 2005). Otra descripción semejante por Orozco-Centeno *et al.* (2014) señalan que se forman a partir del magma que fluye hacia la superficie terrestre a través por zona de debilidad o que fueron expulsados por un volcán.

#### *Toba Riolítica (To R-TR) Terciario Oligoceno*

Este tipo de rocas fueron descritas originalmente por Labarthe-Hernandez *et al.* (1982) como el miembro inferior de la Riolita Panalillo. Se encuentran en la parte norte, centro y noroeste de la carta geológica-minera de Tepetate F14-A83, cerca del Cerro Prieto, y son considerada como una toba depositada por aire bien estratificada y gradada

(SGM, 2007). En la base de esta roca se observa depósito en agua mezclándose con materiales de acarreo, por ello se considera como depósitos volcanoclásticos, este tipo de rocas Riolitas-Tobas Riolíticas (To R-TR) se consideran como unidad de rocas de composición félsica compuesta por derrames, flujos, tobas riolíticas a riolíticas. La Secuencia Volcánica Ácida, es una secuencia de rocas volcánicas representadas por conglomerados de riolitas, tobas riolíticas e ignimbritas (CONAGUA, 2015). La toba se encuentra bien estratificada, granulada con una estratificación cruzada; sus horizontes varían de grano muy finos a arenosos y aún conglomeráticos. Esta unidad se considera originaria de procesos volcánicos explosivos, de un medio ambiente de tectónica extensional.

#### *Latita Portezuelo Terciario Oligoceno*

Originalmente esta roca fue descrita por Labarthe-Hernandez *et al.* (1982), como una Latita porfirítica. Posteriormente, formalizó su nombre como Latita Portezuelo de Labarthe ya que fue localizada en el poblado de Portezuelo. Esta roca es un derrame de lava, que tiene un color café grisáceo con una matriz afanítica, los minerales accesorios presentes en esta unidad son magnetita, circón y apatita (Muñoz González, 2005).

Mientras que Tristan & Torres (1992) la describe como una roca de coloración gris, el cual contiene un 15% de fenocristales de 2-9 mm de plagioclasa, sanidino y cuarzo aislado, es una roca con magnetita diseminada en la matriz, y se encuentra desvitrificada y tiene foliación de flujo. De acuerdo con López Álvarez (2012), la Latita Portezuelo pertenece a la formación Cenicera del Oligoceno Tardío. Esta formación también aflora hacia el oriente del valle de San Luis Potosí y escasamente al poniente y se encuentra a una profundidad de 50 a 550 m. Su afloramiento es al norte y sur del municipio, con textura fluidal, intemperizada en color gris amarillento y café rojizo, con una textura arenosa. Su ambiente de depósito son rocas que forman parte del paquete volcánico de la Sierra de San Miguelito (SGM, 2006). En el poblado el Rodeo se observa una excavación de aproximadamente 14m de profundidad, donde se observa

esta misma formación de coloración gris, textura arenosa y con una estructura fluidal laminar de un espesor de aproximadamente 30 cm. (ver Fig. 13).



Fig. 13. Afloramiento de Toba Riolítica en la localidad El Rodeo, Mexquitic de Carmona, S.L.P.

De acuerdo a Almaguer-Rodríguez (2010) esta formación fue recolecta en el CVSLP (Campo Volcánico de San Luis Potosí), le realizaron análisis químicos los cuales la caracterizan como una riodacita rica en K, mientras que otros análisis químicos realizados en la Carta San Luis Potosí, la caracterizan como una traquita con tendencia a dacita rica en potasio.

#### *Ignimbrita Riolítica*

Esta formación fue descrita por Labarthe-Hernandez *et al.* (1982) y pertenece al miembro superior de la Riolita Panalillo, ubicado en la hoja San Luis Potosí, en la comunidad El Panalillo, al oriente de la capital. En la localidad El Rodeo se puede observar el afloramiento de este tipo de roca que y consta de dos unidades; la primera es una ignimbrita de color café gris claro bien soldada, con fragmentos de pómez alargados y textura porfirítica, la segunda unidad es una ignimbrita bien soldada, color gris rosáceo a café gris un poco rojizo en algunas partes, con textura microcristalina, porfirítica, fluidal, matriz devitrificada, con numerosas esferulitas, rellenas de cuarzo (ver Fig. 14).



Fig. 14. Afloramiento de Ignimbrita Riolítica en la localidad El Rodeo, Mexquitic de Carmona, S.L.P.

DeLaCalleja Moctezuma (2014) describe a esta formación de Ignimbrita Panadillo Superior (Trp) como un depósito de flujo piroclástico de composición riolítica con una coloración rosa claro a café claro, con abundantes fiammes y litofisas de 0.5-2 cm rellenas de calcedonia. Esta formación estratigráfica está conformada por Depósito de caída basal, Vitrófido basal, Ignimbrita reomórfica, Vitrófido superior y Toba no soldada (Horizonte superior).

#### *Andesita Basáltica (ToA-B). Terciario Oligoceno*

Tristán y Labarthe 1982 la describieron informalmente en la cartografía de la carta Tepetate como basalto La Placa, mientras que Rodríguez Ríos en 2004 la describió como Andesita basáltica intercalada como los dos miembros de la Riolita Panalillo (SGM, 2007).

#### *Aluvión (Qhoal)*

Los depósitos de aluvión se originaron por la desintegración de las unidades descritas anteriormente. Estas se pueden encontrar en los lechos y márgenes de arroyos en contacto discordante, conformando depósitos mal consolidados, con fragmentos redondeados a subredondeados de diferente granulometría, Carrizales- Aguilar et al. (2001) menciona que esta formación agrupa los depósitos aluviales y pro aluviales del área. Rodríguez León (2012) la describe como extensas cubiertas de depósitos de clastos, en el cual predomina la grava, arena, limo, arcilla, los cuales se depositaron tanto en las vegas de los arroyos como rellenando depresiones. Se consideran como depósitos lacustres ya que en algún tiempo estas planicies en algún momento fueron lagunas y/o arroyos.

#### *Traquita (ToTq)*

Su matriz es microcristalina a criptocristalina, son fenocristales con feldespato alcalino, opacos y augita egirínica, y vítrea en la obsidiana y la pómez (Pérez Arencibia & DeLaNuez, 1990). De acuerdo a la carta geológica (F-14 A83 Tepetate) este tipo de formación es la que tiene mayor presencia en la zona de estudio, siendo una roca félsica de origen volcánico.

## 1.11 Conceptualización de parámetros

*Acuífero:* Es una formación geológica que puede almacenar en sus poros y transmitir el agua subterránea a través de ella en cantidades significativas, ya sea que el agua brota a la superficie de forma natural, a través de manantiales, lagunas, canales fluviales, entre otros, como que también puede llenar los pozos, norias, etc.

*Disponibilidad Media Anual Subterránea. (DMA):* Es el volumen medio anual de agua subterránea, cuando es positivo, puede ser extraído de un acuífero para diversos usos, adicional a la extracción ya concesionada y a la descarga natural comprometida, sin poner en peligro el equilibrio de los ecosistemas (CONAGUA, 2018).

*Descarga Natural Comprometida (DNC):* Es el volumen que representa una fracción de la descarga natural de un acuífero, se determina sumando los volúmenes de agua concesionados de los manantiales y del caudal base de los ríos que están comprometidos como agua superficial, alimentados por un acuífero.

*Tipos de acuíferos:*

Existe una clasificación de acuíferos de acuerdo a las condiciones de presión que se encuentren el subsuelo o por su comportamiento hidrodinámico (Santiago Carrasco, 2012). (ver Fig. 15).

- a) *Acuífero libre:* Este acuífero tiene como basamento una capa impermeable y por encima una zona no saturada permeable que permite que el agua almacenada se encuentre a la presión atmosférica, entre la superficie del suelo y el nivel freático se encuentra la zona no saturada, la superficie hasta donde llega el agua es conocida como superficie freática.
- b) *Acuíferos colgados:* Este tipo de acuífero se produce cuando existe una recarga fuerte de agua provocando que el nivel freático ascienda, quedando una porción de agua retenida por un nivel inferior impermeable.
- c) *Acuífero confinado:* Es el acuífero que se encuentra cubierto por algún material impermeable o un acuicludo o acuífugo. En estos acuíferos la presión del agua

es mayor que la presión atmosférica, y cuando son perforados por un pozo, el agua se elevará por encima del nivel freático, y en algunos casos por encima del nivel del terreno, a lo que se conoce como pozo fluyente o artesiano.

- d) *Acuífero semiconfinado*: Es un acuífero limitado en su parte superior por formaciones semipermeables (acuitardo), de baja transmisibilidad. El acuífero semiconfinado contiene agua a poco mayor presión que la atmósfera. El agua se mueve muy lentamente a través de los acuitardo.

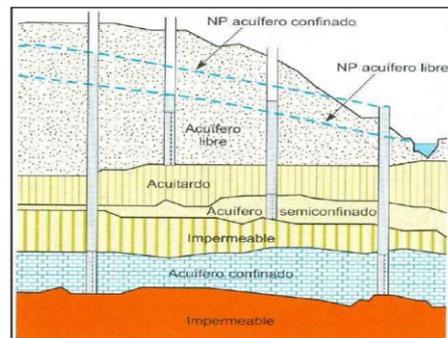


Fig. 15. Tipos de acuíferos y niveles piezométricos.

*Nivel Estático*: Es la distancia que tiene una perforación desde la superficie del terreno hasta el nivel del agua subterránea (CONAGUA, 2000).

*Nivel Piezométrico*: Es el nivel en que se encuentra el agua subterránea con respecto al nivel del mar equilibrado a la presión atmosférica.

*Exploración Hidrogeológica*: También conocido como prospección hidrogeológica se refiere a la localización y/o ubicación de reservorios de agua subterránea con características apropiadas para la explotación y aprovechamiento del recurso natural (Auge, 2008).

*Presas o Pozos subterráneas*: Son aquellas que se construyen cuando existe flujo subterráneo limitado y corrientes efímeras. Se perfora un pozo en el cauce del río hasta encontrar el material permeable, el cual es rellena con material de baja permeabilidad para detener los flujos subterráneo y así el agua es almacenada (Hernández López, 2017).

*Dunas de filtración:* se efectúa la infiltración de aguas que provienen de estanques contruidos sobre dunas. La recuperación se produce en la parte más baja de la duna; esto se realiza con el fin de mejorar la calidad del agua por medio de su filtración por el material de las dunas (ver Fig. 16).

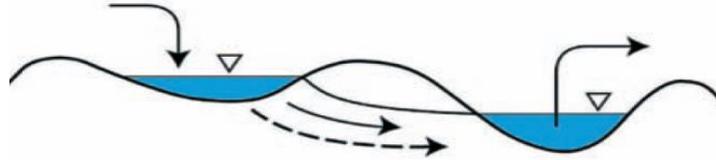


Fig. 16. Dunas de filtración.

## **Capítulo 2. Marco Teórico**

### **2.1 Fundamentos de los métodos potenciales**

Dentro del campo geofísico existen diferentes métodos que nos sirven como herramientas para conocer las propiedades físicas del subsuelo y así como también su forma. Los métodos geofísicos se clasifican de diferentes maneras. Una de las más adecuadas es dividirlos en métodos inducidos (campo artificial) y no inducidos (campo natural). Dentro de los métodos inducidos se consideran los sísmicos y eléctricos y electromagnéticos de fuente artificial, y los no inducidos son considerados, magnéticos y gravimétricos (considerados como métodos potenciales) y los eléctricos y electromagnéticos de fuente natural (Muñoz González, 2005).

### **2.2 Método Magnético**

El método magnético es uno de los métodos geofísicos más antiguos aplicados a la prospección petrolífera, exploraciones mineras y de estudios arqueológicos. Para la prospección petrolífera el método magnético entrega información acerca de las profundidades de las rocas pertenecientes al basamento. A partir de la obtención de estos datos se puede localizar y definir la extensión de cuencas sedimentarias ubicadas encima del basamento (Ramírez Díaz, 2012). La medición magnética se realiza midiendo el campo magnético en la superficie terrestre sobre un perfil con puntos equidistantes, utilizando un equipo llamado magnetómetro.

Para la arqueología y la minera estos estudios magnéticos son de gran utilidad la información que se obtiene, ya que se pueden localizar cuerpos metálicos en general (ej. Municiones, explosivos, tuberías, etc.).

#### **2.2.1 Reseña**

El campo magnético es bien conocido desde la antigüedad, utilizando la brújula como instrumento de navegación. Se estima que en el siglo XII fue cuando se comenzó a utilizar la brújula en el Occidente existe la posibilidad de que en China lo utilizó algunos siglos antes.

En el año 1600 el magnetismo fue considerada por la comunidad científica como una propiedad fundamental de la tierra; esto cuando el Dr. Gilbert realizó la primera investigación sobre el magnetismo terrestre en su obra “De Magnete”, donde propone que la tierra es como un magneto señala que hasta los años 1843 Von Wrede utilizó esa propiedad para el descubrimiento de minerales de hierro. En 1875, Talen escribió un libro titulado “Sobre el uso de mediciones magnéticas en el descubrimiento de los minerales”. A principios de 1900, Symith de Harvard realizó varios descubrimientos sobre magnetismo en minería y en 1904, Haanel escribió sobre la localización y examen de minerales magnéticos por medio de un magnetómetro (Cantos Figueroa, 1973).

### 2.2.2 Campo magnético terrestre

Narváez Medina (2012) señala que el Campo Magnético Terrestre (CMT) medido en la superficie de la tierra, se expresa como un vector el cual corresponde a la superposición de diferentes campos constituyentes, donde cada uno se originó en lugares distintos y varía de diferente forma en el espacio y en el tiempo.

El campo magnético terrestre se divide en campo magnético interno y externo. El campo magnético interno representa el 99% del campo total y teóricamente se puede representar como el campo producido por una serie de dipolos magnéticos con diferentes orientaciones situados en el centro de la tierra (ver Fig. 17). El campo magnético externo sólo representa el 1% y se produce por corrientes inducidas en la ionósfera (España Bernardino, 2017).

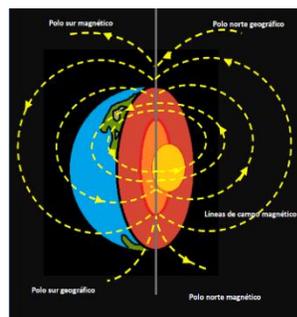


Fig. 17. Ilustración del Campo magnético terrestre.

### 2.2.3 Componentes del campo magnético terrestre

El campo magnético es considerado un campo vectorial y para representar este campo se necesitan de al menos 3 componentes (Arias Cáceres, 2015). Los componentes principales del campo magnético son: componente vertical Z, componente en dirección al norte geográfico X, componente en dirección al este geográfico Y. Se considera que la inclinación y declinación son los elementos que describen la dirección del campo vectorial y se miden en grados (Logachev & Zajarov, 1977). F es considerada como la intensidad del campo magnético; mientras que H es el componente horizontal norte; I es el ángulo de inclinación entre el plano horizontal y el vector del campo total; D es el grado de declinación entre el norte magnético y el norte verdadero y positivo cuando el ángulo está al este del norte verdadero y negativo cuando está al oeste (ver Fig. 18) (Arias Jiménez, 2001), la Ec. 1 expresa la configuración de esta formulación (Lanza & Meloni, 2006).

(Ec. 1)

$$F = \sqrt{(X^2 + Y^2 + Z^2)}; \text{ y } H = \sqrt{(X^2 + Y^2)}.$$

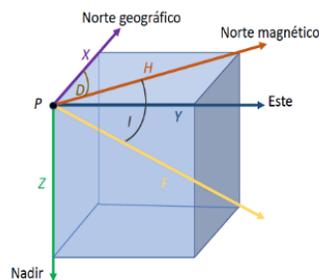


Fig. 18. Componentes del campo geomagnético (Pérez Hernández, 2019).

En magnetometría la intensidad del campo magnético terrestre (CMT) se expresa en: 1 Oersted = 1 Gauss = 100 gamma = 100 nT (T=Tesla), 1 gamma = 10<sup>-9</sup> T = 1nT (España Bernardino, 2017).

### 2.2.4 Propiedades magnéticas de las rocas

La magnetización es una magnitud vectorial se da como el momento magnético por unidad de volumen de materia, la magnetización que se mide en las rocas crea las anomalías magnéticas y se calculan con distintos grados de aproximación. En

investigaciones geológicas es necesario disponer de suficientes datos de campo de la magnetización de las rocas en el área de estudio. La exploración magnética ha demostrado que no todas las anomalías magnéticas de las rocas coinciden con su magnitud y dirección en el campo magnético actual (Logachev & Zajarov, 1977).

Las anomalías magnéticas se originan en la inhomogeneidad de la magnetización de las rocas, la cual está compuesta por magnetización inducida y remanente. Algunos minerales como los ferromagnéticos o ferrimagnéticos presentes en rocas volcánicas tienen mayor magnetismo remanente que inducido debido al comportamiento magnético de esos minerales.

Se conoce como magnetización inducida cuando el material magnético se magnetiza al estar en contacto con el campo magnético, y este campo de magnetización externo se refuerza por el mismo campo magnético que induce el material. La magnetización remanente es aquella que existe en ausencia del campo magnético externo y tiene la capacidad de retener el magnetismo que fue inducido en su momento, el cual retiene cuando desaparece el campo magnético externo. Las rocas en general se consideran débiles en magnetización, sin embargo, estas pueden exhibir la magnetización inducida como también remanente (España Bernardino, 2017).

Existen dos contribuciones magnéticas en una roca, es decir el vector suma dos componentes de acuerdo a la Ec. 2.

$$M = M_i + M_r \quad (\text{Ec. 2})$$

Dónde,  $M_i$  es la magnetización inducida por la presencia de un campo magnético  $H$ ,  $M_r$  es la magnetización remanente.  $M_i = X H$  donde  $X$  representa la susceptibilidad magnética (propiedad magnética de un material) la cual es adimensional y depende de la temperatura de los materiales. La importancia que tienen estas dos componentes magnéticas se expresa mediante el coeficiente de Königsberger es el cociente entre la intensidad de la magnetización remanente y la inducida (ver Fig. 19) (Butler, 1992).

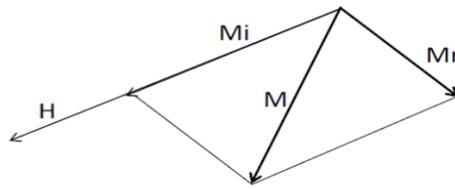


Fig. 19. Magnetización resultante de la suma de las componentes de magnetización inducida,  $M_i$ , y remanente,  $M_r$ . (Butler, 1992).

### 2.2.5 Tipos de magnetismo

Existen diferentes tipos de magnetismo, estos son determinados por las propiedades magnéticas que tiene un material. Todas las sustancias y rocas se consideran generadoras a nivel atómico de campos magnéticos clasificándose en: paramagnético, diamagnéticos y ferrosos.

*Paramagnéticos:* Son minerales como; olivinos, piroxenos, anfíboles, entre otros. Tiene una estructura atómica incompleta y en un campo inductor los átomos estos se alinean en dirección de éste, generando así un campo más fuerte. Los efectos que ocasiona son pequeños y pocos percibidos.

*Diamagnéticos:* Spines de los electrones se alinean, ocasionando una variación en el radio y la velocidad de giro de las cargas de los átomos de esta forma los dipolos magnéticos se oponen al campo magnético externo, provocando que el momento magnético del átomo sea nulo, derivando una susceptibilidad negativa.

En exploración el paramagnetismo y el diamagnetismo en rocas son perceptibles solo como anomalías de baja susceptibilidad magnética (Galván Pineda, 2016), (ver Fig. 20).

*Ferrosos:* Presenta átomos que tienen un arreglo en su último orbital, el cual permite el intercambio de electrones y juntos provocan un campo magnético fuerte, esto depende del arreglo de los átomos. Al lineamiento de los elementos ferrosos se le llama como: ferromagnéticos, antiferromagnéticos y ferrimagnéticos (Caballero, 2011).

Como se muestra en la Fig. 20, los diagramas de la izquierda muestran con flecha de color gris la magnetización (flechas de color negro) que adquiere un material cuando se le aplica un campo magnético inductor. La imagen de la derecha muestra la distribución de los spines magnéticos después de remover el campo presente.

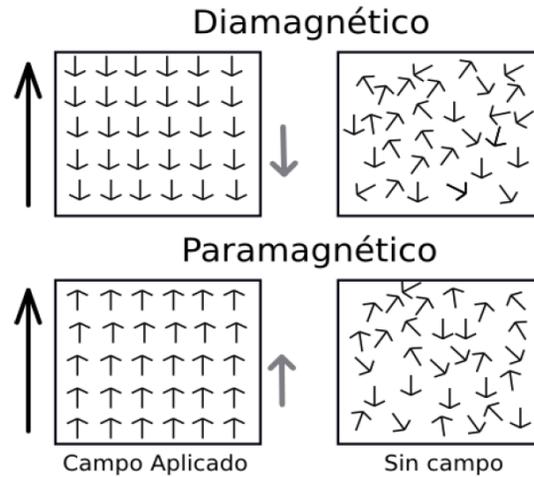


Fig. 20. Distribución de spines magnéticos.

### 2.2.6 Susceptibilidad magnética

Pérez Hernández (2019) describe a la susceptibilidad como la relación de la resistencia del magnetismo inducido a la fuerza del campo que lo causó. Las rocas con alta susceptibilidad magnética son aquellas que tiene minerales ferromagnesianos y ferromagnéticos, como las rocas básicas y ultrabásicas; mientras que las rocas ácidas y metamórficas su susceptibilidad magnética tienen valores intermedios a bajos, mientras que las rocas sedimentarias son consideradas en general de muy bajo valor en susceptibilidad magnética. En la Tabla 2 se observan los diferentes niveles y valores de susceptibilidad magnética de algunas rocas (Telford et al., 1990).

Tabla 2. Susceptibilidad magnética de las rocas (Telford, et al., 1990).

| Tipo de roca         | Susceptibilidad $10 \times 10^{-3}$ (SI) |          |
|----------------------|--|----------|
|                      | Rango                                    | Promedio |
| <b>Sedimentarias</b> |  |          |
| Dolomita             | 0 - 0.9                                  | 0.1      |
| Calcita              | 0 - 3                                    | 0.3      |
| Arenisca             | 0 - 20                                   | 0.4      |
| Lutitas              | 0.01 - 15                                | 0.9      |
| <b>Metamórficas</b>  |  |          |
| Anfiobolita          | -  | 0.7      |
| Gneiss               | 0.1 - 25                                 | -        |
| Cuarcita             | -  | 4        |
| Serpentina           | 3 - 17                                   | -        |
| <b>Ígneas</b>        |  |          |
| Granito              | 0 - 50                                   | 2.5      |
| Riolita              | 0.2 - 35                                 | -        |
| Grabo                | 1 - 90                                   | 70       |
| Basalto              | 0.2 - 175                                | 70       |
| Diorita              | 0.6 - 120                                | 85       |
| Peridotita           | 90 - 200                                 | 150      |
| Andesita             | -  | 160      |

De acuerdo a Narváez Medina (2012) cualquier material expuesto a un campo exterior puede ser:

*Diamagnético:* el valor de susceptibilidad  $X$  es negativo y se caracterizan por ser difícilmente o nada imantables. En sustancias diamagnéticas, la aplicación de un campo magnético externo produce una pequeña magnetización inducida en la dirección opuesta al campo magnético aplicado. La magnetización es proporcional al campo magnético aplicado, y decae hasta cero cuando el campo es removido.

*Paramagnético:* La susceptibilidad de las sustancias  $X$  es positiva e inversamente proporcional a la temperatura absoluta (Ley de Curie-Weiss). Se consideran fáciles de magnetizar y su magnetización desaparece cuando el campo es removido.

*Ferromagnético:* produce un campo magnético, sin necesidad de un campo exterior. El ferromagnetismo desaparece por encima de una temperatura de Curie.

### 2.2.7 Temperatura magnética

El gradiente de temperatura se considera como una variable vectorial, la cual es perpendicular a la superficie de la isoterma y su dirección es en sentido en que aumenta la temperatura. Las dimensiones del gradiente térmico se expresan en  $^{\circ}\text{C}/\text{Km}$ .

La ley de Fourier relaciona la transferencia de calor por conductividad y cuando es unidimensional la dirección de la variación de temperatura es vertical y el gradiente es constante ( $dT/dz$ ), la ecuación 3 de la Ley de Fourier se expresa:

$$q_z = -k \frac{dT}{dz} \quad (\text{Ec. 3})$$

En donde  $q_z$  representa el flujo del calor y  $k$  la conductividad térmica, y la temperatura de Curie queda definida en la ecuación 4 como:

$$\theta_c = \left( \frac{dT}{dz} \right) d \quad (\text{Ec. 4})$$

En este caso  $d$  es el representa la profundidad del punto de Curie que se obtiene del análisis espectral (Medina, 2012).

### 2.2.8 Permeabilidad magnética

Se considera como permeabilidad magnética a la facilidad que tiene un campo de establecerse en una sustancia magnética y se representa en la Ec. 5:

$$\mu = \frac{B}{H} \quad (\text{Ec. 5})$$

Dónde ( $\mu$ ) es la permeabilidad magnética, ( $B$ ) es el flujo magnético y ( $H$ ) es el campo magnético. La permeabilidad expresa la modificación de la fuerza de atracción o repulsión entre dos polos magnéticos en un medio magnético (Medina, 2012).

### 2.2.9 Fuerza magnética

La fuerza magnética terrestre se considera como un campo potencial que da información de los materiales existentes en la tierra por medio de las propiedades físicas de cada material. A través de distintos estudios Longo Mariana (2017) concluyó que el campo magnético de la tierra existe a raíz de la corriente de convección en el núcleo externo de la tierra.

### 2.2.10 Anomalías magnéticas

Se considera como anomalía magnética a la desviación de la intensidad del campo magnético de sus registros normales, causado por la composición variada que tienen las rocas. Estas anomalías magnéticas son detectadas por estudios magnéticos, por medio de las propiedades físicas de las rocas como son: susceptibilidad magnética o la imantación remanente de las rocas, que sólo existen a temperaturas por debajo de la temperatura de Curie (Medina, 2012). Estos estudios magnéticos proporcionan información referente a la estructura profunda del área de estudio, pero aún no se ha establecido hasta que profundidad se extiende las rocas que crean estas anomalías magnéticas que se observan desde la superficie terrestre (Logachev & Zajarov, 1977).

En la Fig. 21 se observa el registro de un levantamiento aeromagnético en un punto dado, en el que la magnitud escalar del campo magnético  $F$  no contiene información sobre la dirección del campo. De acuerdo a lo descrito. Sin embargo, es considerado en ese punto como la suma vectorial del IGRF y un componente anómalo  $\Delta F$ . Dado que en ese punto el componente IGRF se orienta en dirección del campo principal de la tierra, el campo magnético debido a una fuente local  $\Delta F$  puede tener cualquier dirección (Reeves, 2005).

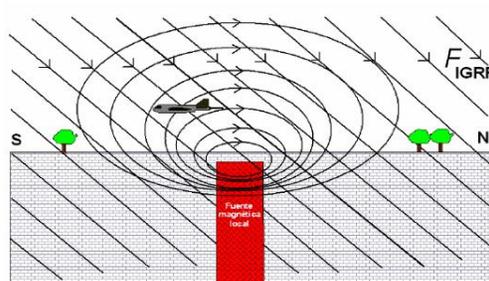


Fig. 21. Se observa el levantamiento aeromagnético el sensor registra la suma del vector del campo magnético ambiente y la contribución anómala de fuentes locales (Reeves, 2005).

### 2.2.11 Campo Geomagnético Internacional de Referencia (IGRF)

De acuerdo a Arias Cáceres (2015) y INEGI (2002) el IGRF siglas en inglés que significa (International Geomagnetic Reference Field) es un modelo matemático que se utiliza para describir los cambios del campo magnético terrestre, así como su

variación secular (que es el cambio anual), es una referencia geomática; que, al restársele, se observan las anomalías magnéticas en un punto medio.

El IGRF se usa como base de calibración para datos magnéticos, generado por National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), la cual se ubica en los Estados Unidos, el departamento de Geodesia es el que se encarga de monitorear y actualizar los datos del campo magnético que se generan en el núcleo de la tierra (España Bernardino, 2017).

Este filtro del IGFR se calcula y actualiza cada cinco años; la aplicación del filtro consiste en realizar una resta de los valores de intensidad del CMT (López-Loera, 2014), al cual se le va a resta la contribución del dipolo principal existente en el núcleo de la tierra que es el IGFR; obteniendo como resultado los valores del Campo Magnético Residual (CMR) (ver Ec. 6)

$$\text{CMR} = \text{CMT} - \text{IGRF} \quad (\text{Ec. 6})$$

### **2.2.12 Reducción a polo magnético**

Es un filtro que nos ayuda a obtener datos magnéticos más precisos del campo magnético, reduciendo el desplazamiento que existe entre el norte geográfico y el norte magnético (Baranov & Naudy, 1964). Este método es considerado como unos de los algoritmos más utilizado para el procesamiento de datos magnéticos ya que se basa en la relación de Poisson.

El dominio de la frecuencia se implementó cuando se interpretaron las anomalías magnéticas en la Transformada Rápida de Fourier (FFT). Un ejemplo clave es el que da Pérez Orrego (2017) en el que menciona que este filtro consiste en la transformación de las anomalías magnéticas dipolares a anomalías monopulares, transformando la zona de estudio a como si éste hubiera sido en el polo (Norte o Sur), es así que las anomalías del campo total son monopulares y centradas directamente sobre un cuerpo.

La reducción al polo se considera como un filtro que lleva a las anomalías a una inclinación de 90° y declinación de 0°, ubicando a la anomalía sobre el cuerpo causante; tiene un componente de amplitud y un componente de fase. Baranov & Naudy (1964) dice que este filtro procesa los datos magnéticos de acuerdo a la Ec. 7:

$$L(\theta) = \frac{-\cos^2(D - \theta)}{(\sin(I_a + i \cos I \cos(D - \theta)))^2} \quad (\text{Ec.7})$$

Dónde,  $I$  es la inclinación magnética, representa la inclinación por corrección de amplitud,  $D$  es la declinación magnética y  $\theta$  es la latitud.

La Fig. 22 muestra una forma de representar la relación que existe entre el campo magnético y el filtro de reducción a polo. En donde (A) relaciona la latitud magnética, observa en campo, (B) representa reducción al polo magnético y (C) el campo de gravedad del objeto que produce la anomalía (ver Fig. 22) (Baranov & Naudy, 1964).

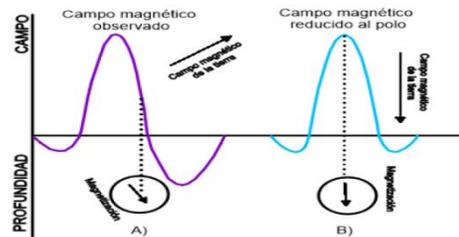


Fig. 22. Relación que existe entre el campo magnético medido (A), reducido al polo (B).

### 2.2.13 Señal Analítica

La señal analítica permite resaltar las anomalías magnéticas que se producen por la discontinuidad geológicas que va de mediana a corta longitud de onda. (Longo, 2017; Pérez Orrego, 2017) señalan que el cálculo de Señal analítica por métodos potenciales como una herramienta para estimar la ubicación y profundidad de un contacto magnético bidimensional. Una de las ventajas que tiene la señal analítica es que es independiente a la dirección de la magnetización y de la dirección del campo magnético. Esta característica es más importante en presencia de remanencia fuerte o en latitud magnética baja, en otras palabras, el cálculo es más útil en zonas con baja latitud magnética el cual la reducción a polo es deficiente. La señal analítica se

compone de los gradientes horizontales y verticales de una anomalía magnética, también conocida como la suma de sus derivadas, señalando la forma que tienen los cuerpos y su localización, más no su dirección de magnetización (Blakely, 1995). En la ecuación 8 de señal analítica A (x, y) se definen como la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de las derivadas (x, y, z) de la anomalía T del campo total (ver Ec. 8) (Nabighian, 1974).

$$A(x,y) = \sqrt{\frac{\partial T^2}{\partial x} + \frac{\partial T^2}{\partial y} + \frac{\partial T^2}{\partial z}} \quad (\text{Ec.8})$$

### 2.2.14 Primera y segunda derivada vertical

La primera derivada (1aDz), es la medición física del campo magnético entre dos puntos de la misma vertical y se encuentra a diferentes alturas (España Bernardino, 2017), este gradiente se divide entre la diferencia de altura de estos. Esta primera derivada vertical al aplicarse a datos magnéticos del campo total descarta rasgos geológicos derivados de fuentes pocas profundas que causan anomalías de alta frecuencia espacial o baja longitud de onda (Pérez Orrego, 2017).

La primera derivada en datos magnéticos es un algoritmo matemático que hace una derivación de manera vertical (1aDz), realiza la información relacionada a altas frecuencias que se encuentra enmascarada por frecuencias bajas que están asociadas a fuentes profundas (Henderson & Zierz, 1949). Software Oasis Montaje 8.4 el filtro que aplica es la derivación general la cual permite la dirección de la derivada en cualquier grado, de acuerdo a la Ec. 9:

Dónde;  $\varphi$  es la inclinación,  $\theta$  es la declinación de la dirección.

$$\text{Gradiente} = \frac{\left(\frac{\partial f}{\partial x} \sin \theta + \frac{\partial f}{\partial y} \cos \theta\right) \cos \varphi + \frac{\partial f}{\partial z} \sin \varphi}{\sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial z}\right)^2}} \quad (\text{Ec.9})$$

Si  $\varphi = 0$ , entonces el gradiente se reduciría al componente horizontal del campo y tiene su sensibilidad de dirección máxima a lo largo de  $\theta$ .

Si  $\varphi = 90^\circ$ , el gradiente se reduce al componente Z del campo sin tener polarización direccional (Geosoft, 2015b)

La segunda derivada ( $2aDz$ ), se utiliza para mejorar las anomalías locales y delinear los bordes de los cuerpos anómalos en los datos. Su interpretación es de gran alcance ayuda en la delimitación de fuentes causales y localizar con más precisión los cambios en los gradientes del campo magnético, esto da como resultado una mayor definición en las discontinuidades y la relación con la geología. Tiene mayor poder de resolución que la primera derivada vertical, para ello se necesita datos de alta calidad ya que su alta frecuencias también resulta mayor ruido (Medina, 2012; Pérez Orrego, 2017).

### 2.2.15 Variaciones de campo magnético

Las variaciones del campo magnético de la tierra se determinan por los resultados de los registros continuos de sus componentes obtenidos en los observatorios magnéticos con repeticiones cada 3 a 5 años. Existen muchos observatorios magnéticos en el mundo, estos reportan gran cantidad medidas repetidas en los puntos de apoyo dan material para la composición de mapas especiales a los cuales se les conoce como mapas isóporas, el cual caracteriza la magnitud de la variación secular de cada componente magnético de la tierra. En la figura 24 se muestra diferentes regiones con variaciones muy rápidas de la intensidad del campo. De acuerdo a (Logachev & Zajarov, 1977) realizó un estudio en el cual la variación secular demuestra que la posición de los focos no permanece constante, los mismos se desplazan gradualmente en dirección oeste con variaciones en los valores máximos y configuración de las isólinas (ver Fig. 23).

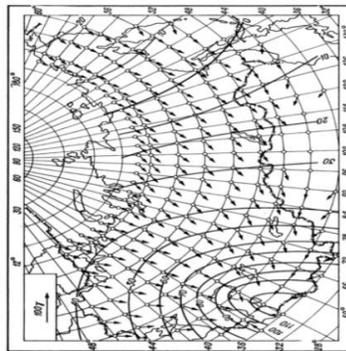


Fig. 23. Mapa de isóporas Z (en gammas) para el año 1942 (Logachev & Zajarov, 1977).

Las variaciones que sufre el campo magnético a través del tiempo son de diferentes órdenes en ángulo e intensidad. La variación más antigua y la más estudiada en el campo magnético es la Variación Secular, es considerada como una variación global por el cambio del tamaño y posición del dipolo magnético (Reeves, 2005). Sus cambios de magnitudes de grados son predecibles y cambian cada cinco o diez años. El IGRF es un modelo matemático el cual puede predecir estas variaciones del campo magnético que son actualizadas cada 5 años.

La variación Diurna es una fuente externa que cambia la intensidad del campo magnético, esta no se puede predecir empíricamente, la magnitud de sus variaciones son grandes en la exploración, provocando que sus micro-pulsaciones sean monitoreadas en periodos de minutos o días (Ocampo-Díaz et al., 2016), (ver Fig. 24).

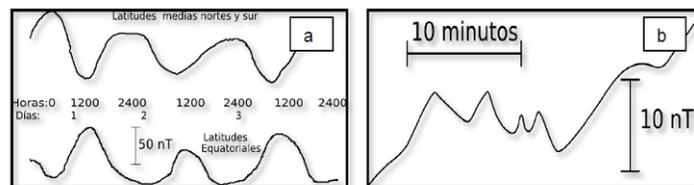


Fig. 24. (a) muestra las variaciones del campo magnético con respecto a latitud y variación en tiempo. La figura (b) se observa la señal de micro-pulsaciones modificada de Breiner (1999).

De acuerdo a lo anterior, las micro-pulsaciones ocurren en una escala de tiempo corta, como pueden ser en minutos o días, haciendo que sus amplitudes sean de pocos nT, estas micro-pulsaciones pueden cambiando de un lugar a otro hasta en unas pocas decenas de kilómetros (ver Fig. 25).

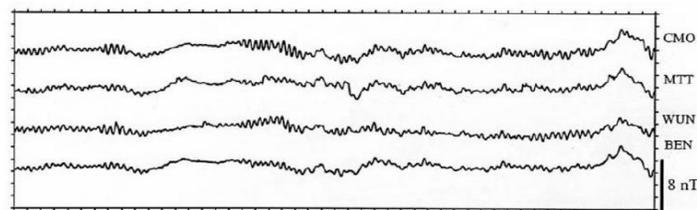


Fig. 25. Se muestran las variaciones del campo magnético registrada a decenas de kilómetros observándose las micro-pulsaciones, la variación de un lugar a otro (Reeves, 2005).

## **2.3 Métodos geoelectrico**

### **2.3.1 Reseña**

Los métodos geoelectricos se consideran como la rama de la geofísica que trata el comportamiento de las rocas y los sedimentos en relación a la corriente eléctrica. (Aguillón-Robles et al., 2012).

La exploración eléctrica es considerada como uno de los métodos geofísicos principales para el estudio de estructuras geológicas de la superficie terrestre. Las rocas presentan diferentes propiedades eléctricas como son la resistividad, permeabilidad y otras, esto en función de su composición, textura y disposición. Es por ello, que el corte geológico se considera como una parte del espacio que se encuentra relleno con material de propiedades eléctricas diferentes. El corte geoelectrico es determinado por estas propiedades complementándolo con los parámetros geométricos del medio como es el espesor, profundidad, buzamiento de las rocas, entre otros (Iakubovskii & Liajov, 1980)

Existen diferentes métodos de exploración eléctrica que se utiliza en diversas investigaciones geológicas como son: prospección de yacimientos minerales, cartografía geológica, investigaciones geotécnicas e hidrogeológicas, etc.

Los métodos geoelectricos de corriente continua se basa en la interpretación de los distintos materiales existentes en el subsuelo por medio de las variaciones de resistividad al paso de la corriente eléctrica. Es por ello que es considerado como uno de los principales métodos geofísicos para el estudio de estructuras geológicas de la tierra. Una de las ventajas que tienen estos métodos es que se puede controlar la profundidad de penetración dependiendo de la abertura de la línea de corriente como lo es el método Sondeo Eléctrico Vertical (Figuera Martínez, 2010).

### **2.3.2 Principios básicos**

#### **2.3.2.1 Resistencia y Resistividad**

El método resistividad eléctrica mide la diferencia de potencial en puntos sobre la superficie de la tierra que es producida por flujos de corriente eléctrica en el subsuelo, permitiendo determinar la distribución de resistividad en el subsuelo y a su vez a interpretar los materiales de la tierra.

Una de las propiedades electromagnética que caracterizan a las rocas son: permitividad eléctrica, permeabilidad magnética, y la resistividad o su inverso la conductividad eléctrica. De acuerdo a EI (1972), en los estudios geoelectricos la que más se utiliza es la resistividad. Los métodos eléctricos de corriente continua se basan en la ley de Ohm la cual establece que la resistencia es directamente proporcional al voltaje e inversamente proporcional a la intensidad de la corriente eléctrica (Orellana, 1982), (ver Ec. 10 y Fig. 26).

$$R = V / I \quad (\text{Ec.10})$$

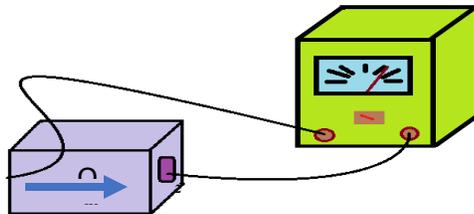


Fig. 26. Representación de medición de resistencia en un cuerpo.

Donde R es la resistencia eléctrica (Ohm,  $\Omega$ ), V es el potencial (Volts) e I es la corriente eléctrica (Ampere).

Pero para estudios del subsuelo esta relación cambia, ya que la resistencia va en función de la naturaleza y la geometría del conductor (tierra), (ver Ec. 11).

$$R = \frac{\rho L}{S} \quad , \quad \rho = \frac{RS}{L} \quad (\text{Ec.11})$$

En este caso  $\rho$  es la resistividad (Ohm), L es la longitud (m) y S es el área o sección del conductor ( $m^2$ ), al realizar el despeje se obtiene la ecuación 12:

$$\rho = \frac{VS}{IL} \quad (\text{Ec.12})$$

Para la exploración geoelectrica la resistividad del suelo se mide por medio de arreglos eléctricos, que consta de cuatro electrodos, en donde, dos electrodos son de corriente y se representan por las letras A y B y los otros dos electrodos son potenciales M y N, y la resistividad se calcula utilizando la Ec. 13 y 14.

$$\rho_a = 2\pi \left( \frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right)^{-1} \frac{\Delta V}{I} \quad (\text{Ec.13})$$

Donde K se define como:

$$K = 2\pi \left( \frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right)^{-1} \quad (\text{Ec.14})$$

$\rho_a$  es la resistividad aparente.

La resistividad es lo inverso a conductividad eléctrica y sus unidades de medidas son Ohm por metro ( $\Omega\text{m}$ ) (Orellana, 1982), (Keller, G. V. & Frischknecht, 1966) y se divide en dos clases como es:

Conductividad electrolítica, en este tipo de conductividad se presentan los minerales y rocas aislantes como son las arenas cuarzosas o areniscas, estas conducen electricidad a través del agua u otro fluido contenido en sus poros interconectados.

Conductividad superficial, es el exceso de conducción eléctrica que aparecen en los sistemas dispersos a la presencia de las dobles capas eléctricas. Estas cargas de exceso se mueven bajo la influencia del campo eléctrico aplicado a la superficie. Este fenómeno se le clasifica como conductividad superficial, que es la conductividad en la superficie equivalente a la conductividad en el volumen la cual es definida por la Ley de Ohm (Cortés, 2015).

### 2.3.3 Resistividad de las rocas

La aplicación de las diferentes técnicas geoeléctricas tiene como objetivo distinguir los materiales del subsuelo en base al contraste que existe en sus características eléctricas. Los factores que afectan la resistividad de un suelo o de una roca incluyen la porosidad, el contenido en agua, la composición (contenido de arcilla), la salinidad del agua en los poros y la distribución de tamaño del grano (Orellana, 1982).

Auge (2008) menciona que la resistividad es elevada en algunas rocas y sedimentos cuando estos se encuentran secos, lo que hace que sean semiconductoras o de baja capacidad para conducir. Pero cuando una roca se encuentra saturada este comportamiento cambia provocando disminución en su resistividad; en otras palabras, su capacidad de conducir corriente eléctrica aumenta. Aparte del grado de saturación de agua que tiene la roca también es importante el rol que juega el contenido de sales en el agua de poro en la resistividad, siendo que a mayor salinidad menor resistividad (mayor conductividad) y viceversa. En la Tabla 3 se muestran algunos valores de resistividad de algunos tipos de rocas y materiales del suelo.

Tabla 3. Valores de resistividad de algunos materiales (Orellana, 1982; J. A. Porres Benito, 2007).

| Material                       |                          | Resistividad<br>Ohm. m          |
|--------------------------------|--------------------------|---------------------------------|
| Rocas ígneas y metamórficas    | Granito                  | $5 \times 10^3 - 10^6$          |
|                                | Basalto                  | $10^3 - 10^6$                   |
|                                | Pizarra                  | $6 \times 10^2 - 4 \times 10^7$ |
|                                | Mármol                   | $10^2 - 2.5 \times 10^8$        |
|                                | Cuarcita                 | $10^2 - 2 \times 10^8$          |
| Rocas sedimentarias            | Arenisca                 | $8 - 4 \times 10^3$             |
|                                | Esquistos                | $20 - 2 \times 10^3$            |
|                                | Caliza                   | $50 - 4 \times 10^2$            |
| Suelo y agua                   | Arcilla                  | 1 - 100                         |
|                                | Aluvión                  | 10 - 800                        |
|                                | Agua dulce               | 10 - 100                        |
|                                | Agua de mar              | 0.2                             |
|                                | Agua de lago             | $10^3 - 3 \times 10^3$          |
|                                | Agua salobre superficial | 2 - 10                          |
|                                | Agua subterránea         | 1 - 20                          |
|                                | Agua de lagos salados    | 0.1 - 1                         |
| Aguas de impregnación de rocas | 0.03 - 10                |                                 |

### **2.3.4 Factores que intervienen en la resistividad**

Una roca como conductor de corriente eléctrica se le considera como un agregado de minerales que contiene poros, los cuales pueden estar llenos de gases y/o líquidos. Los factores que intervienen en la variación de la resistividad eléctrica de este agregado de acuerdo a (Iakubovskii & Liajov, 1980) son:

- a) Resistividad de los minerales que conforman la roca.
- b) Porosidad de la roca. Textura de la roca, forma y distribución de sus poros.
- c) Humedad de la roca.
- d) Resistividad de los gases y líquidos contenidos en los poros de las rocas.
- e) Doble Capa Eléctrica y Capacidad de Intercambio Catiónico.
- f) Temperatura.

### **2.3.5 Modelos Geoeléctricos del subsuelo**

Si consideramos el medio geológico como un semiespacio infinito, limitado en la superficie de la tierra e infinito en las direcciones X, Y y Z del medio, la aplicación de los métodos geoeléctricos de superficie resultan en la obtención de diferentes modelos del subsuelo. Esto se agrupan en: modelos unidimensionales, bidimensionales y tridimensionales.

*Modelos unidimensionales*, mejor conocido como 1-D: Este modelo consiste en que la resistividad del subsuelo varía solo con la profundidad (coordenada Z), estando compuesto de capas paralelas, horizontales e isótropas (la resistividad no cambia en ninguna dirección dentro de cada capa geoeléctrica). Cuando el medio está litológicamente bien definido en capas o estratos, el modelo 1-D puede representar bastante bien el modelo geológico. En caso de existir una geología más compleja, el modelo 1-D es una generalización, útil para diseñar estudios geoeléctricos 2-D y/o 3-D necesarios para modelar el medio geológico.

*Modelos bidimensionales*, comúnmente conocido como 2-D. Siendo uno de los resultados más comunes en los levantamientos geoeléctricos, como son búsqueda de aguas subterráneas, estudios de impacto ambiental, ingeniería geológica y geotecnia.

En la aplicación de este modelo la variación de resistividad es lateral (coordenadas X) y también en la profundidad (coordenadas Z). El método comúnmente utilizado para obtener modelos geoelectricos 2-D es Tomografía de Resistividad Eléctrica aplicado sobre perfiles, sobre el cual se tratará en detalle más adelante.

*Modelos tridimensionales*, también conocido como 3-D: En casos en los cuales el objeto de estudio es la modelación de cuerpos contrastante eléctricamente, con dimensiones limitadas en X, Y y Z se requiere de la obtención de un modelo 3-D. Casos como la modelación de plumas contaminantes, sitios arqueológicos, karst, entre otros, pueden requerir este tipo de modelo. El método de Tomografía de Resistividad Eléctrica es ampliamente utilizado con este fin.

### **2.3.6 Sondeos Eléctricos Verticales (SEV)**

Los sondeos eléctricos son una serie de determinaciones de resistividad aparente, el cual se efectúa con el mismo tipo de dispositivo y su separación entre electrodos de emisión y receptor van en aumento (Orellana, 1982). Los sondeos eléctricos verticales son series de mediciones en profundidad de la resistividad aparente en un punto de la superficie, hasta cierta profundidad el cual dependerá de la penetración de inyección de corriente en el medio geológico.

Su configuración consiste en inyectar corriente continua por dos electrodos a los que se les denomina como A y B, mientras que otros dos electrodos que se encuentran en el centro de los electrodos de corriente (A y B) denominados M y N miden la diferencia de potencial creada por los electrodos A y B (ver Fig. 27). Conforme aumenta la separación de los electrodos A y B mayor será la profundidad de inyección de corriente aparente, llegando así a capas geológicas un poco más profundas, de esta forma obtenemos los valores de  $\rho_a$ . La finalidad de los SEV es encontrar la distribución vertical de resistividad bajo el punto sondeado, la mayor eficacia de los SEV corresponde en efectuarlos sobre un terreno compuesto por capas lateralmente homogéneas en lo que respecta a la resistividad y limitada por los planos paralelos a la superficie del terreno (medio estratificado) (Orellana, 1982).

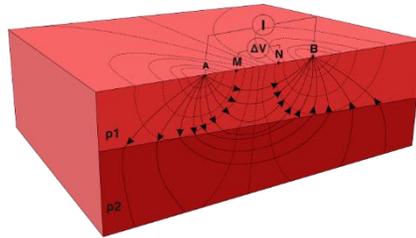


Fig. 27. Configuración de un Sondeo Eléctrico Vertical (SEV).

### 2.3.6.1 Dispositivo electródicos principales

Existen diferentes tipos de arreglos que se pueden utilizar en el método SEV, incluso se pueden personalizar (mezclando los arreglos) en dependencia de los objetivos de estudios que se tengan, la accesibilidad y condiciones del área de estudio. Los arreglos que más se utilizan son: Wenner, Schlumberger, Dipolo – Dipolo; los menos utilizados son: Polo – Dipolo y Polo – Polo. Estos arreglos se diferencian por posiciones relativa que adoptan los electrodos de corriente A y B y de potencia M y N (Toledo Baca, 2015).

#### 2.3.6.1.1 Wenner

El método Wenner consiste en colocar cuatro electrodos en dimensiones alineadas (línea recta) y equidistante entre cada electrodo, en otras palabras, el distanciamiento entre electrodos es iguales entre sí (AM es igual a MN y NB, e igual a un valor “a”) (Márquez, 1990).

Los electrodos de corriente se denominan como A y B, mientras que los electrodos centrales son los de potencial denominados como M y N. La profundidad de estudio incrementa con forme aumenta el distanciamiento a entre todos los electrodos (ver Fig. 28).

Para la obtención de más datos se utilizan múltiplos de la abertura (valor) inicial a, estos regularmente son enteros (ejemplo:  $2^a$ ,  $3^a$ ,  $4^a$ , etc.). Una de las ventajas que tiene este arreglo es su sensibilidad al detectar los cambios verticales en la resistividad y su intensidad de señal es mayor. Mientras que una de sus desventajas es el

espaciamiento en el área de estudio, ya que se requiere mover los cuatro electrodos al mismo tiempo que se va abriendo el SEV a una distancia definida (Márquez, 1990).

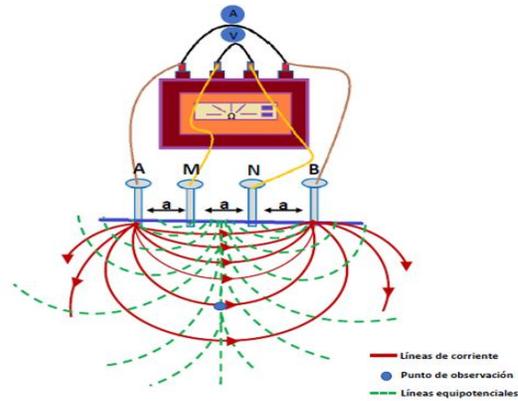


Fig. 28. Arreglo Wenner.

### 2.3.6.1.2 Schlumberger

Schlumberger es considerado un arreglo tetra-electrónico simétrico igual al arreglo de Wenner, los electrodos de corriente (A y B) y los de potencial (M y N) también se encuentra situados en línea recta, con la diferencia del distanciamiento que existe entre los electrodos de corriente A y B es mayor (al menos 5 veces) a la distancia que existe entre los electrodos de potencial M y N, los cuales se mantienen fijos mientras los de corriente son los que se van desplazando (ver Fig. 29).

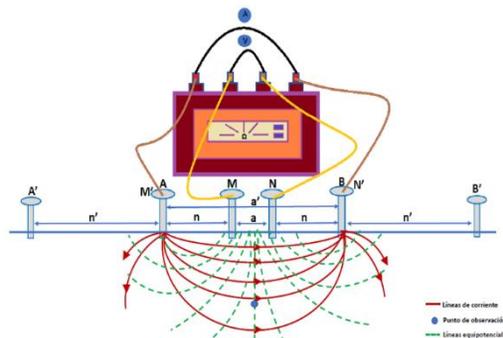


Fig. 29. Arreglo Schlumberger.

La aplicación de este método tiene muchas ventajas, pero también se encuentra limitada su aplicación por el potencial que tienen algunos de los equipos a utilizar, la cual determinará la capacidad de inyección de corriente y de medición de tensiones. Su procedimiento para la obtención del modelo del terreno consiste en separar progresivamente los electrodos alrededor de un punto central permanente (como se

describe anteriormente) conocido como *punto máximo de exploración* (Ospina et al., 2007).

### 2.3.6.1.3 Dipolo – Dipolo

En este tipo de arreglo los electrodos cambian su orden encontrándose primero los electrodos de corriente AB y a una cierta distancia constante se encuentran los electrodos de potencial MN (Toledo Baca, 2015) (ver Fig. 30). Es importante mencionar que el punto de atribución se sigue midiendo entre los electrodos de potencial de manera normal, los cuales permanecen fijos; mientras que los electrodos de corriente son los que se desplazan (Estrada, 2013).

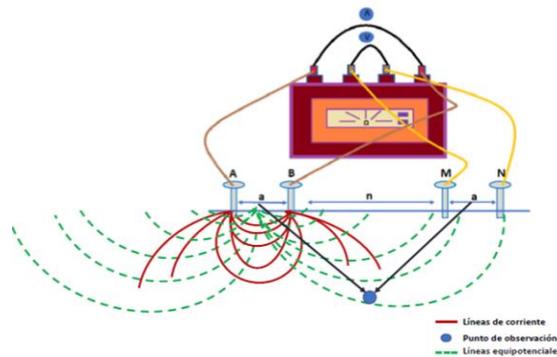


Fig. 30. Arreglo Dipolo-Dipolo.

### 2.3.6.2 Clasificación de los Cortes Geoeléctrico

La clasificación de los cortes eléctricos es de acuerdo al número de capas que las componen, cuando los cortes son de mismo número de capas se pueden subdividir de acuerdo a su magnitud comparativa y por el orden en que van mostrando las resistividades de cada capa. Orellana (1982) clasifica estas curvas de la siguiente manera:

- a) Los cortes de dos capas, de los cuales sólo existe de dos tipos ( $\rho_1 < \rho_2$  y  $\rho_1 > \rho_2$ ); no llevan símbolo especial.
- b) Las letras H, K, Q y A representan los cuatro tipos posibles para cortes geoeléctricos de tres capas.

Los cortes de 4 o más capas (distribuyéndose en 8 grupos), se representan siguiendo el mismo método. Se consideran en primer lugar las 3 primeras capas y se representa

con la letra correspondiente; posterior se hace lo mismo con las capas segunda, tercera y cuarta, continuando con la tercera, cuarta y quinta y así sucesivamente (Orellana, 1982).

### 2.3.6.2.1 Tipos de curvas

Regularmente el medio geológico en donde se realizan los SEV son heterogéneos, las mediciones que se realizan en la superficie son valores que se les conocen como resistividad aparente ( $\rho_a$ ), los cuales son un valor representativo de la contribución de todo el medio por donde circula corriente eléctrica.

En la Fig. 33 se muestra un ejemplo de curvas de resistividad aparente de  $AB/2$  para 2, 3 y 4 capas, así como también se visualizan las diferentes relaciones de  $\rho_a$  en profundidad (ver Fig. 31).

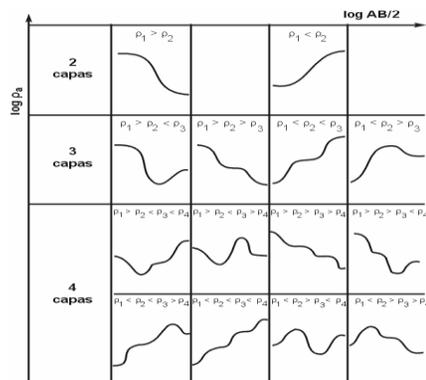


Fig. 31. Tipos de curvas de tres capas de resistividad aparente.

### 2.3.7 Tomografías de Resistividad Eléctrica (TRE)

Es un método muy conocido y empleado para la investigación de los cambios de resistividad del medio geológico. Su aplicación a favorecido a la investigación de diversos problemas geológicos, geofísicos, hidrogeológicos, ambientales.

La Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE) es una técnica geofísica que se utilizada para estudios 2D y 3D del subsuelo, y consiste en determinar la distribución de resistividades a partir de un número elevado de medidas realizadas en la superficie del terreno. La TRE consiste en la combinación de un gran número de electrodos

alineados a lo largo de un perfil, con de separación equidistante. Su fundamento teórico al igual que los SEV se basa en la Ley de Ohm y su arreglo geométrico varía dependiendo de los objetivos de estudio (Loke & Barker, 1996). Su fundamento al ser igual que de los SEV, tiene dos electrodos de corriente (A y B) que son conectados a una fuente de energía artificial externa que les inyecta corriente y dos potenciales (M y N) que lee la diferenciación potencial del campo eléctrico creado por A y B. La relación de estas dos magnitudes proporciona una resistividad aparente, que depende de la resistencia de los materiales presentes en el subsuelo (Cuevas Medina & Fernando, 2017; Porres Benito, 2003).

Una de sus ventajas es la simplicidad de operación y alta productividad, como también de proporcionar una configuración de datos que pueden ser interpretados por el algoritmo de inversión 2D de Loke por medio del programa Res2DInv (Loke & Barker, 1996). El software Res2DInv subdivide automáticamente el subsuelo en un número determinado de bloques. El tamaño y las posiciones de los bloques son fijos, pero se permite que la resistividad varíe utilizando un esquema de inversión de mínimos cuadrados no lineales para determinar el valor de resistividad apropiado para cada bloque. El proceso de variación de las resistividades tiene como propósito hacer coincidir los modelos teóricos observados y calculados como una indicación de la fiabilidad del modelo de resistividad verdadera. Al final del proceso se obtiene un modelo geoelectrico bidimensional para cada perfil que muestra la variación espacial de la resistividad del subsuelo debido a la presencia de diferentes litologías.

### ***2.3.7.1 Dispositivo electrónicos principales utilizados en el método TRE***

#### ***2.3.7.1.1 Arreglo Wenner-Schlumberger***

Este arreglo consiste en mezclar la técnica de Wenner y Schlumberger para obtener un mejor resultado de datos al realizar la TRE. La Fig. 34 muestra un ejemplo de este tipo de arreglo en donde los electrodos M y N son colocados al centro de A y B. La primera medición se realiza como el arreglo Wenner mientras que las siguientes mediciones hasta finalizar la TRE se realiza como indica Schlumberger. Una vez que se va a realizar la primera medición del arreglo Schlumberger sus electrodos se

acomodan en 1, 3, 4 y 6; esto indica que el electrodo 1 y 6 son los de corriente (A y B), mientras que 3 y 4 son los potenciales (M y N) (ver Fig. 32) (Cantos Figueroa, 1973).

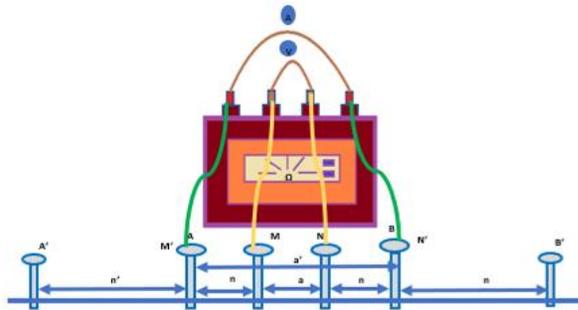


Fig. 32. Arreglo Wenner - Schlumberger TRE.

### 2.3.5.2.1 Arreglo Dipolo – Dipolo

En este tipo de arreglo las mediciones inician colocando los electrodos de la siguiente manera: los electrodos de corriente A y B se denominan como 1 y 2 y los electrodos potenciales M y N son 3 y 4; ya para la segunda medida los electrodos A y B se recorren un electrodo hacia la derecha o izquierda (esto depende de la dirección del perfil a realizar), ósea ahora A y B son 2 y 3, mientras que M y N son 4 y 5 (Cantos Figueroa, 1973). En la figura 33 se observa un ejemplo de este perfil con los electrodos de corriente AB hacia la izquierda y MN con dirección hacia la derecha.

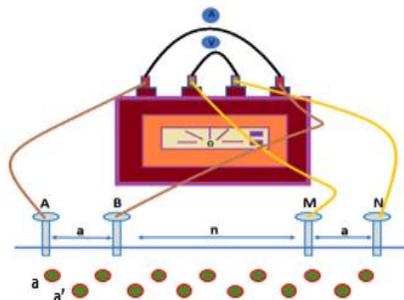


Fig. 33. Arreglo Dipolo – Dipolo para TRE.

## **Capítulo 3. Metodología**

### **3.1 Métodos magnéticos**

#### **3.1.1 Magnetometría aérea**

La información magnetométrica aérea se obtuvo del Servicio Geológico Mexicano (SGM). Estos datos fueron obtenidos a escala 1: 50,000. Para ello realizaron un vuelo lineal de norte a sur a una altura sobre el nivel del terreno de 450 m. La distancia de separación entre líneas de vuelo fue de 1,000 m mientras que la distancia entre líneas de control fue de 2,000 m. La navegación fue georreferenciada. Este vuelo se realizó en el año 1995 de acuerdo a la carta magnética F14-A-84 (Tepetate) (Servicio Geológico Mexicano, 1995). El método que se siguió para el levantamiento aéreo-magnético se especifica en la carta magnética de campo total F14-A-84 (Tepetate) proporcionada por el Servicio Geológico Mexicano.

##### **3.1.1.1 Características del equipo**

El avión empleado para realizar el vuelo fue ISLANDER BN2-B27, utilizando un magnetómetro Scintrex de Cesio, bombeo óptico, con sensibilidad de 0.001 nT. El sistema de adquisición de datos fue el PDAS 1 000, con una cámara de video a color JVC con alta resolución. En la estación base utilizaron un magnetómetro GEM SYSTEM GSM – 19 con una sensibilidad de 0.01 nT, con un radar altímetro SPERRY.

##### **3.1.1.2 Procesamiento de magnetometría aérea**

Para realizar la interpretación de los datos aeromagnético proporcionados por el SGM, esto es el Campo Magnético Total (CMT). Al CMT se le aplicaron distintos filtros para ayudar a visualizar la información e interpretar los datos. El procesamiento de estos datos se realizó con el software Oasis Montaj (Geosoft, 2015a). Los filtros aplicados a estos datos utilizando el software de Oasis Montaj fue el cálculo del Campo Magnético Residual (CMR), como resultado de sustraerle al CMT el campo magnético regional asumido como el valor IGRF. Posteriormente se realizó la reducción al polo (RP) con

el propósito de eliminar el efecto de la inclinación del campo magnético, esto es, llevando la información del CMR como si se hubiera medido en el polo magnético, lo que elimina el corrimiento de las anomalías del CMR por efecto de la inclinación del campo magnético terrestre en el sitio de estudio, quedando como resultado el CMR-RP. CMR-RP es útil para delimitar los dominios magnéticos y realizar una interpretación cualitativa del comportamiento del CMR-RP. Posteriormente, se procesó la señal analítica para una mejor ubicación de los cuerpos causantes de las anomalías del CMR-RP. El área procesada para la magnetometría aérea fue de 95.7 Km<sup>2</sup> abarcando un perímetro de 39.8 Km.

### 3.1.2 Magnetometría terrestre

Para la adquisición de datos magnéticos terrestre se realizaron dos campañas. La primera se desarrolló en el mes de junio del 2019. En esta campaña se realizaron nueve perfiles con una longitud variada entre 1.2 km hasta 1.4 km aproximadamente cada uno, con una distancia de separación entre cada punto de 25 m. La dirección de estos nueve perfiles fue: cuatro perfiles de N – S (con una distancia de separación por perfil de aproximadamente 250 a 360 m) y cinco perfiles de W - E (la distancia de separación por perfil fue de aproximadamente 200 a 250 m), haciendo un levantamiento total de 380 puntos. El área total de levantamiento de datos fue de 95 Ha y un perímetro aproximado de 3,812 m (ver Fig. 34).

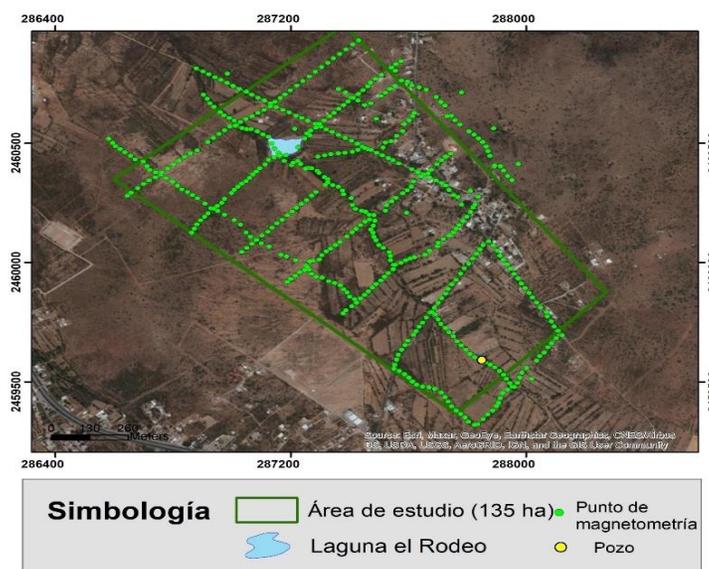


Fig. 34. Mapa de levantamiento de datos magnéticos en área de estudio (primera campaña).

La segunda campaña se realizó en el mes de enero del 2020, con el objetivo de ampliar el área de estudio, en este se realizaron cinco perfiles. La longitud de cada perfil fue de entre 450 a 700 m. La distancia de separación entre cada punto fue de 25 m. La dirección de los perfiles fue: tres perfiles de W – E (la distancia de separación entre perfil fue de aproximadamente 300 m) y dos N -S (con una separación entre perfil entre 400 m), aquí se levantaron un total de 108 puntos (ver Fig. 35 y 36).

En total el levantamiento de magnetometría terrestre fue de aproximadamente 135 ha, con un perímetro aproximado de 4 750 m y un total de 488 puntos levantados.



Fig. 35. Levantamiento de datos magnéticos terrestre en área de estudio.

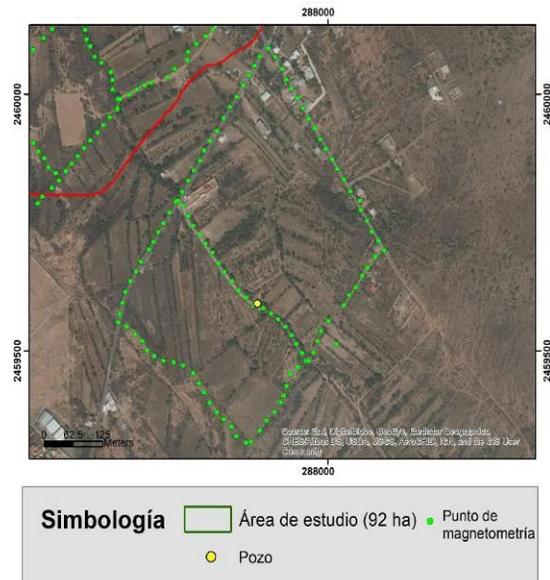


Fig. 36. Mapa de levantamiento de datos magnéticos terrestre en área de estudio (segunda campaña).

### 3.1.2.1 Características del equipo

En la realización del levantamiento de puntos se utilizaron dos magnetómetros marca Geometrix, modelo G-856 con resolución de 0.1 nT, para la estación base se utilizó el magnetómetro marca GEM, modelo GSM 19 con resolución de 0.001 nT.

### 3.1.2.2 Procesamiento de magnetometría terrestre

Para el procesamiento de magnetometría terrestre, de igual forma que el levantamiento de datos se realizó en dos fases, por la diferencia de fechas. Pero

ambas se procesaron de la misma forma, utilizando el software Oasis Montaje (Geosoft, 2015a).

1. Se realizaron distintos cálculos de correcciones de variación magnética (horaria y diurna proporcionados por el Observatorio Geomagnético de Teoloyucan) entre los datos obtenidos de la base (la cual se ubicó en el centro del área de estudio) y los datos obtenidos de los equipos móviles, obteniendo el Campo Magnético Total (CMT).
2. Se realizó el cálculo de Campo Magnético Residual (CMR), para ello se utilizó la ecuación 6 del punto 2.2.11.
3. A partir de obtener el CMR, se aplicó el filtro de Reducción a Polo (RP)
4. Como último paso, después de obtener CMR-RP, se obtuvo la señal analítica, como herramienta para resaltar con mayor precisión los cuerpos causantes de las anomalías magnéticas en CMR-RP, independientemente si son positivas o negativas.

## **3.2 Métodos geoelectricos**

### **3.2.1 Sondeo eléctrico vertical (SEV's)**

Se realizaron un total de ocho sondeos en el área de estudio, distribuidos estratégicamente, formando así dos secciones; en dirección N-S y W-E (ver Fig. 37 y Tabla 4). Algunos SEV's se realizaron cerca del cauce del arroyo seco, otros cerca de norias y laguna artificial para correlacionar los niveles estáticos y conocer mejor la distribución del acuífero somero.

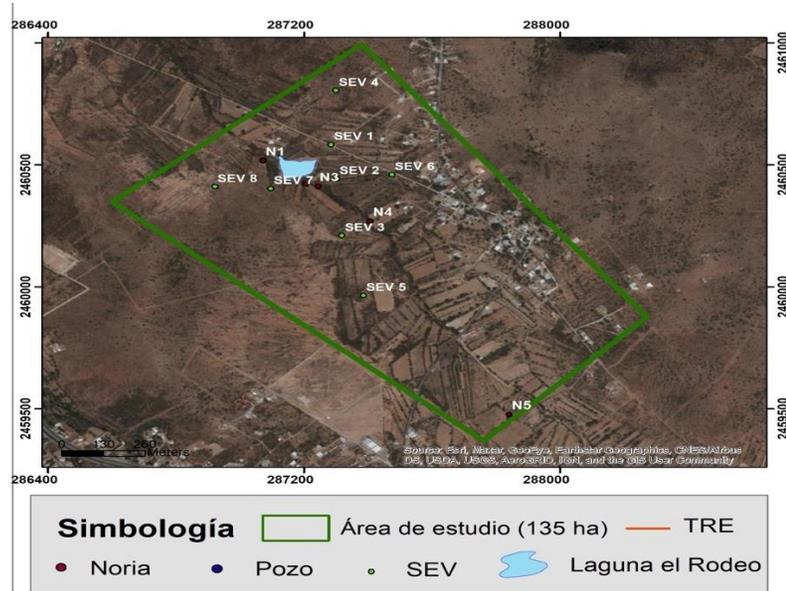


Fig. 37. Mapa de ubicación de los SEV's formando dos secciones (N-S y W-E) en El Rodeo, Mexquitic de Carmona, S.L.P, utilizando el arreglo Schlumberger.

| Núm. de SEV | Orientación del SEV | Sección |
|-------------|---------------------|---------|
| 1           | N-S                 | 1       |
| 2           | N-S, W-E            | 1, 2    |
| 3           | N-S                 | 1       |
| 4           | N-S                 | 1       |
| 5           | N-S                 | 1       |
| 6           | W-E                 | 2       |
| 7           | W-E                 | 2       |
| 8           | W-E                 | 2       |

El arreglo utilizado para estos SEV's fue Schlumberger. La separación entre electrodos de corriente AB/2 fue estuvo sujeta a las características del terreno y su nivel de acceso, siendo que para todos los SEV el valor máximo de AB/2 no fue menor a 550 m, por lo que se garantizó una profundidad máxima de estudio de aproximadamente 220 m. También se realizó un SEV cerca del pozo El Rodeo, hasta una abertura de AB/2 de 700 m aproximadamente, alcanzando una profundidad de estudio de aproximadamente 280 m, con la finalidad de correlacionar el modelo geoelectrico con el nivel estático del pozo ubicado a 252 m de profundidad.

### 3.2.1.1 Características del equipo

Para el levantamiento geoelectrico se utilizaron los siguientes equipos y materiales descritos en la Tabla 5 y Fig. 38:

Tabla 5. Descripción del equipo y materiales que se utilizaron para realizar los SEV's.

| Equipo   | Material  |
|--|---|
| <b>SYSCAL R2</b><br>Características: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Voltaje máximo den 800 V</li> <li>• Impedancia de entrada 100 Mghm</li> <li>• Resolución de 1 <math>\mu</math>V/0.2%</li> <li>• 2 canales</li> </ul> | Carretes de cable de 600 m c/u para A y B.                                      |
|  | Mazos   |
|  | Batería externa de 12 V   |
|  | Electrodos  |
|  | Cinta, pinzas, bananas, caimanes, cables de corriente para conectar la batería. |
|  | Carretes de cable de 300 m c/u para M y N.                                      |



Fig. 38. Mediciones eléctricas con equipo Syscal R2.

### 3.2.1.2 Procesamiento de datos de SEV

El procesamiento de datos de los SEV's se realizó mediante el software IX1D (INTERPEX, 2002), obteniéndose un modelo discreto por cada SEV que se realizó (ver figura en la sección de resultados). Posteriormente, utilizando el software IPI2Win (Bobachev et al., 2003), se realizaron secciones geoelectricas de N-S y W-E mediante la conjunción los diferentes modelos de SEV dispuestos a lo largo de cada perfil. De acuerdo a la distribución de los SEV (ver Fig. 37) se formaron dos perfiles y sus correspondientes secciones geoelectricas una en dirección N-S y otra en dirección W-E. Por último, y para una mejor visualización, la sección fue exportada a Surfer 15 (Golden Software, 2018) donde, utilizando el algoritmo de interpolación de *mínima curvatura*, se obtuvo ambas secciones geoelectricas. Una vez obtenidas las secciones geoelectricas se construyeron las secciones geológicas tomando en cuenta la información geológica del sitio, incluyendo los niveles estáticos del pozo y las norias, así como los resultados de las mediciones eléctricas realizadas en muestras de suelo y agua.

### 3.2.2 Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE)

Se realizaron de manera manual un total de seis Tomografías de Resistividad Eléctrica (TRE) en el área de estudio (ver Fig. 39) con el propósito de obtener un modelo geoelectrico 2-D de alta resolución del acuífero somero, relacionado con la existencia de norias productivas. El arreglo utilizado fue Wenner – Schlumberger. La longitud de los perfiles varió entre 260 m a 400 m (esto dependiendo del acceso que se tuvo en el área). El espaciamiento entre cada electrodo fue de 10 m (X espaciado) y la separación entre los centros de atribución o puntos del perfil fue de 30 m. Las aberturas AB/2 mínima fue de 15 m y máxima de 205 m, logrando una profundidad máxima de estudio de 74 m.

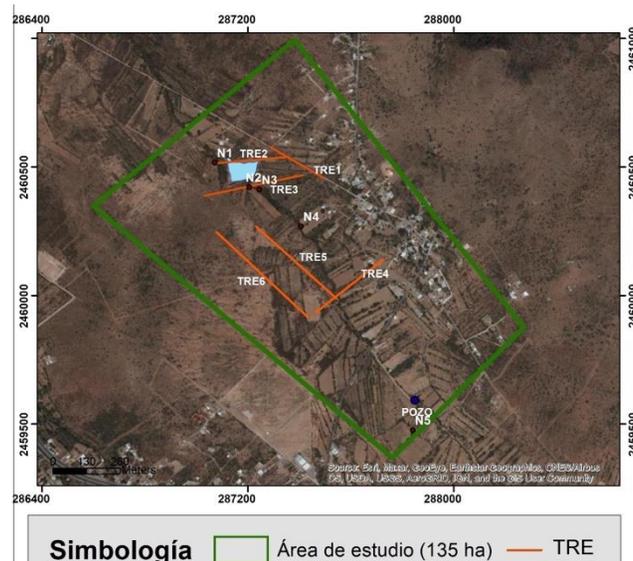


Fig. 39. Mapa de TRE realizadas en El Rodeo Mexquitic de Carmona S.L.P, utilizando el arreglo Wenner – Schlumberger.

#### 3.2.2.1 Características del equipo

En la realización de las TRE, el equipo y materiales utilizados fueron los mismos que se ocuparon en los SEV's (ver tabla de equipos y materiales de la sección 3.2.1.1).

#### 3.2.2.2 Procesamiento

Para el procesamiento de las TRE fue necesario generar un archivo de entrada Wenner-Schlumberger con espaciamiento entre electrodo de 10 m. La inversión de los datos se realizó en el software RES2DINV (Geotomo software, 2006) mediante el método de interpolación de mínimos cuadrados, se dio una tolerancia de error máximo

de 7% en cada TRE, posteriormente, las TRE fueron reprocesadas en el software Surfer 15 (Golden Software, 2018), donde se generaron imágenes basadas en máximos y mínimos medidos para minimizar la inter-extrapolación, del mismo modo se consideró el uso de Surfer para ajustar la escala de resistividad a fin de resaltar estratos geológicos de interés ajustando todas las TRE a una misma escala geoelectrica.

### **3.3 Determinación del contenido de finos y de la conductividad hidráulica**

#### **3.3.1 Modelo teórico del suelo de Ryjov**

El programa PetroWin calcula un modelo teórico desarrollado por Ryjov & Sudoplatov, (1990). Este modelo que incluye los componentes de los sedimentos no consolidados y la estimación de la resistividad electroquímica del agua de los poros, que da lugar a la estimación de la resistividad de la roca. La estructura del suelo se considera como un esqueleto formado por los granos sólidos de arena y arcilla en el que sus capilares se ven como cilindros huecos con diferentes radios. El componente de arena contiene un amplio sistema de poros cilíndricos y no tiene el efecto de la Doble Capa Eléctrica DCE. Los microporos del componente de finos son muy estrechos, lo que se acerca al grosor de la DCE. El espesor de la DCE depende de la salinidad del agua y aumenta con la disminución de la concentración de sal. El volumen total de poros de la muestra e calcula a partir de las proporciones de arena y finos y sus respectivas porosidades, por lo que el modelo de la mezcla consta de dos tipos de capilares con radios diferentes (Shevnin et al., 2007). Los capilares de arena y arcilla pueden estar conectados en serie, en paralelo o una combinación de ambos.

Las conductividades de los componentes de la arena ( $\sigma_{are}$ ) y de los finos ( $\sigma_{finos}$ ) pueden calcularse utilizando:

$$\sigma_{are} = \varphi_{are} \sigma_{capilar \text{ de arena}} \quad \text{Ecu. 15}$$

$$\sigma_{finos} = \varphi_{finos} \sigma_{capilar \text{ de finos}} \quad \text{Ecu. 16}$$

donde  $\sigma_{\text{capilar de arena}}$  y  $\sigma_{\text{capilar de finos}}$  son las conductividades de los capilares de arena y de finos (finos + limo), respectivamente, y  $\varphi_{\text{are}}$  y  $\varphi_{\text{finos}}$  son las porosidades de los componentes de arena y de finos, expresadas como fracciones de volumen del volumen total. En el sistema de poros de la arena, que tiene capilares anchos, la conductividad media de los canales de arena  $\sigma_{\text{capilar de arena}}$  no depende del radio capilar y corresponde a la conductividad del agua libre  $\sigma_w$  (conductividad electrolítica).

La conductividad de las soluciones de agua depende de la concentración de sal, del tipo de anión y catión, así como de la influencia de la EDL.

La porosidad total  $\varphi_t$  del suelo puede determinarse mediante las siguientes ecuaciones (Marion et al., 1992; Revil et al., 2002).

$$\varphi_t = (\varphi_{\text{are}} - C_{\text{finos}}) + \varphi_{\text{finos}} C_{\text{finos}}, \text{ cuando } C_{\text{finos}} < \varphi_{\text{are}} \quad \text{Ecu. 17}$$

$$\varphi_t = C_{\text{finos}} \varphi_{\text{finos}}, \text{ cuando } C_{\text{finos}} \geq \varphi_{\text{are}} \quad \text{Ecu. 18}$$

donde  $C_{\text{finos}}$  es el contenido volumétrico de finos (arcilla + limo) en una mezcla de arena y finos.

Cuando  $C_{\text{finos}} < \varphi_{\text{are}}$ , la conductividad total del suelo,  $\sigma_t$ , es igual a la conductividad del componente de finos ( $\sigma_{\text{capilar de finos}}$ ), la porosidad de los finos y la concentración de sales. El componente de arena sólo puede influir disminuyendo el volumen del huésped de finos ( $C_{\text{finos}}$ ):

$$\sigma_t = \sigma_{\text{capilar de finos}} \varphi_{\text{finos}}, \text{ cuando } C_{\text{finos}} > \varphi_{\text{are}} \quad \text{Ecu. 19}$$

Cuando  $C_{\text{finos}} < \varphi_{\text{are}}$ ,  $\sigma_t$  está definido por ambos  $\varphi_{\text{are}}$  y  $\varphi_{\text{finos}}$ , que está saturado por el agua de poro de una salinidad dada.

En los suelos, es común la presencia de capilares paralelos y en serie. Una parte de los finos se encuentra en las paredes de los poros de la arena, mientras que otra parte de los finos se encuentra dentro de los poros de la arena en forma de tapones. Los capilares se dividen en una parte volumétrica de capilares paralelos igual a  $M$  y una parte en serie igual a  $1 - M$ . Ahora, es posible calcular el  $\sigma_t$  según:

$$\sigma_t = M_{opri} + (1 - M) \sigma_{ser}, \text{ cuando } C_{finos} > \phi_{are}$$

Ecu. 20

La salinidad del agua de poro se calcula para los siguientes parámetros: Solución de NaCl y saturación del suelo, temperatura 20°C, porosidad de la arena 25%, porosidad de los finos 55%, la CEC de la arcilla 40 cmol (+) / Kg (~3 g/l). Los valores de las curvas indican el contenido de finos (en este caso, sólo arcilla) desde la arena (0%) hasta el 100% de finos y la porosidad del suelo en porcentaje. Para una alta salinidad del agua de poro (> 10 g/l) las curvas de resistividad del suelo se sitúan por encima y prácticamente en paralelo a la curva de resistividad del agua de poro, que es similar a la curva de la arena (efecto de conductividad electrolítica). A menor salinidad del agua de poro, las curvas de resistividad del suelo para diferentes mezclas de arena y finos se sitúan por debajo y no paralelas a la curva del agua de poro debido a la influencia de la EDL (efecto de conductividad superficial), este modelo se describe en detalle en (Shevnin et al., 2017).

### 3.3.2 Estimación del contenido de finos y de la K

Considerando las ecuaciones 19 y 20, es posible generar curvas teóricas de resistividad eléctrica de cualquier suelo compuesto por arena y finos (arcilla y/o limo) frente a la salinidad del agua de los poros a partir de los parámetros definidos: contenido de finos, porosidad y CEC.

Utilizando el programa PetroWin desarrollado por Ryjov (Ryjov & Shevnin, 2002), se realiza un proceso de inversión iterativo de minimización del error RMS entre las curvas experimentales (a partir de las medidas eléctricas en laboratorio) y las teóricas (modelo teórico anteriormente descrito). Durante el proceso de inversión iterativa se pueden modificar diferentes parámetros, como la salinidad del agua de los poros (incluidos los tipos de aniones y cationes con su valencia, el número de hidratación, la constante de sorción y la movilidad), la porosidad, la capilaridad radios, humedad y exponente de cementación para cada componente de finos y arena del suelo, así como la CEC para el componente de finos y la temperatura del suelo. Finalmente, el cálculo de la porosidad, del contenido de finos y, como derivado de este último el valor de conductividad hidráulica K, utilizando la expresión

$$K=0.101176*FINOS^{-1.62}$$

Ecu. 21

Donde: K representa la conductividad hidráulica en m/día y los finos es el resultado de la suma del contenido de arcilla y limo de la muestra, expresada en el intervalo 0 - 1.

En total se analizaron siete muestras de suelo en distintos puntos del área de estudio (ver Tabla 6 de contenido de finos en la sección de resultados). También se realizaron análisis de agua a las norias reportadas, a la laguna artificial y al pozo de la localidad El Rodeo para determinar la salinidad de cada muestra de agua.

# Capítulo 4. Resultados y Discusión

## 4.1 Resultados de Magnetometría

### 4.1.1 Magnetometría Aérea: Dominios magnéticos

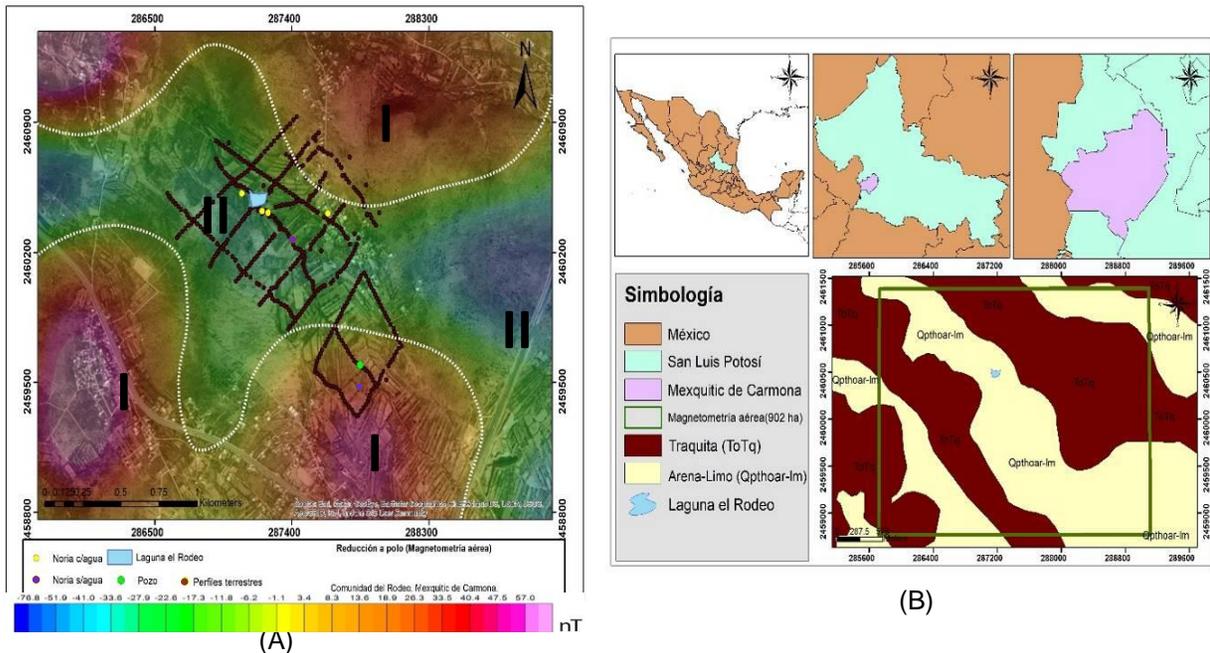


Fig. 40. (A) Se muestra el campo magnético aéreo residual con reducción al polo con delimitaciones de dominios magnéticos regionales. (B) Se muestra la geología local del área de estudio El Rodeo.

En la Fig. 40A observamos el mapa de CMR-RP, donde se delimitan dos dominios magnéticos fundamentales con una orientación de W-E, asociados a la geología presentada en la Figura 40B. El dominio I de alto campo magnético, con valores positivos dado por el predominio de rocas ígneas como la Traquita, Riolita y Tobas riolíticas, mientras que, en la parte central del área de estudio (El Rodeo) se observa un bajo magnético, con valores negativos dado por el predominio de sedimentos arena-limosos. Dentro de este dominio II se encuentra la mayor parte de nuestra área de estudios terrestres, que consta de 14 perfiles magnéticos. Es notable que el extremo sureste del área de estudios magnético terrestres, a diferencia del resto del área, se encuentra sobre el dominio I, lo que pudiera significar un cambio geológico-estructural, desde el predominio de espesores de sedimentos aluviales en el centro del área a un predominio de rocas volcánicas hacia el extremo sureste.

## 4.1.2 Señal Analítica

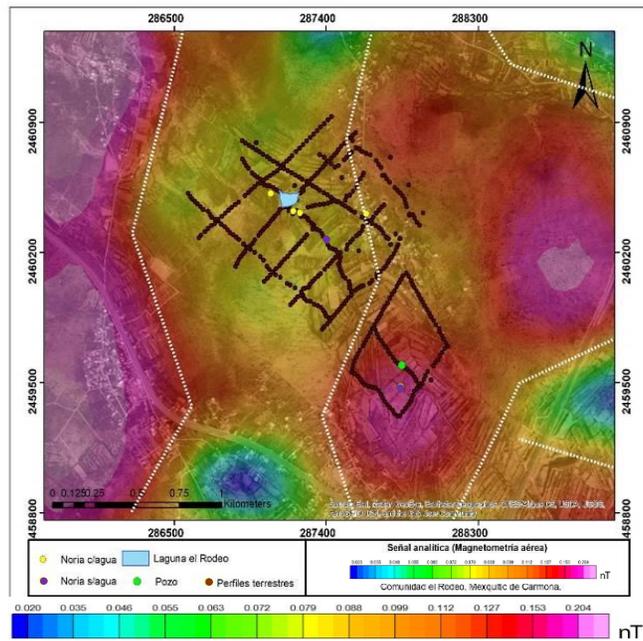


Fig. 41. Señal analítica con lineamientos magnéticos.

El mapa de amplitud de la Señal Analítica, es mostrado en la Figura 41. La señal Analítica, considerada como la contribución de las derivadas del campo magnético en las direcciones X, Y y Z, muestra sus máximos anomalías (color rojo) contorneando la posición de los cuerpos causantes de las anomalías de CMR-RP, sean positivas o negativas. En este caso, la mayor parte de nuestra área de estudios terrestres sigue estando en una zona de bajo gradiente de campo magnético, mientras que la zona sureste donde se encuentra el pozo del pueblo y la noria N5 seca se encuentra en un máximo de amplitud, lo que confirma la posibilidad de cambios litológicos-estructurales que pudieran estar relacionados con las diferencias en las condiciones de disponibilidad de agua entre la zona de la laguna y la zona del pozo del pueblo. No obstante, para asegurar o rechazar esta suposición, es necesario realizar estudios magnéticos más detallados.

Zonas de máximo gradiente están frecuentemente relacionadas con contactos litológicos verticales o cercanos a verticales, zonas de fracturas, que favorecen el incremento de la porosidad secundaria y, por lo tanto, la permeabilidad del subsuelo (G. et al., 2019; Lachassagne et al., 2011). En la Fig. 41, se visualiza los lineamientos

magnéticos de la señal analítica aérea, en esta figura se observa con mayor definición que las norias productivas como la laguna se encuentran en un bajo gradiente.

### 4.1.3 Magnetometría Terrestre: Dominios magnéticos

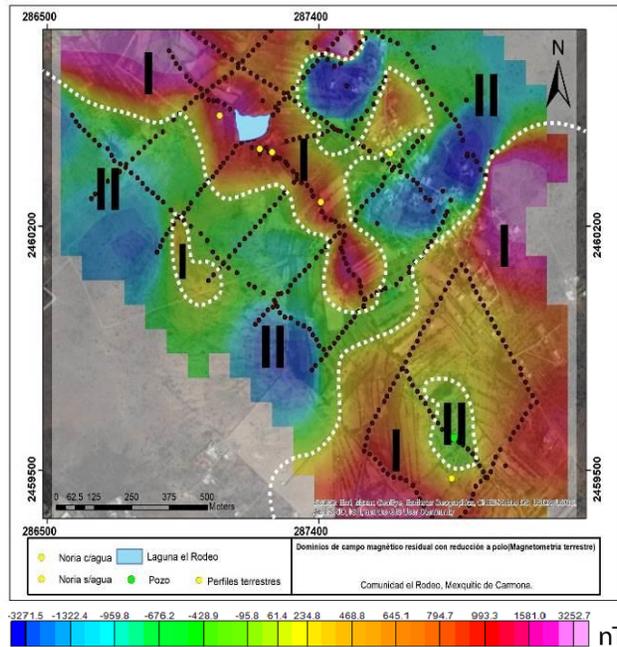


Fig. 42. Dominios de campo magnéticos con reducción a polo del área de estudio El Rodeo (magnetometría terrestre).

Los perfiles magnéticos terrestres fueron realizados en direcciones que permitan obtener un mapa de alta resolución de las anomalías de CMR-RP, definidas antes de manera más general en el mapa de campo magnético aéreo (Fig. 42). Tomando en cuenta la ubicación de la zona de alto gradiente aéreo y las vías de acceso o rutas permitidas en el área de estudios, se realizaron un total de 14 perfiles.

En la Figura 42 se observa los dominios del CMR-RP resultado del levantamiento magnético terrestre. Ahora, con mayor resolución, se observa un dominio I, con valores positivos de CMR-RP, el cual, de acuerdo a la geología local descrita en el apartado 1.10, se debe al predominio de los afloramientos de las tobas riolíticas y tepetate, mientras que en el dominio II, con un rango de campo magnético negativo, se debe al predominio del afloramiento de conglomerado de riolitas polimícticas en matriz arenolimsa. En la porción centro-norte, el dominio magnético I presenta una dirección predominante NW-SE, incluyendo el área de la laguna y las norias productivas N1, N2 y N3. Esta anomalía positiva no es visualizada en el mapa de anomalías aérea (ver

Fig. 40), lo que infiere se debe a un cuerpo más local y superficial. Este cuerpo se extiende hacia el SE hasta la zona centro del área de estudio, estando separada (en concordancia con los resultados de magnetometría aérea) de la zona donde se encuentran el pozo del pueblo (NE = 252 m) y la noria N5 seca.

#### 4.1.4 Señal Analítica

En la Figura 43 se presenta el mapa de la señal analítica del CMR-RP. Los lineamientos del campo magnético en SA son notorios marcando alto magnético positivos en las zonas de máximo gradiente, contorneando mediante estas anomalías de amplitud de SA los cuerpos causantes de las anomalías positivas (tobas riolíticas y tepetate) y negativas (mayormente conglomerado de riolitas polimícticas). Cabe recordar que las riolitas polimícticas tienen una muy baja presencia de óxido de hierro (menor al 1%).

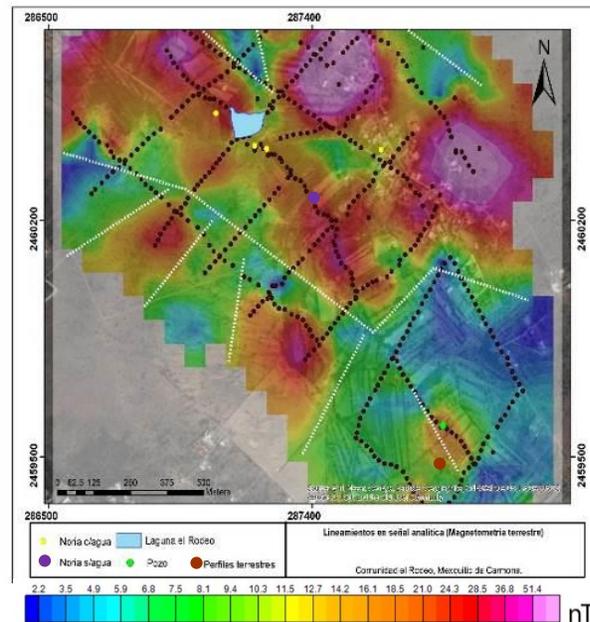


Fig. 43. Señal analítica (SA) del área de estudio El Rodeo (Magnetometría Terrestre).

## 4.2 Resultados de mediciones de salinidad, contenido de finos y conductividad hidráulica en muestras de agua y de material no consolidado.

Los muestreos de suelos fueron llevados a cabo en puntos cercanos a las norias N1 (productiva) y N4 (seca) (Tabla 6). Las muestras de color naranja se destacan por materiales altamente compactados (Tepetates) y de moderada a baja conductividad hidráulica.

**Tabla 6. Resultados de contenido de finos en muestras no consolidadas.**

| Muestra | Referencia  | Altitud (m.s.n.m.) | Finos (%) | Porosidad (%) | K (m/día) |
|---------|---|--------------------|-----------|---------------|-----------|
| S1      | Bordo Norte, Tepetate color rojizo.                         | 1982               | 40        | 22.5          | 0.043     |
| S2      | Bordo cercano a la N1, material detrítico poco consolidado. | 1984               | 15        | 20.0          | 0.28      |
| S3      | Noria 1, material detrítico poco consolidado.               | 1986               | 9         | 26.85         | 0.72      |
| S4      | Laguna, material detrítico poco consolidado.                | 1980               | 13        | 24.8          | 0.28      |
| S5      | Noria 4 (6m), matriz fina, color rojizo poco consolidado.   | 1975               | 24        | 20.16         | 0.115     |
| S6      | Noria 4 (8m), matriz fina, color gris muy consolidado.      | 1975               | 40        | 25.2          | 0.043     |
| S7      | Escarpe al Sur del área de estudio, Tepetate color rojizo.  | 1970               | 58        | 32.48         | 0.021     |

La muestra S2 se tomó del material extraído de un proceso reciente de ampliación de la profundidad de perforación de la N1, mientras que las muestras S5 y S6, fueron obtenidas durante el proceso de excavación de la noria N4 para las profundidades 6 m y 8 m, respectivamente. Otras muestras de suelo y material poco consolidado fueron colectadas del parte del fondo de la laguna en época de seca (S4) y en cortes

proporcionados por los bordos y escarpes ubicados dentro del área de estudio (S1, S2 y S7) (ver Fig. 44 y 45).



Fig. 45. Se muestra las norias sin agua existentes en la comunidad El Rodeo, con afloramiento de riolitas, tobas y tepetate.

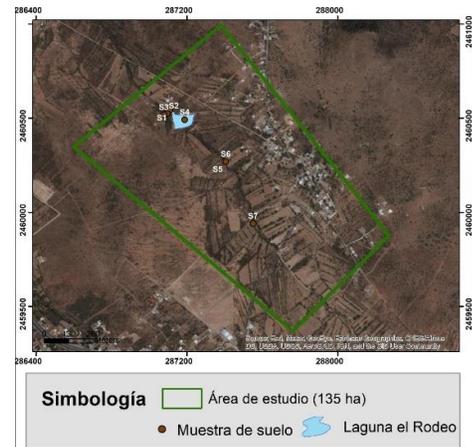


Fig. 44. Ubicación de toma de muestra de material poco consolidados en El Rodeo, Mexquitic de Carmona.

Las muestras fueron procesadas según el procedimiento descrito en el apartado 3.3 y procesados sus datos experimentales en el programa PetroWin (Ryjov & Shevvin, 2002), dando como resultados los valores de contenido de finos, porosidad y K expuestos en la Tabla 7. Destaca la presencia de tepetate color rojizo cerca de la laguna, así como al sur del área de estudio, los cuáles se caracterizan por un alto contenido de finos (arcillas) y por ser de moderada a baja permeabilidad ( $K \leq 0.043$  m/día). Otras muestras de suelo (S2 a S5) mostraron estar menos compactadas y con clastos de rocas ígneas de tamaño variables, de color variable entre rojizo y pardo claro; este material muestra menor contenido de finos y, por consiguiente, una mayor permeabilidad ( $K \geq 0.115$  m/día).

Las existencias conjuntas de estos materiales pueden combinar estratos permeables empacados en capas de tepetate de baja permeabilidad, lo que, combinado con la topografía local de la cuenca del arroyo seco, puede crear horizontes saturados y permeables limitados por los tepetates que fluye aguas debajo de acuerdo a la topografía (ver Fig. 46), donde se observa un gradiente positivo de la topografía hacia el Norte y el Oeste del cauce del antiguo arroyo intermitente, siendo de menor gradiente hacia el Este del cauce seco. Recordemos que en los flancos Este y Oeste del área de estudio predominan los afloramientos de conglomerados de riolitas polimícticas.

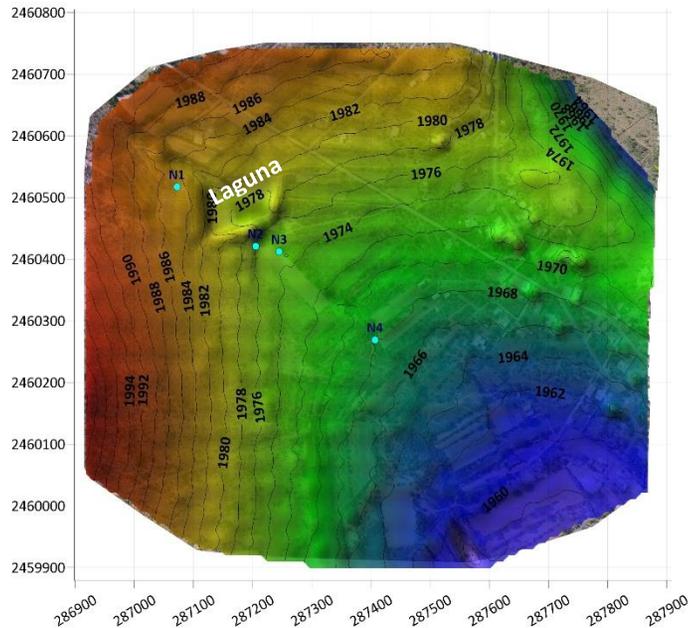


Fig. 46. Mapa topográfico del área de estudio El Rodeo, Mexquitic de Carmona.

Basados en la información de la geología local y en los resultados magnetométricos, es necesario realizar estudios geoelectricos a detalle utilizando el método de Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE) para modelar esta unidad superficial en superficie y profundidad, asociadas a la presencia de norias productivas y la laguna. Siendo el primer paso realizar mediciones de resistividad de agua subterránea, lo que, junto a los estudios realizados en las muestras de suelo y la información geológica local, permitiría construir una escala geoelectrica para la interpretación de los datos adquiridos con los métodos TRE y SEV.

Muestras de agua subterránea y superficial fueron tomadas con el fin de determinar la salinidad del agua en el área de estudio. La Tabla 7 muestra los resultados de la determinación de la salinidad en cinco muestras de agua (A1 a A5). Una muestra de agua fue tomada en la laguna tomando en consideración de que el nivel del agua de la laguna corresponde con el nivel piezométrico de las Noria N1, N2 y N3, sin embargo, lluvias ocurridas en los días anteriores al muestreo afectaron su salinidad, no siendo confiable su valor (ver Fig. 47 y 48). Esta laguna, en época de seca, es también utilizada para satisfacer las necesidades del ganado vacuno y ovino, lo que también

afecta la salinidad natural del agua. Debido a esto, se decidió tomar como confiables las muestras A2 de la Noria N1 y la A5 tomada del pozo profundo del pueblo, dando como resultados valores similares con una salinidad promedio de 0.215 g/L.



Fig. 48. Se muestra de izquierda a derecha, la laguna (época de seca) y las norias productivas N2 y N1, existentes en la comunidad El Rodeo.

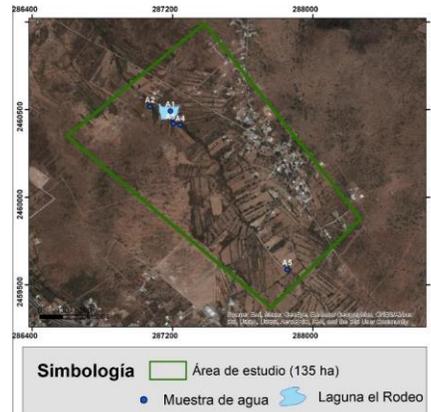


Fig. 47. Ubicación de toma de muestra de agua en El Rodeo, Mexquitic de Carmona.

Tabla 7. Resultado de salinidad en muestras de agua.

| Muestra | Referencia | Altitud (m.s.n.m.) | Nivel estático (m) | Observaciones                                   | T (°C) | $\rho_{20\text{ °C}}$ , Ohm.m | Salinidad (g/L) |
|---------|------------|--------------------|--------------------|---|--------|-------------------------------|-----------------|
| A1      | Laguna     | 1980               | 0                  | Afectado por lluvias                            | 0.043  | 64.24                         | 0.09            |
| A2      | Noria 1    | 1986               | 6                  | Época de seca, muestra sin sedimentos           | 0.28   | 28.36                         | 0.21            |
| A3      | Noria 2    | 1982               | 1.3                | Afectado por lluvias                            | 0.72   | -                             | 0.17            |
| A4      | Noria 3    | 1980               | 2.7                | Afectado por alta presencia de materia orgánica | 0.28   | 17.1                          | 0.35            |
| A5      | Pozo       | 1962               | 250                | Época de seca, muestra sin sedimentos           | 0.115  | 24.8                          | 0.22            |

Con color verde se destacan las muestras más confiables para la determinación de salinidad de agua subterránea. Este valor de salinidad, en combinación con los

modelos teóricos de las muestras de suelo analizadas, nos brindan la posibilidad, utilizando el programa PetroWin, de estimar el comportamiento de la resistividad de estos materiales para diferentes niveles de humedad con agua de salinidad 0.215 g/L, esto es, para valores de humedad 5%, 20%, 50% y 100%.

Estos resultados se observan en la Tabla 8, donde también se muestran algunos de los parámetros considerados en el programa PetroWin para dicha estimación.

Tabla 8. Estimación de resistividad eléctrica de las diferentes litologías representadas en las muestras S1 a S2, para diferentes niveles de humedad, tomando en cuenta una salinidad de 0.215 g/L.

| Muestra | Res.100% | Res.50% | Res20% | Res5% |
|---------|----------|---------|--------|-------|
| S1      | 11.4     | 18.9    | 33.2   | 69.6  |
| S2      | 59       | 96.5    | 160    | 300   |
| S4      | 35.7     | 71      | 120    | 250   |
| S5      | 16.5     | 26.3    | 41     | 74.1  |
| S7      | 25.5     | 36.0    | 48     | 91    |

Tomando en cuenta los resultados de la Tablas 6 y 8, así como de la información geológica y de observación en afloramientos, se determina una escala de resistividades eléctrica con fines de diferenciación de litologías presentes y su humedad (ver Fig. 49).

$\rho$ , Ohm.m

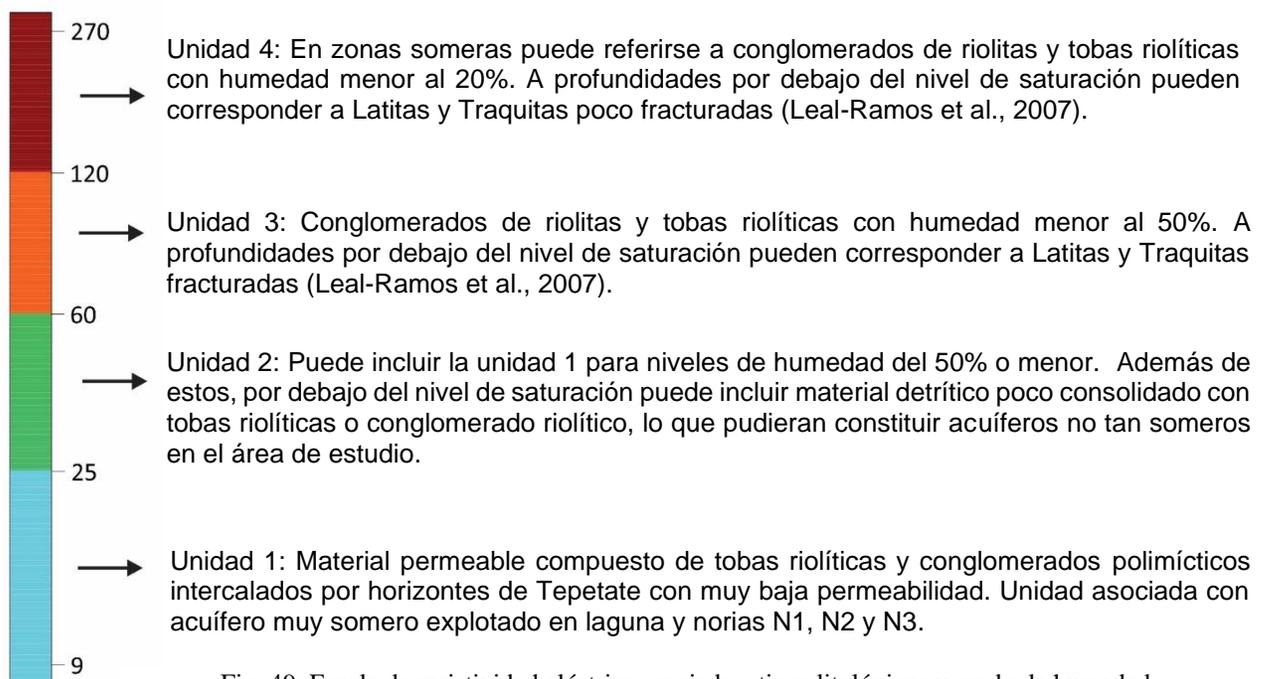


Fig. 49. Escala de resistividad eléctrica asociada a tipos litológicos y grado de humedad.

### 4.3 Resultados de las Tomografías de Resistividad Eléctrica

De acuerdo a la interpretación de los resultados de la magnetometría, los SEV's y la topografía del área de estudio, se decidió realizar tomografías de resistividad eléctrica (TRE) se propusieron 6 puntos viables y accesibles para las TRE (ver Fig. 50).

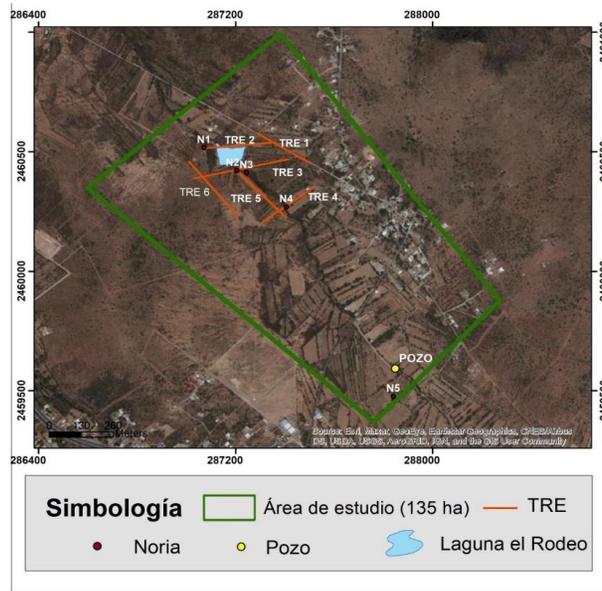


Fig. 50. Tomografías de resistividad eléctrica (TRE) en el área de estudio El Rodeo, Mexquitic de Carmona, S.L.P.

Por medio de las tomografías de resistividad eléctrica TRE realizadas en la localidad el Rodeo, ha sido de gran ayuda para determinar la ubicación, profundidad y espesor del acuífero somero en esta zona, como también distinguir las formaciones geológicas y sus espesores.

#### 4.3.1 Modelos geoelectricos-geológicos

Los resultados obtenidos de los estudios de las TRE se pudo realizar mapas de resistividad, modelos geoelectrico y la interpretación geológica de la zona de estudio.

En la Figura 51, se observan los seis modelos geoelectricos de cada tomografía de resistividad eléctrica realizada, observándose con buena las variaciones de resistividad del subsuelo a diferentes profundidades de estudio, alcanzando una profundidad máxima de 75 m aproximadamente. Algunas norias como la N1, N2, N3,

N4 y la laguna se encuentran ubicadas cercanas a algunos de los perfiles de TRE realizados, las cuales se señalan en los modelos geoelectrico 2, 3, 4 y 5, con su distancia de separación del perfil en cuestión.

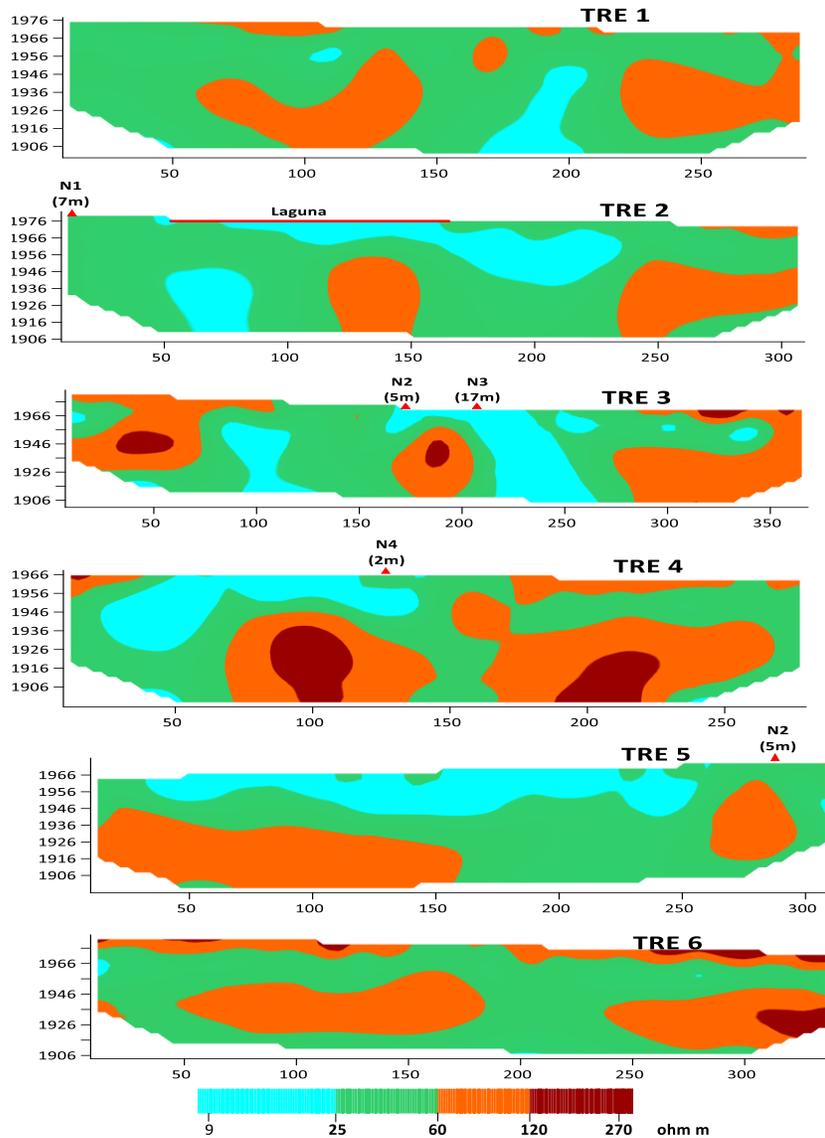


Fig. 51. Modelos geoelectricos de perfiles de tomografía de resistividad eléctrica en el área de estudio (El Rodeo).

El modelo de la TRE1 muestra la no existencia de este cuerpo somero, compuesto de tobas y tepetates saturados ( $\rho < 25 \text{ Ohm.m}$ ), solo pueden observarse estas resistividades en el intervalo 170-205 m del perfil para profundidades mayores a los 25 m. Los perfiles TRE2, TRE3 y TRE4 cruzan más o menos perpendicular el cauce seco y los tres muestran este cuerpo somero de bajas resistividad correspondiente a las

tobas y tepetates saturados. El cuerpo conductor saturado que aflora en la laguna (TRE2, ver Fig.51) se extiende hacia el centro-este del sitio profundizando su techo en un promedio de 10 m. En el perfil TRE3 este cuerpo aflora relacionándose con las norias productivas N2 y N3. Este resultado puede ser importante como criterio para recomendar aumentar la profundidad de ambas norias en al menos 15 m adicionales. La TRE4 muestra este cuerpo somero conductor y propone un aumento de la profundidad de la N4 en al menos 12 m; en estos momentos se encuentra excavada a 11 m de profundidad sin alcanzar el nivel de saturación. La TRE5 cruza de Sur a Norte el área de estudio de TRE, muy próximo y paralelo al cauce seco, mostrando este cuerpo somero saturado hasta una profundidad aproximada de 20 m; en su parte final pasa a 5 m al Oeste de la N2. Por último, la TRE6, orientada de Norte a Sur, se encuentra sobre el flanco Oeste del área de estudios de TRE, no mostrando la presencia de este cuerpo conductor. Cabe recordar que hacia el lado Oeste del cauce seco la topografía asciende más rápidamente evitando la saturación de cuerpos someros.

#### **4.3.2 Mapas de resistividad eléctrica**

En esta etapa se realizó la modelación de mapas de resistividad eléctrica a partir de los datos obtenidos de las TRE, identificando los estratos geológicos del área de estudio, estos cambios van de forma horizontal o lateral a diferentes profundidades.

Para realizar estos mapas de resistividad (ver Fig. 52) se analizó de forma horizontal los cambios laterales geoelectricos por medio de los datos obtenidos de los seis perfiles de TRE con su respectiva escala de elevación sobre nivel del mar. Las profundidades de estudio variaban de acuerdo a la elevación de estos mapas que van en aproximadamente 10 m cada una hasta llegar a los 70 m de profundidad aproximadamente.

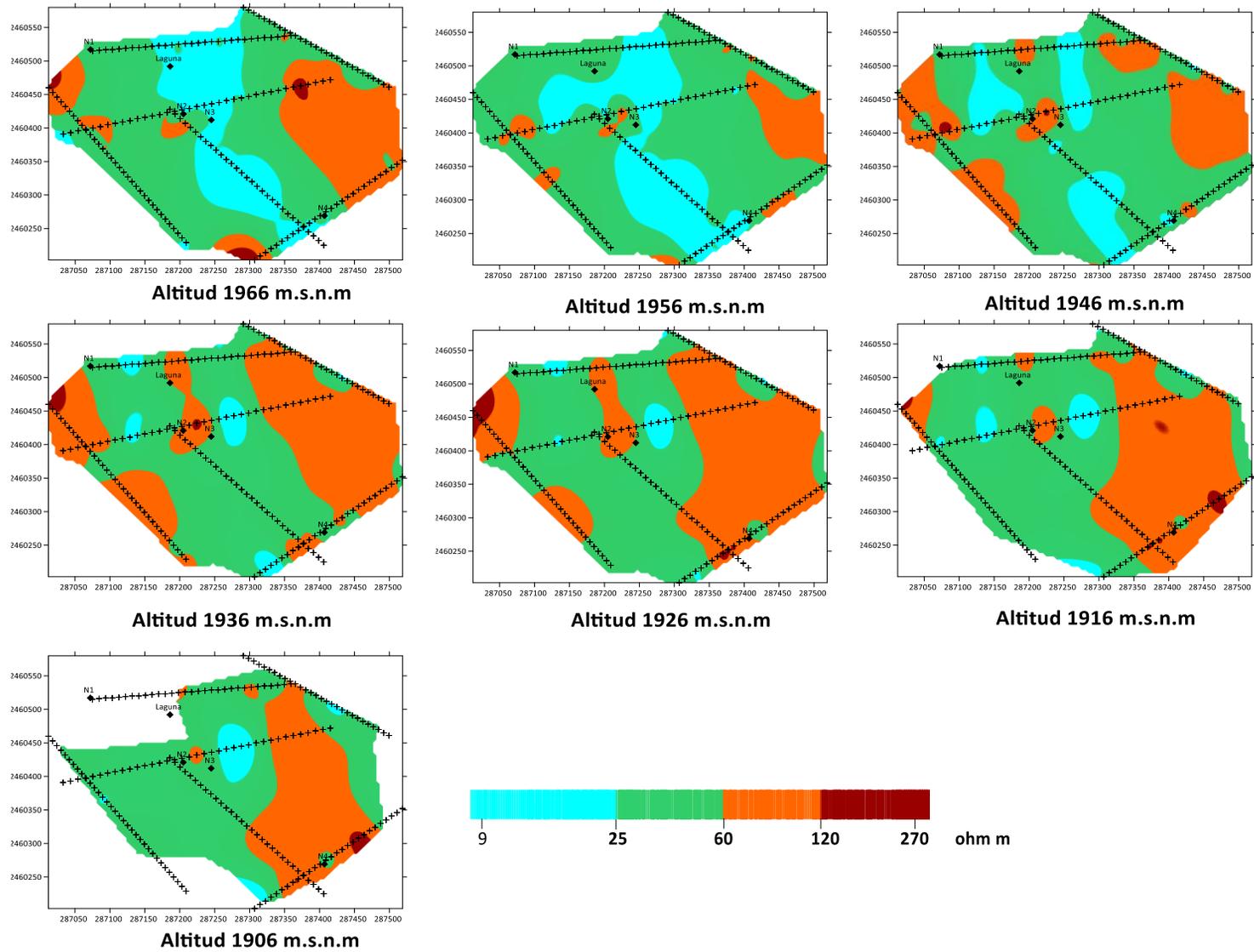


Fig. 52. Mapas geolétrico obtenidos de los modelos de las tomografías de resistividad eléctrica.

En la Fig. 52 se observan los mapas en forma de superficies con cotas en m.s.n.m, visualizando el comportamiento geoeléctrico que tiene cada uno de ellos. Para la primera y segunda cotas, 1966 y 1956 m.s.n.m., se puede observar este cuerpo conductor, mostrado en las secciones, extendiéndose de Norte a Sur, tomando como eje el cauce seco, lo que asegura un espesor promedio de 20 m sin interrupciones, alcanzando la porción Sur del área estudiada con TRE (ver Fig. 52). Recordemos que la topografía puede jugar un papel controlador de los niveles de humedad en estos materiales superficiales tales como tobas y tepetates.

En la Fig. 53 se muestra un esquema generalizado de este acuífero somero.

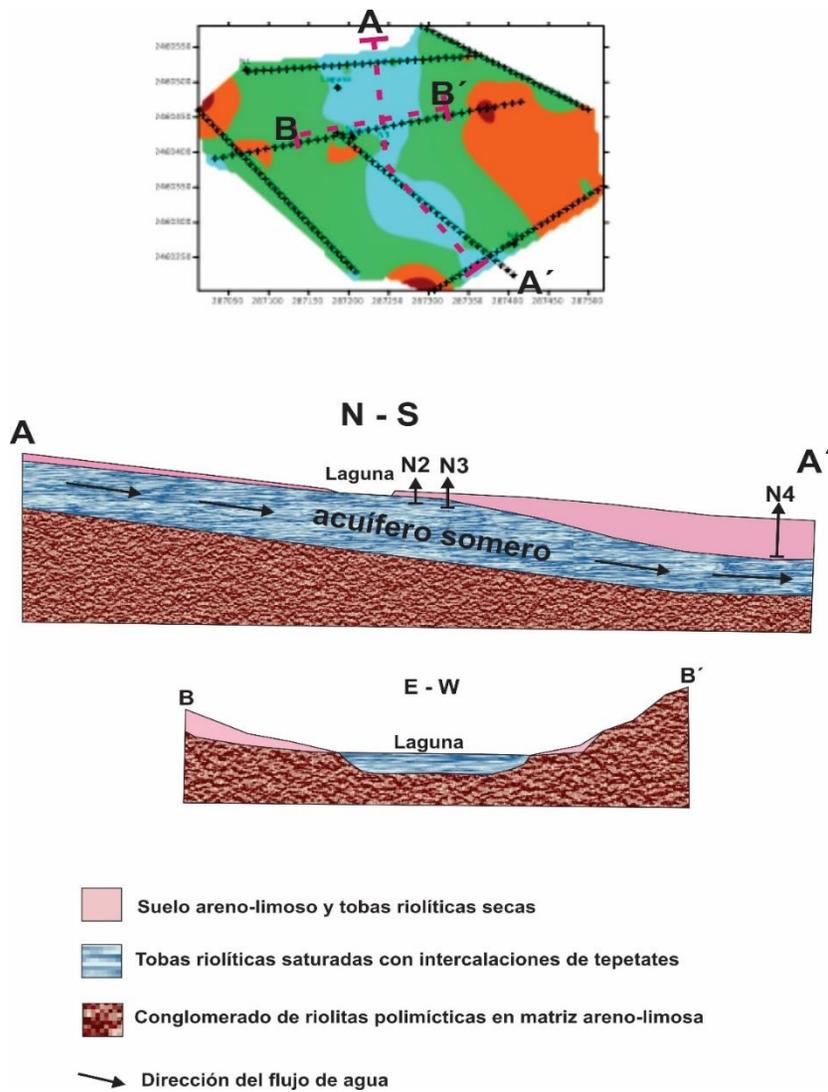


Fig. 53. Modelo esquemático del acuífero somero en la zona de estudio.

A partir de la cota 1946 m.s.n.m. y hasta 1936 m.s.n.m., este cuerpo va desapareciendo de manera discontinua, lo que significa que solo en pequeñas zonas puede profundizar hasta los 70 m de profundidad.

## 4.2 Resultados de Sondeos Eléctricos Verticales

En este apartado se muestran los ocho sondeos eléctricos verticales que se realizaron en el área de estudio. En la Fig. 55 se observa los ocho SEV's que se realizaron, de acuerdo al orden de los SEV's 4, 1, 2, 3 y 5 conformando una línea de dirección de N-S, mientras que los SEV's 8, 7, 2 y 6 con dirección de W-E. La ubicación de los SEV, así como la orientación de las líneas de corriente fueron elegidas de acuerdo al nivel de acceso al cada punto centro de SEV (ver Fig. 54) y de acuerdo a los resultados obtenidos en la magnetometría. También se muestran dos SEV adicionales ubicados en la laguna y pozo profundo del poblado El Rodeo, respectivamente.

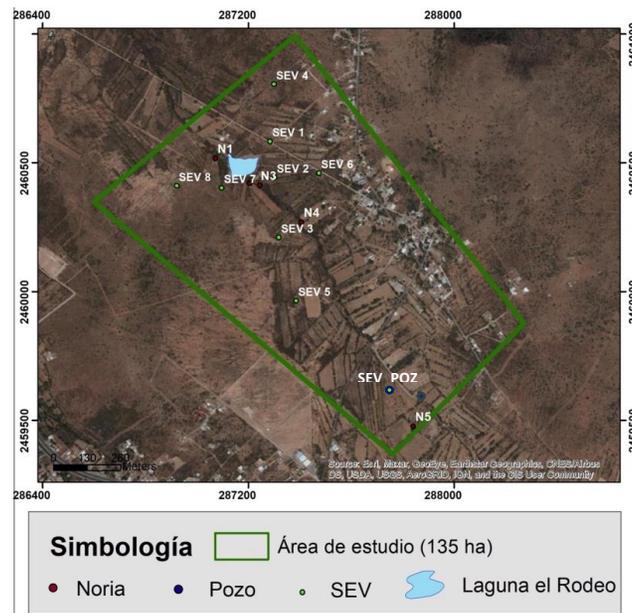


Fig. 54. Muestran los 8 sondeos eléctricos verticales que se realizaron en el área de estudio (El Rodeo).

En la Figura 55, se observan los diferentes sondeos eléctricos verticales (5 SEV's) que se realizaron en la zona de estudio pertenecientes a la sección 2 con dirección de N-S, la orientación de estos SEV's varían de acuerdo a la accesibilidad al punto de cada

SEV's. En esta misma sección se muestra diferentes curvas como son: SEV 4 muestra una curva KHKQ, SEV 1 KQQ, SEV 2 KQQ, SEV 3 KHKQ y SEV 5 KHKQ. En los primeros metros de profundidad (0.5 a 2 m) en estos SEV's se obtuvieron resistividades que van desde los 10 a 40 Ohm.m, y de acuerdo con el Servicio Geológico Mexicano se consideran rocas sedimentarias como son arenas - limo.

La Fig. 56, observamos los sondeos eléctricos verticales pertenecientes a la sección 1 con dirección de W-E, en esta sección se presenta de nuevo el SEV 2. De la misma forma se presentan las diferentes curvas obtenidas en los SEV's: SEV 8 QHKQ, SEV 7 QQHKQ, SEV 2 KQQ y SEV 6 QKQ. En estos SEV's a partir de 1 a 5 m de profundidad se obtuvieron resistividades variantes que van desde los 100 – 800 Ohm.m, el material rocoso presente son rocas ígneas como la riolita, traquita y conglomerados.

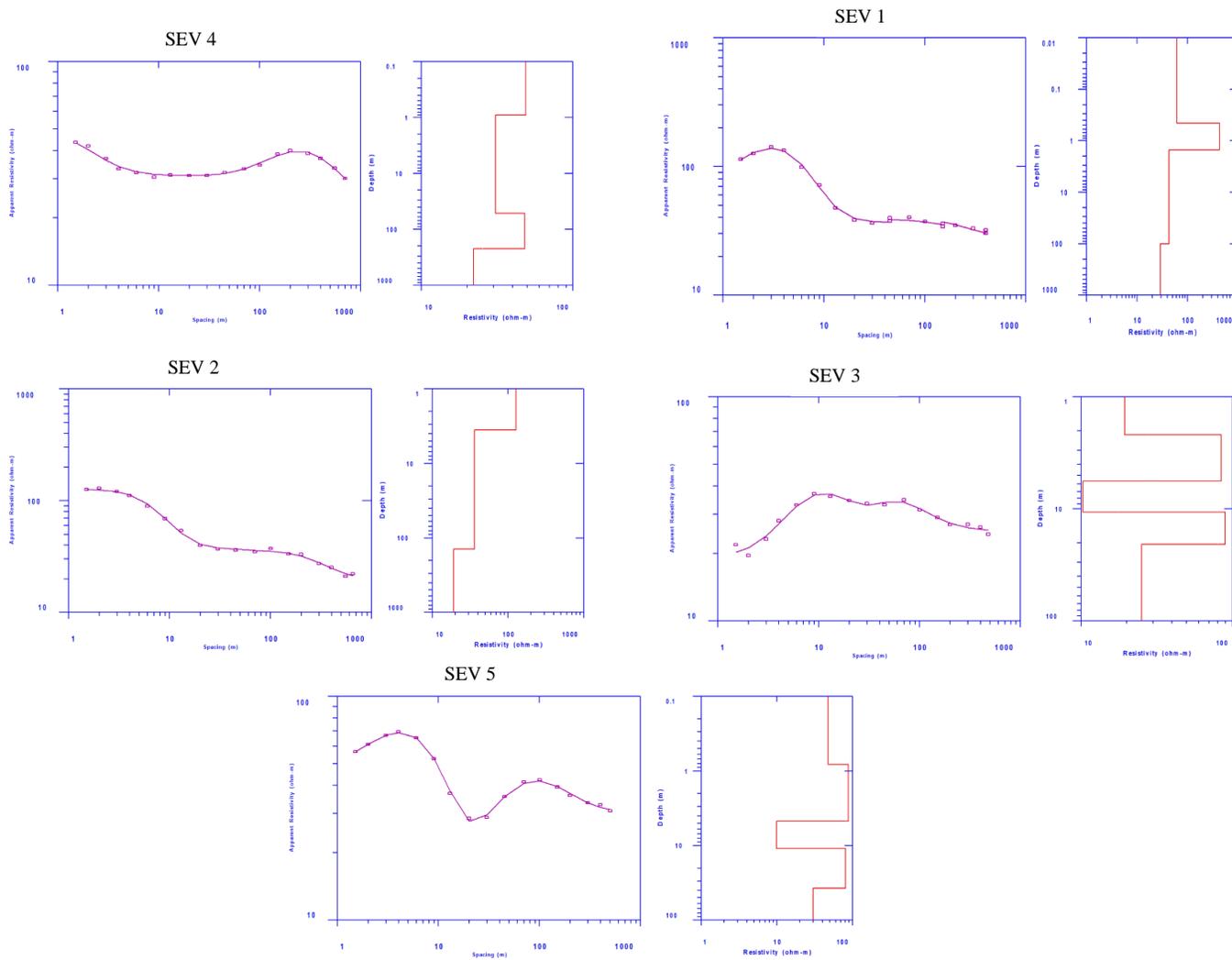


Fig. 55. Sondeos eléctricos verticales pertenecientes a la sección 2 con dirección de N-S, SEV 4, SEV 1, SEV 2, SEV 3 y SEV 5.

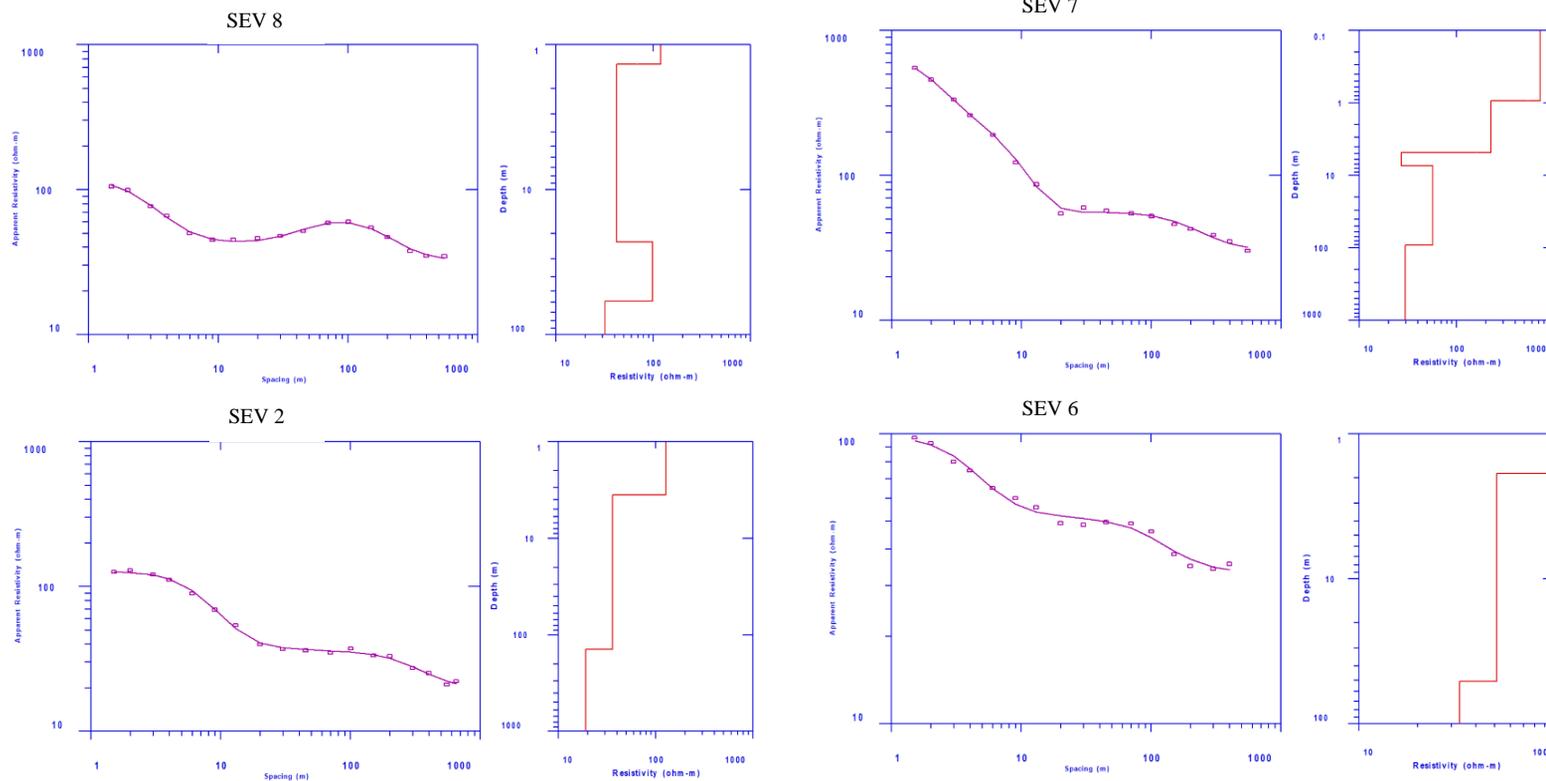


Fig. 56. Sondeos eléctricos verticales pertenecientes a la sección 1 con dirección de W-E, SEV 8, SEV 7, SEV 2 y SEV 6.

### 4.2.1 Secciones de los Sondeos Eléctricos Verticales

Los ocho SEV's realizados en El Rodeo se ubicaron de manera tal que pudiera generar dos secciones, con los cuales se identificó la distribución litológica en la zona de estudio.

En la Figura 57 se muestra la distribución estadística de valores de resistividad aparente de los SEV's realizados formando las dos secciones de W-E y N-S, la escala de color que se muestra es la frecuencia de ocurrencia de los datos por cada  $AB/2$ . Los colores de la escala en naranja y rojo son los datos que se repiten en un rango estrecho de valores (entre 22 y 50%), la línea discontinua que se observa en la figura es la curva promedio de los SEV de siete capas tipo QHKHK, describe las unidades principales y sus rangos de valores, observándose en general un predominio de capas resistividad en la primera rama de la curva de resistividades aparente, mientras que la segunda rama marca que la parte más profunda del corte, aproximadamente después de los 12 m de profundidad, predominan los estratos conductores, esto tal vez por sobrepasar el nivel de saturación.

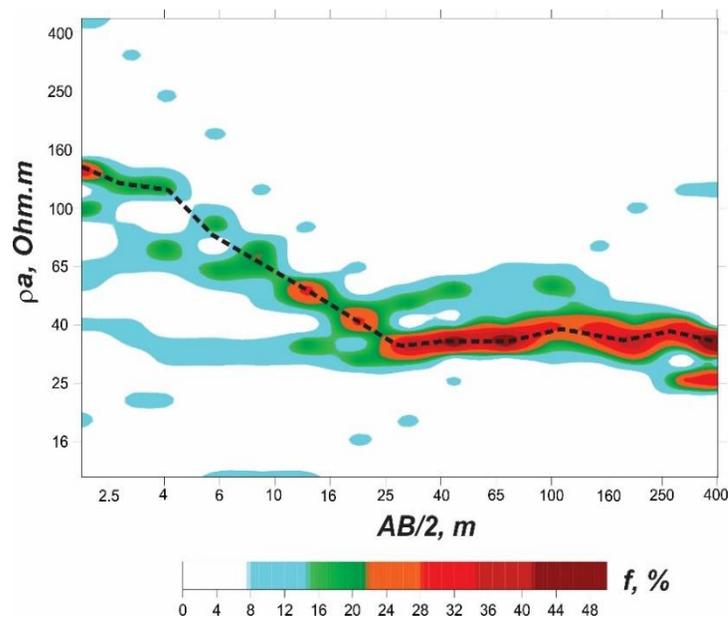


Fig. 57. Distribución estadística de valores de resistividad aparente medidos en los 8 SEV's que conforman los perfiles E-W y N-S.

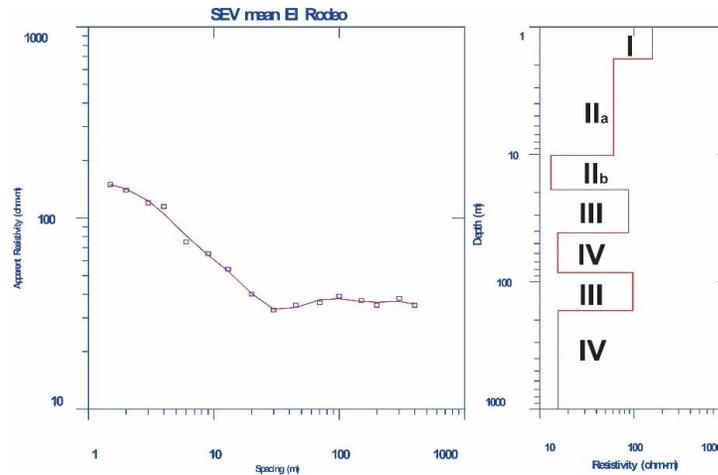


Fig. 58. Se muestra la curva representativa de los 8 SEV's de acuerdo a la distribución estadística de los valores de resistividad aparente y el modelo 1D resultante.

Este SEV promedio es interpretado con ayuda del programa IX1D (ver Fig. 58), obteniéndose el modelo 1D, cuyas resistividades y espesores se muestran en la Tabla 9 en relación a las litologías existentes en el sitio y los resultados de la Tabla 8.

Tabla 9. Sondeos Eléctricos Verticales en la zona central del área de estudio.

| Unidad | Resistividad (Ohm.m) | Descripción   |
|--------|----------------------|---|
| I      | 100-200              | Se presentan de manera superficial a un espesor aproximado de 1 m. Este cuerpo superficial resistivo representa al suelo limo-arenoso típico de esta región, en este caso seco, dado la época del año en que se realizaron los SEV.   |
| IIa    | 50-70                | De acuerdo a información geológica local, se infiere la presencia de material aluvial en forma de conglomerados con matriz areno-limosa, con espesores promedios de 10 m, dado por presencia de material areno-limoso de muy baja humedad. Variaciones de valores de resistividad pueden estar asociados a la mayor presencia de material fino, fundamentalmente limos. |
| IIb    | 25-60                | Sedimentos aluviales saturados tipo conglomerados con matriz areno-limosa con espesores variables entre 9 y 10 m. La salinidad promedio del agua subterránea local es de 0.21 g/L, lo que puede producir estos valores  |

de resistividad eléctricas en litologías tales como tobas riolíticas y tepetates saturados, pudiendo representar en algunos casos la presencia de este acuífero somero para los SEV realizados próximo al cauce seco.

|     |        |  |
|-----|--------|--|
| III | 80-100 | Tomando en cuenta la información geológica local, este valor de resistividad, por debajo del nivel de saturación, Ignimbritas riolíticas fracturadas, tobas riolíticas y latitas. En el caso de las tobas riolíticas, éstas pueden funcionar como acuífero debido a sus valores considerables de conductividad hidráulica. |
| IV  | 15-25  | Se presentan a profundidades mayores a los 40 m y se asumen corresponda a conglomerados polimícticos saturados del Terciario de matriz arcillosa.  |

Se realizó un SEV adicional (ver Fig. 59) con centro a una distancia de 30 m aproximadamente del pozo del pueblo (no se incluyó dentro de las secciones N-S y W-E), con el objetivo de poder visualizar las resistividades y espesores de los estratos cercano al pozo del pueblo. La abertura máxima de AB/2 fue de 920 m, teniendo una profundidad máxima de estudio aproximadamente de 450 m.

En la Figura 60, se observa que la curva de resistividad aparente de 6 capas (tipo QHAK) obtenida próxima al pozo es bastante similar a la curva promedio obtenida de los análisis estadísticos que incluye a los ocho SEV. Este resultado propone que la discontinuidad en el cuerpo somero conductor mostrado en los mapas de CMR-RP, tanto aéreo como terrestre, no implica cambios sustanciales en la litología a profundidades mayores a los 20 m.

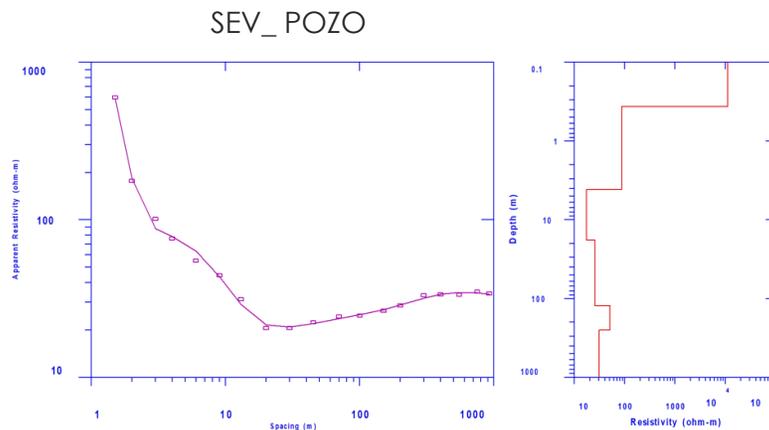


Fig. 59. SEV del pozo El Rodeo, Mexquitic de Carmona, S.L.P.

## 4.2.2 Sección 1

La sección 1 es integrada por los SEV's 8, 7, 2 y 6 con dirección de W-E es mostrada en la Fig. 60 muestra un modelo geoelectrico con tres capas geoelectricas fundamentales. Los valores de resistividad que se reportan en un rango de 120 a 100 Ohm.m (toba riolítica) se observan en la parte superficial de esta sección (SEV 7). En los SEV's 2, 6 y 7 se observan superficialmente valores de resistividad entre 60 a 100 Ohm.m. El espesor de esta capa resistiva varía a lo largo de la sección. Tomando como más confiable los espesores en los puntos de SEV (evitando errores por interpolación), la profundidad máxima de esta capa resistiva superficial es de aproximadamente 30 m, disminuyendo hasta llegar al SEV 6. Recordemos que la alta heterogeneidad geológica del sitio de estudio no se refleja en un modelo 1D dado por SEV. Esta capa resistiva muestra la influencia de los materiales detríticos no saturado por encima del cuerpo conductor saturado definido en los modelos 2D de las TRE. Las zonas con resistividades de 25 a 60 Ohm.m se observa espesores de hasta 150 m de profundidad (ver Fig. 60), y pueden corresponder por encima del nivel de saturación a conglomerados o tobas, mientras que debajo del nivel de saturación pueden corresponder a conglomerados de riolitas, abundantes en la zona de estudio.

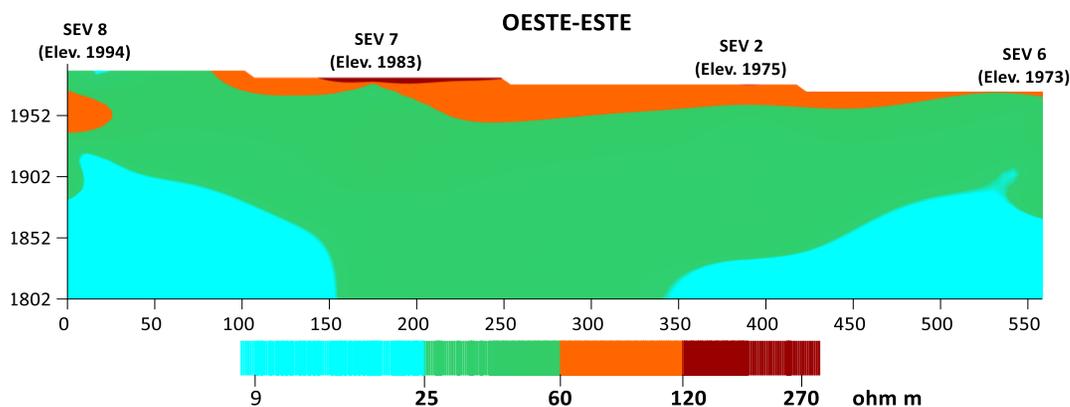


Fig. 60. Sección 1 (Modelo geoelectrico).

## 4.2.3 Sección 2

Esta sección 2 la integran los SEV's 4, 1, 2, 3 y 5 con dirección de N-S. En la Fig. 61 se observa la interpolación correspondiente a esta sección 2, con bastante similitud con la sección 1 (Fig. 60). El material resistivo superficial de 60 a 100 Ohm.m (presencia de la toba riolítica, tepetate o conglomerados no saturados) alcanzan aproximadamente un espesor de 6 m de profundidad en el SEV 1 y 2. Al igual que la sección 1, se observa el material semi conductor con resistividades entre 25 a 60 Ohm.m, en algunos SEV desde la superficie, alcanzando espesores mayor a los 150 m entre el SEV 4 y 1, mientras que en los SEV 2, 3 y 5 este espesor disminuye entre 50 a 80 m, alcanzando a otro cuerpo aún más conductor debido a aumento del contenido de arcilla, dado por la presencia de la formación Caracol.

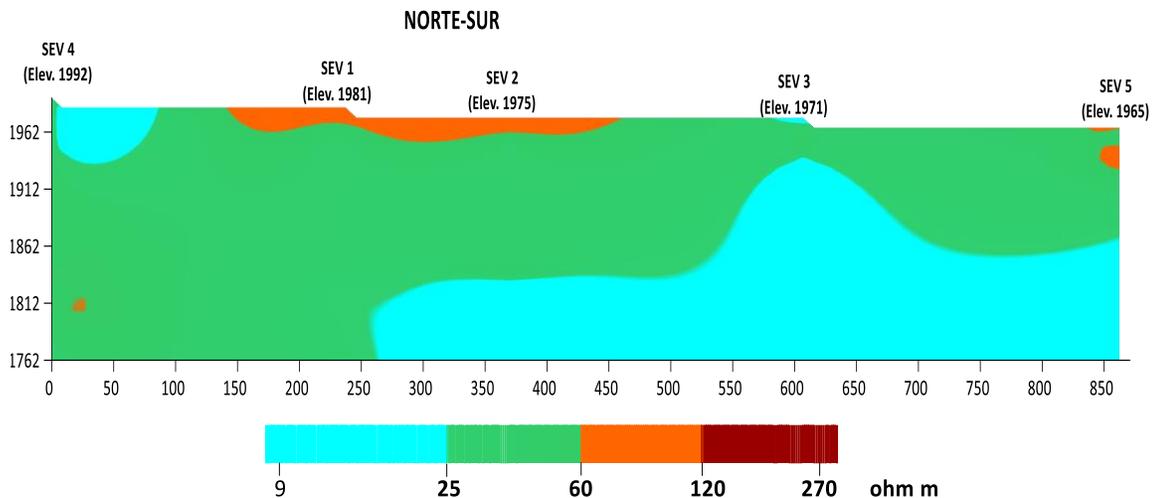


Fig. 61. Sección 2 (Modelo geoeléctrico).

## Conclusiones

La zona de estudio en donde se ubica la comunidad El Rodeo, muestra un panorama litológico somero muy variado, incluyendo presencia fundamentalmente de conglomerados de riolitas polimícticas, tobas riolíticas y tepetates. En el caso de las tobas riolíticas y los tepetates, éstos conforman una unidad somera en la parte centro-norte del área de estudio, el cual, auxiliado por la topografía local, conforma

un acuífero somero libre hasta al menos 20 m de profundidad en dirección Norte-Sur (aguas abajo), hasta la zona central del área de estudio, teniendo como eje el cauce seco de un antiguo arroyo intermitente. Este acuífero somero alimenta actualmente a tres norias y una laguna artificial, siendo insuficiente para la demanda de agua de uso agropecuario.

Debido a la presencia de arcilla y en particular de óxido de hierro, este acuífero somero se manifiesta como anomalía positiva en el CMR-RP y Señal Analítica, dentro de un medio encajante formado principalmente por conglomerados de riolitas polimícticas en matriz areno-limosa.

Mediciones eléctricas realizadas laboratorio en muestras agua subterránea y de material poco consolidado y el uso del programa PetroWin, permitieron estimar el comportamiento geoeléctrico de aquellas litologías presentes en el acuífero para diferentes niveles de humedad, lo que, junto a la información geológica local, hizo posible generar una escala que permitiera interpretar los estudios geoeléctricos en términos litológicos y de humedad. Las secciones y mapas geoeléctricos resultantes del levantamiento de TRE muestran este cuerpo como conductor (8 – 25 Ohm.m) y proponen una estrategia de ampliación de profundidad de las norias N2 y N3 para un mejor aprovechamiento de las mismas, así como la perforación de una nueva noria en la parte norte del área de estudio.

Los resultados del estudio magnetométricos mostraron que este acuífero somero no tiene continuidad hacia la porción Sur del área de estudio donde se encuentra el único pozo profundo y que abastece seis comunidades de la región. Los resultados del levantamiento de SEV en dos secciones (N-S y E-W), fueron utilizados para proponer una subzona de aproximadamente 14,000 m<sup>2</sup>, como la de mejor perspectiva para la perforación de un pozo profundo; sin embargo, futuros estudios geoeléctricos hasta una profundidad de 400 m son necesarios para proyectar la perforación de un pozo de 350 m de profundidad que garantice un mejor abastecimiento de agua para el consumo humano a las seis comunidades (incluyendo El Rodeo) dependientes del pozo actual en operación.

## Propuesta

Profundizar la perforación de las norias productivas N2 y N3 aproximadamente 15 m adicionales en cada una de manera de dar un mayor aprovechamiento de las mismas, mientras que la N4 (actualmente seca) debe incrementar su perforación en 10 m, alcanzando así los 21 m de profundidad para garantizar un tirante de agua promedio de 6 m (en dependencia de la estación del año). Se propone la perforación de una nueva noria dentro de un área rectangular de 8,000 m<sup>2</sup> con centro en UTM X=287081, Y=2460583. Estas norias, por sus cercanías a las parcelas agrícolas e invernaderos, serán un catalizador importante para la producción agrícola administrada por el Grupo de Mujeres Emprendedoras del Mexquitic con, no solo impacto económico, sino social, al permitir incrementar el número de invernaderos y empleos locales (ver Fig. 63).

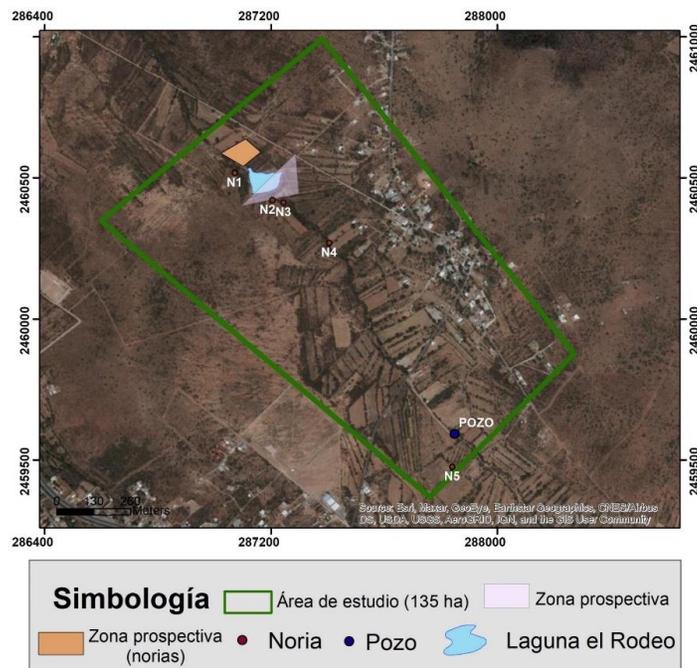


Fig. 62. Mapa con propuesta para la perforación de una noria en la comunidad El Rodeo, Mexquitic de Carmona.

## **Recomendaciones**

Se recomienda en un futuro cercano, realizar estudios geoelectricos más profundos (estudios de 400 m de profundidad máxima) que incluya la subzona de mayor perspectiva definida por el levantamiento de SEV, utilizando el método TEM (menos afectado en comparación de los SEV por nivel de acceso) para obtener un modelo geoelectrico que incluya el acuífero profundo, siendo posible proponer la perforación de un pozo de 350 m de profundidad que ayude a mitigar la necesidad de agua para consumo humano a las seis comunidades (incluyendo El Rodeo), ahora abastecida de manera insuficiente por el pozo en operación.

## Bibliografía

- Aguillón-Robles, A., Tristán-González, M., López-Doncel, R. A., Elena, M., García-Arreola, Almaguer-Rodríguez, J. D. L., & Maury, R. C. (2012). Trace elements geochemistry and origin of volcanic units from the San Luis Potosí and Río Santa María volcanic fields, Mexico: the bearing of ICP-QMS data. *Geofísica Internacional*, 51(3), 293–308.
- Almaguer-Rodríguez, J. de L. (2010). *Estudio geoquímico de elementos traza en unidades volcánicas del CVSLP: método ICP-MS (validación del método)* [Universidad Autónoma de San Luis Potosí].  
<http://ninive.uaslp.mx/jspui/handle/i/2397>
- Arias Cáceres, J. (2015). *Determinación de la anomalía de bouguer para una zona de Canadá*. (Issue November) [Universidad Distrital Francisco José de Caldas]. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.5032.5840>
- Arias Jiménez, A. C. (2001). *Suelos Tropicales*. Euned.
- Auge, M. (2008). Métodos Geoeléctricos para la Prospección de Agua Subterránea. *Universidad de Buenos Aires*, 30.
- Baranov, V., & Naudy, H. (1964). Numerical calculation of the formula of reduction to the magnetic pole. *Geophysics*, 29, 67–79.
- Barboza-gudiño, J. R., Hoppe, M., Gómez-Anguiado, M., & Martínez-Macías, P. R. (2004). Aportaciones para la interpretación estratigráfica y estructural de la porción noroccidental de la Sierra de Catorce , San Luis Potosí , México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 21(3), 299–319.
- Blakely, R. J. (1995). *Potential Theory in Gravity and Magnetic Applications*. Cambridge University Press.
- Bobachev, A. , Modin, I. , & Shevnin, V. . (2003). *IPI2Win Versión 3.01*.
- Butler, R. F. (1992). Paelomagnetism:Magnetic domains to geologic terranes. *Scientific Publications Boston*, 319.
- Caballero, M. (2011). *La fábrica magnética a partir de la anisotropía de susceptibilidad magnética (AMS): sus bases generales y ejemplos como auxiliar para determinar direcciones, fuentes dinámicas y de flujo*. Universidad

- Autonoma de México.
- Cantos Figeroa, J. (1973). *Tratado de geofísica Aplicada* (S. de P. de la E. T. S. de I. de Minas (ed.); 2da ed.).
- Carrillo-Bravo, J. (1982). Exploración petrolera de la cuenta mesozoica del centro de México. *Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros v. XXXIV, 1*, 21–46.
- Carrizales Aguilar, A., Loaeza García, J. P., Zárate Barradas, R. G., Rodríguez Castro, M. G., Martín Rodríguez, L., Aranda Osorio, J., & Lemus Bustos, O. (2001). Carta geológica-minera Ciudad Victoria F14-2 Escala 1:250 000 Estado de Tamaulipas. *Consejo de Recursos Minerales*, 63.
- CONAGUA. (1999). *Título de Concesión*.
- CONAGUA. (2000). Manual de difusión y divulgación sobre temas selectos de agua subterránea “conceptos básicos de hidrogeología” Parte I. *CONAGUA*, 39.
- CONAGUA. (2015). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Huásabas (2653), Estado de Sonora. *DOF*, 30.
- CONAGUA. (2018). Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero San Luis Potosí, S.L.P. *DOF*, 1, 32.
- Cortés, E. M. G. (2015). *Estudio matemático de suspensiones coloidales*. Lulu.com. <https://books.google.com.mx/books?id=jPLDCQAAQBAJ>
- Cuevas Medina, A., & Fernando, G. L. (2017). Prospección de acuíferos a través de las tomografías de resistividad eléctrica (tre), en el departamento norte de santander. para la perforación de pozos profundos como alternativas de riego. *Independiente*, 14.
- DeLaCalleja Moctezuma, A. E. (2014). *Análisis estructural de la porción noroccidental del graben de bledos* [Universidad Autónoma de San Luis Potosí]. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2018.03.005>
- El, P. (1972). *Cap 1: Propiedades eléctricas de las rocas*. 5–15.
- España Bernardino, J. M. (2017). *Análisis Aeromagnético del complejo dómico “Las Derrumbadas”, en el estado de Puebla*. Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica A.C.
- Estrada, L. A. (2013). *Apuntes de Prospección geoeléctrica*. Universidad nacional

de Tucuman.

- Figuera Martínez, M. (2010). *Métodos geofísicos aplicados en la exploración del agua subterránea, caso: acuífero de Villa Hidalgo, S.L.P.* Instituto Potosino De Investigación Científica Y Tecnológica, A.C.
- G., M., J., W., Mountney, N. P., & M., W. (2019). Permeability of rock discontinuities and faults in the Triassic Sherwood Sandstone Group (UK): insights for management of fluvio-aeolian aquifers worldwide. *Hydrogeology*.
- Galván Pineda, J. (2016). *Métodos potenciales y electromagnéticos aplicados a la modelación bidimensional del volcán tipo maar "La Joyuela", San Luis Potosí, México.* Instituto Potosino De Investigación Científica Y Tecnológica, A.C.
- Geosoft, I. (2015a). *Oasis Montaj versión 8.4.*
- Geosoft, I. (2015b). *This topic was last modified: Version 5.1.7 (2003-03-05).*
- Geotomo software, M. (2006). *Res2dinv Versión 3.55.*
- Gobierno del Estado. (2009). Monografías de los municipios de México: Mexquitic de carmona, S.L.P. *Coordinación Estatal Para El Fortalecimiento Institucional de Los Municipios*, 63.
- Golden. (2018). Surfer® v. 15.5.382 (Powerful Contouring, Gridding, & 3D Surface Mapping Software). In *Golden-Software*.
- Gonzalez Arrollo, A., & Salas Vazquez, G. (1996). *Estudio Geologico Integral a Semidetalle de la Asignación Minera Santa Isabel, Municipio de Mazapil, Estado de Zacatecas, Tomo 1.* Secretaria de comercio y fomento industrial.
- H. Ayuntamiento de Mexquitic de Carmona, S. L. P. (1999). Plan de desarrollo urbano del centro de población de Mexquitic de Carmona, S.L.P. *Gobierno Del Estado*, 103.
- Henderson, R., & Zierz, I. (1949). The upward continuation of anomalies in total magnetic intensity field. *Geophysics*, 14, 508–516.
- Hernández López, Á. (2017). *Métodos Geofísicos para la Determinación de Características de Acuíferos para su Recarga Artificial mediante Lagunas de Infiltración.* Universidad nacional autónoma de México.
- Iakubovskii, I. V., & Liajov, L. L. (1980). *Exploración eléctrica.* Reverté.  
<https://books.google.com.mx/books?id=EF3iQ4bpNH4C>

- 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 America*, 47, 1091–1152.
- Imlay, R. W. (1938). Studies for the Mexican geosyncline. *Geological Society of America*, 49, 1651–1694.
- INEGI. (2002). Estudio Hidrológico del Estado de San Luis Potosí. In *Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática*.
- INEGI. (2009). Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos: Mexquitic de Carmona, San Luis Potosí. *INEGI*, 9.
- INTERPEX. (2002). *IX1D Versión 2.06*.
- Jiménez Ramírez, M. L. (2009). *Turismo rural y de naturaleza como una alternativa de sustentabilidad en Mexquitic de Carmona, San Luis Potosí*. Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- Keller, G. V. & Frischknecht, F. C. (1966). *Electrical methods in geophysical prospecting*.
- Labarthe-Hernandez, G., Tristian.González, M., & Aranda-Gómez, J. J. (1982). Revisión estratigráfica del Cenozoico de la parte central del estado de San Luis Potosí. *Universidad Autónoma de San Luis Potosí*, 85.
- Lachassagne, P., Wyns, R., & B., D. (2011). The fracture permeability of Hard Rock Aquifers is due neither tectonics, nor to unloading, but to weathering processes. *Terra Nova*, 23(3), 145–161.
- Lanza, R., & Meloni, A. (2006). The Earth's magnetism, An introduction for geologists. *Springer*.
- Logachev, A. A., & Zajarov, V. P. (1977). *Exploración magnética*. Reverté.  
<https://books.google.com.mx/books?id=WrvHvfU40qAgC>
- Loke, M. H., & Barker, R. D. (1996). Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method. *Geophysical Prospecting*, 131–152.
- Longo, L. M. (2017). *Caracterización de la estructura del complejo volcánico AUCA Mahuida mediante datos aeromagnéticos y Gravimétricos*.
- Longo Mariana, L. (2017). *Caracterización de la estructura del complejo volcánico*

- Auca Mahuida mediante datos aeromagnéticos y gravimétricos*. Univesidad nacional de la plata.
- López-Loera, H. (2014). Geofísica para la localización de Agua Subterránea en Ambientes Volcánicos áridos de la Mesa Central. Caso La Dulcita, Villa de Ramos, San Luis Potosí, México. *Boletín de La Sociedad Geológica Mexicana*, 66(1), 165–181. <https://doi.org/10.18268/bsgm2014v66n1a12>
- López Álvarez, B. (2012). *Cambios de uso de suelo y su impacto en el sistema acuífero del valle de San Luis Potosí, aplicando modelación numérica*. Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica A.C.
- Marion, D., Nur, A., Yin, H., & Han, D. (1992). Compressional velocity and porosity in sand-clay mixtures. *Geophysics*, 57, 554–563.
- Márquez, R. G. (1990). *LA PUESTA A TIERRA DE INSTALACIONES ELÉCTRICAS Y EL R.A.T.* Marcombo.  
<https://books.google.com.mx/books?id=iQ8iYy7RT4gC>
- Medina, L. N. (2012). *Modelo de fuentes de anomalías Geomagnéticas de Campo Total asociadas al estado de la cámara magmática del volcán Galeras*.
- Muñoz González, C. (2005). *Evaluación de movimientos del subsuelo en San Luis Potosí mediante métodos de sistemas de posicionamiento global (G.P.S. diferencial) y gravimetría*. Instituto Potosino De Investigación Científica Y Tecnológica, A.C.
- Nabighian, M. N. (1974). Additional comments on the analytic of two dimensional magnetic bodies with polygonal cross - section. *Geophysics*, 39, 85–92.
- Ocampo-Díaz, Y. Z. E., Pinzon-Sotelo, M. P., Chávez-Cabello, G., Ramírez-Díaz, A., Martínez-Paco, M., Velasco-Tapia, F., Guerrero-Suastegui, M., & Barboza-Gudiño, J. R. (2016). Propuesta nomenclatural y análisis de procedencia de la Formación Concepción del Oro (antes Formación Caracol): Implicaciones sobre la evolución tectónica del sur de Norteamérica durante el Cretácico Tardío. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 33(1), 3–33.
- Orellana, E. (1982). Prospección geoelectrica en corriente continua. In *Paraninfo* (2da ed.).
- Orozco-Centeno, W. P., Branch Bedoya, J. W., & Jiménez-Builes, J. A. (2014).

- Classification of fine-grained igneous, sedimentary and metamorphic rocks through structured programming. *Boletín de Ciencias de La Tierra*, 36, 5–9. <https://doi.org/10.15446/rbct.n36.44037>
- Ospina, G. M., Velásquez, J. A. V, Agudelo, C. A. C., & Acevedo, W. M. V. (2007). *Fundamentos e ingeniería de las puestas a tierra: Respuestas ante fallas eléctricas y rayos*. Universidad de Antioquia. [https://books.google.com.mx/books?id=0\\_lfdN3rHNsC](https://books.google.com.mx/books?id=0_lfdN3rHNsC)
- Pérez Arencibia, J. C., & DeLaNuez, J. (1990). Estudio de los materiales vitrocerámicos obtenidos a partir de la fusión de rocas volcánicas sálicas. *Boletín de La Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 29(1), 29–31.
- Pérez Hernández, K. de J. (2019). *Estudio geofísico para la prospección de fuentes alternativas de agua libre de arsénico en el área de cerrito blanco, Matehuala, SLP*. Instituto Potosino De Investigación Científica Y Tecnológica, A.C.
- Pérez Orrego, C. E. (2017). *Modelamiento e interpretación de datos magnéticos y gravimétricos en la caracterización de un depósito tipo IOCG*. Universidad de Chile.
- Porres Benito, J. Á. (2003). *Caracterización de cavidades en el subsuelo mediante la interpretación de perfiles de tomografía eléctrica. Aplicación al yacimiento arqueológico de Clunia*. Escuela politécnica superior.
- Ramírez Díaz, A. (2012). *Estudio geológico - estructural del anticlinal la caja (área bonanza – providencia), sierra madre oriental, NE de zacatecas*. Universidad autónoma de Nuevo León.
- Reeves, C. (2005). *Aeromagnetic Surveys, Principles, Practice y Interpretation. Geosoft Earthworks*.
- Revil, A., Grauls, D., & Brévar, O. (2002). Mechanical compaction of sand/clay mixtures. *Journal of Geophysical Research*, 107, 2293. <https://doi.org/10.1029/2001JB000318>
- Rodríguez-Ríos, R., Tristán-González, M., & Aguillón-Robles, A. (2013). Estructura y geoquímica de un grupo de domos dacíticos del norponiente del campo volcánico de San Luis Potosí, México C i e n A ñ o s. In *S.L.P* (Vol. 65, Issue

1).

- Rodríguez León, L. (2012). *Evolución geológica del campo volcánico salinas – villa de ramos*. Universidad autónoma de San Luis Potosí.
- Rylov, A., & Shevnin, V. (2002). Theoretical calculation of rocks electrical resistivity and some examples of algorithm's application. *Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems (SAGEEP)2*, P2--10.
- Rylov, A., & Sudoplatov, A. D. (1990). The calculation of specific electrical conductivity for sandy - clayed rocks and the usage of functional cross-plots for the decision of hydro-geological problems. *Scientific and Technical Achievements and Advanced Experience in the Field of Geology and Mineral Deposits Research*, 27–41.
- Santiago Carrasco, B. (2012). *Estudio hidrogeológico de la región agua nueva, estado de Coahuila*. Universidad autónoma de Nuevo León.
- Servicio Geológico Mexicano. (1995). *Carta magnética de campo total, escala 1:50,000, F14-A83*.
- SGM. (2006). Inventario físico de los recursos minerales, municipio Mexquitic de Carmona, S.L.P. *Gobierno Del Estado*, 98.
- SGM. (2007). Carta geológica-minera F14-A83. *Servicio Geológico Mexicano*.
- Shevnin, V., KVON, D. A., & RYZHOV, A. (2017). Petrophysical Approach to Electrical Properties of Loose Soils. *Journal of Mining Institute*, 226, 397–404.
- Shevnin, V., Mousatov, A., Rylov, A., & Delgado-Rodríguez, O. (2007). Estimation of clay content in soil based on resistivity modeling and laboratory measurements. *Geophysical Prospecting*, 55(2), 265–275.
- Tarback, E. J., & Lutgens, F. K. (2005). Ciencia de la tierra: una introducción a la geología física. In Pearson (Ed.), *American Journal of Otolaryngology--Head and Neck Medicine and Surgery* (8va ed., Vol. 12, Issue 1). Prentice Hall.  
[https://doi.org/10.1016/0196-0709\(91\)90073-O](https://doi.org/10.1016/0196-0709(91)90073-O)
- Telford, W. M., Geldart, L. P., & Sheriff, R. E. (1990). *Applied geophysics*. Cambridge University Press.
- Toledo Baca, J. C. (2015). *Aplicación de los métodos geoeléctricos en la*

*prospección geofísica* [Universidad nacional mayor de San Marcos].

[http://cybertesis.unmsm.edu.pe/bitstream/handle/cybertesis/4147/Diaz\\_rc.pdf;jsessionid=CD5A7FF3022F1A5526948369A600356D?sequence=1](http://cybertesis.unmsm.edu.pe/bitstream/handle/cybertesis/4147/Diaz_rc.pdf;jsessionid=CD5A7FF3022F1A5526948369A600356D?sequence=1)

Tristan, G. M., & Torres, H. J. R. (1992). *Cartografía geológica 1:50 000 de la hoja de Charcas, Estado de san Luis Potosí* (l. de Geología (ed.)). UASLP.