

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA TIERRA**



TESIS

**ESTUDIO DE LA DINÁMICA HIDROGEOLÓGICA DE LA LAGUNA
DE LABRADORES, GALEANA, NUEVO LEÓN**

**PRESENTA
PAULINA CUEVAS CASTELLANOS**

**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OPTAR AL GRADO DE
MAESTRÍA EN CIENCIAS GEOLÓGICAS**

DICIEMBRE, 2015



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA TIERRA**



LA TESIS

**ESTUDIO DE LA DINÁMICA HIDROGEOLÓGICA DE LA LAGUNA
DE LABRADORES, GALEANA, NUEVO LEÓN**

**ELABORADA POR
PAULINA CUEVAS CASTELLANOS**

**HA SIDO ACEPTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OPTAR AL
GRADO ACADÉMICO DE
MAESTRO EN CIENCIAS GEOLÓGICAS**

DIRECTOR DE TITULACIÓN

DR. IGNACIO NAVARRO DE LEÓN

LINARES, NUEVO LEÓN, MÉXICO,

DICIEMBRE DE 2015



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA TIERRA**



LA TESIS

**ESTUDIO DE LA DINÁMICA HIDROGEOLÓGICA DE LA LAGUNA DE
LABRADORES, GALEANA, NUEVO LEÓN**

ELABORADA POR

PAULINA CUEVAS CASTELLANOS

HA SIDO ACEPTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OPTAR AL
GRADO ACADÉMICO DE
MAESTRO EN CIENCIAS GEOLÓGICAS

COMITÉ DE REVISIÓN

Dr. Ignacio Navarro de León
Director de Titulación

Dr. Juan Carlos Montalvo Arrieta
Co-Director de Titulación

M.C. Efraín Alva Niño
Co-Director de Titulación

LINARES, NUEVO LEÓN, MÉXICO

DICIEMBRE 2015

Por este medio, declaro bajo protesta, haber realizado esta tesis de manera personal y haber utilizado únicamente los medios y procedimientos descritos en la misma.

Paulina Cuevas Castellanos

Linares, Nuevo León, 2015.

*“¿Quién repartió conducto al turbión,
y camino a los relámpagos y truenos,
haciendo llover sobre la tierra deshabitada,
sobre el desierto, donde no hay hombre,
para saciar la tierra desierta e inculta,
y para hacer brotar la tierna hierba?*

*¿Tiene la lluvia padre?
¿O quién engendró las gotas del rocío?
¿De qué vientre salió el hielo?
Y la escarcha del cielo, ¿Quién la engendró?”*

Job 38: 25-29

*“Cuando yo oí por primera vez el murmullo
de una corriente subterránea, no en balde
me inclinaba a la tierra prestándole oído. Con ella iba
un misterio que yo debía comprender al cabo”*

Gustavo Adolfo Becker, El gnomo.

Dedicatoria

Dedico este trabajo a mis padres, por el gran apoyo que me han dado y aún más grande la espera... sin haber desesperado. En este trabajo está puesto todo mi esfuerzo y es para Ustedes.

A Oscar y Uriel, que algún día lean este texto, se sientan orgullosos y de alguna manera los motive, porque el camino es muy largo y la vida es difícil, pero es perfecta.

Agradecimientos

Gracias a Usted, Lector, porque una obra no existe sino hasta ser leída.

A mi Alma Máter la UANL, al Posgrado de FCT y al CONACYT.

Al gobierno de Galeana, a Protección Civil de Galeana, y a Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey.

Muchísimas gracias, a los habitantes de Laguna de Labradores y Galeana, que me ayudaron con sus anécdotas, toda la información fue muy valiosa para mí; ojalá un día les pueda retribuir de alguna manera.

Le agradezco a mi director de Tesis, el Dr. Ignacio Navarro, por ayudar en mi desarrollo académico, por motivarme a ser autodidacta y a hacer las cosas de la manera correcta. A mis asesores M.C. Efraín Alva y el Dr. Juan Carlos Montalvo, por estar siempre disponibles para mis preguntas, no sólo en el posgrado sino desde la licenciatura, y por sus correcciones.

Gracias a los intelectuales y revolucionarios de la vida real, que se manifiestan a través de sus palabras, y quienes me han compartido esas ideas de revolución, libertad, justicia y amor: Mi abuelo Leonardo Castellanos, mi padre Fernando Cuevas, y mis mentores Konstantin Krivosheya y Carlos García.

Le agradezco sinceramente a las personas de la Facultad que me ayudaron durante el posgrado y quienes colaboraron en la elaboración de mi tesis: al Subdirector de Posgrado Fernando Velazco por su ayuda académica, su comprensión y sus sabios consejos durante todas (todas) mis dificultades. A los Profesores Carlos Aguilar y Federico Viera por todo su apoyo, ayuda y consejos. Al Prof. Gabriel Chávez por sus pláticas motivacionales y por esa brevísima clase de hidrogeología que me abrió los ojos sobre mi tema de tesis. A la Prof. Yolanda Pichardo por su apoyo y ánimo. Al Prof. Uwe Jenchen por permitirme entrar a través del polvo a su biblioteca y prestarme los artículos que necesitaba. A Dirk Masuch

por haberme animado a no esperar a nadie e ir a campo por mi cuenta. A Roberto Luna por su disponibilidad para ayudarme en la búsqueda de material en la biblioteca, por su amabilidad y su paciencia. A Karla Casas por ser tan atenta ante mis dudas.

Un agradecimiento especial a mis compañeros Jorge y Luis por toda su ayuda en la búsqueda de literatura, por haberme acompañado a campo, aunque fuesen días festivos, por compartirme sus conocimientos y por todo.

Gracias a mis amigos del posgrado: Ray, Carmen, Jorge, Luis, fueron buenos tiempos aquellos (Cuando yo tenía un escritorio para mi sola (jeje) y a su vez, era de todos a las 12pm; tantas comidas compartidas, algunas pláticas inteligentes y muchas pláticas absurdas). A mis demás compañeros que siempre me ayudaron de manera académica y con su muy agradable compañía: César, Edgar, Chío, Lalo, Silver, Many, Moy, Chucho, Fermín, Chebo, Adrián, Gemma, Siboney, Angélica, Bióloga, Immer; también a mis amigos Alex, Suiza, May, Brayan, el profe Soto y muy en especial a Darío, Fredy y Adriana, que estuvieron conmigo justo cuando lo necesitaba. Todos me han compartido algo que de alguna manera ahora forma parte de mí y de esta tesis, muchas gracias a todos.

A mi familia que me apoya desde lejos, y comprenden mi tardanza en volver: mi abuelita "La Jefa", mi hermana Haydee, mi tío Vic y mi tía Rosy.

Le agradezco nuevamente a Fredy, y de manera infinita, por haberme regresado a la vida. Gracias por ayudarme a esperar, aún sin saber que lo que estaba esperando era ¡a ti!, porque todo llega cuando tiene que llegar. Te amo.

A la Fuerza Suprema que me trajo hasta aquí y hace que todo pase, que me permitió entender una pequeñísima parte de su maravillosa e infinita creación.

Contenido

Índice de figuras	I
Índice de tablas	vii
Resumen	viii
Abstract	ix
Capítulo 1. Introducción	1
1.1. El proceso de karstificación	1
1.2. Acuíferos kársticos fracturados	2
1.3. Estudio de las surgencias en un medio kárstico	4
1.4. Geomorfología kárstica	4
1.5. Karstificación en evaporitas	6
1.6. Regiones kársticas de yeso en México	8
Capítulo 2. Planteamiento del problema	11
2.1. Antecedentes	14
2.2. Objetivos	17
2.2.1. Objetivo General	17
2.2.2. Objetivos Particulares	17
2.3. Hipótesis	17
2.4. Metodología de trabajo	17
Capítulo 3. Marco de referencia	20
3.1. Generalidades	20
3.1.1. Ubicación del área de estudio	20
3.1.2. Vías de acceso	21
3.1.3. Orografía	21
3.1.4. Hidrografía	21
3.1.5. Clima	22
3.1.6. Vegetación	23

3.2. Aspectos geológicos de referencia	23
3.2.1. Geología regional	23
3.2.2. Geología local	24
3.2.3. Geomorfología	29
3.2.4. Hidrogeología	36
Capítulo 4. Caracterización de unidades hidrogeológicas	39
4.1. Movimiento del agua en un acuífero	41
4.1.1. Los efectos de las barreras hidrogeológicas en la hidrodinámica	44
4.2. Descripción hidrodinámica de acuerdo a la composición litológica-estructural, en el área de estudio	47
4.3. Resultados de la descripción hidrodinámica, en el área de estudio.	62
Capítulo 5. Prospección geoeléctrica aplicada en la hidrogeología	64
5.1. Principios básicos del método geoeléctrico	64
5.1.1. Tomografía eléctrica de resistividad (TER)	66
5.1.2. Dispositivos electródicos	67
5.1.3. Procesado de datos	69
5.1.4. Resistividad eléctrica del subsuelo	70
5.2. Aplicación del método TER en el área de estudio	71
5.2.1. Metodología	71
5.2.2. Toma de datos en campo	72
5.2.3. Procesado de datos geofísicos	78
5.2.4. Interpretación de las líneas	82
5.3. Resultados de la tomografía eléctrica de resistividad aplicados en el área de estudio	87
Capítulo 6. El nivel piezométrico y sus oscilaciones	89
6.1. Piezometría	89
6.1.1. Elaboración de una carta piezométrica	90
6.1.2. Cálculo de la velocidad del agua en un acuífero a través de la carta piezométrica	92

6.2. Oscilación del nivel piezométrico	93
6.2.1. Efectos estacionales de las oscilaciones del nivel piezométrico	94
6.3. Aplicaciones al área de estudio	95
6.3.1. Descripción de la metodología	96
6.3.2. Piezometría	96
6.3.3. Estimación de la velocidad de los flujos de agua subterránea y los tiempos de tránsito de la cuenca	103
6.3.4. Carácter transitorio de la recarga del acuífero	112
6.4. Resultados del análisis del nivel piezométrico, sus oscilaciones y causas	119
Capítulo 7. Discusión	121
Capítulo 8. Conclusiones y recomendaciones	125
Bibliografía	127
Apéndice 1: Medición de profundidad de la laguna	135
Apéndice 2: Fotografías	139

Índice de Figuras

Capítulo 1

Figura 1. Geomorfología común de un medio kárstico. Tomado de Muñoz-Delgado (2003).....	5
Figura 2. Distribución de rocas evaporíticas en el mundo (Ford y Williams, 2007).....	7
Figura 3. Afloramiento de yesos en el camino que rodea a la Laguna de Labradores. Fotografía tomada en Septiembre de 2013.....	8
Figura 4. Afloramiento de yesos en el poblado Laguna de Labradores. Fotografía tomada en Septiembre de 2013.....	9
Figura 5. Afloramiento de yesos en la zona minera de Galeana, cercana al Pozo del Gavilán. Fotografía tomada en Noviembre de 2007.....	9

Capítulo 2

Figura 6. Parque recreativo en Laguna de Labradores antes del desborde de la laguna; fotografía tomada del blog <i>Panoramio</i> , del usuario <i>Trotasitios</i> con fecha de 09 de Diciembre de 2009.....	12
Figura 7. Inundación del parque recreativo en la Laguna de Labradores luego del desborde de la laguna; fotografía del 28 de Septiembre de 2013.....	12
Figura 8. Inundación del parque recreativo de la Laguna de Labradores; fotografía del 04 de Julio de 2014. Se observa uno de los techos de las palapas del parque, sumergida.	13
Figura 9. Barrera de contención para controlar el desborde al NE de la laguna. Derecha: Dique de concreto con conexión al desagüe de la laguna.....	13

Capítulo 3

Figura 10. Mapa de localización del área de estudio.....	20
Figura 11. Delimitación de la Cuenca La Laguna a partir de la red de escurrimientos del área. Modificada del SIATL. La línea verde es el límite del acuífero Citrícola sur. El área punteada es el límite de la cuenca local del área de estudio.....	22
Figura 12. Principales lineamientos geoestructurales del área de estudio. Criterios	

tomados de acuerdo a la carta geológica del INEGI y la carta geológica minera del SGM.	24
Figura 13. Carta Geológico-Minera de Galeana, clave G14C56, adaptada de SGM (2007).	25
Figura 14. Sección geológico-estratigráfica adaptada de la carta Geológico-Minera, Galeana G14C56, Nuevo León (SGM, 2007).....	25
Figura 15. Esquema de la Planicie de la Laguna, Planicie de Galeana y Planicie de la Poza; tomado de Wenzens (1973).....	30
Figura 16. Geomorfología kárstica principal del área de estudio; 1) Pozo del Gavilán, 2) Laguna Seca, 3) Laguna de Labradores y 4) Grupo de dolinas menores.....	31
Figura 17. Vista lateral hacia el interior del Pozo del Gavilán. Fotografía tomada el 21 de Febrero de 2014.....	32
Figura 18. Perfil estructural cruzando el Pozo del Gavilán, la Laguna Seca y la Laguna de Labradores en el municipio de Galeana, Nuevo León. Se indica el nivel freático a 1720 msnm. Tomado de Chapa-Guerrero y colaboradores (1994).....	33
Figura 19. 1) Dolina de subsidencia: ocurre disolución en la superficie, subsidencia por bloques y hay sedimentos terra rossa que cubren la base de la dolina, obstruyendo el conducto de desagüe. 2) Dolina de colapso: El flujo del agua a través de las cavidades forma una caverna que va creciendo hacia el exterior, causando un colapso de su techo cuando ya no soporta el peso y la tensión.....	33
Figura 20. Geomorfología tipo lapiaz en el área de estudio. Fotografía tomada el 28 de Septiembre de 2013.....	34
Figura 21. Pozo del Álamo o Cenote Azul. Fotografía tomada el 21 de Febrero de 2014...	35
Figura 22. Vista lateral de la Laguna Seca, se observa en su interior una dolina de aprox. 5 metros de diámetro; al lado derecho de la fotografía se observa la parte superior del Pozo del Álamo en una de las paredes de la Laguna Seca. Fotografía tomada desde la parte norte de la Laguna Seca en el camino hacia Dieciocho de Marzo, el día 21 de Febrero de 2014.....	35
Figura 23. Columna estratigráfica del NE de México y su potencial hidrogeológico (Modificada de Michalzik (1988), adaptada de Moctezuma-Navarro (2011).....	36
Figura 24. Perfil esquemático de las tres zonas del sistema acuífero del área de estudio, descritas por Huízar-Álvarez y Oropeza-Orozco (1989).....	38

Capítulo 4

Figura 25. Tipos de acuíferos litológicos. Izquierda: acuífero de poros; centro: acuífero de grietas; derecha: acuífero kárstico. Tomado de Werner (1996).....	40
Figura 26. Direcciones del flujo de agua subterránea desde una zona con potencial de fluido mayor a una zona de potencial de fluido menor. Tomado de Chapman (1981).....	43
Figura 27. Efectos de discontinuidad de barrera en una cuenca unitaria: a) vertical; b) horizontal; c) inclinación opuesta a la dirección del flujo regional; d) inclinación en dirección del flujo regional. Tomado de Tóth (2009).....	45
Figura 1. Efectos de una discontinuidad conductiva en una cuenca unitaria: a) vertical; b) horizontal; c) inclinación opuesta a la dirección del flujo regional; d) inclinación en dirección del flujo regional. Tomado de Tóth (2009).....	46
Figura 2. Ubicación de los perfiles y manantiales recopilados de la literatura.....	48
Figura 30. Diagrama esquemático del alumbramiento de los manantiales 2 (LAG) y 5 (LL) a través de material cuaternario por depresión del terreno. Tomado de Correa-Rubio, 1998.....	52
Figura 31. Diagrama esquemático del alumbramiento del manantial 3 (RS) a través de la formación La Casita, donde el contenido lutítico de dicha formación actúa como barrera hidrogeológica, a través de la cual transita el agua subterránea y alumbra en superficie. Tomado de Correa-Rubio, 1998.....	52
Figura 3. Diagrama esquemático del alumbramiento del manantiales 7 (SL) a través de la formación Taraises, en el cual se presentan fracturas tipo “ac” sobre las cuales transita el agua y alumbra en superficie; en esta zona la formación Taraises presenta vetillas de yeso. Tomado de Correa-Rubio, 1998.....	53
Figura 4. Diagrama esquemático del alumbramiento del manantial 9 (SC) a través del contacto sedimentario de las formaciones Taraises y La Casita. Tomado de Correa-Rubio, 1998.....	53
Figura 5. Perfil hidrogeológico A-A’ modificado del perfil estructural de Barrera-Navarro (1991).....	55
Figura 35. Perfil hidrogeológico B-B’, modificado del perfil geológico de Lara-Tristán (1991).....	56
Figura 36. Perfil hidrogeológico C-C’ modificado del perfil geológico de Lara Tristán (1991).....	56

Figura 37. Perfil hidrogeológico D-D' modificado del perfil geológico de Lara Tristán (1991).....	57
Figura 38. Perfil hidrogeológico E-E', modificado del perfil geológico de Chavarría-Iglesias (1998).....	58
Figura 6. Perfil hidrogeológico F-F', modificado del perfil geológico de Chavarría-Iglesias (1998).....	58
Figura 7. Perfil hidrogeológico G-G', modificado del perfil geológico de la carta Geológica-Minera Galeana G14C56, del Servicio Geológico Mexicano.....	59
Figura 8. Perfil hidrogeológico H-H', modificado del perfil geológico de la carta Geológica-Minera Galeana G14C56, del Servicio Geológico Mexicano.....	60
Figura 9. Perfil hidrogeológico I-I', modificado del perfil geológico de la carta Geológica-Minera Galeana G14C56, del Servicio Geológico Mexicano.....	60
Figura 43. Perfil hidrogeológico J-J', modificado del perfil geológico de Huízar-Álvarez y Oropeza-Orozco (1989).....	61
Figura 44. Perfil hidrogeológico K-K', modificado del perfil geológico de Huízar-Álvarez y Oropeza-Orozco (1989).....	62
Figura 10. Perfil hidrogeológico L-L', modificado del perfil geológico de Huízar-Álvarez y Oropeza-Orozco (1989).....	62

Capítulo 5

Figura 46. Principio del método geoelectrico. Tomado de Zúñiga-Lara, 2011.....	65
Figura 47. Representación simplificada de las mediciones de la Tomografía Eléctrica de Resistividad. Tomado de Chávez-Segura, 2011.....	66
Figura 48. Acomodo de los electrodos en el arreglo tipo Schlumberger. Tomado de Chávez-Hernández, 2011.....	68
Figura 49. Acomodo de los electrodos en el arreglo tipo Dipolo-Dipolo. Tomado de Chávez-Hernández, 2011.....	68
Figura 50. Acomodo de los electrodos en el arreglo tipo Wenner-Schlumberger. Tomado de Chávez-Hernández, 2011.....	69
Figura 51. Ubicación de las Tomografías Eléctricas de Resistividad.....	71
Figura 52. Ubicación de la Línea TER L1 Minas Viejas.....	73
Figura 53. Izquierda: Resistivímetro usado en la Línea L1 Minas Viejas. Derecha:	

Tendido de cable y electrodos a través del área de interés.....	73
Figura 54. Ubicación de la Línea geofísica, L2 La Casita.....	74
Figura 55. Izquierda: Equipo usado en la línea L2 La Casita. Derecha: Tendido de cables y electrodos a través del área de interés.....	75
Figura 56. Izquierda: Vista del alumbramiento del manantial. Derecha: Arroyo proveniente del manantial.....	75
Figura 57. Ubicación de la Línea geofísica L3 Taraises.....	76
Figura 58. Tendido de cables y electrodos a través del área de interés en la Línea L3 Taraises.....	77
Figura 59. Secciones de resistividades aparentes medidas, calculadas y resistividades invertidas, correspondientes a la línea L1 Minas Viejas.....	79
Figura 60. Secciones de resistividades aparentes medidas, calculadas y resistividades invertidas, correspondientes a la línea L2 La Casita.....	81
Figura 11. Secciones de resistividades aparentes medidas, calculadas y resistividades invertidas, correspondientes a la línea L3 Taraises.....	81
Figura 62. Modelo geológico elaborado a partir de la sección geofísica para la Línea L1 Minas Viejas.....	83
Figura 12. 1) Muestra de yeso tomada al Oeste de la Laguna de Labradoros. 2) Muestra de yeso tomada cercano al Pozo del Gavilán. 3) Muestra de yeso tomada en una fractura rellena de yeso al SW del Cerro del Potosí. 4) Muestra de yeso tomada a un costado de la Línea geofísica L1 Minas Viejas.....	84
Figura 64. Modelo geológico elaborado a partir de la sección geofísica para la Línea L2 La Casita.....	85
Figura 65. Modelo geológico elaborado a partir de la sección geofísica para la Línea L3 Taraises.....	86

Capítulo 6

Figura 66. Nivel piezométrico en un acuífero libre (a), o un acuífero confinado (b). Tomado de Werner (1996).....	90
Figura 67. Ubicación de aprovechamientos (pozos, norias, pozas naturales) dentro de la Cuenca La Laguna.....	99
Figura 68. Carta piezométrica de la cuenca La Laguna.....	100
Figura 69. Carta piezométrica con fallas y fracturas de la cuenca La Laguna. Ubicación	

de las fallas y fracturas tomadas de la carta geológica G14C56 del INEGI.....	101
Figura 70. Perfil piezométrico extrapolando las alturas piezométricas de los aprovechamientos para hacerlas coincidir en una línea de referencia que atraviesa la cuenca. 1-La Laguna, 2-La Habana, 4-Buenavista, 5-Derramadero III, 7-Manila, 9-Laguna de Labradores, 10-Noria, 12-Pozo del Álamo, 17-Pozo del Gavilán.....	103
Figura 71. Carta piezométrica con geología. Se muestra la ubicación de las líneas a partir de las cuales se tomaron los gradientes y distancias para el cálculo de las velocidades de flujo; 1) Línea para el cálculo en el acuífero kárstico a través de Yeso-Caliza, 2) Línea para el cálculo en el acuífero de grietas a través de calizas-lutitas, 3) Línea para el cálculo en el acuitardo a través de lutitas-areniscas.....	106
Figura 72. Registros de lluvias mayores a 90 mm/día. Sequías intensas de acuerdo al estudio de Ortega-Gaucín (2012) señaladas con un valor unitario representativo.....	113
Figura 73. Precipitación acumulada mensual, registrado por la estación climatológica Ejido 18 de Marzo (19148) durante Junio de 2008 hasta Diciembre de 2012.....	114
Figura 74. Comparación de hidrogramas de dos pozos de la Cuenca La Laguna y la precipitación acumulada mensual registrada en la estación climatológica Ejido 18 de Marzo (19148), durante el período Julio 2010 – Julio 2011.....	116
Figura 75. Comparación del nivel del agua de la Laguna de Labradores, teniendo como referencia las estructuras señaladas con flechas. Arriba) Autor: Trotasitios, fecha: 09-12-09; Abajo) Autor: Abernal, fecha: 15-12-10. Tomadas del blog Panoramio de Google.....	117
Figura 76. Registro extendido de precipitaciones y del nivel piezométrico del pozo Buenavista, desde Enero de 2009, hasta Diciembre de 2012.....	118
 Apéndice 1	
Figura 77. Medición de la profundidad de la laguna, con utilización del cordel y pesa.....	135
Figura 78. Inclinación del cordel durante las mediciones.....	136
Figura 79. Posibles causas de la inclinación del cordel durante las mediciones.....	136
Figura 80. Modelo de profundidades de la Laguna de Labradores.....	137
Figura 13. Modelo 3D de la Laguna de Labradores de acuerdo a las mediciones con el cordel.....	138

Índice de Tablas

Capítulo 2

Tabla 1. Metodologías para el estudio.....	18
---	----

Capítulo 4

Tabla 2. Manantiales estudiados por diversos autores, cerca del área de estudio.....	47
---	----

Tabla 3. Líneas cartografiadas por diversos autores, cerca del área de estudio.....	48
--	----

Capítulo 5

Tabla 4. Resistividades de materiales geológicos y residuos. Tomado de Zúñiga-Lara (2011).....	70
---	----

Capítulo 6

Tabla 5. Censo de aprovechamientos de la Cuenca La Laguna.....	98
---	----

Tabla 6. Valores estimados de la porosidad total y efectiva para suelos y rocas comunes. Tomado de Sanders (1998).....	105
---	-----

Tabla 7. Valores típicos de conductividad hidráulica. Tomado de Isherwood (1979).....	105
--	-----

Tabla 8. Velocidad de flujo y tiempo en que el agua atraviesa las formaciones geológicas del área de estudio.....	111
--	-----

Resumen

La Laguna de Labradores, estructuralmente, es una dolina de disolución de 500 metros de diámetro y 80 metros de profundidad, que se encuentra en el municipio de Galeana, Nuevo León. A mediados del año 2012, la laguna tuvo un crecimiento de su nivel de agua de aproximadamente tres metros en un período de tres meses, causando la inundación del parque recreativo y algunas viviendas y caminos que se ubican a su alrededor. Este suceso ocurrió al finalizar una época de intensa sequía en todo el Estado. En este trabajo, se estudia la cuenca hidrogeológica en la que se encuentra la Laguna de Labradores y se describe su funcionamiento hidrogeológico, para conocer los motivos del desborde de la laguna. Se hizo una descripción hidrodinámica a partir de estudios previos litológico-estructurales, complementando dicha descripción con prospección geofísica en las unidades litológicas de mayor interés. Además se realizó la piezometría de la cuenca hidrológica de estudio, y con la evaluación de datos hidrométricos y climatológicos, se determinó cuánto tiempo tarda el agua en recorrer la cuenca y en llegar a la Laguna de Labradores. Se obtuvo como resultado, que en el área de estudio hay barreras hidrogeológicas, como fallas y fracturas rellenas de yeso y unidades litológicas que actúan como acuitardos, a través de los cuales, el agua fluye hasta 1000 veces más lento que en el acuífero kárstico, esto representa un retardo considerable en el tiempo de tránsito del agua, con un tiempo total estimado de 20.9 meses en recorrer la cuenca completa. Este tiempo coincide con la cantidad de meses de anterioridad a los cuales ocurrió el huracán Alex; así que el agua acumulada durante esas fechas, se infiltró al acuífero y se manifestó en la Laguna de Labradores (al ser una zona de descarga de la cuenca), de 21 a 24 meses después. La importancia de este estudio radica en la contribución al conocimiento de este tipo de medios geológicos, y en el aspecto social, para informar a la sociedad y prevenir futuras afectaciones a los habitantes de la zona.

Abstract

The Laguna de Labradores Lake, structurally, is a dissolution Sinkhole of 500 meter in diameter and 80 meters deep, located in the town of Galeana, Nuevo León, México. In mid-2012 year, the water table of the lake grew about three meters in a three months period, causing flooding at recreation park and some houses and roads that are located around it. This event occurred at the end of a period of severe drought in all state of Nuevo León. At this work, is studied the groundwater basin in which lies the Laguna de Labradores Lake and is described its hydrogeological function to know the reasons for the overflow of the lake. A hydrodynamic description is made from previous lithological-structural studies, complementing with geophysical prospecting. Also was performed a piezometry of the groundwater basin, and with the hydrometric and climatological evaluation, it was determinated, how long it take the water to travel from the recharge areas until reach the lake. Was obtained as a result, at the study area there are hydrogeological barriers, such as faults and fractures filled with gypsum and geological units that act as aquitards, through which the water flows up to 1000 times slower than in the karst aquifer, this represents a considerable delay in travel time of water, with an estimated total time of 20.9 months to travel the entire basin. This time coincides with the number of months of which occurred prior to Alex Hurricane; so the water accumulated during that time, infiltrated the aquifer and was manifested in the Laguna de Labradores (being a discharge area of the basin), 21 to 24 months. The importance of this study lies in contributing to knowledge of this type of geologic media, and the social aspect, to inform the community and prevent future damages to the locals.

Capítulo 1. Introducción

El recurso natural primordial para la existencia de la Humanidad, más que ningún otro, es el agua; desde siempre, todos los asentamientos humanos han buscado ubicarse cerca de alguna fuente que les provea de dicho recurso. Sin embargo cuando alguna de esas fuentes comienza a escasear, o de lo contrario, aumenta hasta afectar los asentamientos, es que aparece la necesidad por conocer la naturaleza del agua, saber de dónde viene y hacia dónde va, para poder captarla o controlarla. La manera de responder a estas cuestiones es el entendimiento de las aguas superficiales y las subterráneas, para hacer un adecuado manejo del recurso hídrico. Sin embargo el estudio del agua es complejo, el paradigma dinámico ha ido cambiando desde que se concibió el ciclo hidrológico, pues ahora se sabe que las escalas de los flujos subterráneos son centimétricas y hasta kilométricas y que el medio geológico es tan importante como el fluido que lo atraviesa (Deming, 2002). Los acuíferos kársticos son de los medios más complejos, y se vuelven más heterogéneos y anisotrópicos con el tiempo; dicho esto, muchos hidrogeólogos piensan que cada acuífero kárstico puede ser considerado como representante único de sí mismo y que tiene sus propias características específicas, sin embargo llegan a presentar algunas características comunes en cuanto a condiciones de flujo de las aguas subterráneas, permitiendo estudiarse por leyes generales físicas y de la hidrogeología (Bacalowicz, 2005; Ford y Williams, 2007).

1.1. El proceso de karstificación

Los acuíferos kársticos se forman a través del proceso de karstificación, el cual ocurre al momento de la interacción del agua con una matriz rocosa soluble, el agua actúa como disolvente químico del mineral en rocas carbonatadas (calizas y dolomitas), así como evaporitas, (yesos y anhidritas) y algunas veces en cuarcitas cuando ocurren condiciones geoquímicas específicas (Bögli, 1980), estos están sujetos a los fenómenos

kársticos, pero resultan en procesos químicos diferentes. La karstificación sólo se desarrolla bajo las siguientes condiciones, denominadas potencial de desarrollo kárstico (Potential for Karst Development PKD) (Mangin, 1978):

- 1 La posibilidad de disolver rocas carbonatadas, la existencia de un solvente.
- 2 Un flujo de agua subterránea, determinada por un gradiente hidráulico.

La evolución de un karst es siempre el resultado de un gran número de factores, climáticos, de relieve, litologías, estratigrafía y tectónica, que actúan conjuntamente sobre él y se deben tener en cuenta al momento de su estudio. Un karst debe ser considerado como acuífero porque la mayoría de las veces contiene agua subterránea, la cual puede ser explotada para el abastecimiento de agua. Sin embargo, debido al origen de las características del karst y las condiciones de su desarrollo, no pueden ser un acuífero explotable en cualquier parte, el almacenamiento de aguas subterráneas es en algunos casos insignificante o imposible de liberar (Bacalowicz, 2005); es por esto que se debe hacer un estudio integral en dichos acuíferos para caracterizarlos de manera correcta y hacer uso óptimo del acuífero.

1.2. Acuíferos kársticos fracturados

Los acuíferos kársticos funcionan en un principio de la misma forma que cualquier acuífero; su característica particular es que el agua, en su recorrido a través de los poros y fracturas, disuelve la roca y agranda las cavidades cambiando con esto, el tiempo y el modo de circular el agua. Al principio, el agua tiene movimiento según las líneas de flujo homogéneas, como en los acuíferos granulares. La disolución avanza desde la zona de infiltración, produciendo el ensanchamiento de las fisuras y dando lugar a los llamados conductos de disolución. El desarrollo de estos conductos primarios a partir de las fisuras es la fase más larga del proceso de karstificación. Algunos autores citan tiempos de formación de 1,000 a 100,000 años por kilómetro, después cuando la velocidad del agua aumenta, la disolución es más rápida. En pocos miles de años pueden alcanzarse

dimensiones métricas (Fernández, E. y colaboradores, 1995).

Las fisuras interconectadas proveen rutas para el flujo de agua (Ford y Williams, 2007), lo que constituye un nuevo tema de estudio: la localización de los sistemas de conductos en funcionamiento en el karst. Los métodos geofísicos y geológicos dan información que contribuyen sólo en el incremento de la probabilidad de la ubicación de los conductos o más generalmente de las cavidades que pudieran contener agua subterránea (Bacalowicz, 2005).

Sobre la distribución del fracturamiento, el supuesto básico es que la red kárstica debería estar organizada de la misma manera como está distribuido el patrón de fracturas, es decir los conductos desarrollados en las fallas, fracturas y fisuras; este enfoque se desarrolló durante los años 70's por un grupo de investigadores en Francia (Droge, 1974; Razack, 1980). Sin embargo estudios posteriores (Eraso, 1986) demostraron que tal enfoque no es suficiente, porque el agua subterránea fluye "tomando decisiones" basadas en la conductividad de las discontinuidades y el gradiente hidráulico existente entre el área de recarga y la ubicación de la surgencia. Ahora se sabe que el flujo de agua subterránea dentro de los acuíferos de rocas fracturadas, está controlado predominantemente por seis parámetros clave: densidad, longitud, geometría, conectividad, relleno de las fracturas y meteorización. De todos los parámetros estudiados, el más difícil de identificar es la conectividad por ser un término subjetivo que sólo se puede cuantificar mediante modelados indirectos (NRC, 1996). La conectividad describe la cantidad relativa de interconexión dentro de un número finito de fracturas con la implicación de que a mayores grados de interconexión de fracturas resulta una permeabilidad general de masa rocosa mayor (Mortimer y Simmons, 2011). Shapiro y colaboradores (2007) concluyeron que la conectividad hidráulica del macizo rocoso está controlada por la menor interconexión de fracturas conductivas, las cuales actúan como embudos hidráulicos que perturban el flujo de aguas subterráneas. El asunto clave que todavía no se entiende completamente, es cómo la conectividad de la red de fracturas puede cambiar con el incremento de la profundidad o puede ser modificada por procesos

secundarios como la disolución o deformación de las fracturas a profundidad.

1.3. Estudio de las surgencias en un medio kárstico

La descarga de las aguas subterráneas usualmente toma lugar cuando los niveles del agua convergen con la línea de superficie, o cuando los niveles del agua están por debajo del nivel del suelo en áreas planas a lo largo de valles o rompimientos, a esto se le llama surgencia (Salama y colaboradores, 1988). El estudio de las surgencias en los medios kársticos es de un interés muy alto, debido a que la complejidad de este tipo de medios kársticos comúnmente fracturados, son heterogéneos y anisótropos, las surgencias naturales son de los pocos medios que se tienen en los que se puede obtener información de manera directa sobre el funcionamiento de todo el sistema, y por lo tanto de la organización de los conductos y del almacenamiento. Consecuentemente, si la surgencia principal de la cuenca hidrogeológica no puede ser monitoreada, como la descarga directa en un manantial, río, lago o mar, el sistema no puede ser simulado o manejado apropiadamente (Bacalowicz, 2005).

1.4. Geomorfología kárstica

La disolución kárstica produce conductos subterráneos a través del medio soluble con el tránsito del agua, y además también puede provocar una erosión química en superficie, o muy cerca de ella a lo que se llama epikarst. Habitualmente se distinguen dos tipos de grupos de morfologías externas en las regiones kársticas (Fernández, E. y colaboradores, 1995):

- 1) *Lapiaces*: también conocido como *Karren en otros países*, es el conjunto de canales o surcos en superficies solubles por karstificación, estos se encuentran separados por pequeñas crestas afiladas o redondeadas, las cuales comúnmente son discontinuas (Figura 1). El lapiaz se forma por corrosión o por flujo permanente de agua sobre una superficie inicialmente suavizada. Presentan una gran diversidad de formas y escalas,

desde los microlapiaces con morfología de tamaño centimétrico, a los grandes lapiaces de agujas típicos de climas tropicales.

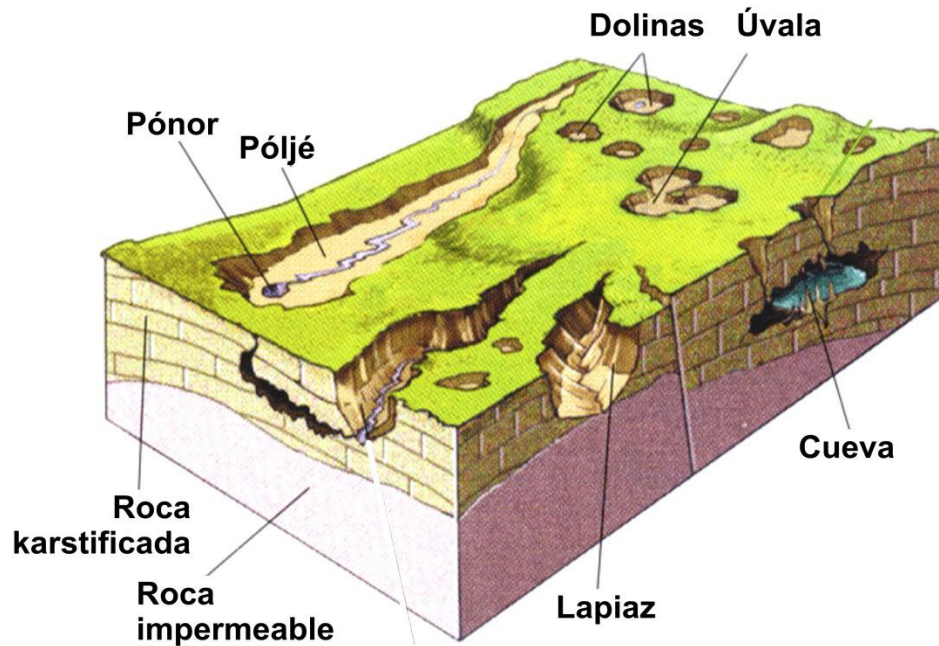


Figura 1. Geomorfología común de un medio kárstico. Tomado de Muñoz-Delgado (2003).

2) *Depresiones kársticas*: La infiltración del agua en el terreno forma depresiones, cuya disposición tamaño y geometría son muy variadas (Figura 1):

Poljé: depresión kárstica cerrada y hundida, con varios kilómetros de largo y de ancho, formando valles de piso plano, cubierto por depósitos fluviales.

Úvala: se refiere a una depresión cerrada alargada, comúnmente seca o con períodos cortos de inundación, puede ser considerado un poljé pequeño

Dolina: depresión, redonda u ovalada, de fondo plano o en forma de embudo, de medidas variables, dependiendo su génesis. Se pueden formar por disolución desde la superficie hacia el subsuelo, o por el contrario, a partir del ensanchamiento de una cavidad hacia la superficie y el colapso de su techo.

Pónor o *sumidero*: agujero o abertura en la parte inferior o lateral de una

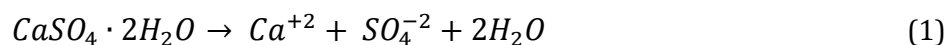
depresión donde una corriente superficial fluye parcial o completamente de manera subterránea al sistema acuífero kárstico.

En algunas ocasiones las formas kársticas pueden contener un tipo de arcilla llamada "*Terra rossa*", este tipo de arcilla se forma por la oxidación de los sedimentos, producto de la descalcificación de las rocas que contienen calcio, al contacto con el agua. Con frecuencia las arcillas *terra rossa* se acumulan en los fondos de los poljés, y en las dolinas y úvalas pueden obstruir la circulación del agua estancándose para formar lagunas temporales o permanentes.

1.5. Karstificación en evaporitas

Las formaciones salinas evaporíticas resultan de la precipitación de las sales disueltas en las aguas marinas y continentales, que proceden a su vez de la disolución de materiales rocosos que aportan los iones componentes de las sales. Por lo tanto las aguas de escorrentía, transportan los iones (en concentraciones débiles), que tomaron las rocas aflorantes, hacia los mares y lagos donde se acumulan incrementando la concentración salina hasta que, por alguna circunstancia climática propicia, se produce la suficiente evaporación que acelera la hipersaturación y la precipitación de los materiales evaporíticos (Mancebo-Piqueras, 2008).

La gran mayoría de las evaporitas son los siguientes minerales: yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), anhidrita (CaSO_4) y halita (NaCl). Este tipo de rocas tienen alta solubilidad en agua (2,4 g/l para el yeso) lo que convierte a las evaporitas en materiales altamente karstificables, con una evolución morfológica y espeleogenética mucho más rápida que la de los carbonatos. El yeso en presencia de agua se disuelve, mediante disociación, según la ecuación (1) (Fernández, E. y colaboradores, 1995):



Los karst en yesos más importantes del mundo, están situados en el Oeste de Ucrania, en la región de Podolosky-Bukovinsky, en donde se encuentran más de 400 Km

de conductos subterráneo (Fernández, E. y colaboradores, 1995). En el mundo, las evaporitas tienen relativamente poca exposición superficial (Figura 2), a pesar de su presencia generalizada (Ford y Williams, 2007).

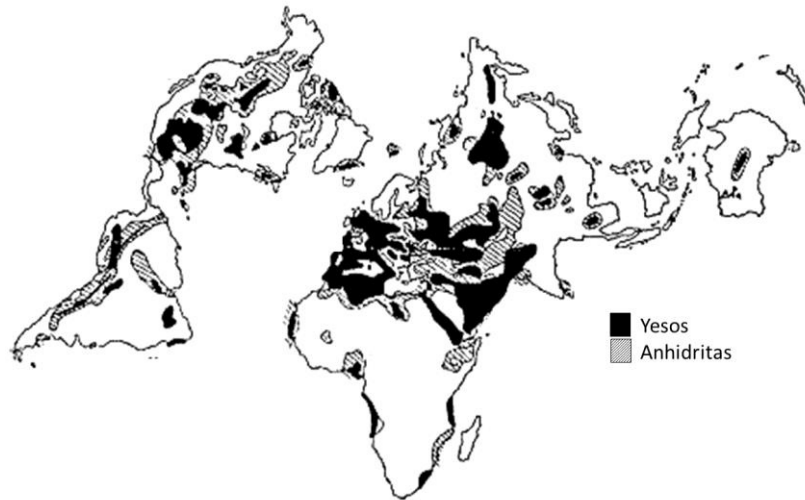


Figura 2. Distribución de rocas evaporíticas en el mundo (Ford y Williams, 2007).

El flujo de agua subterránea en superficies evaporíticas, es un importante control en la disolución. La disolución kárstica de sales del medio, puede conducir a fallamientos y subsidencia asociada a la salinidad del agua subterránea. La salinidad aumenta en la dirección del flujo subterráneo, desde los puntos de recarga hacia los de descarga y puede aumentar en períodos de humedad. (Salama y colaboradores, 1998; Reitman, 2014)

La hidrogeología en evaporitas ha sido menos estudiada que la hidrogeología en carbonatos, debido fundamentalmente a que en estas zonas las aguas subterráneas tienen una elevada salinidad a causa de la alta solubilidad de las evaporitas, por lo tanto el agua no tiene la calidad necesaria para ser potable y tiene un bajo nivel económico (Samper-Calvete y García-Vera, 1998; Bacalowicz, 2005).

1.6. Regiones kársticas de yeso en México

En México, el territorio cercano al Golfo de México, es donde se encuentran los mayores depósitos de evaporitas, y tienen edades del Calloviano al Oxfordiano

correspondiente a la edad en que ocurrió la primera transgresión marina en México.

En el municipio de Galeana, en el estado de Nuevo León, se encuentran los afloramientos de yeso más grandes del estado. Estos afloramientos, debido a las condiciones adecuadas de temperatura y precipitación, han desarrollado el proceso de karstificación, el cual se observa en las formas kársticas superficiales (Figuras 3, 4 y 5), poljés, dolinas y lapiaces, siendo atractivos turísticos, el Pozo del Gavilán y la Laguna de Labradores, ambas dolinas de más de 80 metros de profundidad.

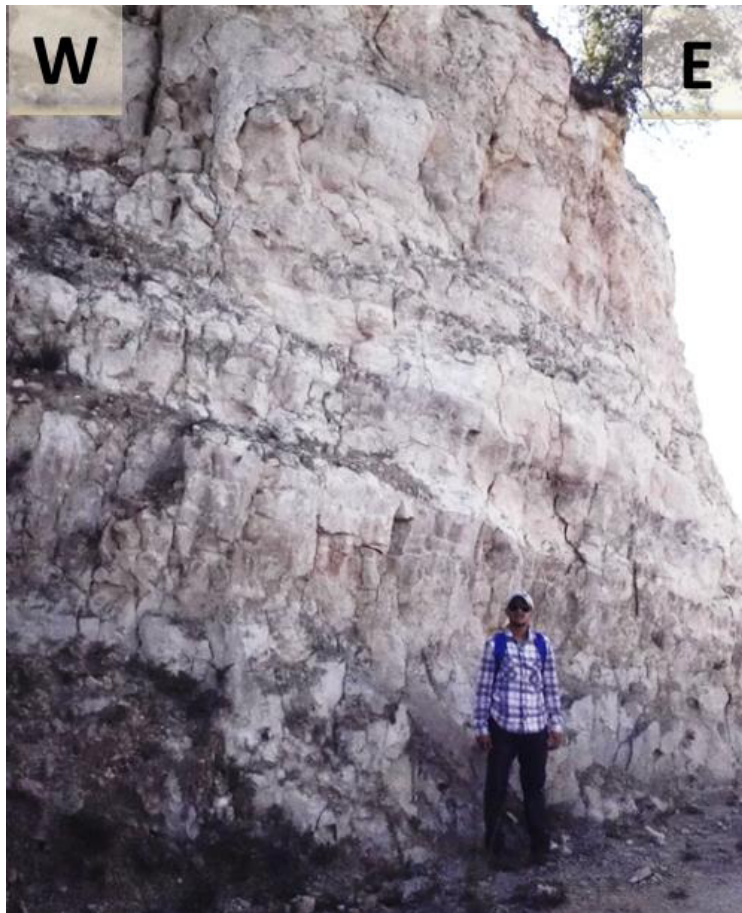


Figura 3. Afloramiento de yesos en el camino que rodea a la Laguna de Labradores. Fotografía tomada en Septiembre de 2013.



Figura 4. Afloramiento de yesos en el poblado Laguna de Labradores. Fotografía tomada en Septiembre de 2013.



Figura 5. Afloramiento de yesos en la zona minera de Galeana, cercana al Pozo del Gavilán. Fotografía tomada en Noviembre de 2007.

El relieve kárstico principal que actualmente se observa en la región de Galeana se ha desarrollado, casi en su totalidad, en yesos, debido a que la disolución de éstos es mucho mayor que la caliza. Las características de este relieve kárstico nos permiten considerar que las formas existentes tuvieron su origen en condiciones climáticas diferentes a las actuales, es decir en climas con un régimen de humedad mayor que el que ahora predomina en el área.

Por lo menos dos ciclos de karstificación se manifiestan en Galeana. El primero de ellos, el más antiguo, se formó probablemente, desde el Mioceno hasta el Pleistoceno (13 a 2Ma), en diferentes ambientes climáticos, húmedos y subhúmedos. El segundo ciclo, más reciente, se ha generado desde el Pleistoceno hasta nuestros días (2Ma a la actualidad). Se puede decir que este es menos importante que el anterior, pues sólo se retocan las formaciones preexistentes (Huizar-Álvarez y Oropeza- Orozco, 1989).

Capítulo 2. Planteamiento del Problema

Como ya se mencionó, el municipio de Galeana en el estado de Nuevo León, presenta numerosas formas kársticas que son el resultado de la disolución de los sulfatos acumulados en el subsuelo; la Laguna de Labradores es una de estas, siendo una de las más grandes del área con un diámetro de 500m y profundidad de 73m (Apéndice 1), la cual sirve como centro turístico de este municipio.

A mediados del año 2012, surgió un cambio en la altura del agua de dicha laguna, observándose un aumento continuo durante algunas semanas; la laguna alcanzó un nivel máximo de aproximadamente tres metros arriba del valor promedio (1720msnm en el año de 1994 (Chapa-Guerrero y colaboradores, 1994)), causando su desborde y con esto la inundación del parque recreativo, algunas viviendas, caminos y sembradíos que se ubican a su alrededor (Figuras 6, 7, 8 y 9). Se hizo un cálculo aproximado del aumento del nivel del agua correspondiente a $824,670\text{m}^3$.

Como medida de protección, el gobierno municipal desaguó la laguna mediante la apertura del canal de desagüe, sin embargo el nivel del agua no descendió lo suficiente y la laguna continúa actualmente desbordada (Junio-2015).

Cuando ocurre un aumento en el nivel piezométrico de una surgencia, como lo es la Laguna de Labradores, se le adjudica como causa, en primera instancia, a las precipitaciones y la cantidad de agua que se haya introducido al acuífero en días previos al incremento del nivel del agua. Sin embargo en esta ocasión, en las fechas del desborde de la laguna, todo el estado de Nuevo León se encontraba finalizando una época de intensa sequía, por lo que no habían ocurrido precipitaciones relevantes que pudieran ocasionar un aumento tan repentino del nivel piezométrico.



Figura 6. Parque recreativo en Laguna de Labradores antes del desborde de la laguna; fotografía tomada del blog *Panoramio*, del usuario *Trotasitios* con fecha de 09 de Diciembre de 2009.



Figura 7. Inundación del parque recreativo en la Laguna de Labradores luego del desborde de la laguna; fotografía del 28 de Septiembre de 2013.



Figura 8. Inundación del parque recreativo de la Laguna de Labradores; fotografía del 04 de Julio de 2014. Se observa uno de los techos de las palapas del parque, sumergida.



Figura 9. Barrera de contención para controlar el desborde al NE de la laguna. Derecha: Dique de concreto con conexión al desagüe de la laguna.

Como se mencionó en el capítulo anterior, en el municipio de Galeana ocurre el proceso de karstificación en evaporitas y además es un medio fracturado por lo que su estudio puede llegar a ser complejo así como lo consideran diversos autores, que cada medio kárstico es particular y único. El desborde de la laguna es un suceso representativo de este medio kárstico, el cual puede deberse a dos factores, actuando en conjunto o individualmente:

- 1) El agua: Volumen de agua que transita por el acuífero a través del ciclo hidrológico.

Una cantidad extraordinaria de agua introducida al acuífero o al contrario, la falta excesiva de salidas del agua del mismo; así como la cantidad de agua que llega a la laguna.

- 2) El medio: Condición estructural de los poros y conductos por donde transita el agua.

La interrupción o favorecimiento del flujo a través de los conductos por donde transita el agua y por lo tanto el tiempo que tarda en recorrerlos; así como la condición estructural de la dolina que contiene a la laguna.

En este estudio se pretende conocer cómo estos dos factores se relacionan para poder causar el aumento repentino del nivel del agua de una laguna que se encuentra en un medio kárstico fracturado; y por otro lado, conocer la dinámica de la hidrogeología de la cuenca. Con esto se podrá contribuir al conocimiento de este tipo de medios hidrogeológicos, y hacia la parte social, controlar las oscilaciones del nivel piezométrico de la laguna para evitar afectaciones a los habitantes cercanos del lugar.

2.1. Antecedentes

En el municipio de Galeana se han llevado a cabo numerosos estudios relacionados a las geociencias: Los primeros estudios que se hicieron en esta área fueron en el Distrito Minero de Galeana (DMG) del cual se extrae el mineral barita; Tavera-Amezcuca (1960) realizó un inventario de recursos minerales en el municipio de Galeana y describe las

formaciones geológicas cartografiadas; Kesler y colaboradores (1988) describieron el origen y características físicas del Distrito de Barita, ahora llamado Distrito Minero de Galeana. Décadas posteriores se continuaba haciendo investigaciones para encontrar más reservas del mineral; Kroeger Y Stinnesbeck (2003) relacionaron la formación de barita al vulcanismo del Jurásico Tardío; Alejandro-Torres (2010) hizo un análisis estructural de las fallas y vetas relacionadas a la formación del mineral barita en la formación Huizachal. García-Marín (2012) analizó las fracturas, fallas y plegamientos ligados a la formación del emplazamiento de barita dentro del DMG, definiendo zonas con mayor potencial de reservas.

Los estudios iniciales en esta área también se enfocaban en el fenómeno de la karstificación y la geomorfología kárstica, fue entonces que se impulsaron algunos estudios para la investigación de la geomorfología en las evaporitas de Galeana; Wenzens (1973) dividió morfológicamente la cuenca de Galeana en cuatro secciones: La Planicie de Galeana, la Planicie de La Poza, la vertiente de Galeana y una superficie topográficamente homogénea. En su trabajo define a la Laguna de Labradores como una olla enorme de rompimiento, con agua en el fondo, que sirve como colector para los desagües subterráneos. Huízar-Álvarez y Oropeza-Orozco (1989) definieron cada uno de los tipos de morfoestructuras, explicando el origen y proceso de formación de los más importantes como la Laguna de Labradores y el Pozo del Gavilán. Chapa-Guerrero y colaboradores (1994), realizaron un estudio en las estructuras de colapso de Galeana causadas por suberosión, haciendo un modelo morfoestructural para el sistema Pozo del Gavilán-Laguna Seca- Laguna de Labradores. En este trabajo se habla sobre los riesgos geológicos para la ciudad de Galeana.

Sobre el aspecto geológico de Galeana se tienen diversos trabajos de investigación; Padilla-Y Sánchez (1978) hicieron una recopilación de la información estructural en el área Linares - Galeana - San Roberto; Götte (1988) realizó una investigación de la estratigrafía y deformación del municipio de Galeana. Götte y Michalzik (1992) hicieron una comparación de las facies estratigráficas, proponiendo nuevas relaciones entre las

formaciones del Jurásico. Se han elaborado también algunas tesis de licenciatura como lo son De León-Gutiérrez (1991), Lara-Tristán (1991) Y Peña-Ponce (1992) en las que se hicieron cartografías, perfiles estratigráficos, y descripción de las facies sedimentarias en distintas formaciones y zonas del municipio mencionado. Rodríguez-Pimienta (2003) llevó a cabo un estudio gravimétrico en el ejido Catarino Rodríguez del municipio de Galeana, con la finalidad de investigar la estructura geológica de la parte superficial de la capa sedimentaria. García-Marroquín (2009) desarrolló un análisis geológico-estructural para determinar la geometría y cinemática de los pliegues y fallas de la región. López-Medina (2010), hizo un estudio mineralógico y geoquímico de las lutitas negras que constituyen la formación La Casita en la localidad de Potrero Prieto.

En temas de hidrogeología, se tienen tesis de licenciatura de la FCT, impulsadas por proyectos de investigación del agua en Galeana; Correa-Rubio (1998) realizó un muestreo de siete manantiales en la parte norte de Galeana con el fin de clasificar las familias de aguas que existen en los alumbramientos con el propósito de establecer el uso tanto potable y de riego de estas aguas para la región; Chavarría-Iglesias (1998) estudió algunas surgencias en el municipio de Galeana, determinando que pertenecen a una sola familia hidrogeoquímica cálcico-bicarbonatada, y dividió en dos los tipos de manantiales de la zona: 1) manantial de fracturas entre estratos permeables y 2) manantial de depresión por superficie; Garza-Tamez (2009) hizo un muestreo para establecer la variación química de los sistemas de agua subterránea de la zona, para la evaluación de calidad del agua y su relación con exceso de concentración de iones de sodio; Ledezma-Estrada (2010), realizó una evaluación del nivel piezométrico y una caracterización hidrogeoquímica del agua subterránea.

Hacia el área de la paleoestratigrafía, Aguilar-Pérez (2002), describió los cuatro tipos de rudistas presentes en la formación Cupido así como el ambiente deposicional de la misma formación; Pichardo-Barrón (2002), realizó una descripción de la paleofauna así como de los ambientes de sedimentación y su secuencia paleogeográfica en el Cerro de Labradores; Cruz-Vázquez (2012), estudió la fauna de amonitas del Cretácico inferior de la

formación Taraises para hacer una datación más precisa de la formación.

2.2. Objetivos

2.2.1. Objetivo General

Conocer las causas de la oscilación anómala del nivel freático de la Laguna de Labradores, a través del estudio de la cuenca hidrogeológica y el medio kárstico en el que se encuentra la laguna.

2.2.2. Objetivos Particulares

- ❖ Describir la geología de la cuenca hidrológica de estudio.
- ❖ Establecer una relación hidrodinámica-litológica-estructural de la cuenca hidrogeológica.
- ❖ Determinar las características dinámicas del agua subterránea en el área de estudio: dirección, velocidad, y tiempo de tránsito.
- ❖ Realizar una evaluación de los datos climatológicos históricos (lluvias y sequías) de la zona que pudieran influir en el proceso estudiado.

2.3. Hipótesis

La presencia de barreras hidrogeológicas subterráneas en el medio kárstico de estudio, provocan que el tiempo de tránsito del agua sea relativamente lento a comparación con otros medios kársticos. Al presentarse eventos climatológicos de gran dimensión, estos se ven manifestados como un aumento acelerado del nivel freático de la Laguna de Labradores, varios meses después del evento, debido a la lentitud del tiempo de tránsito del agua en la cuenca.

2.4. Metodología de trabajo

Para comprobar o descartar las hipótesis, se llevaron a cabo una serie de

metodologías que se consideraron adecuadas para el estudio del problema; éstas se sintetizan en la Tabla 1.

Tabla 1. Metodologías para el estudio.

Metodología	Finalidad	Resultado
Descripción litológica-estructural	Definir las unidades hidrogeológicas del área	Perfiles hidrogeológicos
Tomografía eléctrica de resistividad	Caracterizar las formaciones hidrogeológicas de interés.	Secciones de Resistividad
Piezometría	Conocer el nivel piezométrico actual del acuífero, las direcciones de flujo, velocidades y tiempos de tránsito.	Mapa Piezométrico
Evaluación de la recarga del acuífero	Cuantificar la recarga y el tiempo que tarda el agua en llegar hasta su descarga	Gráficos comparativos

- ❖ Reconocimiento del área y documentación de testimonios: Se realizó un recorrido alrededor de la laguna para observar el nivel actual de desborde y las afectaciones que causó; además se recorrió el área para observar la geología y los rasgos hidrológicos. Al mismo tiempo se entrevistó a los habitantes para conocer su experiencia con respecto al comportamiento del nivel del agua de la laguna así como ubicar norias o dolinas para hacer un censo de aprovechamientos del lugar.
- ❖ Descripción litológica-estructural: A partir de la recopilación bibliográfica, se tomaron perfiles geológicos, se describieron sus unidades geológicas y su comportamiento hidrogeológico de acuerdo a la litología y el marco estructural, modificando los perfiles a manera de perfiles hidrogeológicos.
- ❖ Tomografía eléctrica de resistividad: Se llevó a cabo prospección geoeléctrica en el área de interés usando el método de TER (Tomografía eléctrica de resistividad), con la cual se hizo un estudio de las resistividades del subsuelo, obteniendo las

características geológicas e hidrológicas del área con el respectivo manejo de los datos en gabinete y la interpretación de las secciones de resistividad.

- ❖ **Piezometría:** Se llevó a cabo la medición del nivel piezométrico con una sonda de luz en cada aprovechamiento (pozo, noria, y poza natural). Al tener dichos datos, se prosiguió a realizar un mapa piezométrico indicador de la altura piezométrica y las direcciones de flujo.
- ❖ **Evaluación de la recarga del acuífero:** Se hizo una recopilación de datos de las diferentes bases de datos de INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía) , CNA (Comisión Nacional del Agua), Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey, y SMN (Servicio Meteorológico Nacional), correspondientes al municipio de Galeana entre los períodos Enero de 2009 – Diciembre 2013, así como algunos datos históricos, para conocer los cambios climatológicos e hidrométricos de la zona que pudieran inducir de alguna forma directa o indirecta, al desborde ocurrido en la Laguna de Labradores.

Capítulo 3. Marco de Referencia

3.1. Generalidades

3.1.1. Ubicación del área de estudio

La zona de estudio se localiza en el estado de Nuevo León, en el municipio de Galeana, al oeste del poblado del mismo nombre (Figura 10). El área de estudio queda delimitada por la cuenca hidrogeológica local, la cual tiene como parteaguas principales el Cerro del Potosí y la Sierra de Viborillas, la cuenca se ubica dentro de la Provincia de la Sierra Madre Oriental.

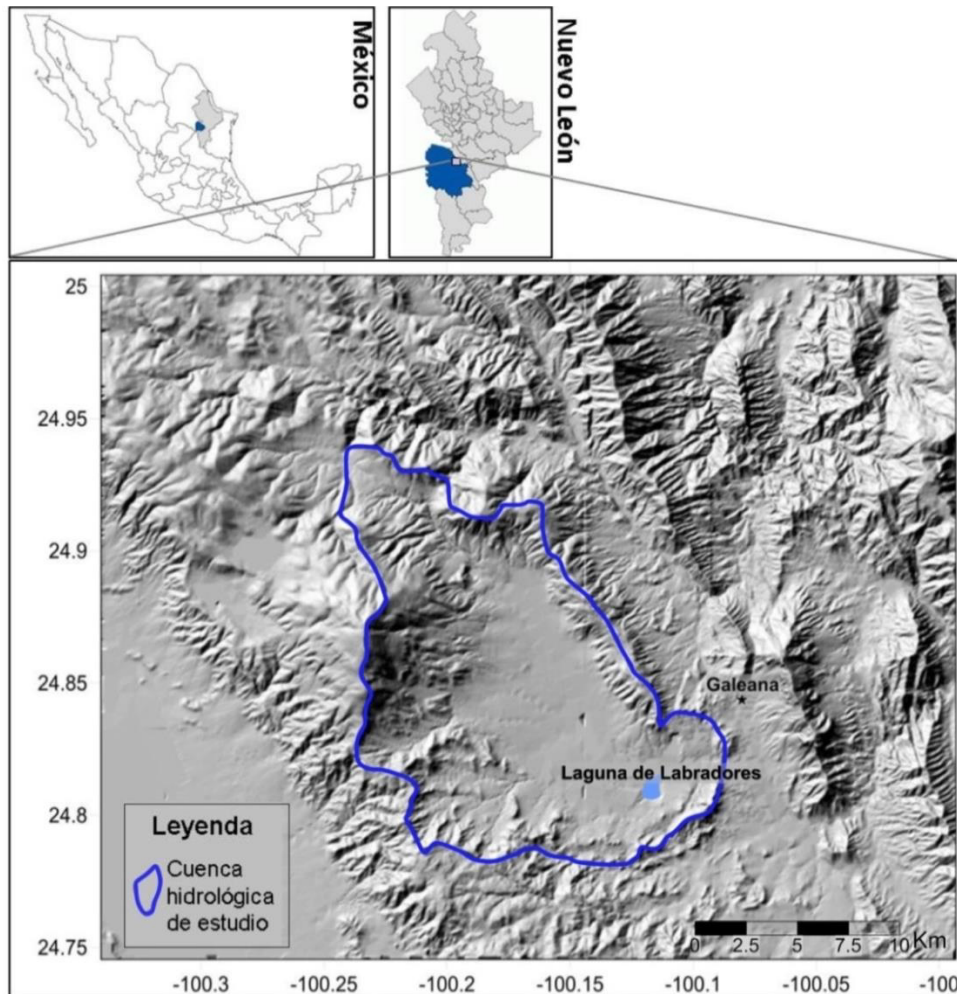


Figura 10. Mapa de localización del área de estudio

3.1.2. Vías de Acceso

Se puede llegar al área de estudio desde Linares por la carretera federal 58 que va para San Roberto, continuando por Avenida Cuauhtémoc hacia el poblado Laguna de Labradores; o desde Monterrey por la carretera federal 85 hasta Montemorelos, se toma la carretera estatal a Rayones y se pasa por el camino de terracería hasta la ciudad de Galeana.

3.1.3. Orografía

El área de estudio se caracteriza por la presencia de uno de los picos más altos del Noreste de México, El Cerro del Potosí con 3,770 msnm; su relieve es imponente dentro del antepaís de la Sierra Madre Oriental. En el área también se encuentra la Sierra de Viborillas con alturas de más de 2000 msnm en sus picos, la cual se encuentra rodeando la parte NE de la cuenca de estudio. El valle formado entre los relieves mencionados, tiene una altura promedio de 1700 msnm. En los alrededores la morfología kárstica se presenta de manera importante (lo cual se verá a detalle en capítulos posteriores).

3.1.4. Hidrografía

El área de estudio se encuentra dentro de la región Hidrológica del Río San Fernando-Soto La Marina (RH-25), Cuenca del Río San Fernando.

De acuerdo al estudio de WENZENS (1973) y a la red hidrográfica obtenida en el sitio web SIATL (Simulador de flujos de agua de cuencas hidrográficas, INEGI, 2012), se delimitó la cuenca hidrográfica de este estudio, en base a los escurrimientos y a los parteaguas del lugar (Figura 11), a la cual a partir de ahora se le llamará “Cuenca La Laguna”. Los escurrimientos se unen en arroyos que más tarde llegan al río Potosí.

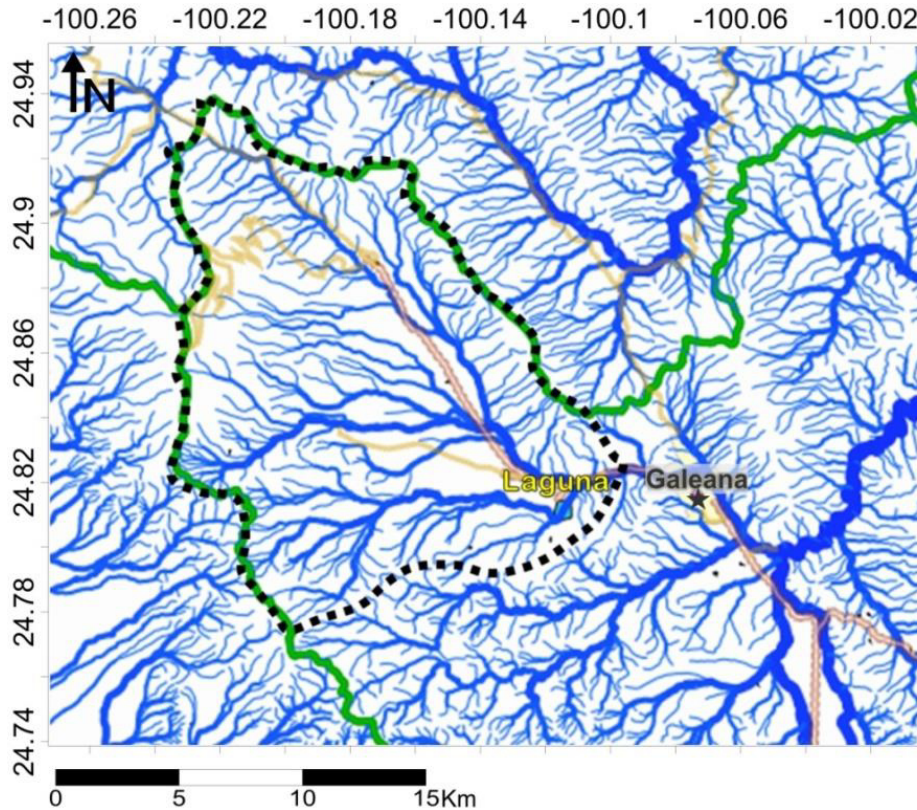


Figura 11. Delimitación de la Cuenca La Laguna a partir de la red de escurrimientos del área. Modificada del SIATL. La línea verde es el límite del acuífero Citrícola sur. El área punteada es el límite de la cuenca local del área de estudio.

3.1.5. Clima

El clima dominante de esta región es templado subhúmedo con lluvias de verano, precipitación total anual entre 600 y 800 mm y una temperatura media anual entre 12 y 18°C. En esta región hay mayor humedad debido a la sombra pluviométrica provocada por la Sierra Madre Oriental, que interfiere en la circulación de los vientos provenientes del Golfo de México. La temperatura es más alta en el fondo de los valles y de las depresiones.

Respecto a las oscilaciones térmicas se observa que, a pesar de que las variaciones diarias influyen en el desarrollo kárstico, son más significativos los cambios estacionales. La oscilación térmica anual es extremosa, con una diferencia entre el mes más frío y el

mes más cálido, de 7 a 14°C y es en la estación invernal cuando se intensifican los procesos de *criokarst* (HUÍZAR-ÁLVAREZ y OROPEZA-OROZCO, 1989).

3.1.6. Vegetación

La vegetación en la provincia de la SMO está determinada por el clima. Sin embargo, también las variantes topográficas influyen para que aparezca en diferentes especies y tamaños. En los valles y partes bajas de los cerros se desarrollan dos tipos de vegetación dominante: matorral desértico micrófilo o resetófilo. La vegetación en las partes más elevadas de las sierras es tan diversa que no permite establecer con seguridad un tipo dominante. Si bien es cierto que los pinos cubren áreas considerables, frecuentemente se les encuentra mezclados con otros tipos de vegetación como matorrales. Hacia la cima del Cerro del Potosí, la vegetación de páramo con arbustos de muy poca altura se presenta debido al clima semifrío, sin embargo no es un tipo de vegetación frecuente en nuestro país (INEGI, 1986).

3.2. Aspectos geológicos de referencia

3.2.1. Geología Regional

El municipio de Galeana forma parte de la provincia geomorfológica de la Sierra Madre Oriental, la cual tiene una historia evolutiva compleja debido a los procesos tectónicos que ha sufrido: la orogenia Ouachita Marathon durante el Pensilvánico-Pérmico (311-253 Ma), la formación del Golfo de México en el Triásico tardío-Jurásico medio (210-165 Ma), la sedimentación de casi toda la columna estratigráfica por la intrusión marina desde la creación del Golfo de México hasta el Cretácico Tardío (99–65 Ma) y la orogenia Laramide a inicios del Paleoceno (65 Ma) la cual formó la Sierra Madre Oriental. La evolución tectónica del lugar formó un relieve montañoso y con valles intermontanos, conformado por pliegues recostados, cabalgaduras y fallamiento inverso,

dando como resultado cerros de entre 2500msnm y el pico más alto del noreste de México, el Cerro del Potosí con 3760msnm; tales procesos son descritos por Coney (1983), Padilla-Y Sánchez (1985), Goldhammer (1999), Eguiluz y colaboradores. (2000) y Gray y Lawton (2011).

3.2.2. Geología local

El área de estudio se localiza geológicamente en el Anticlinal Dieciocho de Marzo formado principalmente por el Cerro del Potosí y la Sierra de Viborillas como flancos (Figuras 12, 13 y 14) y teniendo como núcleo erosionado una planicie en la que se encuentran las localidades de 18 de Marzo, Manila, El porvenir, El Derramadero, Laguna de Labradores, El Potrero, Jalisco y Galeana.

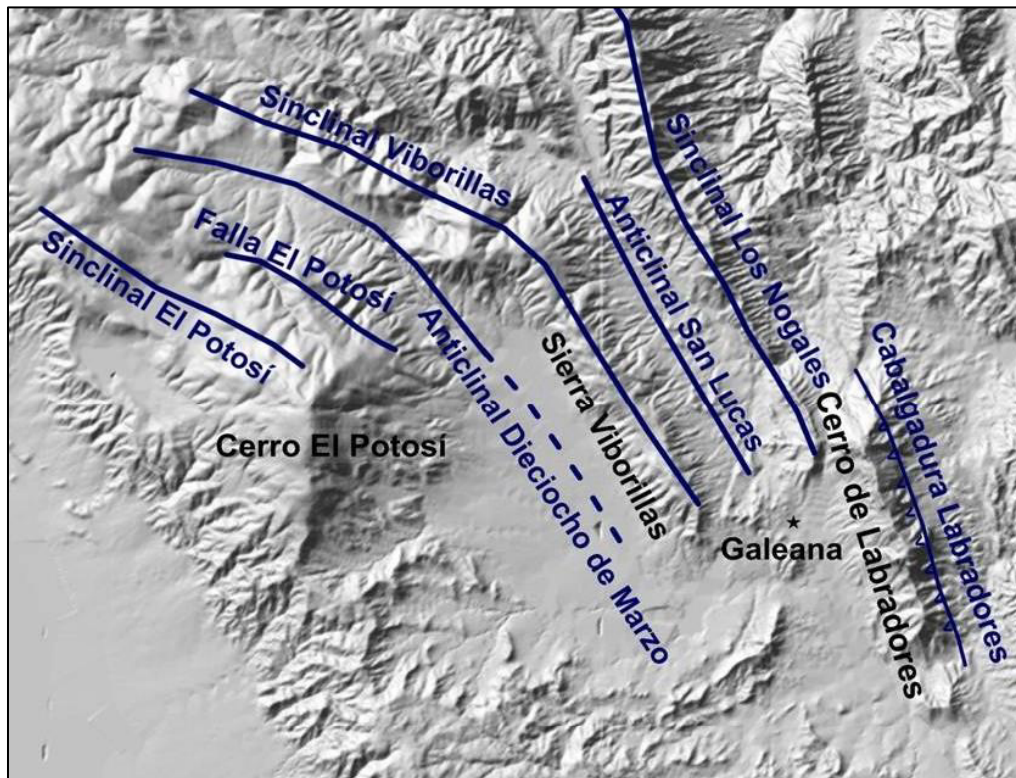


Figura 12. Principales lineamientos geoestructurales del área de estudio. Criterios tomados de acuerdo a la carta geológica del INEGI y la carta geológica minera del SGM.

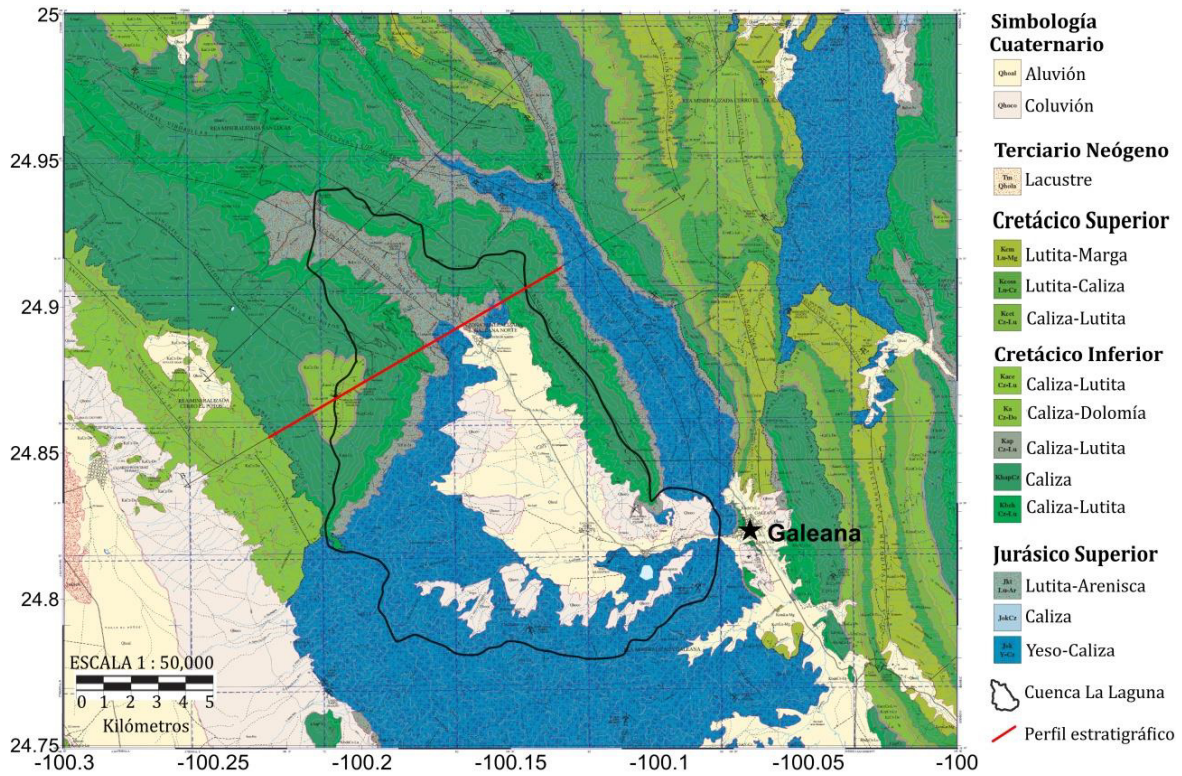


Figura 13. Carta Geológico-Minera de Galeana, clave G14C56, adaptada de Servicio Geológico Mexicano (2007).

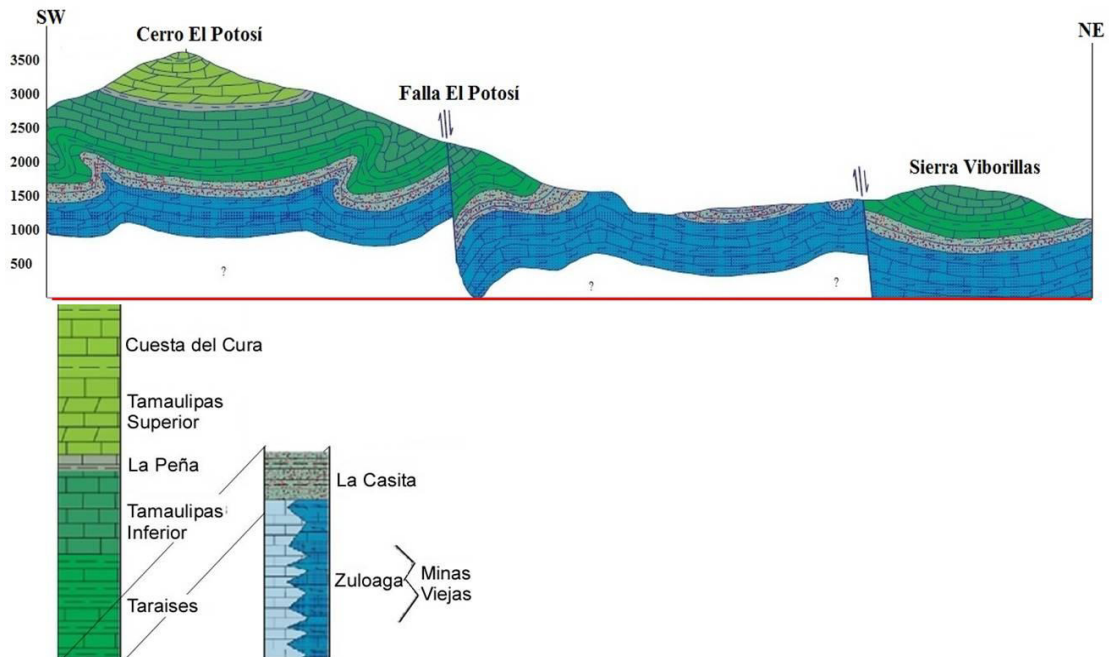


Figura 14. Sección geológico-estratigráfica adaptada de la carta Geológico-Minera, Galeana G14C56, Nuevo León, Servicio Geológico Mexicano (SGM, 2007).

La litología del área está integrada por una secuencia sedimentaria esencialmente marina formada por calizas, calizas arcillosas y yesos, que comprende desde el Jurásico Superior hasta el Cretácico Inferior. Gran parte de esta litología está cubierta por sedimentos cuaternarios. Se reconocen localmente las siguientes formaciones estratigráficas:

>> Minas viejas (Calloviano - Oxfordiano)

La unidad más antigua que aflora en el área de estudio es la formación Minas Viejas, la cual fue definida por Humphrey (1954) para denominar los estratos de yeso, lutita y arenisca formados en un ambiente hipersalino, en la localidad de Sierra de Minas Viejas, Nuevo León.

Götte (1988) en un estudio detallado de la Formación Minas Viejas en el municipio de Galeana, dividió dicha formación en cinco subsecuencias litológicamente variables:

- 1) Secuencia sulfática superior: conformada por sulfatos encontrándose en contacto con la Formación Zuloaga
- 2) Secuencia lutítica-calcárea (Miembro Santa Rita): Está constituido en su mayor parte de lutitas y limolitas calcáreas, las cuales aparecen en afloramientos recientes con colores negros.
- 3) Secuencia sulfática-carbonatada: conformada por calizas y sulfatos, abundan capas delgadas de limolitas y areniscas.
- 4) Secuencia calcárea (Miembro las Minas): La formación también llamada “Caliza Las Minas” tiene espesores considerables (>150m) que van disminuyendo hacia el SW; Se compone de calizas con intercalaciones de limolitas y areniscas.
- 5) Secuencia sulfática inferior: Consiste principalmente de anhidrita, la cual está yesificada superficialmente. La superficie de la roca anhidrítica aún no yesificada se encuentra desde unos 10 hasta 20 metros bajo el nivel del terreno. Varios horizontes carbonatados se intercalan con espesores menores de un metro hasta 30 m.

En el área de estudio, esta formación aflora en algunas partes de la planicie de la cuenca y en las faldas del Cerro el Potosí, hacia las cercanías del Ejido 18 de Marzo, donde se presenta como una gruesa capa de yeso, con intercalaciones de caliza y anhidrita, y hacia la parte sur de la cuenca se encuentran los miembros calcáreos de la Formación. Se estima un espesor de más de 600 metros (Gracia-Marroquín, 2009).

>> Zuloaga (Oxfordiano)

La formación Zuloaga fue definida formalmente por Imlay (1938) en la Sierra de Sombrerete, Zacatecas. Contiene secuencias de lutita, dolomita, limolita e intercalaciones de yeso.

En el área de estudio esta formación se encuentra aflorando al lado Noreste del Cerro El Potosí y en la planicie de la cuenca de estudio, cercano al Pozo del Gavilán y la Laguna de Labradores. Se compone de caliza de color gris claro con espesor mediano, con presencia de vetas y fracturas rellenas de calcita, se estima un espesor de 100 metros.

>> La Casita (Kimmeridgiano - Tithoniano)

La formación La Casita fue definida por Imlay (1936) en la localidad del Cañón La Casita a 16 km de General Cepeda, Coahuila. Está compuesta por una secuencia de lutita, arenisca y capas de caliza intercaladas.

Se encuentra aflorando en todo el camino que conduce desde el Ejido 18 de Marzo hasta las inmediaciones del Ejido La Manteca, camino a San José de la Hoya, con un espesor de 275 metros. Se caracteriza por presentar lutita masiva con intercalaciones aisladas de limolita que intemperiza a colores amarillentos y ocre. Presenta un gran contenido de fósiles de amonoides dentro de concreciones calcáreas (Gracia-Marroquín, 2009); Al contacto superior con la Formación Taraises se reconoce el cambio de litología de lutitas a calizas, los estratos de areniscas están intercalados con lutitas, luego aparecen calizas intercaladas en capas de lutitas hasta que las lutitas desaparecen hacia el contacto con Taraises.

>> Taraises (Berriasiano – Hauteriviano)

La formación Taraises fue definida por Imlay (1936) en el Cañón Taraises en la Sierra de Parras, conformada por dos miembros, el miembro inferior que se encuentra constituido por caliza arcillosa delgada de color gris, y el miembro superior es caliza arcillosa delgada de color negro con intercalación de lutitas calcáreas y caliza nodular.

Esta formación aflora en la parte alta del Cerro El Potosí, y en la Sierra de Viborillas; se compone de intercalaciones de marga y lutita, con espesores de 200 metros (Gracia-Marroquín, 2009).

>> Tamaulipas Inferior (Hauteriviano – Aptiano)

La formación Tamaulipas Inferior fue originalmente definida por Muir (1936) el estado de Tamaulipas; se caracteriza principalmente por presentar potentes espesores de calizas medianas a gruesas de color gris oscuro y frecuentemente, hacia la parte media de las capas, se observan bandas gruesas de juntas estilolíticas (Padilla-Y Sánchez, 1982).

Esta formación aflora, al igual que la Formación Taraises, en la parte alta del Cerro El Potosí y en la Sierra de Viborillas, se compone de calizas medianas y gruesas de color gris, observándose que los espesores de los estratos van de gruesos a masivos con desarrollo amplio de karstificación. El espesor total estimado es de 550 metros en el área de estudio (Gracia-Marroquín, 2009).

>> La Peña (Aptiano)

La formación La Peña fue descrita originalmente por Imlay (1936), en la Sierra de Parras, Coahuila; ésta fue redefinida por Humphrey (1949) en la Sierra de los Muertos, Nuevo León. La unidad está formada por margas de color gris que intemperizan en colores rosa y rojo, interestratificadas con delgadas capas de calizas de color gris; puede contener vetillas y lentes de pedernal.

La formación La Peña aflora en el Cerro El Potosí; se caracteriza por presentar

marga intercalada con lutita, nódulos y bandas de pedernal, se presenta en estratos delgados y fuertemente fracturados. Tiene un espesor aproximado de 30 metros (Gracia-Marroquín, 2009).

>> Tamaulipas superior (Albiano)

Muir (1936) fue el primero en definir esta formación a detalle, en el Cañón de la Borrega, al suroeste de Ciudad Victoria, Tamaulipas como una secuencia de 134 metros de caliza de estratificación mediana, con lentes y bandas de pedernal de color negro.

Esta formación aflora en las partes altas del Cerro El Potosí, se caracteriza por presentar caliza gruesa a masiva con nódulos de pedernal y estilolitas diagenéticas. Se estima un espesor de 190 metros (Gracia-Marroquín, 2009).

>> Cuesta del Cura (Albiano – Cenomaniano)

Esta formación fue definida por Imlay (1936) en la Sierra de Parras, Coahuila. La secuencia descrita originalmente se conforma de capas delgadas de caliza con arcilla con nódulos, lentes y bandas de pedernal.

En el área de estudio, esta formación aflora en la punta del Cerro El Potosí; presenta intercalaciones de marga delgada a mediana con bandas, lentes y nódulos de pedernal negro intercaladas con lutita lamiar, se presenta en estratificaciones ondulantes. Se estima un espesor en áreas cercanas de 120 metros (Gracia-Marroquín, 2009).

3.2.3. Geomorfología

Como se ha mencionado, gran parte de la columna estratigráfica del área de interés está formado por secuencias de carbonatos y sulfatos, esta litología forma parte del proceso de karstificación al estar siempre en contacto con el agua de los acuíferos y al tener las condiciones adecuadas de temperatura.

La Cuenca de estudio es una zona kárstica con orientación predominante NW-SE,

que está constituida por capas de yeso y caliza las cuales forman la orilla de la cuenca misma. Los límites del norte, sur y este de la planicie están constituidos por areniscas (insolubles). Morfológicamente la zona alrededor de Galeana puede dividirse en tres secciones (Wenzens, 1973): 1) La planicie de La Poza al sur, 2) La vertiente de Galeana en el centro y 3) La planicie de La Laguna en el norte (Figura 15).

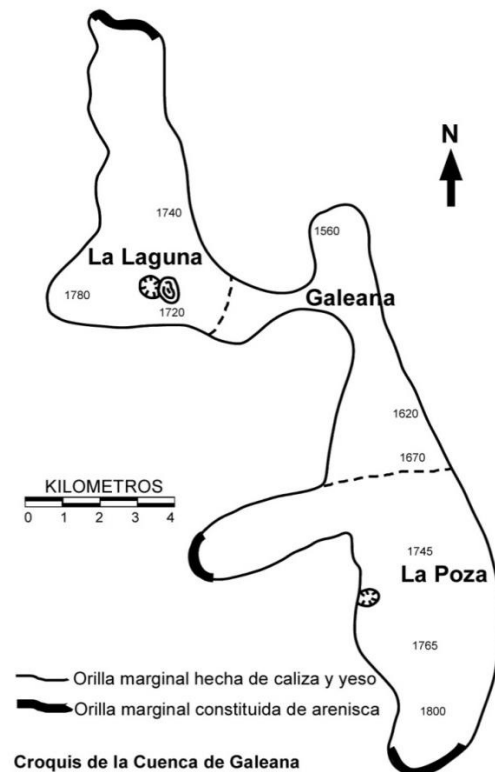


Figura 15. Esquema de la Planicie de la Laguna, Planicie de Galeana y Planicie de La Poza; tomado de Wenzens, 1973

En la planicie de La Laguna, que es donde se encuentra la Laguna de Labradores, se formó un *Poljé* conectado con la zona de desagüe durante el Pleistoceno; esto queda indicado por el rompimiento en forma de escalones en la barranca en la salida hacia Galeana, pues dicha salida posee la misma altura de 1662 metros coincidiendo la máxima altura con el parteaguas de la planicie. La planicie de La Laguna está definida por Wenzens (1973) como una olla enorme de rompimiento, con agua en el fondo, que sirve como colector para los desagües subterráneos. El rompimiento es referido al descenso del nivel del agua hasta 50 metros bajo la superficie de la orilla sur, seguido del abatimiento del

nivel piezométrico el cual originó el alto desarrollo de yeso en esta zona. Debido a la evaporación, la Planicie de la Laguna no posee un desagüe, por lo que el agua está altamente saturada en yeso, sobre todo hacia la parte sur. Las estructuras de colapso se encuentran únicamente en la zona sur y sureste (Figura 16), siempre junto al contacto geológico yeso-caliza.

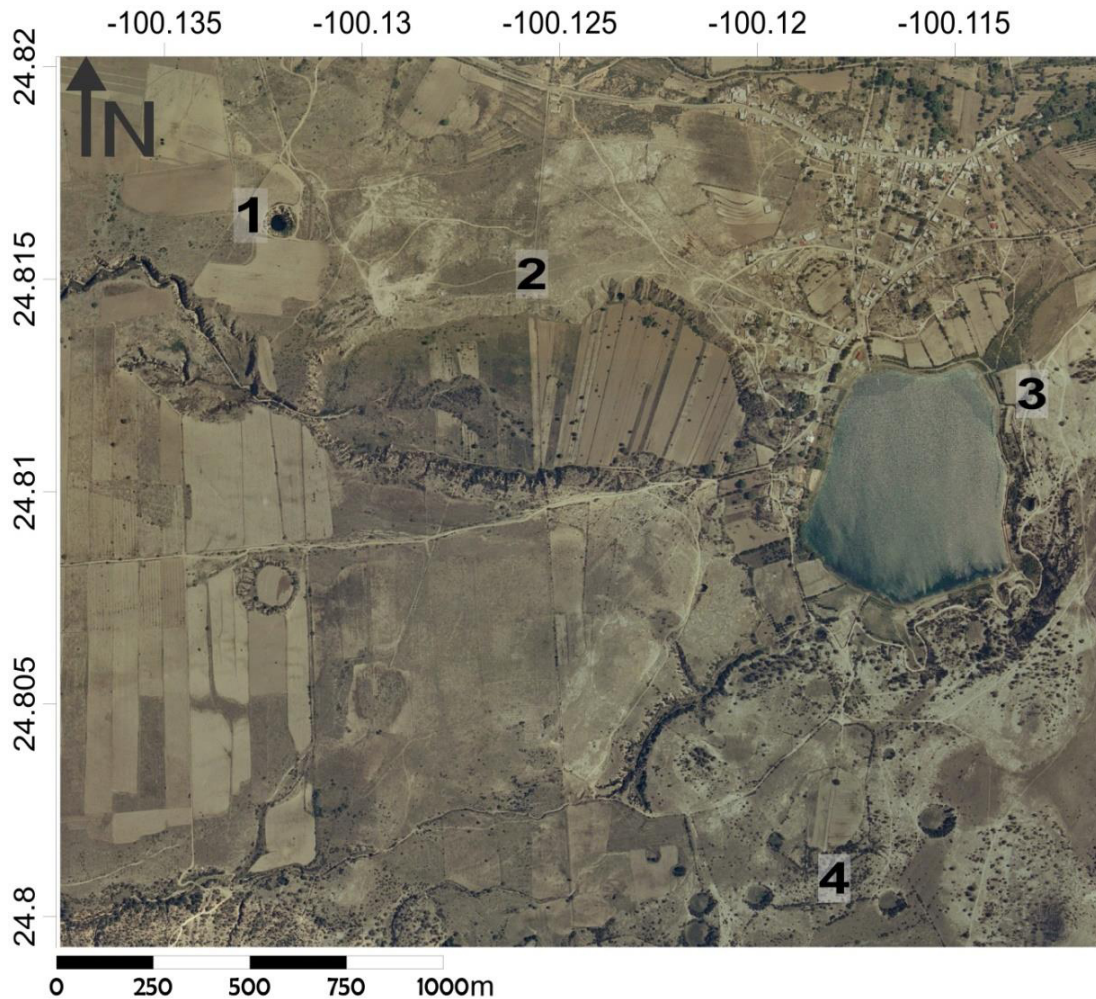


Figura 16. Geomorfología kárstica principal del área de estudio; 1) Pozo del Gavilán, 2) Laguna Seca, 3) Laguna de Labradores y 4) Grupo de dolinas menores.

A continuación se describen las formas kársticas principales encontradas en el área de estudio, las cuales se ubican dentro de la Planicie La Laguna:

La Laguna de Labradores es una dolina de subsidencia (Figura 18) de 500m de

diámetro y 73 de profundidad (Ver Apéndice 1), la cual presenta una base cubierta por arcillas tipo *terra rossa* que impide en ocasiones el drenaje natural, lo cual determina el predominio de la ampliación sobre la profundización de la misma; es así como surgen las dolinas-lago, en las cuales existe agua durante todo el año.

A 2 Km de distancia se tiene el Pozo del Gavilán (Figura 17) el cual es una dolina de colapso (Figura 19), de 90m de diámetro y 100m de profundidad, se caracteriza por su disolución vertical motivando los colapsos continuos (Huizar-Álvarez y Oropeza-Orozco, 1989); Esta disolución activa fue corroborada tanto para el Pozo del Gavilán como para la Laguna de Labradores mediante comparación de fotografías aéreas (Chapa-Guerrero y colaboradores, 1994).



Figura 17. Izquierda: Vista lateral hacia el interior del Pozo del Gavilán. Fotografía tomada el 21 de Febrero de 2014. Derecha: Fotografía aérea del Pozo del Gavilán, tomada del blog *Skyscrapercity*.

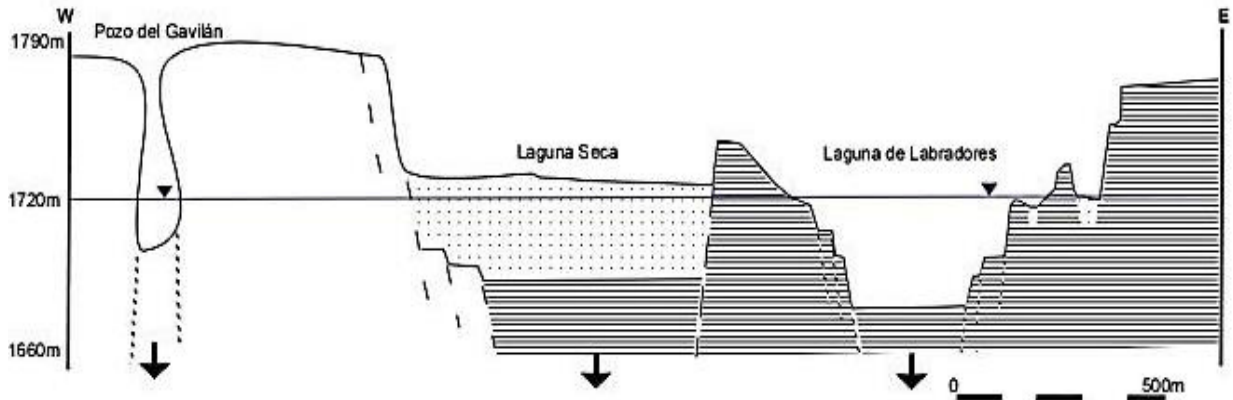


Figura 18. Perfil estructural cruzando el Pozo del Gavilán, la Laguna seca y la Laguna de Labradores en el municipio de Galeana, Nuevo León. Se indica un nivel freático a 1720 msnm. (Tomado de Chapa-Guerrero y colaboradores, 1994).

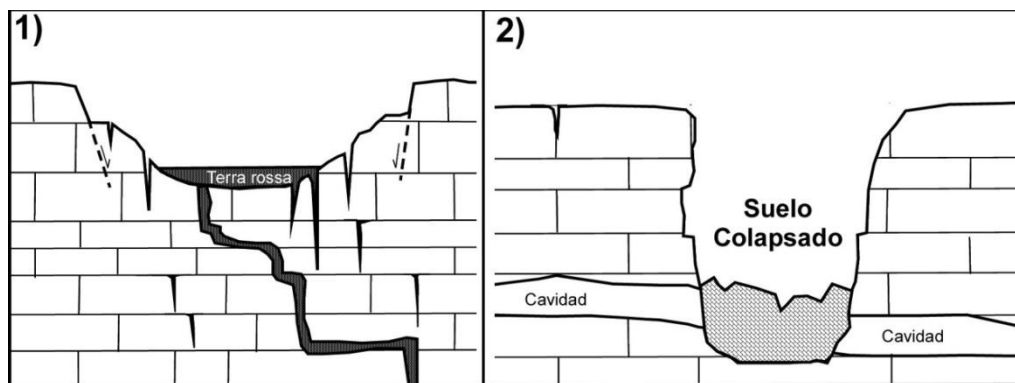


Figura 19. 1) Dolina de subsidencia: ocurre disolución en la superficie, subsidencia por bloques y hay sedimentos terra rossa que cubren la base de la dolina, obstruyendo el conducto de desagüe. 2) Dolina de colapso: El flujo del agua a través de las cavidades forma una caverna que va creciendo hacia el exterior, causando un colapso de su techo cuanto ya no soporta el peso y la tensión.

Hacia la parte este de la laguna se pueden observar lapiaces (Figura 20) en yeso-anhidrita de pocos centímetros de profundidad con crestas agudas.

Otra estructura, que se encuentra a 200 metros de distancia al oeste de la laguna, es la Laguna Seca (Figura 22); esta depresión tiene las mismas características que la Laguna de Labradores, además de tener como aportación hídrica, el flujo de un paleorío que se formó de la unión de varios escurrimientos del Cerro del Potosí; Esta estructura en

la actualidad no tiene agua por el descenso del nivel del agua. En la parte norte se puede observar la presencia de un sumidero el cual se llama Pozo del álamo o también es conocido como Cenote azul, por el intenso color del agua que se encuentra fluyendo a través de este pozo, se cree que esta forma kárstica tiene las mismas características genéticas que una dolina de colapso (Figura 21).

Ninguno de los trabajos revisados trata la posibilidad de una conexión directa de la Laguna con el Pozo del Gavilán y el Pozo del Álamo, a través de conductos subterráneos kársticos, pero los testimonios de habitantes del lugar aseguran dicha conexión.

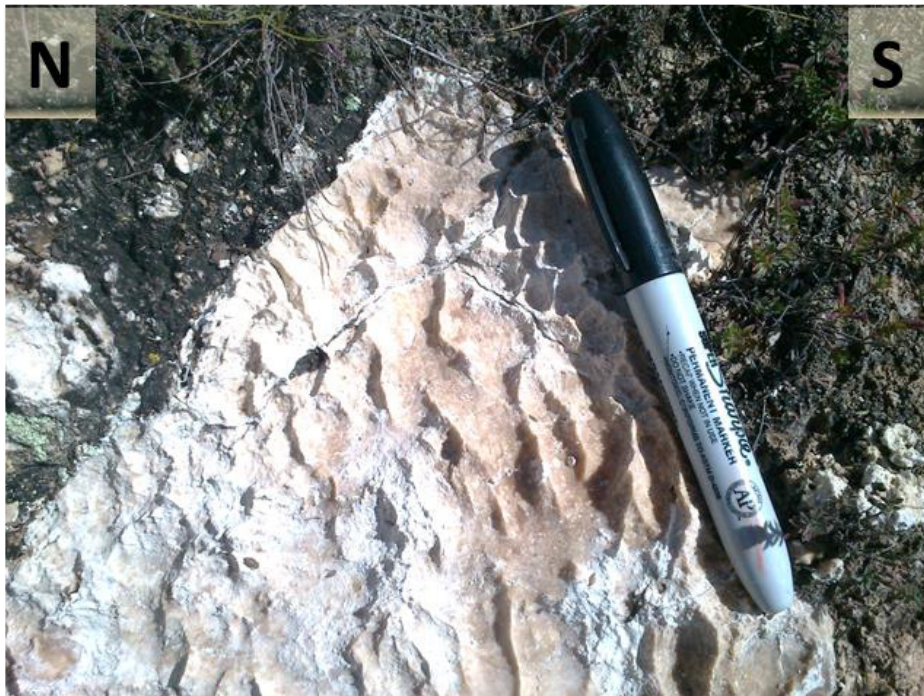


Figura 20. Geomorfología tipo Lapiaz en el área de estudio. Fotografía tomada el 28 de Septiembre de 2013



Figura 21. Pozo del álamo o Cenote Azul. Fotografía tomada el 21 de Febrero de 2014.



Figura 22. Vista lateral de la Laguna Seca, se observa en su interior una dolina de aprox. 5 metros de diámetro; al lado derecho de la fotografía se observa la parte superior del Pozo del Álamo en una de las paredes de la Laguna Seca. Fotografía tomada desde la parte norte de la Laguna Seca en el camino hacia Dieciocho de Marzo, el día 21 de Febrero de 2014.

3.2.4. Hidrogeología

Cada Formación geológica permite el tránsito del agua de acuerdo a su litología (Figura 23), a partir de esto se forman los acuíferos, sus pisos y sus bases. En el área de estudio la base del acuífero está conformada por las Formaciones La Joya y Huizachal. Debido a la estratificación heterogénea que hay entre cada Formación Geológica, se dice que el agua recorre todas las formaciones a través de sus estratos más permeables, los estratos impermeables sirven como límites de los acuíferos, y en Formaciones como Minas Viejas y Zuloaga el agua fluye a través de la porosidad secundaria y terciaria, es decir del fracturamiento y los conductos kársticos respectivamente.

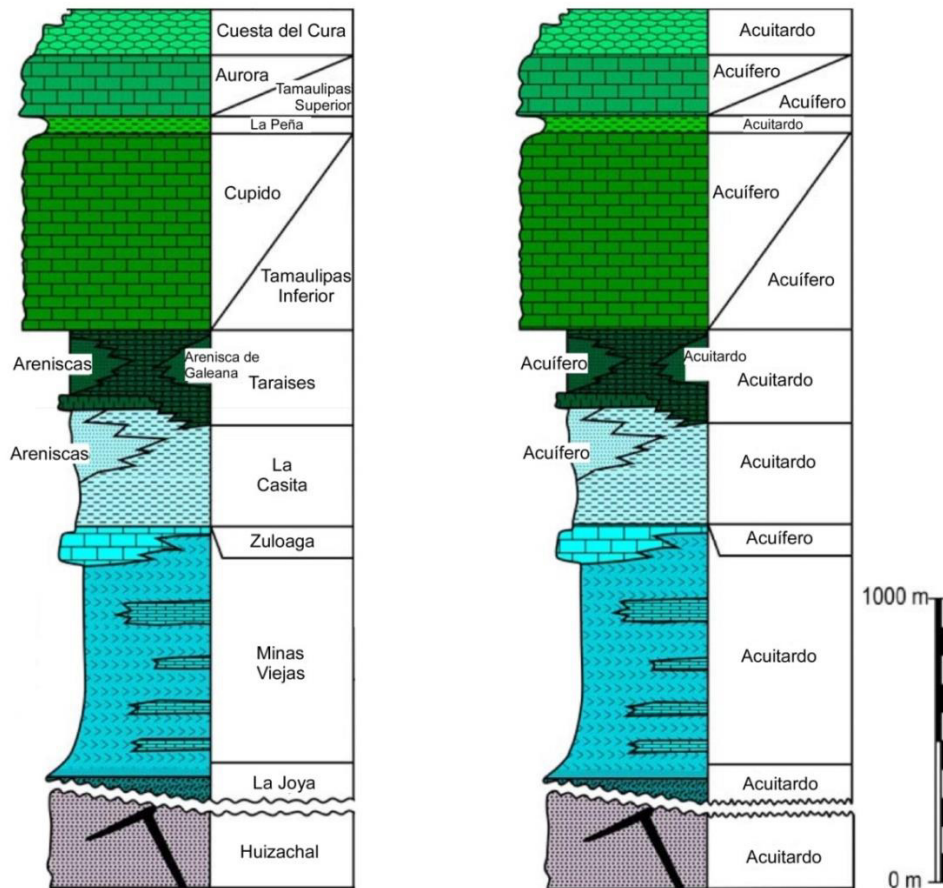


Figura 23. Columna estratigráfica del NE de México y su potencial hidrogeológico (Modificada de Michalzik, 1988), adaptada de Moctezuma-Navarro (2011).

La recarga de los acuíferos ocurre por la infiltración del agua de lluvia, y en algunos casos, de nieve en temporadas de frío.

La descarga de los acuíferos ocurre a través del manantial del poblado 18 de Marzo y de la Laguna de Labradores en su poblado homónimo. Más hacia el Este de la cuenca también hay descarga en el Manantial El Chorro, cercano a la cabecera municipal de Galeana. Cabe mencionar que en cartas hidrológicas del INEGI de años anteriores (1981) se muestra la ubicación de otros manantiales dentro de la cuenca al Oeste y Norte de la cuenca, sin embargo son intermitentes y de agua meteórica que actualmente no se observan en el área.

Se considera que el sistema acuífero está conformado por tres zonas (Huizar-Álvarez y Oropeza-Orozco, 1989); La primera zona superficial es de infiltración difusa y lenta, a través de diaclasas y fracturas pequeñas, en su mayoría en material aluvión y conglomerado. La segunda zona es a niveles poco profundos conteniendo el agua vadosa estacional, esto se presenta en las áreas de recarga formadas por calizas y lutitas en formaciones como La Casita y Taraises; se pueden llegar a observar acuíferos colgados formados por horizontes impermeables y/o la presencia de fallas inversas, estos se manifiestan como manantiales, ubicados sobre dichos horizontes.

Dentro de estratos inclinados con más de 30°, el agua circula a nivel de los estratos y fracturas, lo cual aunado a las características climáticas, determina un proceso lento de corrosión. A una profundidad mayor se encuentra la tercera zona, la zona de saturación de la cual se pueden extraer gastos razonables, pero la calidad del agua, en algunos sitios, no es muy aceptable ya que procede de cuerpos de yeso de la formación Minas Viejas, este tipo de agua es llamada “agua dura” (Figura 24).

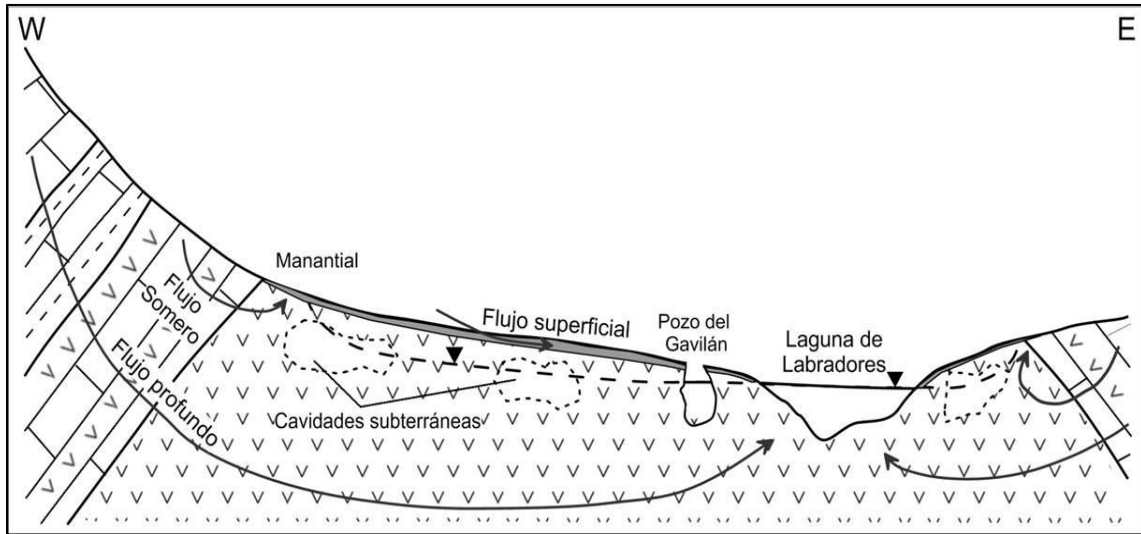


Figura 24. Perfil esquemático de las tres zonas del sistema acuífero del área de estudio, descritas por Huízar-Álvarez y Oropeza-Orozco (1989).

Capítulo 4. Caracterización de unidades hidrogeológicas

El término agua subterránea se usa para referirse al agua que se encuentra en los poros de las rocas que conforman los suelos y las formaciones geológicas (Freeze y Cherry, 1979). La ocurrencia y movimiento del agua subterránea depende de las características hidrogeológicas de las formaciones geológicas. Estas formaciones naturales varían en litología, textura y estructura. Las formaciones geológicas que contienen agua subterránea, son clasificadas de acuerdo a sus permeabilidades relativas (Singhal y Gupta, 1999):

- 1) **Acuífero:** Formación geológica saturada con agua, el cual tiene una alta conductividad hidráulica para abastecer una cantidad razonable de agua a un pozo o surgencia.
- 2) **Acuitardo:** Formación geológica que tiene permeabilidad insuficiente para ser un abastecimiento de agua, pero permite la circulación del agua hacia acuíferos adyacentes.
- 3) **Acuicludo:** Formación geológica que contiene agua en cantidad apreciable pero que el agua circula a través de ella con dificultad.
- 4) **Acuífugo:** Formación geológica que no contiene agua ni permite la circulación a través de ella.

La diferencia básica entre un acuífero y otro, es la litología que lo comprende, esto hace que el agua fluya y el nivel de facilidad con que lo haga, y por lo tanto su velocidad. Se distinguen tres tipos de acuíferos principales (Figura 25) (Werner, 1996):

- **Acuíferos de poros:** En su mayor parte se trata de sedimentos sueltos (gravas, arenas). El agua se mueve en los poros (intersticios). Los poros componen la porosidad primaria.
- **Acuíferos de grietas:** Rocas consolidadas como areniscas, calizas no

karstificadas, basaltos, granitos y otras rocas extrusivas e intrusivas, gneises. El agua se mueve en las fracturas abiertas de origen tectónico o de intemperismo. El contenido de poros generalmente es despreciable. Las grietas componen la porosidad secundaria.

- Acuíferos kársticos: Rocas karstificadas (calizas, dolomías, yesos). El agua se mueve en los huecos kársticos de diámetros muy variables (canales, cavidades). El contenido de poros es despreciable. Los conductos kársticos componen la porosidad terciaria.

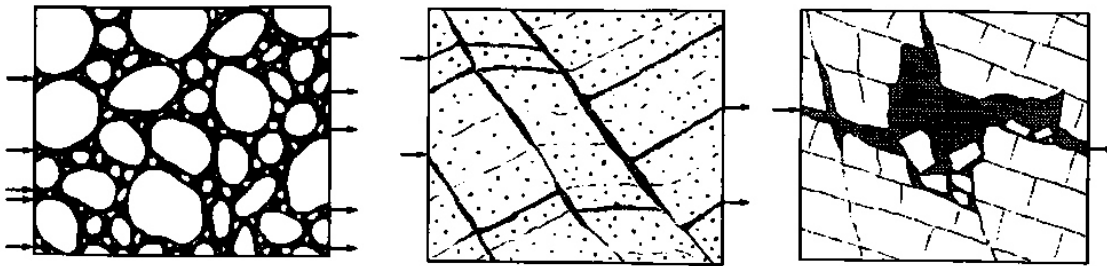


Figura 25. Tipos de acuíferos litológicos. Izquierda: acuífero de poros; centro: acuífero de grietas; derecha: acuífero kárstico. Tomado de Werner, 1996.

Por otra parte, los acuíferos, según sus circunstancias hidrodinámicas, pueden funcionar de tres distintas formas (González-De Vallejo, 2004):

- Acuíferos libres: son aquellos en los que el nivel del agua se encuentra por debajo del techo de la formación permeable. Liberan agua por desaturación, es decir, el agua que ceden es el agua que tienen almacenada.
- Acuíferos cautivos o confinados: son aquellos que están aislados en el subsuelo, rodeados de materiales impermeables por todos sus lados. El nivel del agua en los acuíferos cautivos está por encima del techo del material acuífero; en realidad están a presión o en carga debido al peso de los materiales superiores. El agua que ceden procede de la descompresión de estos niveles superiores cuando se produce la depresión en el acuífero. En rigor no existen acuíferos cautivos puros en la naturaleza dado que no existen

materiales absolutamente impermeables capaces de aislarlos, aunque a efectos prácticos muchos se pueden considerar como tales.

- Acuíferos semiconfinados: los materiales que los rodean no son todos impermeables; así el paquete superior o semiconfinante lo constituyen formaciones semipermeables que permiten el paso del agua de otros acuíferos superiores al inferior semiconfinado.

4.1. Movimiento del agua en un acuífero

El factor fundamental básico que hace que el agua subterránea fluya, es la gravedad. Así como la fuerza gravitatoria de la Tierra hace que el agua caiga desde el cielo, así esta fuerza permite que el agua subterránea migre a través de los poros de las rocas. En términos generales, el agua subterránea se comporta como cualquier otro fluido natural: tiende a fluir cuesta abajo desde los puntos altos. Sin embargo hay otros comportamientos del agua que no siempre han estado tan claros. Por ejemplo, que en ciertos lugares del acuífero, el agua subterránea puede fluir verticalmente en contra de la gravedad.

En 1856, H. Darcy explicó la relación fundamental constitutiva que se usa en la hidrogeología para entender el movimiento de los fluidos en la corteza terrestre. La ley de Darcy dice que el índice de flujo de un fluido a través de un medio poroso es proporcional al gradiente de energía potencial dentro del fluido, y que el agua subterránea se mueve en el medio geológico por los cambios de presión y de altura topográfica. En 1940, M.K. Hubbert a partir del estudio de Darcy, habló de las direcciones del flujo de agua subterránea, tomando en cuenta lo que él considera un término faltante en la ecuación de Darcy, la “Energía mecánica del fluido por unidad de masa”, la cual da el impulso al flujo de agua subterránea para fluir en cualquier dirección, incluso en contra de la gravedad, proponiendo el término “Potencial” para referirse a esta energía mecánica. El potencial de un fluido en un punto específico está definido como el trabajo requerido para transformar una unidad de masa de fluido de un estado a otro. Hay tres componentes para el cálculo

del potencial (Freeze y Cherry, 1979):

El trabajo requerido para levantar la masa m de una elevación z_0 a una elevación z , siendo g la gravedad en ese punto:

$$w_1 = mgz \quad (2)$$

El trabajo requerido para acelerar el fluido de una velocidad v_0 a una velocidad v :

$$w_2 = \frac{mv^2}{2} \quad (3)$$

Y el trabajo realizado en el fluido con el aumento de la presión de p_0 a p :

$$w_3 = m \int_{p_0}^p \frac{V}{m} dp \quad (4)$$

El potencial de fluido se obtiene de la suma de los trabajos w_1 , w_2 y w_3 .

$$\Phi = w_1 + w_2 + w_3 \quad (5)$$

Con dichas fuerzas en conjunto es que el agua puede fluir en sentido horizontal y vertical, ascendente y descendente, independientemente de la situación de las formaciones geológicas, atendiendo únicamente al potencial del fluido (Φ) que tenga en cada punto del espacio (Figura 26) (Hubbert, 1940; Chapman, 1981; Young, 1999; González-De Vallejo, 2004). El conjunto de energías mecánicas conforman el potencial, lo cual queda descrito por la ecuación de Bernoulli (6), que fue modificada por Hubbert (7) para aplicarla al potencial hidráulico ya que para el agua subterránea es despreciable el factor cinético por ser siempre un valor demasiado pequeño

$$\Phi = gz + \frac{v^2}{2} + \int_{P_0}^P \frac{dP}{\rho} \quad (6)$$

$$\Phi = gz + \int_{P_0}^P \frac{dP}{\rho} \quad (7)$$

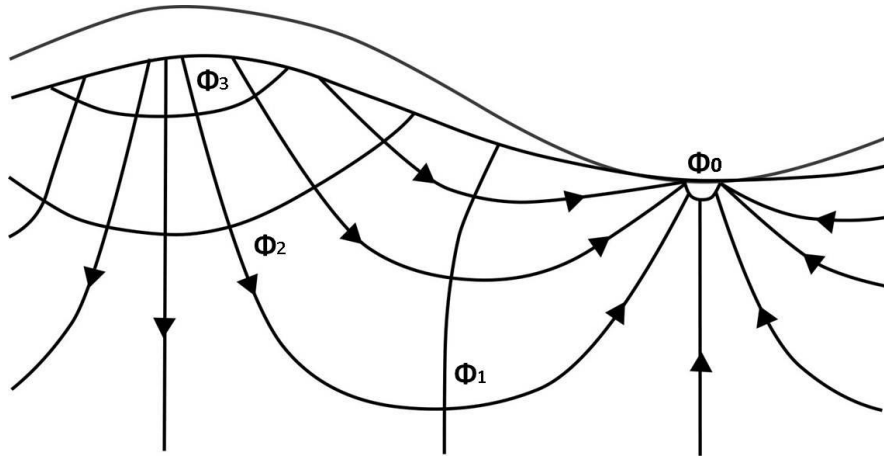


Figura 26. Direcciones del flujo de agua subterránea desde una zona con potencial de fluido mayor a una zona de potencial de fluido menor $\Phi_3 > \Phi_2 > \Phi_1 > \Phi_0$. Tomado de CHAPMAN (1981).

El agua se mueve desde los niveles de energía potencial más altos a los niveles energéticos más bajos. Su energía entonces procede de las diferencias de nivel de energía, y ésta se consume por la fricción con las superficies del medio rocoso a través del que circula. Estas pérdidas de energía mecánica se convierten en energía calorífica, que causa un aumento de temperatura prácticamente no medible, por lo tanto despreciable (Werner, 1996).

De acuerdo al manómetro de Darcy, la presión de un fluido en un punto cualquiera está dado por:

$$p = \rho g(h - z) + p_0 \quad (8)$$

Y la ecuación (8) la sustituimos en la suma de los trabajos correspondientes para el cálculo del potencial, para poder hacer una relación directa con la carga hidráulica h , se obtiene la ecuación (9) (con una reducción de términos):

$$\Phi = gh \quad (9)$$

El potencial hidráulico en cualquier lugar del acuífero corresponde al nivel piezométrico o a la presión del agua subterránea en ese mismo lugar. La diferencia de potencial entre dos puntos en una línea de flujo de agua subterránea es la pérdida de energía por la distancia entre ellos, en otras palabras, el gradiente hidráulico (o

piezométrico).

4.1.1. Los efectos de las barreras hidrogeológicas en la hidrodinámica

Como ya se ha mencionado, los medios kársticos son considerados de los más complejos y con el tiempo aumenta su complejidad así como su heterogeneidad y anisotropía; Tanto para karstificación en carbonatos como en sulfatos, las rocas son localmente impermeables, sin embargo el agua se introduce a través de discontinuidades que facilitan el almacenamiento y movimiento del agua a través de las mismas, disolviendo mediante los procesos de karstificación; sin estas zonas de “debilidad” la disolución subterránea no se podría llevar a cabo. Es entonces que la matriz rocosa cambia de propiedades hidrogeológicas y en cada zona diferente del karst, se comporta como diferentes tipos de acuíferos, litológicamente hablando.

Por otra parte algunas discontinuidades, por ejemplo las fallas y los diques también pueden actuar como barreras del flujo de agua. (Singhal Y Gupta, 1999). Dicho esto, es extremadamente importante entender y describir la estructura de la masa rocosa y cuantificar los patrones y naturaleza de sus discontinuidades que puedan actúan como barreras hidrogeológicas (Fallas, fracturas, diaclasas) (Golf-Racht, 1982) ya que con esto se pueden determinar las desviaciones que ocurran en las direcciones generales del agua subterránea.

Los efectos de las discontinuidades en el medio geológico son determinantes o insignificantes, dependiendo de numerosos factores, los más importantes son: Permeabilidad del material de relleno y del material del estrato, espesor y ángulo del plano de la discontinuidad. Se reconocen dos tipos básicos de discontinuidad (Tóth, 2009):

1) Discontinuidades de Barrera

Una discontinuidad es considerada barrera hidráulica (Figura 27) cuando su cuerpo

tiene una permeabilidad contrastantemente más baja que la formación yuxtapuesta a través de él. En muchas situaciones puede ser modelada como un límite impermeable. La impermeabilidad absoluta, sin embargo, es sólo un caso teórico limitado, rara vez existe en la naturaleza. Si se asume una permeabilidad absoluta se estaría manejando un concepto erróneo.

El efecto de barrera de una discontinuidad puede ser reducido por cambios temporales en su permeabilidad; tales cambios pueden ser por alteraciones mecánicas o químicas por disolución o remoción del material que la compone o por cambios relativos en la posición de los acuíferos y acuitardos. En este caso, el agua puede filtrar tan lentamente que necesite más de un año para atravesar la discontinuidad y de ninguna manera responde a la precipitación con fluctuaciones del nivel del agua. La velocidad principal de flujo puede alcanzar desde pocos centímetros o hasta metros por día (Lehmann, 1932).

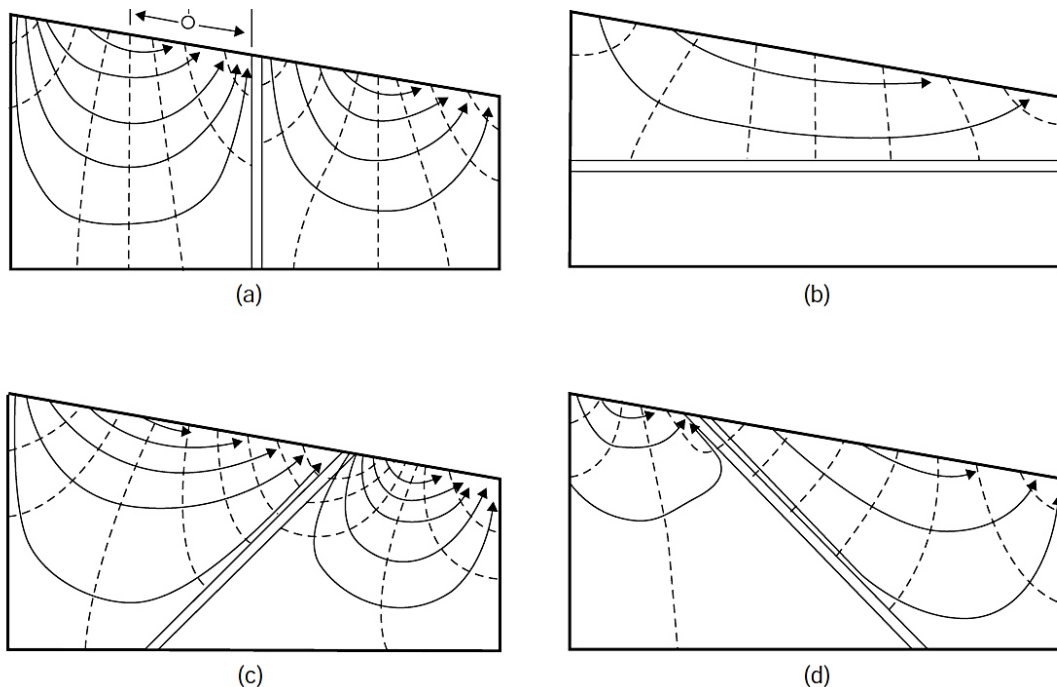


Figura 27. Efectos de una discontinuidad de barrera en una cuenca unitaria: a) vertical; b) horizontal; c) inclinación opuesta a la dirección del flujo regional; d) inclinación en dirección del flujo regional. Tomado de Tóth, 2009.

2) Discontinuidades conductivas

Se considera que una discontinuidad es conductiva hidráulicamente (Figura 28) si permite el fluido a través de ella. Los patrones de flujo cambian de acuerdo al contraste entre las permeabilidades, así como del ángulo de incidencia del flujo con el plano de la discontinuidad y el acuífero en sí.

Las discontinuidades conductivas se amplían por corrosión en el caso de medios kársticos y se vuelven hidrológicamente-kárstico activos, término dado por Lehmann en el año de 1932.

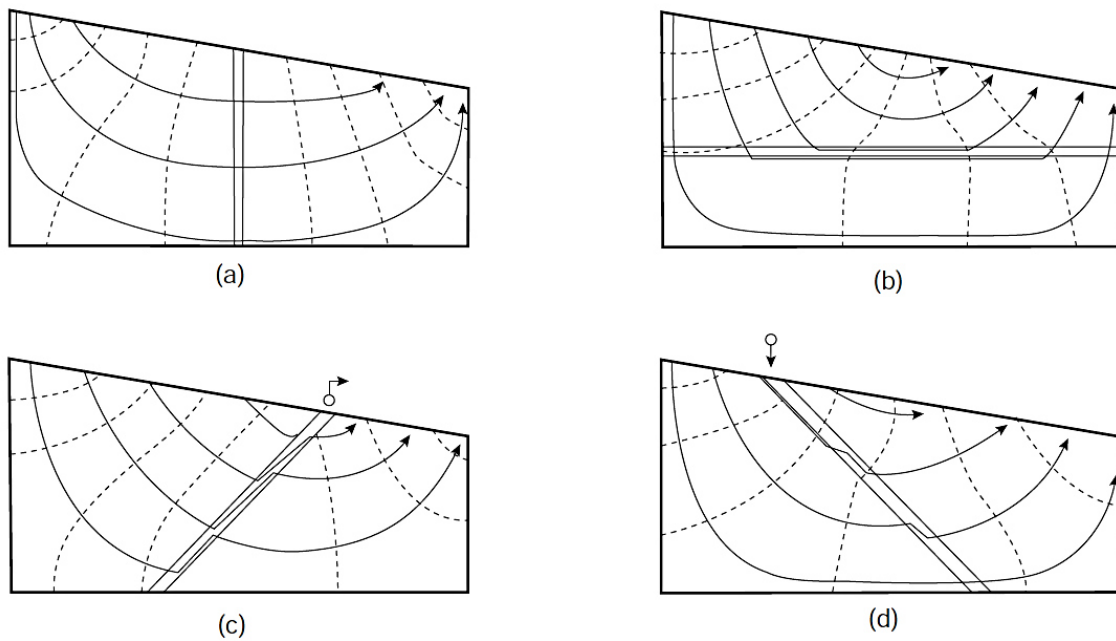


Figura 28. Efectos de una discontinuidad conductiva en una cuenca unitaria: a) vertical; b) horizontal; c) inclinación opuesta a la dirección del flujo regional; d) inclinación en dirección del flujo regional. Tomado de TÓTH, 2009.

4.2. Descripción hidrodinámica de acuerdo a la composición litológica-estructural, en el área de estudio.

Los estudios de la dinámica del agua buscan determinar y describir el comportamiento del flujo de agua en el subsuelo, sin embargo dicha información sólo puede ser considerada a grandes rasgos, debido a que la geología siempre desafía las descripciones cuantitativas en términos físicos y geométricos (Bögli, 1980). Para hacer que la hidrodinámica tenga más validez, es necesario tomar en cuenta la geología tanto estructural como estratigráfica y litológica del área de interés.

A partir de revisión bibliográfica, se recopilaron perfiles geológicos e información hidrogeológica del área, para describir el funcionamiento litológico-estructural del acuífero de estudio en la cuenca La Laguna, y con ello determinar las condiciones hidrogeológicas, y quizás ampliar los límites de la cuenca de estudio de manera subterránea, más allá de los parteaguas superficiales. Para esto se tomaron en cuenta información de manantiales (Tabla 2) y perfiles geológicos (Tabla 3) en los alrededores de la cuenca (Figura 29).

Tabla 2. Manantiales estudiados por diversos autores, cerca del área de estudio.

Manantial	Clave	Nombre	Temp. (°C)	pH	Autor del estudio	Año
1	TEJ	Los Tejocotes	14.5	7.3	Chavarría-Iglesias	1998
2	LAG	La Lagunita	15.4	7.0	Correa-Rubio	1998
3	RS	El Salitre	18.8	7.1	Correa-Rubio	1998
					Chavarría-Iglesias	1998
4	BUY	Los Bueyes	12.5	7.3	Chavarría-Iglesias	1998
5	LL	Los Llanitos	16.6	7.2	Correa-Rubio	1998
6	MAR	Dieciocho de Marzo	14.4	7.0	Chavarría-Iglesias	1998
7	SL	San Lucas	17.6	7.1	Correa-Rubio	1998
8	ACA	Los Aguacates	19.1	7.7	Correa-Rubio	1998
					Chavarría-Iglesias	1998
9	SC	Santa Cruz	15.6	7.6	Correa-Rubio	1998

Tabla 3. Líneas cartografiadas por diversos autores, cerca del área de estudio.

Línea	Autor del estudio	Año	Figura
A-A'	Barrera Navarro	1991	34
B-B'	Lara Tristán	1991	35
C-C'	Lara Tristán	1991	36
D-D'	Lara Tristán	1991	37
E-E'	Chavarría Iglesias	1998	38
F-F'	Chavarría Iglesias	1998	39
G-G'	Servicio Geológico Mexicano	2007	40
H-H'	Servicio Geológico Mexicano	2007	41
I-I'	Servicio Geológico Mexicano	2007	42
J-J'	Huizar y Oropeza	1989	43
K-K'	Huizar y Oropeza	1989	44
L-L'	Huizar y Oropeza	1989	45

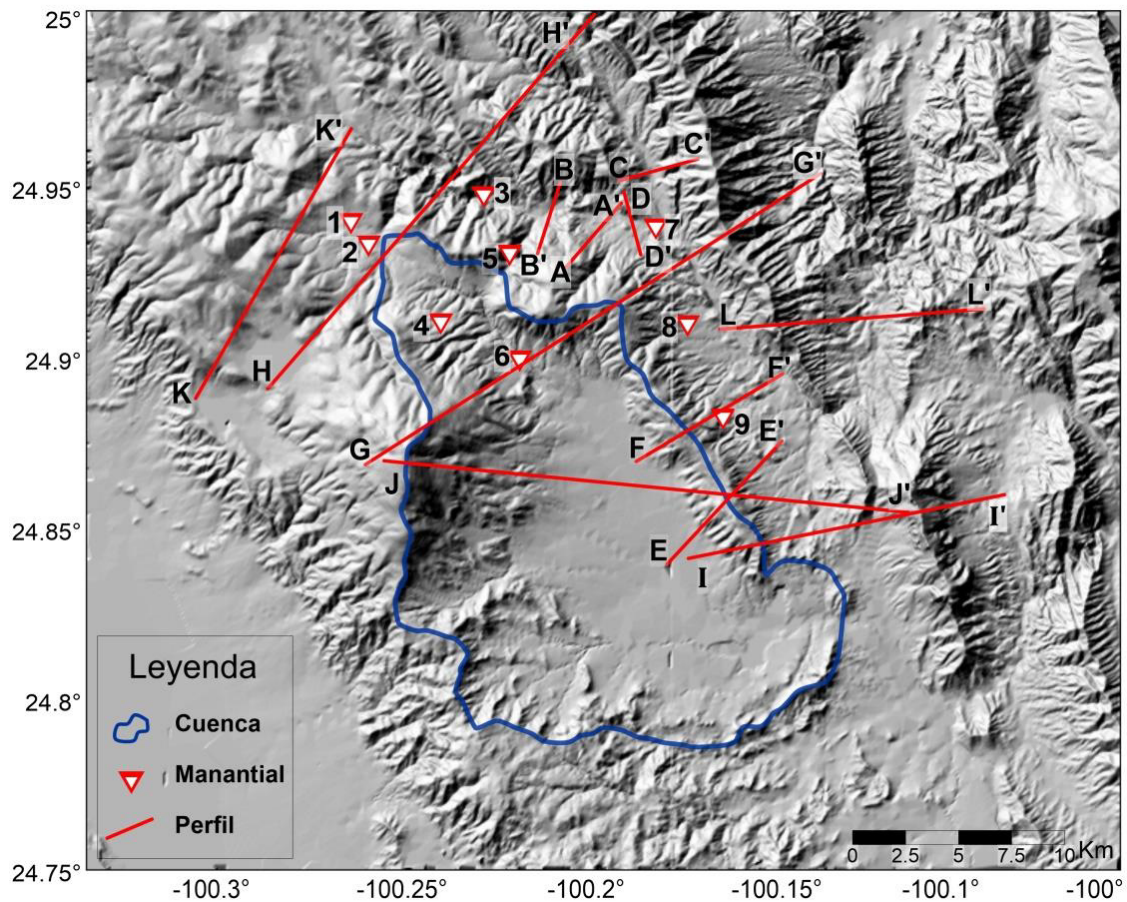


Figura 29. Ubicación de los perfiles y manantiales recopilados de la literatura.

Los manantiales y las líneas estudiadas en los trabajos consultados dan información útil para este trabajo:

Manantial 1 - Los Tejocotes TEJ

Alumbra en material cuaternario sobre la formación Taraises, con dirección al Este

Manantial tipo: depresión de superficie con alto grado de permeabilidad

Caudal: 5 L/seg

Composición hidrogeoquímica: cálcico-bicarbonatada.

Recarga: 3000 msnm, Cerro picacho o la Sierra el potosí

Figura 30

Manantial 2 - La Lagunita LAG

Alumbra en material cuaternario sobre la formación Taraises, con dirección al Este

Manantial tipo: depresión por superficie

Composición hidrogeoquímica: cálcico-bicarbonatada

Recarga: 3100 msnm, Cerro y Sierra El Potosí

Figura 30

Manantial 3 - El Salitre RS

Alumbra en travertino sobre la formación La Casita, con dirección al Este

Manantial Tipo: fracturas entre estratos con alto índice de permeabilidad.

El manantial se considera permanente

Caudal: 3 L/seg

Recarga: 2300 msnm, en la Sierra de Viborillas.

Una gran cantidad de fracturas se observa entre los estratos de lutitas y calizas, por una de las cuales tiene lugar el alumbramiento

Figura 31

Manantial 4 - Cañada los Bueyes BUY

Alumbra en la formación Taraises

Recarga: Cerro El potosí.

Manantial 5 - Los Llanitos LL

Alumbra en material cuaternario sobre la formación Zuloaga

Manantial tipo: por depresión de superficie

Caudal: 1 l/seg.

Composición: cálcico-bicarbonatada

Figura 30

Manantial 6 - Dieciocho de Marzo MAR

Alumbra en material cuaternario sobre la formación La Casita

Composición: cálcico-bicarbonatada

Se evidencian fracturas entre los estratos de lutitas y calizas los cuales permiten que el brote del agua sea hacia el NE

Recarga: Cerro del potosí, con altitudes de 3660 msnm

Figura 31

Manantial 7 - San Lucas SL

Alumbra en la formación Taraises

En esta zona Taraises presenta horizontes alternados de fosforita y algunos horizontes dolomíticos intercalados, así como vetillas de yeso.

Presenta un patrón de fracturamiento tipo “ac”

Caudal: 6.5l/seg

Manantial tipo: fracturas entre estratos

Composición: cálcico-sulfato-bicarbonatada

Figura 32

Manantial 8 - Los aguacates LA o ACA

Alumbra en material cuaternario sobre la formación La Casita

Manantial tipo: por depresión de superficie

Caudal: 1 l/seg.

Composición: cálcico-bicarbonatada

Recarga: 2700 msnm, en la Sierra de viborillas.

Alumbra con dirección al Este

Manantial 9 - Santa Cruz SC

Alumbra en el contacto sedimentario entre la formación La casita y la formación Taraises.

En esta zona, Taraises se caracteriza por presentar fracturas rellenas de yeso o calcita recristalizada.

La recarga se realiza en la formación Taraises por medio de la infiltración del agua en

fracturas

Caudal: 2 l/seg.

Composición: cálcico-sulfato-bicarbonatada

Figura 33

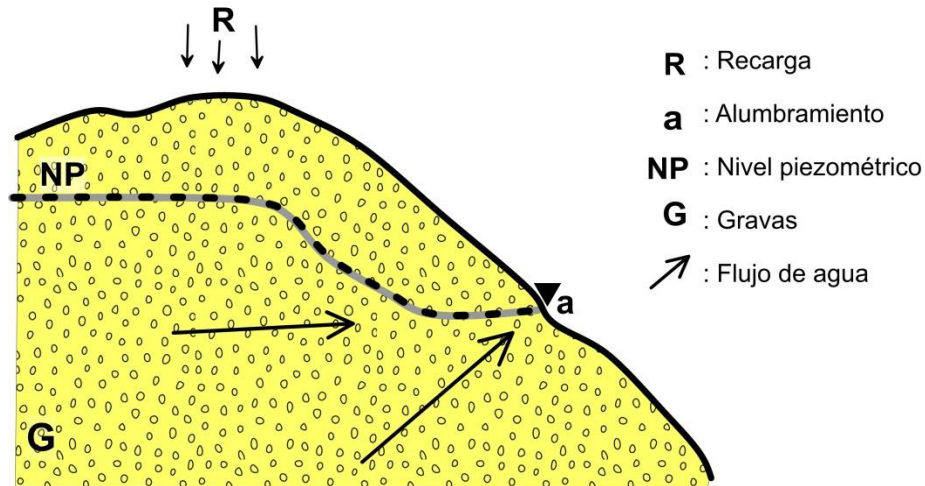


Figura 30. Diagrama esquemático del alumbramiento de los manantiales 2 (LAG) y 5 (LL) a través de material cuaternario por depresión del terreno. Tomado de Correa-Rubio, 1998.

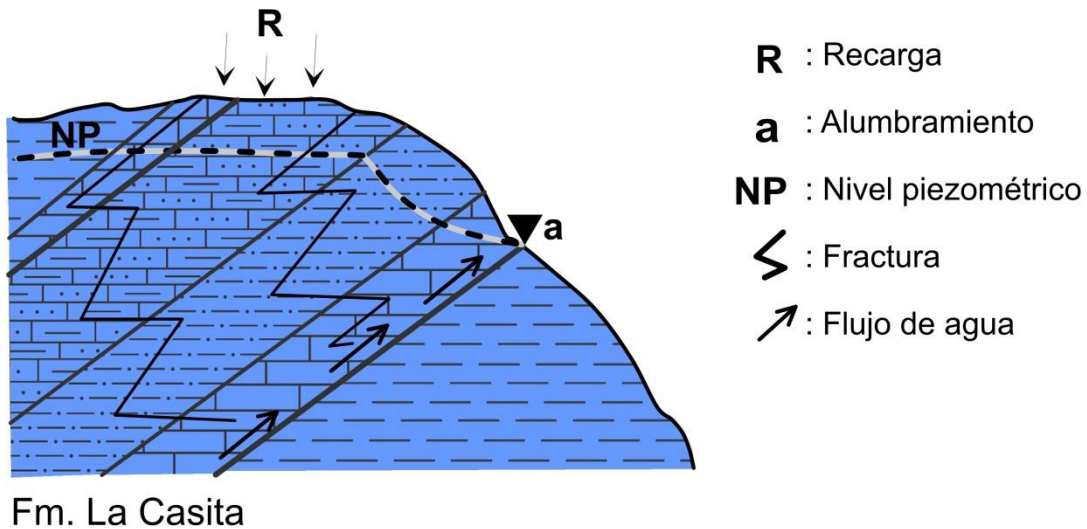


Figura 31. Diagrama esquemático del alumbramiento del manantial 3 (RS) a través de la formación La Casita, donde el contenido lutítico de dicha formación actúa como barrera hidrogeológica, a través de la cual transita el agua subterránea y alumbra en superficie. Tomado de Correa-Rubio, 1998.

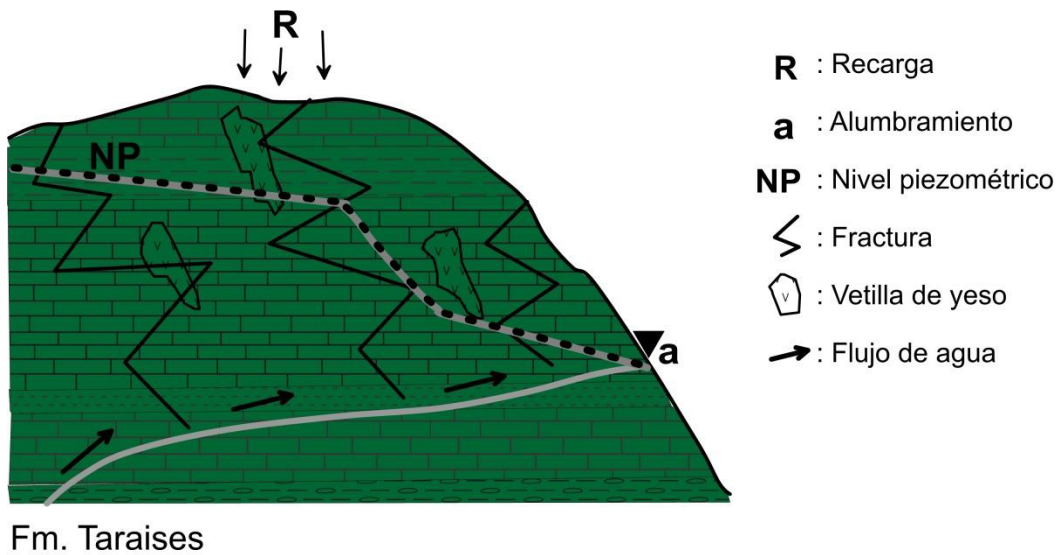


Figura 32. Diagrama esquemático del alumbramiento del manantial 7 (SL) a través de la formación Taraises, en el cual se presentan fracturas tipo “ac” sobre las cuales transita el agua y alumbra en superficie; en esta zona la formación Taraises presenta vetillas de yeso. Tomado de Correa-Rubio, 1998.

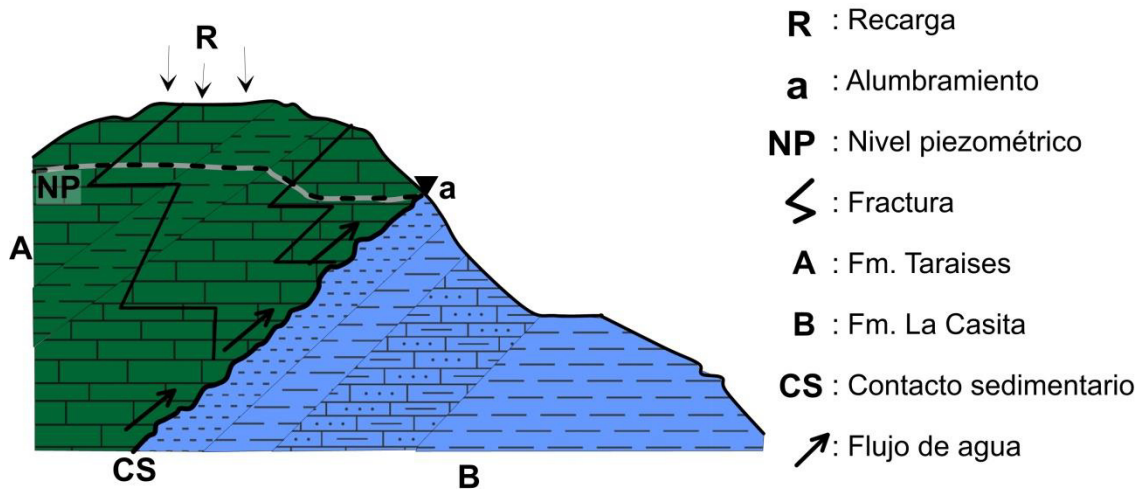


Figura 33. Diagrama esquemático del alumbramiento del manantial 9 (SC) a través del contacto sedimentario de las formaciones Taraises y La Casita. Tomado de Correa-Rubio, 1998.

Conjuntando la información obtenida de los estudios de Huízar-Álvarez y Oropeza-Orozco (1989), Barrera-Navarro (1991), Lara-Tristán (1991), Chavarría-Iglesias (1998) Correa-Rubio (1998), y El Servicio Geológico Mexicano (2007) sobre los manantiales y

perfiles geológicos, es posible conocer las condiciones estructurales y litológicas de la zona de estudio, permitiendo el entendimiento de la hidrogeología y de las direcciones de los flujos subterráneos a través de la cuenca hidrogeológica.

Para la revisión geológica del área se realizó de manera generalizada la descripción del contenido litológico de las formaciones geológicas para hacer la descripción hidrogeológica y saber si hay aportaciones del exterior de la cuenca. De esta forma, se describe a las formaciones geológicas del área con las siguientes características hidrogeológicas:

- **Cuesta del Cura:** Unidad geológica de baja impermeabilidad, debido a las capas delgadas de caliza con arcilla que contiene, comportándose como un Acuitardo.
- **Tamaulipas Superior:** Unidad geológica permeable, por los estratos de calizas masivas con niveles altos de fracturación a través de las cuales penetra el agua, ensanchando las fracturas por el nivel alto de disolución, comportándose como acuífero kárstico.
- **La Peña:** Unidad geológica de baja permeabilidad, por su alto contenido de lutitas intercaladas con margas, comportándose como Acuitardo.
- **Tamaulipas Inferior:** Unidad geológica permeable por el alto nivel de fracturamiento entre las calizas masivas que componen sus estratos, comportándose como un acuífero kárstico.
- **Taraises:** Unidad geológica compuesta por calizas arcillosas con intercalaciones de lutitas, lo que haría que fuera una formación geológica de muy baja permeabilidad, sin embargo se encuentra muy fracturada haciendo que se vuelva más permeable y se comporte como un acuífero de grietas. Las fracturas que presenta suelen estar rellenas de yeso, o calcita, sólo se habla de las fracturas con yeso hacia la parte este y noreste de la cuenca.
- **La Casita:** Unidad geológica de baja impermeabilidad, por sus intercalaciones de lutitas, calizas y areniscas comportándose como un Acuitardo.
- **Zuloaga:** Unidad geológica compuesta por calizas fracturadas que se comporta

como un acuífero kárstico.

- **Minas Viejas:** Unidad geológica que por su contenido de Yesos y su baja porosidad debería comportarse como un Acuicludo y no permitir el tránsito ni el almacenamiento de agua subterránea, sin embargo cuando este tipo de roca entra en contacto con el agua subterránea a condiciones específicas de presión temperatura, acidez del agua y velocidad de flujo, como se presenta en el área de estudio, puede disolverse por su alta solubilidad haciendo conductos kársticos y con esto, comportarse como un acuífero kárstico que almacena y transmite agua con gran facilidad y a muy altas velocidades de flujo.

Para el análisis de los perfiles geológicos, estos se transformaron a perfiles hidrogeológicos con sus descripciones geológicas así como la información brindada a través del estudio previo de los manantiales, obteniendo una interpretación de cada uno de ellos y del área de estudio.

Perfil A-A'

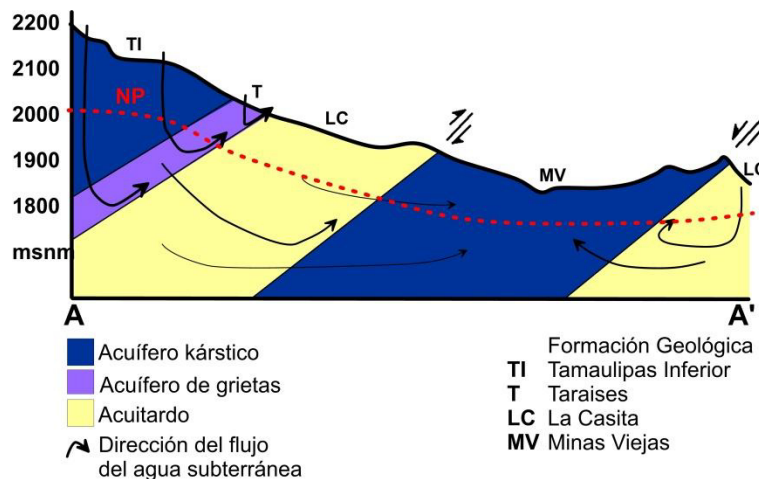


Figura 34. Perfil hidrogeológico A-A' modificado del perfil estructural de Barrera-Navarro (1991).

El perfil A-A' (Figura 34) se encuentra ubicado al norte de la cuenca de estudio, se observan los estratos inclinados y algunos fallamientos con la misma inclinación que las formaciones geológicas. La recarga ocurre en la formación Tamaulipas Inferior, a

travesando Taraises y cierta cantidad de agua se descarga en el límite Taraises-La Casita, al agua que no se llega a descargar ahí, atraviesa hasta a formación Minas Viejas.

Perfil B-B', Perfil C-C', Perfil D-D'

Los perfiles B-B' (Figura 35), C-C' (Figura 36) y D-D' (Figura 37) se ubican al norte de la cuenca de estudio, se observan anticlinales erosionados con fallamientos en su núcleo. La recarga ocurre en la Formación Tamaulipas Inferior, recorriendo Taraises y descargando en el límite Taraises-La Casita y en algunos fallamientos, el agua que logra atravesar el medio llega hasta el núcleo de los anticlinales.

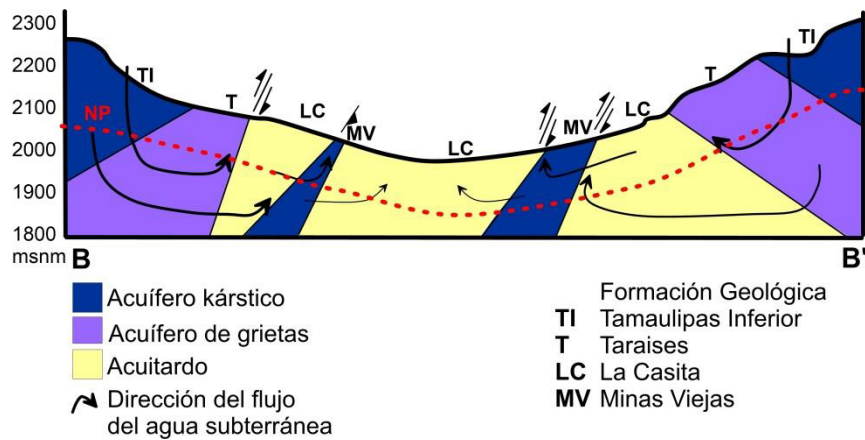


Figura 35. Perfil hidrogeológico B-B', modificado del perfil geológico de Lara-Tristán (1991).

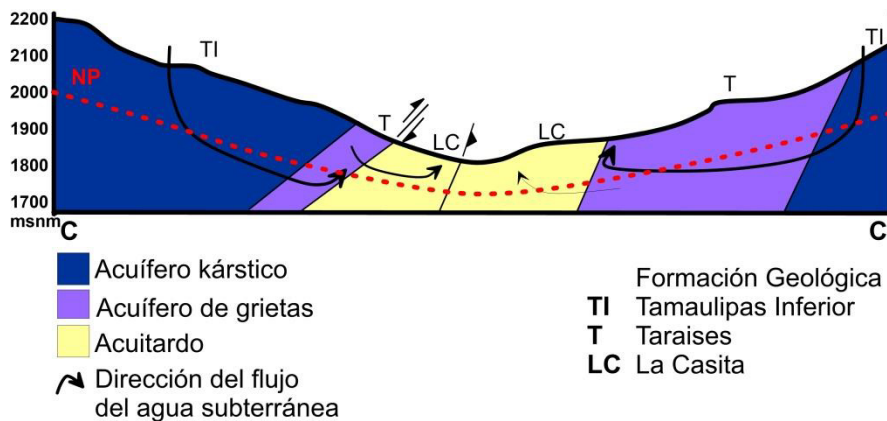


Figura 36. Perfil hidrogeológico C-C' modificado del perfil geológico de Lara Tristán (1991).

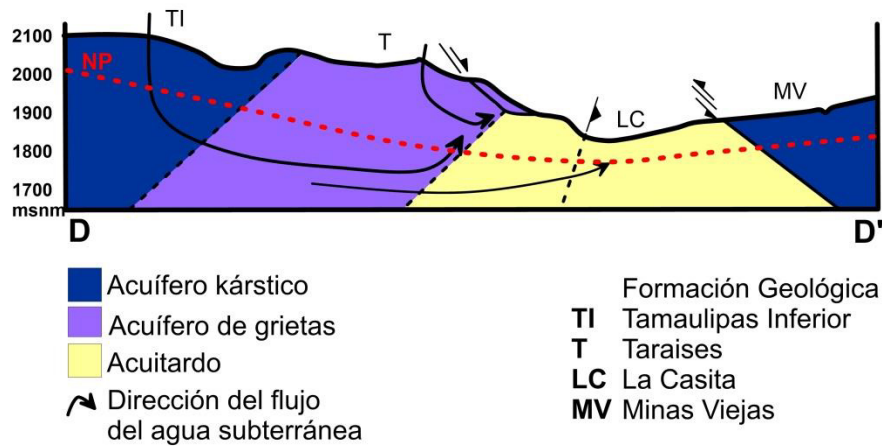


Figura 37. Perfil hidrogeológico D-D' modificado del perfil geológico de Lara Tristán (1991).

Perfil E-E', Perfil F-F'

Los perfiles E-E' (Figura 38) y F-F' (Figura 39) se ubican al Este de la cuenca de estudio, conformando los parteaguas de la misma. La recarga ocurre en las formaciones Tamaulipas Superior y Tamaulipas Inferior. En ambos perfiles se observan sinclinales, en los cuales el flujo corre hacia el este y oeste dependiendo la zona del parteaguas. Estos perfiles permitieron identificar una zona importante la cual será llamada "zona de estancamiento", ya que los estratos impermeables de la formación La Casita, se encuentra haciendo una forma de U por el sinclinal, lo cual forma una trampa para el flujo de agua. Por el potencial hídrico el flujo va a tender a subir a través de la superficie de los estratos más impermeables de la formación La Casita, pero como ya se ha hablado la impermeabilidad absoluta no existe, de esta manera el agua que no sube hacia la superficie se queda estancada por la barrera hidrogeológica y penetra en el Acuitardo hasta que lo atraviesa y disuelve las barreras conformadas por las fracturas de yeso que serían más impermeables que el medio en el que se mueve, estos procesos pueden llegar a tardar días, meses o quizás años, de acuerdo a su composición química.

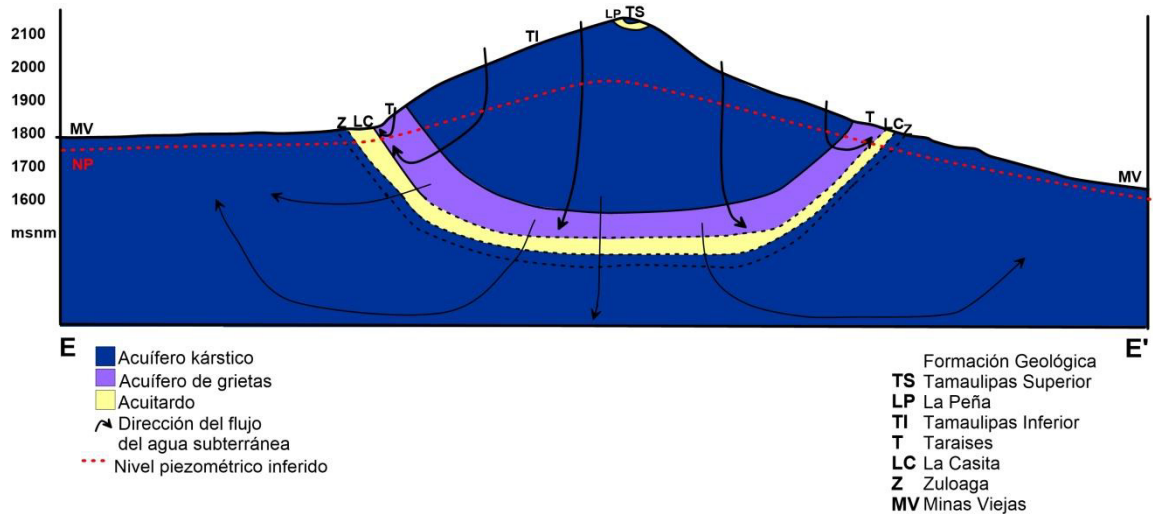


Figura 38. Perfil hidrogeológico E-E', modificado del perfil geológico de Chavarría-Iglesias (1998).

En el Perfil F-F' (Figura 39) se encuentra localizado muy cercano el manantial 9, del que se habló con anterioridad, comprobando la disolución de alguna fractura rellena de yeso, ya que el análisis del agua de este manantial dio como resultados aguas sulfatadas.

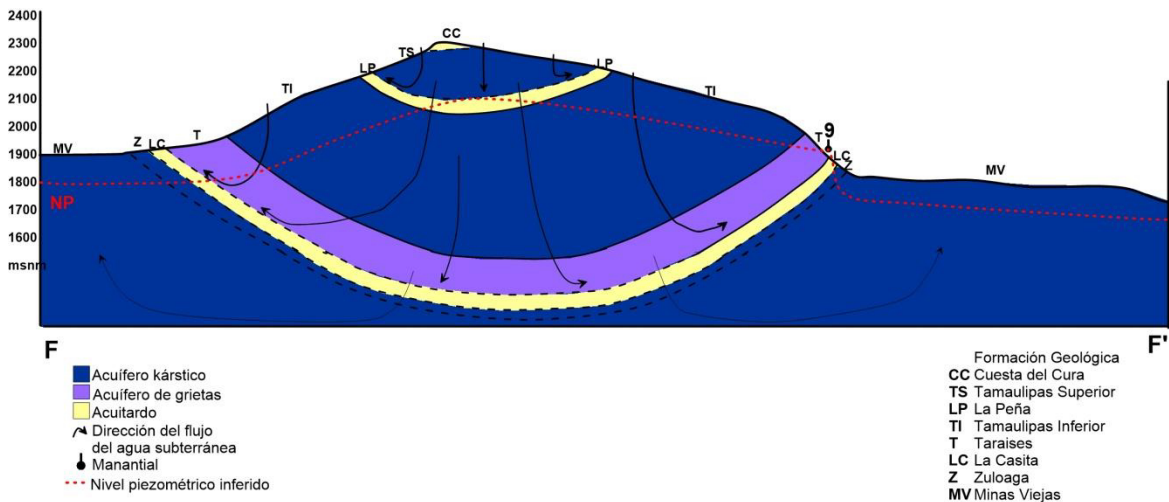


Figura 39. Perfil hidrogeológico F-F', modificado del perfil geológico de Chavarría-Iglesias (1998).

Perfil G-G'

El perfil G-G' (Figura 40) se ubica cruzando la cuenca de Suroeste a Noreste, se pueden observar dos parteaguas, y la misma zona de estancamiento de la que se habló en los perfiles anteriores. Del lado izquierdo se tiene el Cerro El Potosí donde se añade otra

zona de estancamiento formada por la formación La Peña la cual también actúa como una barrera hidrogeológica por su alto contenido de lutitas.

En el perfil G-G' (Figura 40) se encuentra el manantial 6 el cual con estudios isotópicos arrojó resultados de recarga de 3600 msnm lo que indicaría que el agua sí proviene de partes altas del cerro del potosí a pesar de las barreras hidrogeológicas, esto demuestra que hubo una disolución y lento tránsito del agua sin embargo sí descarga en esta zona, además este manantial tiene composición cálcico bicarbonatado lo que habla de que el relleno de las fallas y fracturas allí presentes son de material calcita y no tanto de yeso como es hacia el lado Este de la cuenca.

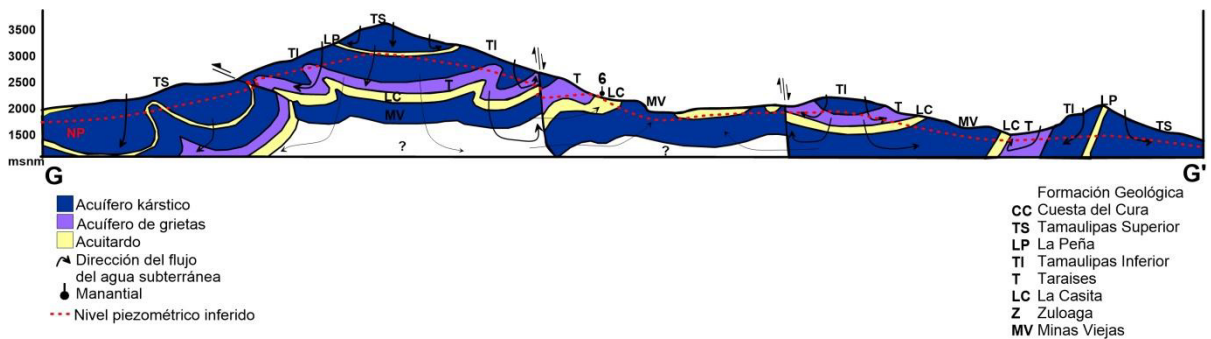


Figura 40. Perfil hidrogeológico G-G', modificado del perfil geológico de la carta Geológica-Minera Galeana G14C56, del Servicio Geológico Mexicano.

Perfil H-H'

El perfil H-H' (Figura 41) se ubica paralelo al perfil G-G' (Figura 40) pero más al norte, también cruzando la cuenca en dirección Suroeste-Noreste, de este perfil es de recalcar la presencia de la formación La Casita aflorando en la zona de descarga, esto es un factor importante ya que al ser La Casita un Acuitardo, la descarga no se realiza con facilidad en esa zona y probablemente el agua fluya en otras direcciones en donde el potencial hidráulico sea menor para descargar con mayor facilidad, lo que es hacia el centro de la cuenca de estudio, esto sería una acumulación de agua subterránea hacia dentro de la cuenca.

Del lado izquierdo del perfil se observa una falla inclinada la cual podría servir de

superficie para añadir agua a la cuenca de manera subterránea, sólo cierta cantidad de agua fluiría hacia la cuenca y la otra cantidad restante penetraría o disolvería la falla hasta introducirse en las formaciones más profundas y descargar hacia la cuenca vecina del lado Oeste.

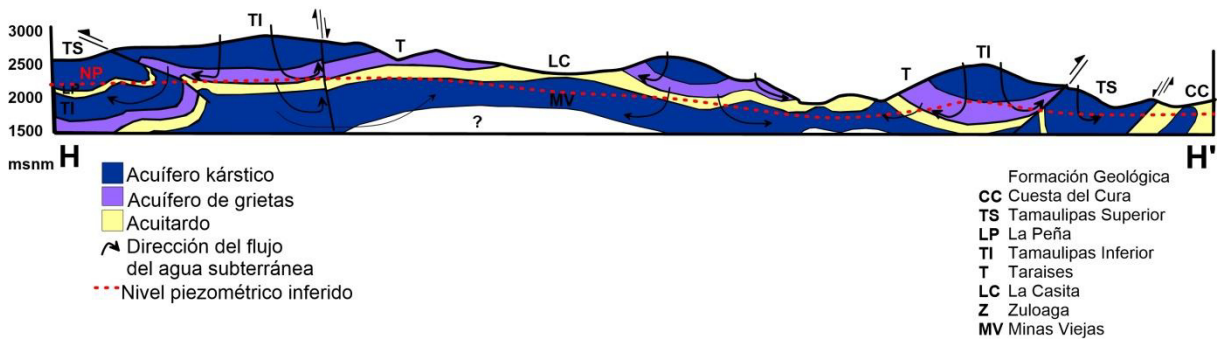


Figura 41. Perfil hidrogeológico H-H', modificado del perfil geológico de la carta Geológica-Minera Galeana G14C56, del Servicio Geológico Mexicano.

Perfil I-I'

El perfil I-I' (Figura 42) está ubicado en la parte Este de la cuenca de estudio cruzando el Cerro de Viborillas y el Cerro de Labradores, se observa el parteaguas en el Cerro de Viborillas y se propone un flujo en sentido de la cuenca vecina al Este.

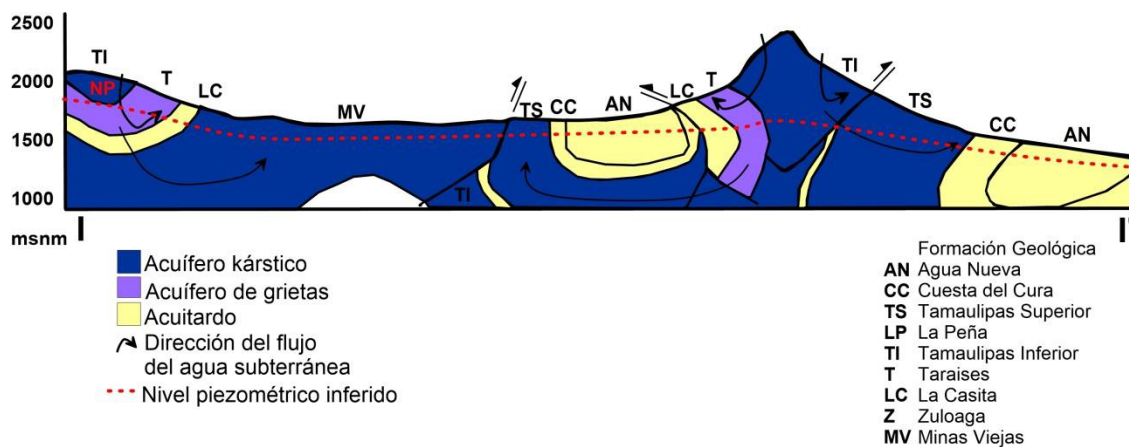


Figura 42. Perfil hidrogeológico I-I', modificado del perfil geológico de la carta Geológica-Minera Galeana G14C56, del Servicio Geológico Mexicano.

Perfil J-J'

El perfil J-J' (Figura 43) se encuentra cruzando la cuenca en casi sentido Oeste-Este desde el Cerro El Potosí hasta alcanzar una pequeña porción del Cerro de Labradores. Se observa una serie de barreras hidrogeológicas que se oponen al flujo del agua subterránea que se recarga en el Cerro El Potosí, estas barreras están conformadas por la litología de las formaciones La Peña y La Casita y por las fallas encontradas según el estudio de Huízar-Álvarez y Oropeza-Orozco (1989) en esta área, las cuales se muestran de manera completamente vertical en el Cerro El Potosí.

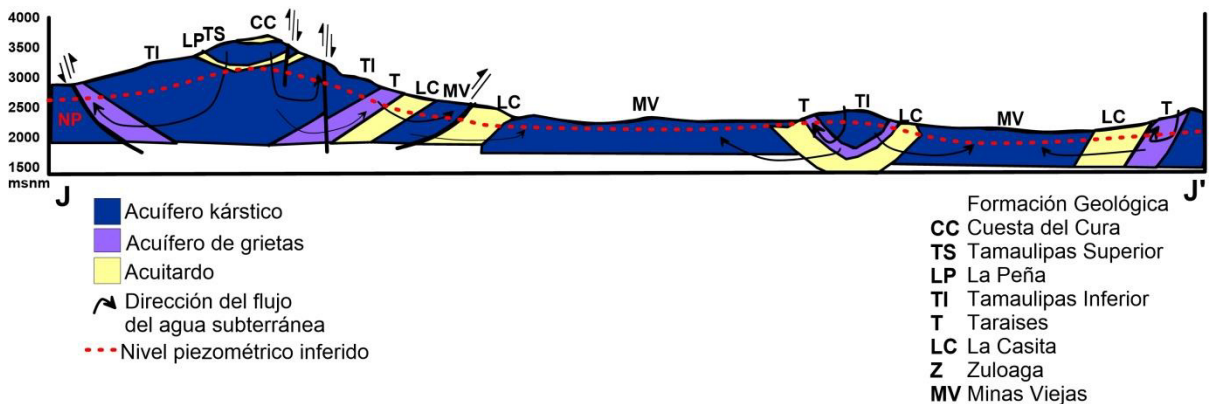


Figura 43. Perfil hidrogeológico J-J', modificado del perfil geológico de Huízar-Álvarez y Oropeza-Orozco (1989).

Perfil K-K'

El perfil K-K' (Figura 44) se ubica en la parte Noroeste por fuera de la cuenca con dirección SW-NE, se observa el tránsito del agua subterránea por las formaciones Tamaulipas Inferior y Taraises hasta llegar al acuitardo formado por la Formación La Casita.

Perfil L-L'

El perfil L-L' (Figura 45) se ubica en la parte Noreste de la cuenca con una dirección Oeste-Este; se observa que las direcciones hacia las que fluye el agua subterránea en este sitio son hacia la zona de descarga de las cuencas vecinas.

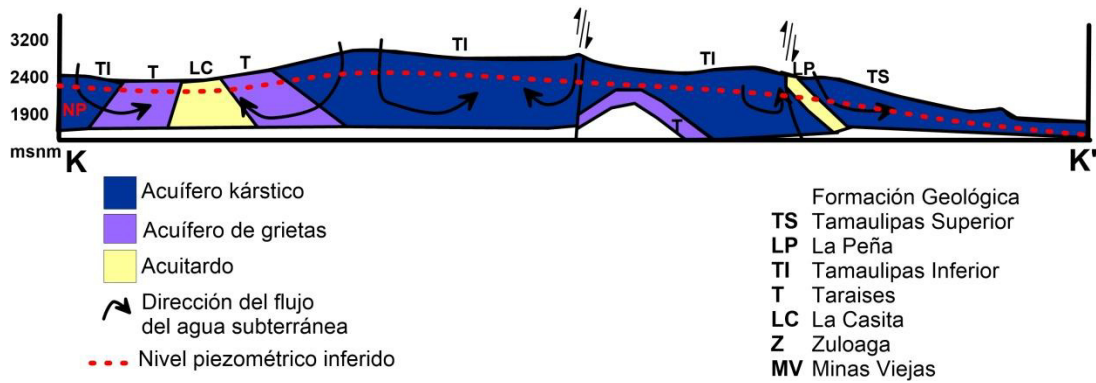


Figura 44. Perfil hidrogeológico K-K', modificado del perfil geológico de Huízar-Álvarez y Oropeza-Orozco (1989).

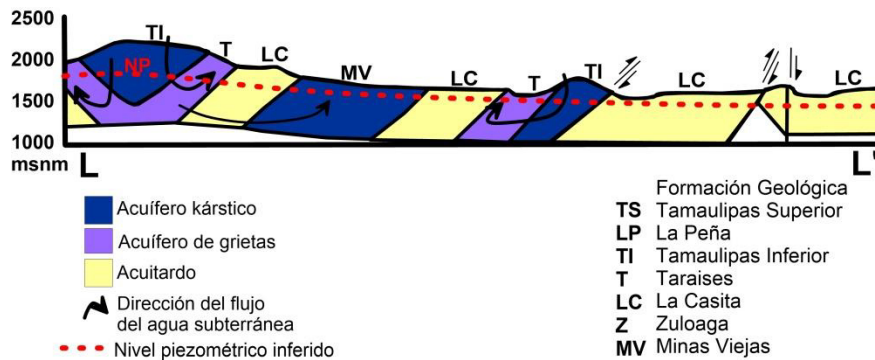


Figura 45. Perfil hidrogeológico L-L', modificado del perfil geológico de Huízar-Álvarez y Oropeza-Orozco (1989).

4.3. Resultados de la descripción hidrodinámica, en el área de estudio

Analizando cada uno de los perfiles y los manantiales, conjuntando la información obtenida, fue posible obtener los siguientes resultados:

- Las barreras hidrogeológicas no son absolutas, por lo que las litologías impermeables o discontinuidades impermeables, no obstruyen el paso del agua subterránea por completo.

- Las barreras hidrogeológicas en el área de estudio están conformadas por: 1) fallas y fracturas, 2) el contacto sedimentario entre las formaciones La Casita y Taraises, 3) las fracturas *ac* en la formación Taraises, 4) el contacto sedimentario entre las formaciones Tamaulipas Superior y La Peña.
- En cuanto uno de los flujos de agua subterránea se encuentra con una de las barreras hidrogeológicas, modifica su dirección a través de la superficie impermeable, o penetra la formación de manera muy lenta hasta atravesarla por los poros, o disolver el medio si se encuentra a condiciones de presión, temperatura y velocidad de flujo ideales, y si el agua tiene el potencial de disolución necesaria, hablando en términos de contenido hidrogeoquímico.
- Debido a que la cuenca se conforma por un anticlinal erosionado, las zonas de recarga son sinclinales, los cuales en presencia de formaciones impermeables, se convierten en zonas de estancamiento en la parte de la curvatura mayor del pliegue, haciendo que el agua se quede atrapada hasta disolver o atravesar la barrera, esto constituye un retraso considerable en el tiempo de tránsito promedio del flujo de agua en el acuífero.
- La presencia de sulfatos en el agua se relaciona a la disolución de vetas de yeso que aparecen en la formación Taraises y por el tránsito del agua a través de los conductos kársticos de la formación Minas Viejas.
- El Cerro el Potosí, sí aporta a la recarga del acuífero desde sus puntos más altos hasta su base, a pesar de la inclinación de su superficie por su gran altitud, debido a que en su mayoría se constituye de las formaciones Tamaulipas Superior y Tamaulipas inferior las cuales actúan como acuíferos kársticos.
- Se tienen tres tipos de acuíferos en el área: Acuífero kárstico, acuífero de grietas y acuitardo, y cada uno se comporta de manera distinta.

Capítulo 5. Prospección geoelectrica aplicada en hidrogeología

En el capítulo anterior se describieron las características hidrogeológicas de la cuenca de estudio, de acuerdo a perfiles geológicos y observaciones superficiales; sin embargo, algunas características del medio estudiado sólo pueden ser inferidas ya que no podemos ver el subsuelo tal como es, para un estudio de caracterización subterránea son usados los métodos geofísicos.

La prospección geoelectrica es un método geofísico que permite investigar la variación de las propiedades electromagnéticas del subsuelo (Orellana-Silva, 1982). Estas propiedades son de especial interés para propósitos de la hidrogeología, ya que con su estudio, es posible discriminar entre agua dulce y agua salada, indicar la altura piezométrica del agua, diferenciar los tipos de rocas en un acuífero, estimar la anisotropía hidráulica, diferenciar interfaces permeables e impermeables y ubicar discontinuidades estructurales.

5.1. Principios básicos del método geoelectrico

La resistividad del subsuelo es medida básicamente, inyectando una corriente eléctrica al subsuelo, y midiendo las diferencias de potencial resultantes en la superficie (Figura 46). El arreglo general que se usa para realizar este procedimiento, es colocar dos electrodos A y B para inyectar la corriente, mientras que se tienen dos electrodos más M y N para la medida de la diferencia de potencial, a una distancia calculada.

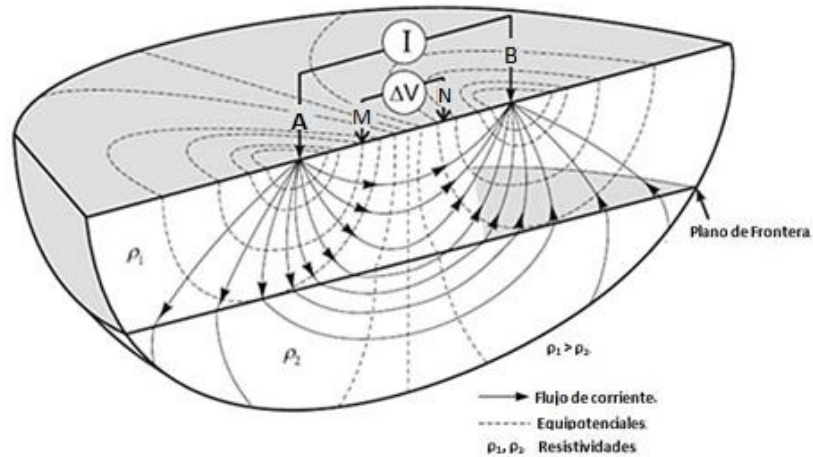


Figura 46. Principio del método geoelectrico. Tomado de Zúñiga-Lara, 2011

El parámetro petrofísico que se mide directamente con el método geoelectrico, es la resistividad ρ (Ohm*metro, Ωm) mediante la ecuación (10):

$$\rho_A = K \frac{\Delta V}{I} \quad (10)$$

siendo ρ_A la resistividad aparente, ΔV la diferencia de potencial, I la intensidad de corriente y K el factor geométrico, el cual es calculado a partir del espaciamento electródico con la ecuación (11):

$$K = \frac{1}{2\pi} \left[\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right) - \left(\frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right) \right] \quad (11)$$

El conjunto de las letras ABMN indica el tamaño del segmento entre los electrodos en metros, por ejemplo, AM es la distancia entre el electrodo A y el electrodo M en superficie. Hay diferentes maneras de configurar el acomodo de los electrodos, a esto se le llama dispositivo electródico.

Por conocimientos empíricos se sabe que la profundidad de penetración que alcanza la prospección geoelectrica equivale a mínimo un octavo, máximo un tercio de la extensión del dispositivo electródico en superficie. Sin embargo en la actualidad hay investigaciones dirigidas al estudio del alcance de la corriente que están tratando de determinar otros factores que también influyen en la penetración además de la apertura

máxima de los electrodos, es decir del dispositivo.

5.1.1. Tomografía eléctrica de resistividad (TER)

El método de Tomografía Eléctrica de Resistividad (TER) es un método geoelectrico que permite investigar la variación de la resistividad del subsuelo a profundidad y lateralmente. Este método multielectrónico consiste en inyectar una corriente eléctrica a lo largo de una línea determinada, y mediante un dispositivo receptor se observa la respuesta del subsuelo, teniendo como resultado un conjunto de datos de resistividades aparentes.

La medición del potencial del subsuelo se hace con el uso de electrodos de corriente y electrodos de potencial; se coloca una serie de electrodos sobre la línea de estudio y automáticamente se van tomando un conjunto de mediciones con un Resistivímetro inteligente que toma varias mediciones, para promediarlas y tomar las mejores, apilándolas en una sección 2D (Figura 47).

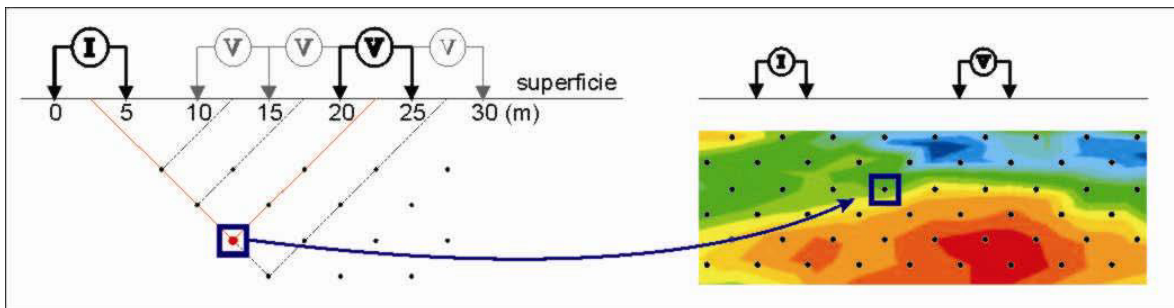


Figura 47. Representación simplificada de las mediciones de la Tomografía Eléctrica de Resistividad. Tomado de Chávez-Segura, 2011.

Este método es usado en la detección y caracterización de contactos entre unidades litológicas, el lecho rocoso, fracturas y fallas, cavidades subterráneas (naturales o antropogénicas), restos arqueológicos; evaluación de sitios por la presencia de rellenos sanitarios y plumas contaminantes, deslizamientos de tierra; inspección de fugas y filtraciones en cañerías y presas; determinación de unidades acuíferas, niveles freáticos e

intrusión marina, etcétera (Zúñiga-Lara, 2011).

La tomografía eléctrica se destaca con respecto a los métodos de resistividad convencionales, por tener un proceso de adquisición de datos totalmente automatizado, además de estar sincronizado con un software que da la imagen de resistividades aparentes inmediatamente al terminar la toma de datos. En gabinete se realiza la inversión de los datos para obtener una sección de resistividades calculadas, misma que deberá ser interpretada bajo las características geológicas de la zona.

5.1.2. Dispositivos electródicos

Como se mencionó anteriormente, los dispositivos electródicos, también llamados “Arreglos” son las diferentes maneras de acomodar geoméricamente los electrodos de corriente y los electrodos de potencial, unos con respecto a otros. La variación de estas disposiciones se hace para tener diferentes penetraciones y mayor resolución tanto vertical como horizontal; algunos de los más usados son:

➤ Schlumberger

Arreglo conformado por cuatro electrodos, de los cuales los electrodos de potencial M, N tienen un espaciamiento a entre ellos, que se mantendrá constante durante el estudio y los electrodos de corriente A, B posicionados por fuera de los de potencial, están a un factor na de ellos y se van moviendo continuamente hacia afuera (Figura 48); procurando que la distancia entre los electrodos de corriente y de potencial deberá ser un múltiplo comúnmente entero. Consta de una pobre resolución lateral pero de buena resolución vertical, por lo que es muy utilizado para la realización de los Sondeos Eléctricos Verticales (Chávez-Hernández, 2011).

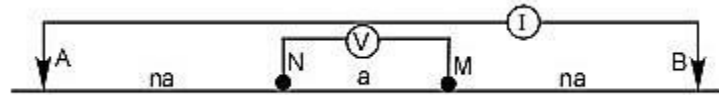


Figura 48. Acomodo de los electrodos en el arreglo tipo Schlumberger. Tomado de Chávez-Hernández, 2011.

➤ Dipolo – Dipolo

Está conformado por cuatro electrodos, dos de potencial M y N, y dos de corriente A y B, en el cual el espaciamiento entre los electrodos de corriente es determinado por el factor n que es la misma distancia entre los electrodos de potencial. La separación entre los dipolos es de un factor de n veces el espaciamiento a (Figura 49). Este arreglo es muy usado debido a que proporciona una imagen detallada de la resistividad del subsuelo, posee una gran sensibilidad para los cambios horizontales de resistividad, aunque carece de resolución lateral. Logra una gran profundidad de penetración. Este arreglo es muy usado en la realización de Tomografías Eléctricas de Resistividad (Chávez-Hernández, 2011).

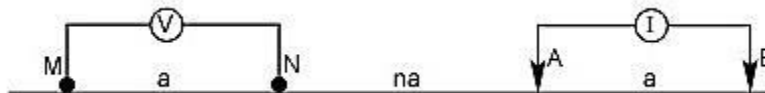


Figura 49. Acomodo de los electrodos en el arreglo tipo Dipolo-Dipolo. Tomado de Chávez-Hernández, 2011.

➤ Wenner – Schlumberger

En este arreglo se colocan los electrodos ANMB, donde la distancia de electrodos de potencial MN es mucho menor que las de los electrodos de corriente AB (Figura 50). Los electrodos se mantienen equidistantes, con una longitud de dipolo de a , se mueven sobre una línea aumentando el espaciamiento $n \times a$ donde n es la relación de distancia entre el electrodo de potencial A y el electrodo de corriente N o también, BM. Este arreglo es moderadamente sensible a estructuras horizontales y verticales. Una de las desventajas de este arreglo es que presenta una escasez de datos en los extremos. Debe mencionarse

que a pesar de esta desventaja presenta una alta intensidad de la señal y que posee una buena profundidad. Es usado para las Tomografías Eléctricas de Resistividad (Chávez-Hernández, 2011; Zúñiga-Lara, 2011).

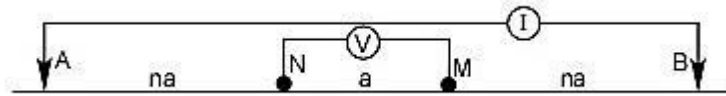


Figura 50. Acomodo de los electrodos en el arreglo tipo Wenner-Schlumberger. Tomado de Chávez-Hernández, 2011.

5.1.3. Procesado de datos

A través de la solución del problema inverso, es que se obtiene la distribución de resistividades del subsuelo a partir de las mediciones en superficie. Se calcula la distribución de las resistividades verdaderas a partir de un modelo teórico basado en una serie de prismas llamados dominios. Este procesado y la interpretación, en los principios del método, se hacían mediante la comparación de curvas estándar y la aproximación de las resistividades reales con las ecuaciones básicas (Orellana-Silva, 1972), sin embargo con el paso del tiempo, el procesado ha ido avanzando con la tecnología y actualmente se realiza la inversión en programas especializados en datos eléctricos en 2D para las TER's, que aplican algoritmos matemáticos para la resolución del problema y con esto se obtienen las resistividades reales del subsuelo.

En el procesado de datos de una TER, se introducen los valores de resistividad aparente tomados en campo, mostrándose una pseudosección a lo largo de un perfil y después se introducen los parámetros de inversión para que el programa aplique los algoritmos y así se tenga como resultado un perfil de resistividades calculadas y resistividades "reales".

Una vez que se hizo el procesado de los datos, ya se puede hacer la interpretación

en base a la geología de la zona estudiada.

5.1.4. Resistividad eléctrica del subsuelo

La resistividad eléctrica de las rocas puede variar en un margen muy amplio (Tabla 4), ya que está en función de diversos factores como la porosidad, permeabilidad, temperatura, saturación de fluidos, química de los fluidos, además del grado de fracturamiento y los minerales que componen estas rocas.

La humedad es muy importante, diferentes grados de humedad en un mismo terreno nos pueden llevar a interpretaciones erróneas de los materiales del subsuelo. Una topografía accidentada puede tener un efecto similar, ya que el flujo de corriente se concentra en los valles y se dispersa en las colinas (Butler, 2005).

Tabla 4. Resistividades de materiales geológicos y residuos. Tomada de Zúñiga-Lara (2011).

Material	Resistividad mínima ($\Omega.m$)	Resistividad máxima ($\Omega.m$)
Grava	50 (agua saturada)	$>10^4$ (en seco)
Arena	50 (agua saturada)	$>10^4$ (en seco)
Limo	20	50
Marga	30	100
Arcilla (húmeda)	5	30
Arcilla (seca)	-	>1000
Lodos	15	25
Arenisca	<50 (húmedo)	$>10^5$ (en compacto)
Caliza	100 (húmedo)	$>10^5$ (en compacto)
Esquisto	50 (húmedo)	$>10^5$ (en compacto)
Toba	2×10^3 (húmedo)	10^5
Rocas Ígneas y metamórficas	<100 (degradado, húmedo)	$>10^6$ (en compacto)
Roca de sal	30 (húmedo)	$>10^6$ (en compacto)
Residuos domésticos e industriales	<1	<1000 (plásticos)
Agua natural	10	300
Agua de mar	0.25	-
Agua salada	(salmuera) <0.15	3×10^3
Agua superficial	0.1	100

5.2. Aplicación del método TER en el área de estudio

Para un estudio de caracterización subterránea son usados los métodos geofísicos, en particular el método geoelectrico el cual es muy usado para estudios hidrogeológicos por obtener información con respecto a la conductividad eléctrica del subsuelo.

5.2.1. Metodología

Para este estudio se planearon varios perfiles de TER en zonas donde se obtuviera una buena descripción del medio, sin embargo sólo tres de estas líneas pudieron realizarse debido a la complicación que representan los accesos al área, ya que gran parte del área de estudio está conformada por sembradíos de propiedad privada, y a su vez la falta de caminos representa una complicación para el acceso.

Los tres perfiles que se realizaron se describen a continuación (Figura 51):

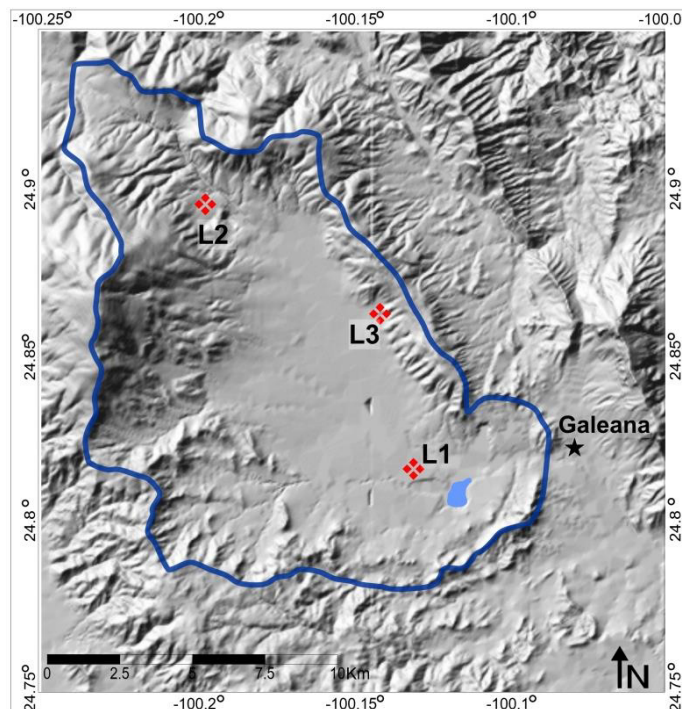


Figura 51. Ubicación de las Tomografías Eléctricas de Resistividad.

1. **L1 Minas Viejas:** Este perfil corre hacia el lado Oeste del Pozo del Gavilán, en la parte donde se extrae yeso para su comercialización. Este perfil fue planeado para observar la ubicación de posibles cavidades o conductos kársticos que conectaran al Pozo del Gavilán- Pozo del Álamo- Laguna de Labradores así como el tamaño de dichos conductos kársticos.
2. **L2 La Casita:** Este perfil se ubica en el Cerro del Potosí, sobre la formación La Casita planeado para caracterizar la zona de transición entre los estratos permeables e impermeables de dicha formación, que hacen brotar al manantial y corre en sentido paralelo a la dirección del flujo superficial del manantial.
3. **L3 Taraises:** Este perfil se ubica en la parte central de la Sierra de Viborillas, y fue planeado para la descripción de la formación Taraises que es donde se supone que se ubican gran cantidad de fracturas rellenas de calcita y yeso.

5.2.2. Toma de datos en campo

Como ya se mencionó se realizaron tres líneas de geoeléctrica con el método Tomografía Eléctrica de Resistividad (TER) en diferentes áreas de la cuenca hidrogeológica de estudio, éstas son las características de las mediciones de las líneas en campo:

L1 Minas Viejas

Sentido: SW-NE

Coordenada L1: N 24°48'52.9" W 100°07'51.1"

Coordenada L1': N 24°49'00.4" W 100°07'48.1"

Longitud de la línea: 235 metros

Cantidad de electrodos: 48

Apertura electródica: 5 metros

Dispositivo electródico: Dipolo-Dipolo

Equipo geofísico utilizado: Resistivímetro ARES, GF Instruments (Figura 53).

Objetivo: Observar los posibles conductos kársticos subterráneos que unen al Pozo del Gavilán, Pozo del Álamo y Laguna de Labradores, para conocer las dimensiones de dichos

conductos y comprobar su existencia. Además determinar la resistividad de los yesos para esta área en particular.



Figura 52. Ubicación de la Línea TER L1 Minas Viejas.



Figura 53. Izquierda: Resistivímetro usado en la Línea L1 Minas Viejas. Derecha: Tendido de cable y electrodos a través del área de interés.

L2 La Casita

Sentido: W-E

Coordenada L2: N 24°53'49.1" W 100°11'43.5"

Coordenada L2': N 24°53'49.6" W 100°1'41.9"

Longitud de la línea: 55 metros

Cantidad de electrodos: 12

Apertura electródica: 5 metros

Dispositivo electródico: Dipolo-Dipolo

Equipo geofísico utilizado: Resistivímetro compuesto por un transmisor ASTRA-100 y un receptor MARY-24 NORTHWEST (Figura 55).

Objetivo: Caracterizar la zona de alumbramiento de un manantial en la formación La Casita, así como distinguir la permeabilidad de dicha formación.



Figura 54. Ubicación de la Línea geofísica, L2 La Casita.



Figura 55. Izquierda: Equipo usado en la línea L2 La Casita. Derecha: Tendido de cables y electrodos a través del área de interés.



Figura 56. Izquierda: Vista del alumbramiento del manantial. Derecha: Arroyo proveniente del manantial.

L3 Taraises

Sentido: N-S

Coordenada L3: N 24°51'59.4" W 100°08'30.5"

Coordenada L3': N 24°51'57.7" W 100°08'30.6"

Longitud de la línea: 55 metros

Cantidad de electrodos: 12

Apertura eléctrica: 5 metros

Dispositivo eléctrico: Dipolo-Dipolo

Equipo geofísico utilizado: Resistivímetro compuesto por un transmisor ASTRA-100 y un receptor MARY-24 NORTHWEST

Objetivo: Caracterizar la formación Taraises, así como determinar las resistividades de sus estratos y de las fracturas rellenas de yeso y calcita que supuestamente se encuentran en dicha formación.

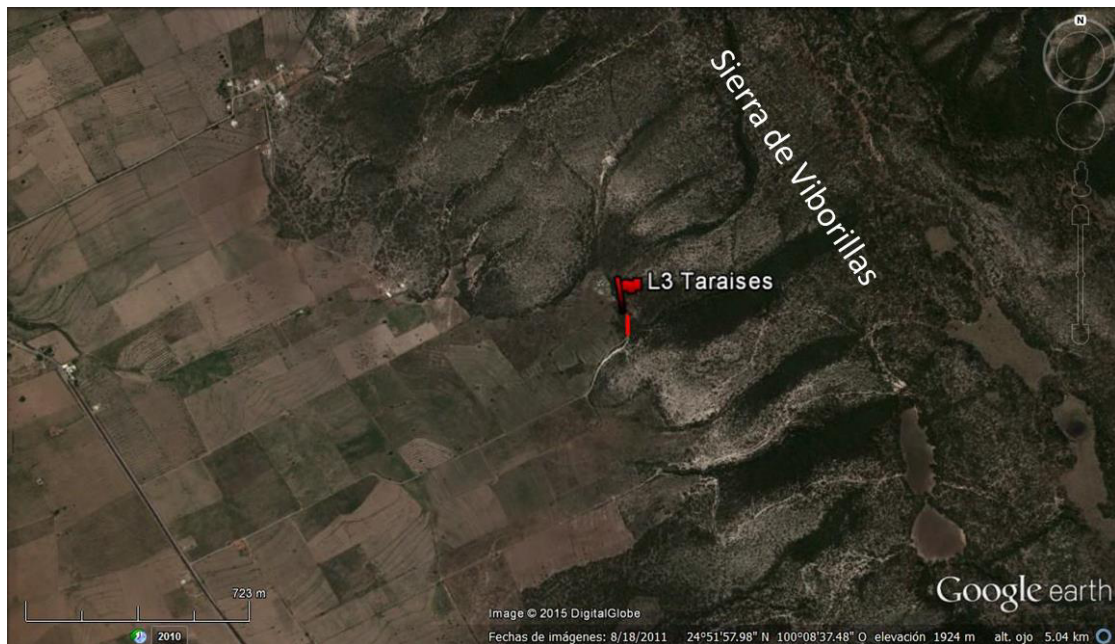


Figura 57. Ubicación de la Línea geofísica L3 Taraises.



Figura 58. Tendido de cables y electrodos a través del área de interés en la Línea L3 Taraises.

Para el levantamiento de los datos geofísicos, el procedimiento que se debe seguir es el siguiente:

- 1) Determinar la ubicación de la línea por la cual irá el tendido del cableado, electrodos y equipo.
- 2) Medir la línea con cinta métrica con la distancia deseada de la línea TER.
- 3) Colocar los electrodos (varillas) con el espaciamiento necesario (en el caso de las tres líneas de este estudio, el espaciamiento de electrodos fue de 5 metros); Los electrodos deben ir clavados en el suelo a manera que profundicen al menos un tercio de la longitud de la varilla.
- 4) Tender el cable junto a los electrodos para proceder a unir mediante el amarre de una liga, el electrodo con la parte metálica del cable.
- 5) Conectar el cableado con el equipo geofísico, así como conectar el mismo, a la batería.
- 6) Prender el equipo, configurarlo de acuerdo a las especificaciones de la línea que se

realizará, e iniciar el levantamiento de datos con el equipo.

Observaciones:

El equipo ARES es automático así que el mismo equipo toma la medición de cada dipolo, graba la medición, y continúa con el siguiente dipolo hasta terminar la línea.

Debido a fallas técnicas del equipo ARES, para el caso de las líneas *L2 La Casita* y *L3 Taraises*, el levantamiento de datos se realizó con el equipo MARY-24 NORTHWEST el cual es manual, a diferencia del ARES, por lo que a partir del paso # 4 la toma de datos se realizó uno a uno cada dipolo, de manera manual, es decir cambiando la conexión de cada uno de los cables por turno.

5.2.3. Procesado de datos geofísicos

Mediante el levantamiento de datos en campo, se obtienen las resistividades aparentes del subsuelo; para poder observar una imagen 2D de los valores de resistividad más aproximados a los reales, es necesario hacer un procesado de los datos obtenidos en campo, mediante la solución del problema inverso de manera computarizada.

Se usaron dos softwares de inversión en este trabajo: RES2DINV y EarthImager2D, los cuales emplean un algoritmo de diferencias finitas con el método de mínimos cuadrados para la resolución del problema inverso, dando como resultado un modelo de resistividades reales en dos dimensiones.

Cada una de las líneas tomadas en campo se introdujo a los programas correspondientes para realizar su inversión:

L1 Minas Viejas

Para la línea L1 se usó el programa RES2DINV obteniendo el perfil de resistividades aparentes medidas, el perfil de resistividades aparentes calculadas y el perfil equivalente al modelo de resistividades luego de la aplicación del método inverso, este último

presenta lo que deben ser los valores de resistividad más acercados a los valores reales del subsuelo (Figura 59).

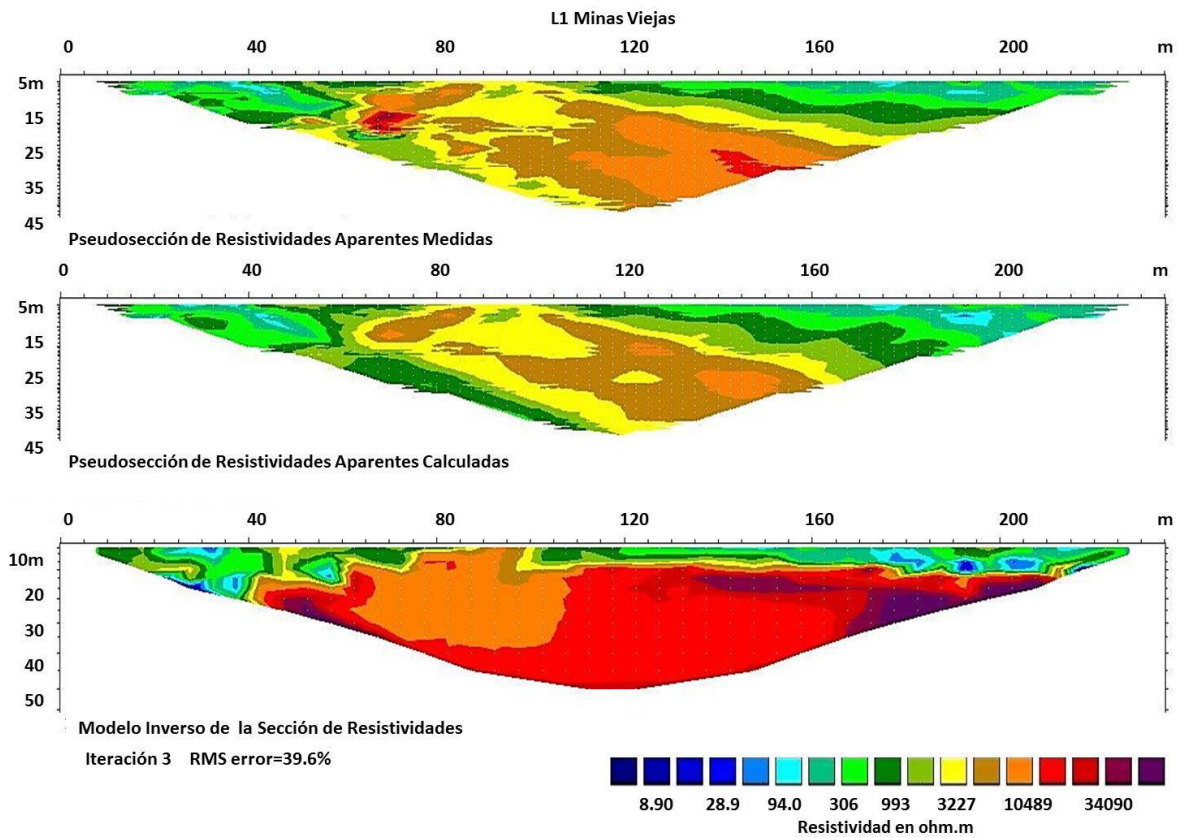


Figura 59. Secciones de resistividades aparentes medidas, calculadas y resistividades invertidas, correspondientes a la línea L1 Minas Viejas.

Luego de varias pruebas de inversión para obtener el modelo más representativo de la geología que se tiene en el área, se analizó cada una de ellas, siempre obteniendo valores altos del error del modelo, lo que podría indicar datos erróneos, pero también es indicador de altos rangos de resistividades en el subsuelo como lo es en este perfil en el que podemos encontrar resistividades desde 8 hasta 40,000 ohm.m, por más iteraciones que se aplicaran al modelo, el error no logró reducirse si no hasta 16%, sin embargo el modelo referido con 16% de error no fue tomado como definitivo, ya que este se logró con 10 iteraciones y se observaba el modelo ya sobrecalculado y casi homogéneo. Aquí entra la importancia de observar los datos de resistividades aparentes de campo, en los cuales podemos observar para este perfil, que se tienen dos anomalías de valores

altísimos que deben ser obtenidos en el perfil de resistividades invertidas, no de la misma manera pero sí asemejándose a lo que se obtuvo en campo.

Después de varios ejercicios de inversión se optó por tomar la Figura (59) en la cual el error es de 39.6% lo que puede ser un valor muy alto, sin embargo se debe tomar en cuenta que no se podría reducir tanto el error teniendo rangos tan altos de resistividad además se obtuvo en sólo 3 iteraciones y sin eliminar datos.

La profundidad de la TER que se alcanzó fue de 50 metros, por lo que no se alcanzó a ver las cavidades o conductos kársticos que se esperaba encontrar.

L2 La Casita

Para la Línea L2 La Casita se hicieron varias pruebas de inversión en el programa RES2DINV en las que el modelo no quedaba tan suavizado debido a que son pocos datos los que se tomaron con el equipo MARY, así que la interpolación era más robusta; se decidió usar otro software de inversión llamado EARTHIMAGER2D el cual trabaja de la misma manera, pero da la opción para aumentar el número de celdas entre cada punto medido, lo que hace la interpolación más suave y con esto el modelo es más realista geológicamente.

Se obtuvo la sección de resistividades medidas, resistividades calculadas y resistividades invertidas (Figura 60).

L3 Taraises

Al igual que la línea L2 La Casita, para esta línea se hizo uso del programa EARTHIMAGER2D ya que se contaba con pocos puntos medidos por haberlo realizado con el equipo MARY. Durante el procesado de datos sólo se pudo reducir el error a 37.51% lo que se debe a la poca cantidad de datos y que algunos estaban ruidosos y tuvieron que ser eliminados.

Se obtuvo la sección de resistividades medidas, resistividades calculadas y resistividades invertidas (Figura 61).

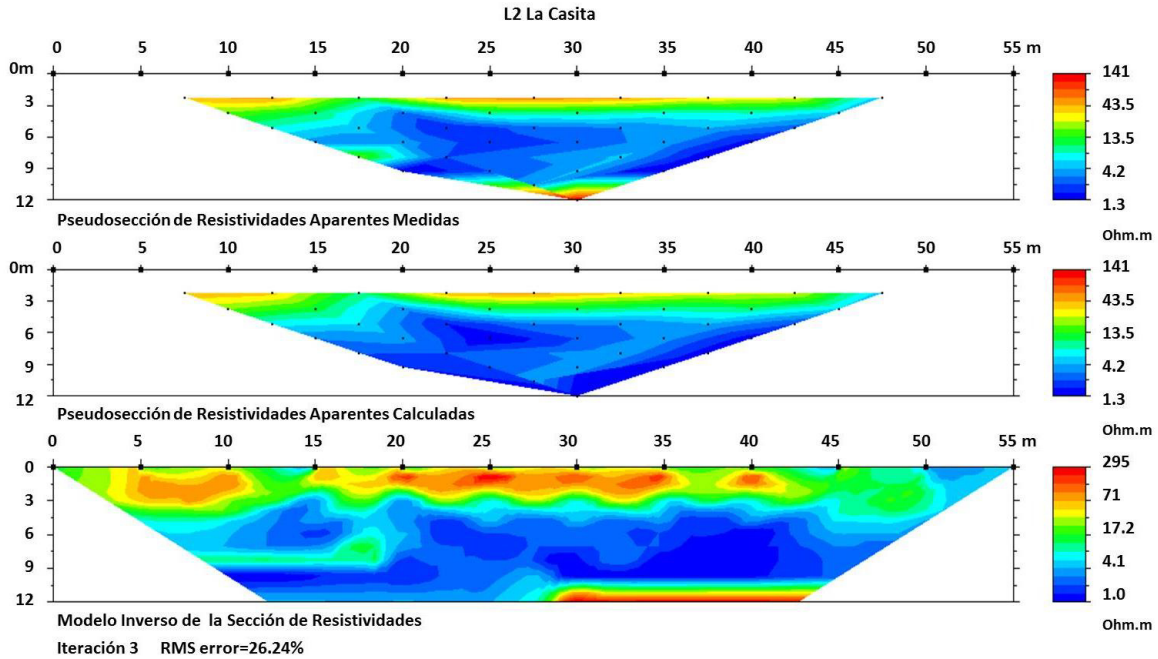


Figura 60. Secciones de resistividades aparentes medidas, calculadas y resistividades invertidas, correspondientes a la línea *L2 La Casita*.

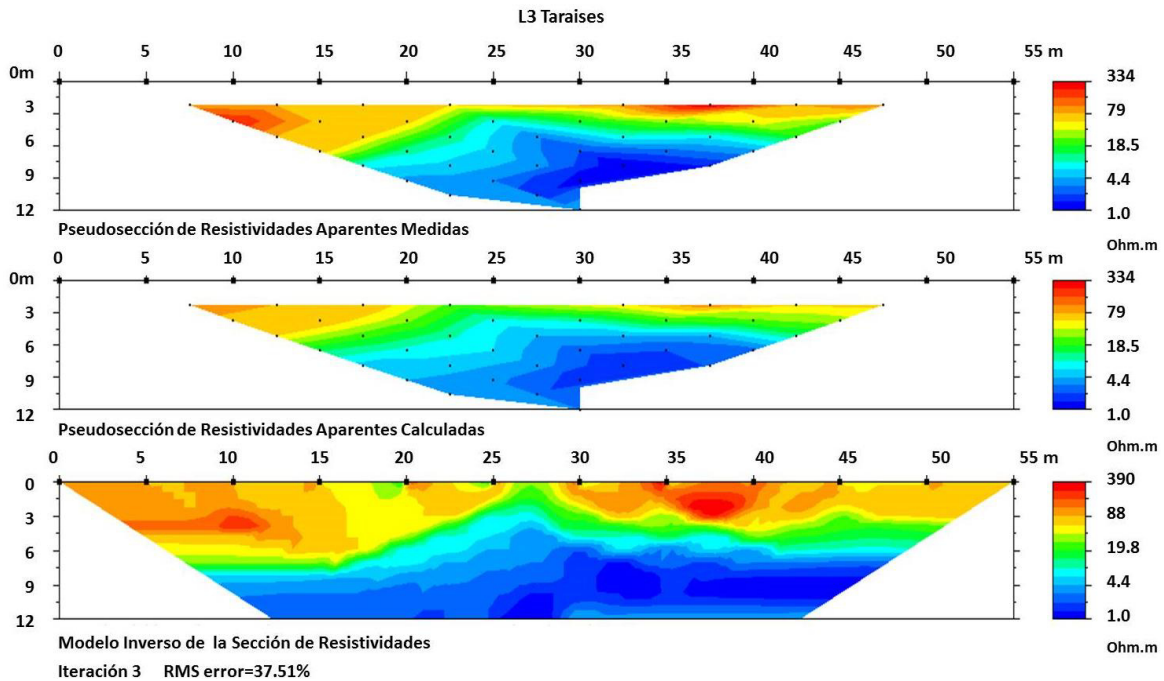


Figura 61. Secciones de resistividades aparentes medidas, calculadas y resistividades invertidas, correspondientes a la línea *L3 Taraises*.

5.2.4. Interpretación de las líneas

Una vez obtenidas las secciones de resistividad invertidas y elegidas aquellas que fueran correctas de acuerdo al medio geológico, así como como a la parte numérica. Se procedió a hacer la interpretación de los perfiles obteniendo los siguientes resultados:

L1 Minas Viejas

En la zona en la que se tendió esta línea se encuentra aflorando la formación Minas Viejas, con yesos de distinto contenido y pureza, esto puede observarse en la sección de resistividades invertidas en la que se tienen valores desde 8.90 y hasta 20,000 ohm.m siendo todo este rango de resistividades correspondiente a los yesos de dicha Formación Geológica; las zonas coloreadas de naranja con resistividades de 10,500 ohm.m representan los yesos de grano más fino y suelto (Figura 63 , fotografía 4). Las zonas rojas con resistividades de 20,000 ohm.m aproximadamente, representan los yesos de grano grueso y más compactado (Figura 63, fotografía 2). Las áreas más conductivas de tonalidades azules, verde y amarillo con valores desde 8 hasta 3227 ohm.m pueden ser los yesos combinados con terrígenos o arcillas que además se encuentran húmedas en las partes más someras debido a las lluvias en fechas anteriores al estudio.

Las zonas de mayor interés se observan de tonalidades moradas con valores de resistividad de 40,000 ohm.m las cuales se dudaba su significado, ya que bien podría ser anhidrita de acuerdo a como se describe la Formación Minas Viejas por Götte (1988), o bien podría ser una cavidad por tratarse de un medio kárstico, lo cual es justamente lo que se buscaba encontrar con esta línea. Sin embargo se optó por interpretar esa anomalía de resistividades altísimas como roca anhidrita ya que debido a la profundidad que se encuentra, no podría tratarse de cavidades, esta anomalía está ubicada a 20 o 30 metros de profundidad aproximadamente, y el flujo, al parecer, siempre ha sido más profundo lo cual se puede corroborar con el Pozo del Gavilán, que tiene profundidad de 80 metros y su cavidad principal tuvo que formarse a una profundidad donde hubiera

mucho flujo de agua. Además de existir una cavidad a la profundidad de la anomalía (20-30m) probablemente dicha cavidad ya hubiera colapsado, formando otra dolina en ese lugar. Además Götte (1988) menciona que la secuencia sulfática inferior de la Formación Minas Viejas, consiste principalmente de anhidrita yesificada superficialmente, encontrando la anhidrita aun no yesificada a una profundidad de 10 o 20 metros bajo el nivel del terreno.

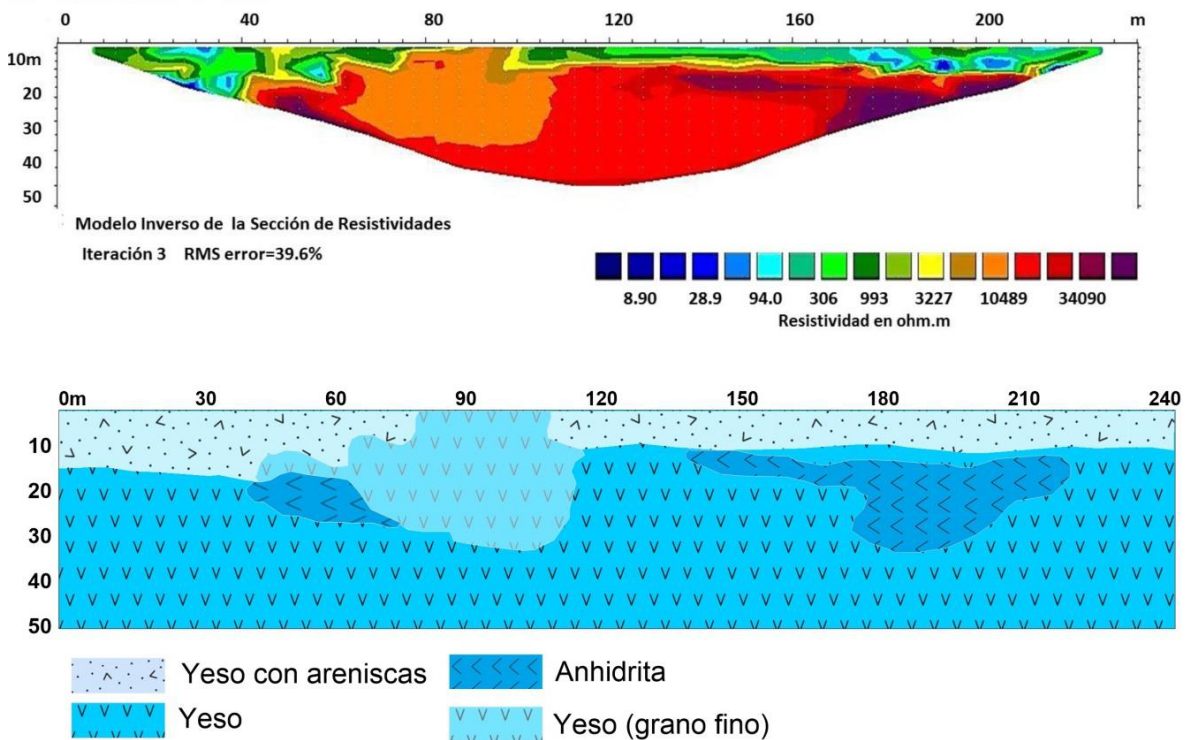


Figura 62. Modelo geológico elaborado a partir de la sección geofísica para la Línea L1 Minas Viejas.



Figura 63. 1) Muestra de yeso tomada al Oeste de la Laguna de Labradores. 2) Muestra de yeso tomada cercano al Pozo del Gavilán. 3) Muestra de yeso tomada en una fractura rellena de yeso al SW del Cerro del Potosí. 4) Muestra de yeso tomada a un costado de la Línea geofísica L1 *Minas Viejas*.

L2 La Casita

El perfil L2 fue realizado cercano a un manantial que aflora en la formación La Casita en las faldas del Cerro del Potosí, el manantial se ubica entre los 18 y 27 metros del perfil. En la sección se observa en color azul lo que representa el nivel freático con resistividad de 1 a 5 ohm.m, en la parte izquierda el agua se encuentra a una profundidad de 9 metros, al centro y a la derecha del perfil el agua se encuentra a 4 metros, este aumento se cree que se deba a lo que se marca como un plano inclinado en el perfil, un cambio de litología en esa zona. De acuerdo al mapa geológico, en esta área se tienen la estratificación inclinada con un buzamiento de 38° al suroeste. La Casita está conformada por capas de lutitas, las cuales en esta zona se compactan más, las capas se hacen más delgadas y no tienen tanto fracturamiento por eso sirven como barrera hidrogeológica para el agua subterránea, y hace que descargue como un manantial en una zona de debilidad; en superficie esta capa de lutitas se observa con resistividades de 20 hasta 295

ohm.m por su alto grado de compactación.

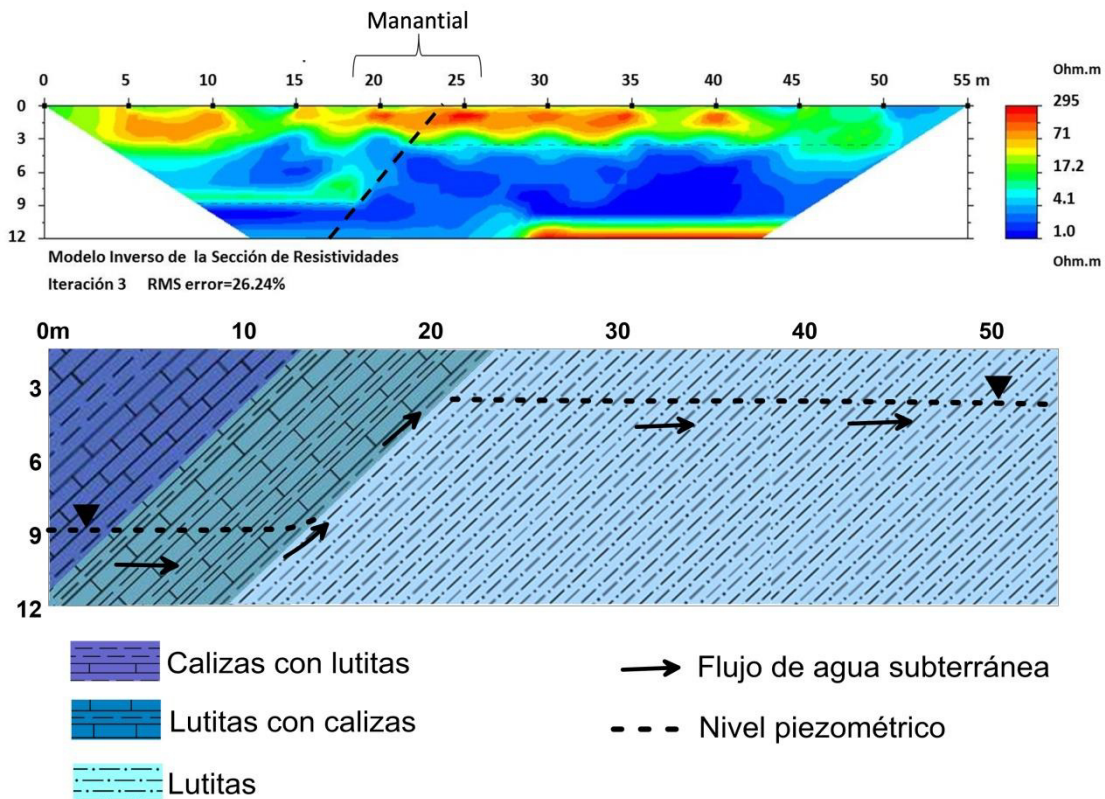


Figura 64. Modelo geológico elaborado a partir de la sección geofísica para la Línea L2 La Casita.

La resistividad del agua, debido a sus valores, se cree que es agua dulce, sin residuos de sal.

La parte más resistiva en la zona del alumbramiento del manantial puede deberse al reflejo tridimensional de la medición de la línea, ya que en el alumbramiento del manantial se forma un surco el cual causó una anomalía de resistividad alta por ser un vacío lo que se midió en esa zona en específico. La profundidad de esta tomografía es de 12 metros.

L3 Taraises

El perfil L3 fue tomado en la formación Taraises, en las faldas del Cerro de Viborillas, en esta zona, de acuerdo al mapa geológico se tienen los estratos de la formación Taraises buzando hacia el noreste con ángulos de 30° y 40°; en esta sección se

tienen resistividades de hasta 390 ohm.m las cuales representan las calizas y margas que se tienen en esta formación, es notable la inclinación de los estratos, algunos más resistivos que otros, esto indicando su contenido de lutitas lo cual hace al estrato más permeable o impermeable y con esto cambia su resistividad. A 9 metros se observa el nivel freático con resistividad de 1 a 5 ohm.m lo que indica que es agua dulce. En este perfil se esperaba observar algunas fracturas rellenas de yeso, sin embargo no se observan anomalías paralelas a los estratos con valores de resistividad tan altos como en el perfil L1, además la resistividad del agua de haber sido menor a 1, podría indicar la salinidad que adquiere el agua al estar en contacto con los yesos, por lo que se cree que en esta zona no hay tales fracturas. Se observa también en la parte central del perfil entre los 25 y 30 metros, lo que pudiera ser una zona de infiltración por donde se humedece más el material rocoso.

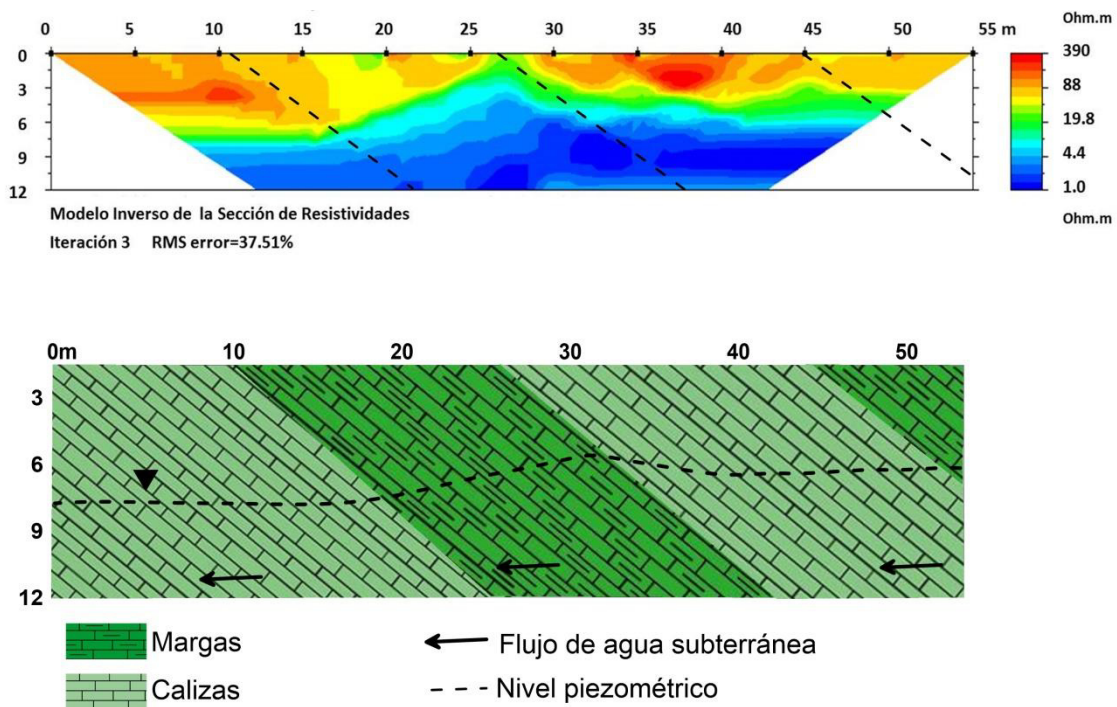


Figura 65. Modelo geológico elaborado a partir de la sección geofísica para la Línea L3 *Taraises*.

5.3. Resultados de la Tomografía eléctrica de resistividad aplicados en el área de estudio

El Método de Tomografía eléctrica de resistividad (TER) es posiblemente el mejor método utilizable de geofísica en temas de hidrogeología, ya que se basa en la inyección de electricidad al subsuelo midiendo qué tanta capacidad tienen las rocas para conducir dicha electricidad, por lo tanto el método fue muy útil para ver características hidrogeológicas en distintas zonas de la cuenca de estudio:

En el perfil *L1 Minas Viejas* se obtuvieron resistividades altísimas desde 8.9 hasta 20,000 ohm.m, donde todo el intervalo corresponde a los yesos que se tienen en la Formación Minas Viejas, sin embargo se pudo diferenciar entre varios tipos de yesos, aquellas anomalías con resistividades de 10,500 aproximadamente representan los yesos de grano más fino y suelto, y los valores de 20,000 representan los yesos de grano más grueso y compacto. Además fue posible detectar roca anhidrita con resistividades de 40,000 ohm.m, atendiendo a la caracterización de la Formación Minas Viejas de Götte (1988) esta anhidrita debe formar parte de la nombrada Secuencia Sulfática Inferior que consiste principalmente de anhidrita yesificada superficialmente.

Del perfil *L2 La Casita* fue posible observar la surgencia del manantial en la sección geofísica, ya que se obtuvieron resistividades de 1 a 5 ohm.m las cuales representan el agua y el nivel freático escalonado por la desviación del flujo al incidir con una capa que funciona como barrera hidrogeológica, por su alto contenido de lutitas; dentro de la misma Formación Minas Viejas se pudo ver el cambio de litología que hace surgir un manantial en esa área. Exactamente en el punto de descarga del manantial se tienen resistividades altas de hasta 295 ohm.m las cuales representan tanto las capas de lutitas más compactadas, como el reflejo tridimensional de la línea geofísica, ya que las mediciones fueron tomadas a un costado del manantial y en la surgencia hay un surco que genera resistividades altas por el vacío.

Del perfil *L3 Taraises* se observan resistividades de hasta 390 ohm.m

representando las calizas y margas de dicha Formación geológica, siendo posible observar la estratificación inclinada y el nivel piezométrico a 9 metros de profundidad con resistividades de 1 a 5 ohm.m, estos valores de resistividad significan que el agua no es sulfatada a diferencia de algunos manantiales de la Sierra de Viborillas al NE del área de estudio.

Capítulo 6. El nivel piezométrico y sus oscilaciones

Una vez descrito el medio geológico, el estudio del nivel piezométrico y sus oscilaciones es un tema muy importante ya que estas oscilaciones pueden provocar, por un lado, falta de agua en zonas de bombeo, y por otro lado, excesos de agua en zonas efluentes pudiendo provocar afectaciones como inundaciones en poblados aguas-abajo. Con el estudio oportuno de las oscilaciones, pueden ser prevenidas las afectaciones y falta de agua.

6.1. Piezometría

Para conocer la variación de los niveles de las aguas subterráneas, es necesario medir primero dicho nivel. El nivel piezométrico o superficie piezométrica, en ocasiones referida como carga hidráulica, se define como la altura que alcanza el agua de un acuífero a presión atmosférica sobre un nivel horizontal de referencia (Werner, 1996). Este nivel puede ser medido directamente en norias, pozos y manantiales. Para acuíferos libres, este nivel aflora como espejo de pozo y es llamado nivel freático; para acuíferos confinados el espejo de pozo corresponde al nivel de presión del acuífero (Figura 66). Se le representa mediante una carta piezométrica la cual se compone de líneas de igual altura piezométrica, de forma similar a la representación de una superficie topográfica mediante curvas de nivel. A estas curvas se les llama isopiezas o hidroisohipsas (Custodio y Llamas, 2001).

La elaboración de la carta piezométrica es llamada piezometría, generalmente se realizan las mediciones con un equipo de nivelación a profundidad: Sonda de luz, sonda acústica, flotador con cordel, o sonda automática con almacenamiento de datos.

Los datos obtenidos son plasmados en una configuración espacial del nivel piezométrico del acuífero, proporciona la siguiente información sobre el agua subterránea en la carta piezométrica (Werner, 1996):

- Las direcciones de flujo, que son de importancia para la colocación de pozos y para el reconocimiento de rutas de migración de contaminantes, entre otros aspectos.
- Los gradientes de flujo o potenciométricos, que se necesitan para el cálculo del caudal y de la velocidad del agua subterránea.

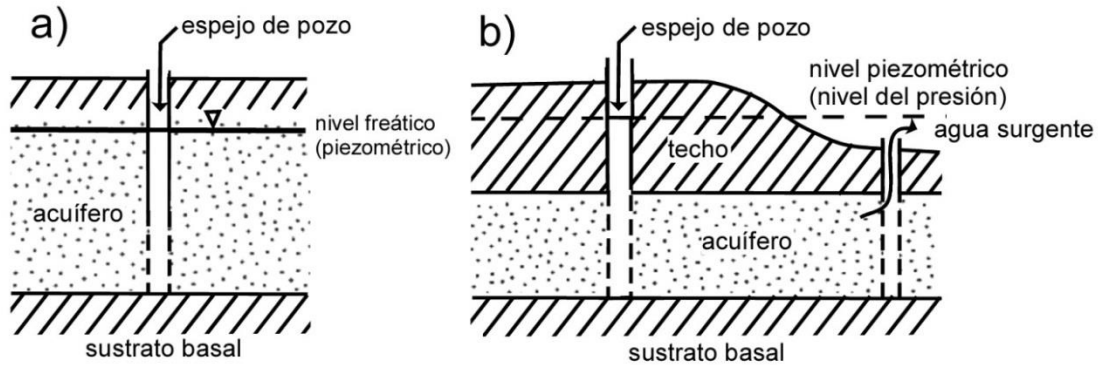


Figura 66. Nivel piezométrico en un acuífero libre (a), o un acuífero confinado (b). Tomado de Werner (1996).

Las mediciones se hacen tratando de aprovechar los accesos al acuífero que sean suficientemente representativos tales como pozos, galerías, zonas pantanosas, manantiales, lagos, lagunas, ríos, etc. Los pozos y las galerías en producción provocan afectaciones a los niveles piezométricos y dan valores dinámicos que varían según el régimen de explotación. Las surgencias como zonas pantanosas, lagunas, y manantiales, indican una salida de agua y en general son una superficie de nivel constante.

6.1.1. Elaboración de una carta piezométrica

La carta piezométrica se basa en la interpolación lineal de los valores obtenidos de los niveles piezométricos, a través del triángulo hidrogeológico (Figura 67). Debido a que el agua debe seguir el gradiente más pronunciado, la dirección de su flujo será marcada por flechas perpendiculares a las isopiezas.

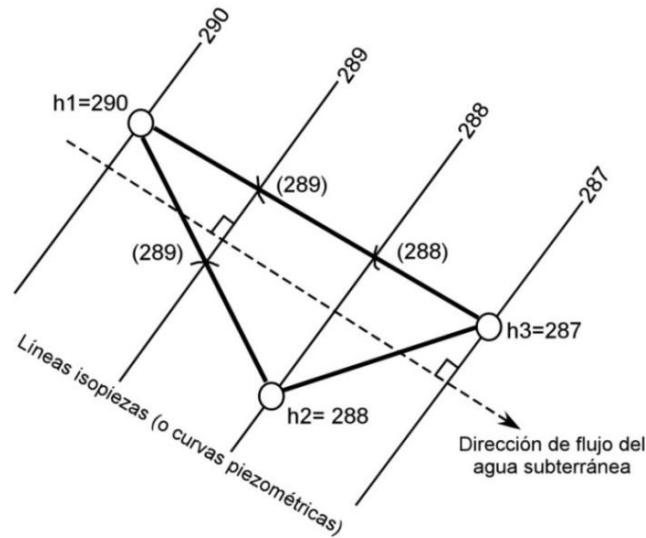


Figura 66. Triángulo hidrológico. Los vértices consisten en 3 niveles piezométricos. Utilizando la regla de tres, los lados del triángulo se dividen según las diferencias de altura entre h1, h2 y h3. Tomado de Werner, 1996.

La superficie freática (en el caso del acuífero libre) y el nivel de presión (en el caso del acuífero confinado) están inclinados rumbo al flujo del agua subterránea. Esta inclinación está determinada por el gradiente piezométrico i .

$$i = \frac{\Delta h}{\Delta l} \quad (12)$$

Donde Δh [m] = distancia vertical y

Δl [m] = distancia horizontal entre dos puntos del nivel

El gradiente piezométrico, también llamado gradiente hidráulico, es la diferencia de potencial entre dos puntos en una línea de flujo de agua subterránea equivalente a la pérdida de energía por la distancia entre ellos.

Para el cálculo del gradiente en el mapa piezométrico se debe medir la distancia entre dos isopiezas a lo largo de una línea de flujo, se lee la diferencia de altura Δh entre las mismas isopiezas y se calcula el gradiente según la ecuación (12). Comúnmente se repite esta operación en varios lugares del mapa para obtener un valor medio estadístico.

Una vez generando, las curvas potenciométricas, los gradientes piezométricos y las direcciones de flujo mediante consideraciones de las condiciones hidrogeológicas del área, se procede a plasmar todo en un mapa para su interpretación.

6.1.2. Cálculo de la velocidad del agua en un acuífero a través de la carta piezométrica

A partir de la carta piezométrica es posible determinar la velocidad a la que fluye el agua subterránea ya que existe proporcionalidad directa entre la velocidad de flujo y el gradiente piezométrico, aplicando la ecuación (10):

$$v = Ki \quad (13)$$

Siendo v la velocidad de flujo del agua, K el coeficiente de permeabilidad o la conductividad hidráulica, e i el gradiente piezométrico tomado de la carta piezométrica.

Sin embargo la ecuación (13) no es aplicable en acuíferos kársticos debido a que el flujo laminar medido cambia a flujo turbulento por su alta permeabilidad en las cavidades y conductos kársticos, por lo que en este estudio se optó por utilizar la ecuación (14):

$$V_L = \frac{K \frac{dh}{L}}{\eta_e} \quad (14)$$

Siendo V_L = velocidad lineal promedio

K = conductividad hidráulica

dh = diferencia en la carga hidráulica

L = longitud entre los puntos

η_e = porosidad efectiva

La ecuación (14) es una derivación de la Ley de Darcy, usada para calcular la magnitud del vector de velocidad. La Velocidad Lineal Promedio de Flujo representa la velocidad promedio de todo el flujo y no la velocidad de las partículas individualmente del agua, esta toma en cuenta parámetros del medio que atraviesa el agua como la

conductividad hidráulica y la porosidad efectiva (Bair y Lahm, 2006).

Una vez que se determina la velocidad del agua subterránea, el tiempo de tránsito puede ser calculado entre dos puntos en el medio estudiado usando la ecuación (15):

$$\text{Tiempo de tránsito} = \frac{\text{Longitud de la trayectoria del flujo}}{\text{Velocidad lineal promedio del flujo}} \quad (15)$$

6.2. Oscilación del nivel piezométrico

El nivel de las aguas subterráneas varía con el tiempo de forma muy diversa, en general se trata de variaciones pequeñas en acuíferos no explotados, pero pueden ser muy importantes en acuíferos con pozos de bombeo intensos. Algunas de estas oscilaciones sólo tiene un valor anecdótico o científico como son las provocadas por las mareas, cambios de presión atmosférica, sobrecargas rápidas, etc. mientras que otras tienen un indudable valor práctico, pues pueden llegar a afectar y condicionar la explotación de un acuífero por disminución de la altura del agua en los pozos y en el acuífero, mayor elevación del bombeo, etcétera (Custodio y Llamas, 2001).

Las variaciones del nivel piezométrico dependen en primer lugar de las variaciones de la precipitación. Las curvas de variación piezométrica se obtienen por mediciones regulares o por el registro automático de pozos de observación y estas comprenden una faceta importante de muchos estudios de agua subterránea ya que pueden resultar de una serie de varios fenómenos físicos, algunos naturales y algunos inducidos por el hombre (Freeze y Cherry, 1979).

Es frecuente distinguir dos tipos principales de oscilaciones de los niveles piezométricos del agua subterránea:

- a) Oscilaciones rápidas, cuya duración varía desde menos de un minuto a poco más de un día.

- b) Oscilaciones de período largo que se repiten en base a un ciclo semianual, anual, o de varios años.

No siempre se trata de oscilaciones periódicas; no lo son, por ejemplo, las producidas por bombeos irregulares o las provocadas por crecidas de ríos cuando se estudian con pocos años de registro. Las oscilaciones piezométricas son unas veces debidas a causas directas que suponen un cambio en el almacenamiento subterráneo tales como:

- 1) Sucesión de épocas secas y épocas húmedas.
- 2) Variaciones de niveles en ríos y lagos conectados directamente con el acuífero.
- 3) Extracción de agua por bombeo o recarga por inyección.

Otras causas actúan indirectamente en especial mediante cambios de presión que no se supone variación importante del agua almacenada, afectan principalmente a acuíferos capaces de comportarse como cautivos, por lo menos en períodos breves de tiempo. Tales como:

- 1) Efectos por mareas marinas.
- 2) Cambios en la presión atmosférica
- 3) Efectos de propagación de ondas elásticas.

6.2.1. Efectos estacionales de las oscilaciones del nivel piezométrico

Como se ha mencionado, las variaciones del nivel piezométrico se deben a diversas causas, sin embargo el causante principal de dichas oscilaciones y por tanto la fuente principal de recarga del acuífero, es la infiltración del agua proveniente de las precipitaciones. La recarga origina una elevación del nivel piezométrico y después el agua aportada se extiende hacia los lugares de descarga, naturales o artificiales (Werner, 1996; Custodio y Llamas, 2001).

La recarga no es igual para todos los acuíferos, debido a que está en función de la

infiltración. El nivel de infiltración depende de: la permeabilidad del suelo, la capacidad de infiltración del suelo y la inclinación de la superficie de recarga; de esta manera, la variación de dichas condiciones geológicas-edafológicas causa una variación espacial grande de la tasa de recarga, dentro de un mismo sistema hidrogeológico. Las tasas más altas de recarga, bajo las mismas condiciones climáticas, se observan en regiones karstificadas y en áreas de gravas con suelos poco desarrollados. Las tasas de recarga más reducidas ocurren en regiones con suelos de permeabilidad baja, especialmente en rocas y suelos arcillosos y con superficie inclinada.

En cuanto se produce la infiltración, la recarga del acuífero ocurre de manera diferencial, ya que en cada lugar el tiempo en llegar al acuífero es diferente por la topografía; ocurriendo amortiguación entre punto y punto, cuanto más profundo es el nivel freático con tanto más retraso se produce el efecto de recarga y el efecto amortiguador es mucho menor cuando la profundidad del nivel freático es casi la misma en todo el acuífero.

En acuíferos freáticos con el nivel poco profundo en materiales arcillosos, la lenta circulación del agua de recarga en el medio no saturado debería producir un efecto lento de recarga diferido; no obstante en ocasiones, en épocas húmedas se observa una respuesta inicial muy rápida que no puede explicarse normalmente ya que no es posible dada la baja permeabilidad del terreno; puede ser debido a infiltración preferencial a través de las discontinuidades creadas por raíces y grietas (Bonell, 1972). Además se habla de otro factor que influye en la velocidad de la recarga que es la sequedad del terreno; en épocas secas no sucede recarga rápida por la elevada tensión capilar del terreno no saturado (Custodio y Llamas, 2001).

6.3. Aplicaciones al área de estudio

Para el caso de estudio, que es el aumento repentino de nivel piezométrico de la Laguna de Labradores en Galeana, Nuevo León, en época de sequía, es necesario estudiar

los niveles piezométricos y determinar cómo varían y de acuerdo a qué factores, con esto se podrán estudiar las oscilaciones que tiene el acuífero de estudio y saber por qué aumentó de manera tan acelerada, el nivel del agua en la Laguna de Labradores.

6.3.1. Descripción de la metodología

Para conocer el nivel piezométrico actual de la cuenca de estudio, se realizó una serie de mediciones piezométricas en campo y con el apoyo de datos de Agua y Drenaje de Monterrey, se elaboró una carta piezométrica del área de interés. A partir de la carta se obtuvieron los gradientes piezométricos y se hizo el cálculo de velocidad lineal promedio de flujo para saber a qué velocidad recorre el agua la cuenca, en promedio, y con esto conocer el tiempo que tarda en transitar en los puntos de recarga hasta los puntos de descarga.

Una vez teniendo los valores actuales de piezometría, velocidad y tiempo, se prosiguió a hacer una evaluación de datos climatológicos de la cuenca y de datos hidrométricos de dos pozos del área, para evaluar la velocidad de recarga del acuífero y saber cómo ha oscilado el nivel piezométrico y su relación con las lluvias y sequías. Con esto es posible distinguir de acuerdo a las recargas cuanto tiempo tarda el agua en transitar por la cuenca, si se compara con los resultados de Velocidad promedio lineal obtenidos a partir de la carta piezométrica.

6.3.2. Piezometría

Como se mencionó anteriormente, el estudio de la dinámica del agua en cualquier acuífero precisa del conocimiento de la superficie piezométrica; para este trabajo se elaboró la piezometría en la Cuenca La Laguna, para conocer el nivel actual del nivel piezométrico del área, la dirección de los flujos subterráneos, el gradiente con el que se mueve, y con esta información, obtener la velocidad a la que fluye desde que se recarga el acuífero hasta su descarga en las surgencias.

Para iniciar con la piezometría se hizo un censo de aprovechamientos comenzando con la búsqueda de norias y pozas naturales en la localidad de Laguna de Labradores y las localidades vecinas dentro del límite del área de estudio, sin embargo sólo en el poblado Laguna de Labradores se encontraron norias ya que el nivel piezométrico se encuentra muy profundo en otras zonas, y no es costoso para los habitantes hacer una noria propia en otras partes de la cuenca. Al tener localizados estos aprovechamientos, se tomó una medición del nivel piezométrico con una sonda de luz de la marca Solinst (sonda coaxial modelo 102), durante las fechas 21 de Febrero y 4 de Abril de 2014.

Después de la búsqueda de norias se consultó con Agua y Drenaje de Monterrey la localización de los pozos que actualmente están en uso en el área de estudio, así como los niveles estáticos y dinámicos de cada uno de los pozos. Una vez teniendo estos datos se completó el censo de aprovechamientos resumido en la Tabla 5.

Una vez teniendo los valores del nivel piezométrico, se procedió a hacer la carta piezométrica. Para la elaboración de dicha carta se hizo uso del software Surfer 10, en donde se localizaron en primera instancia todos los aprovechamientos con coordenadas y altitudes del terreno; después se introdujeron los valores de los niveles estáticos de dichos aprovechamientos para proceder a hacer una interpolación de tipo Krigging a partir de los valores dados; una vez obtenida una superficie potenciométrica, se colocó la línea de flujo perpendicular a las isopiezas y se calcularon los gradientes piezométricos.

Tabla 5. Censo de Aprovechamientos de la Cuenca la Laguna. Las claves SP17 son las claves registradas para los pozos de Agua y Drenaje. N.E. =Nivel estático, N. D. = Nivel dinámico.

#	Nombre de la Fuente	Clave	N.E. msnm	N.D. msnm	Latitud	Longitud	Altitud msnm
1	La Laguna	SP17-004	1751	1734	24.8374486	-100.1390950	1799
2	La Habana	SP17-002	1799	1778	24.8491982	-100.1446514	1836
3	El Porvenir II	SP17-026	1898	1858	24.8656978	-100.1642353	1934
4	Buena Vista	SP17-025	1830	1796	24.8690305	-100.1514571	1926
5	Derramadero III	SP17-023	1807	1763	24.8587529	-100.1531239	1887
6	Derramadero IV	SP17-024	1811	1810	24.8584759	-100.1528458	1886
7	Manila	SP17-030	1905	1890	24.8734473	-100.1526243	1950
8	Parque Béisbol	SP17-00	1634	1614	24.8343170	-100.0788828	1669
9	Laguna de Labradores	P0	1716	-	24.8106993	-100.1164548	1716
10	Noria	P3	1718	-	24.8101154	-100.1208438	1725
11	Noria	P5	1722	-	24.8092274	-100.1206218	1725
12	Pozo del álamo	P6	1733	-	24.8145043	-100.1235110	1741
13	Noria	P8	1717	-	24.8169771	-100.1135939	1720
14	Manantial	P9	2173	-	24.8969469	-100.1948757	2173
15	Noria	P10	1714	-	24.8181430	-100.1110109	1715
16	El chorro	P11	1696	-	24.8395867	-100.0761769	1696
17	Pozo del Gavilán	P12	1721	-	24.8162090	-100.1322140	1786
18	Pozo	P1	Inactivo	-	24.8159773	-100.1317332	1731
19	Noria	P2	sin agua	-	24.8102780	-100.1194440	1728
20	Noria	P4	sin agua	-	24.8111100	-100.1200000	1735
21	Poza	P7	sin agua	-	24.8140120	-100.1232530	1786

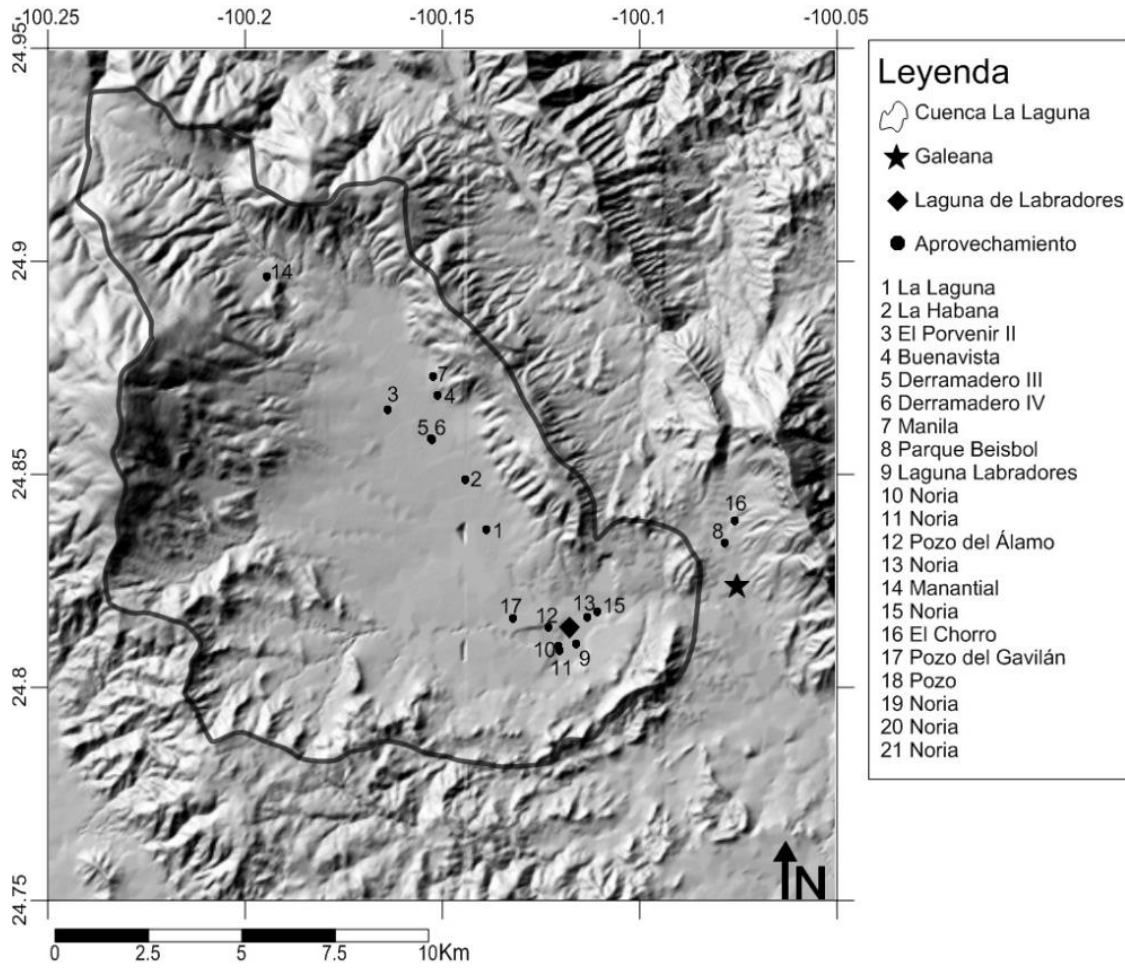


Figura 67. Ubicación de aprovechamientos (pozos, norias, pozas naturales) dentro de la Cuenca La Laguna.

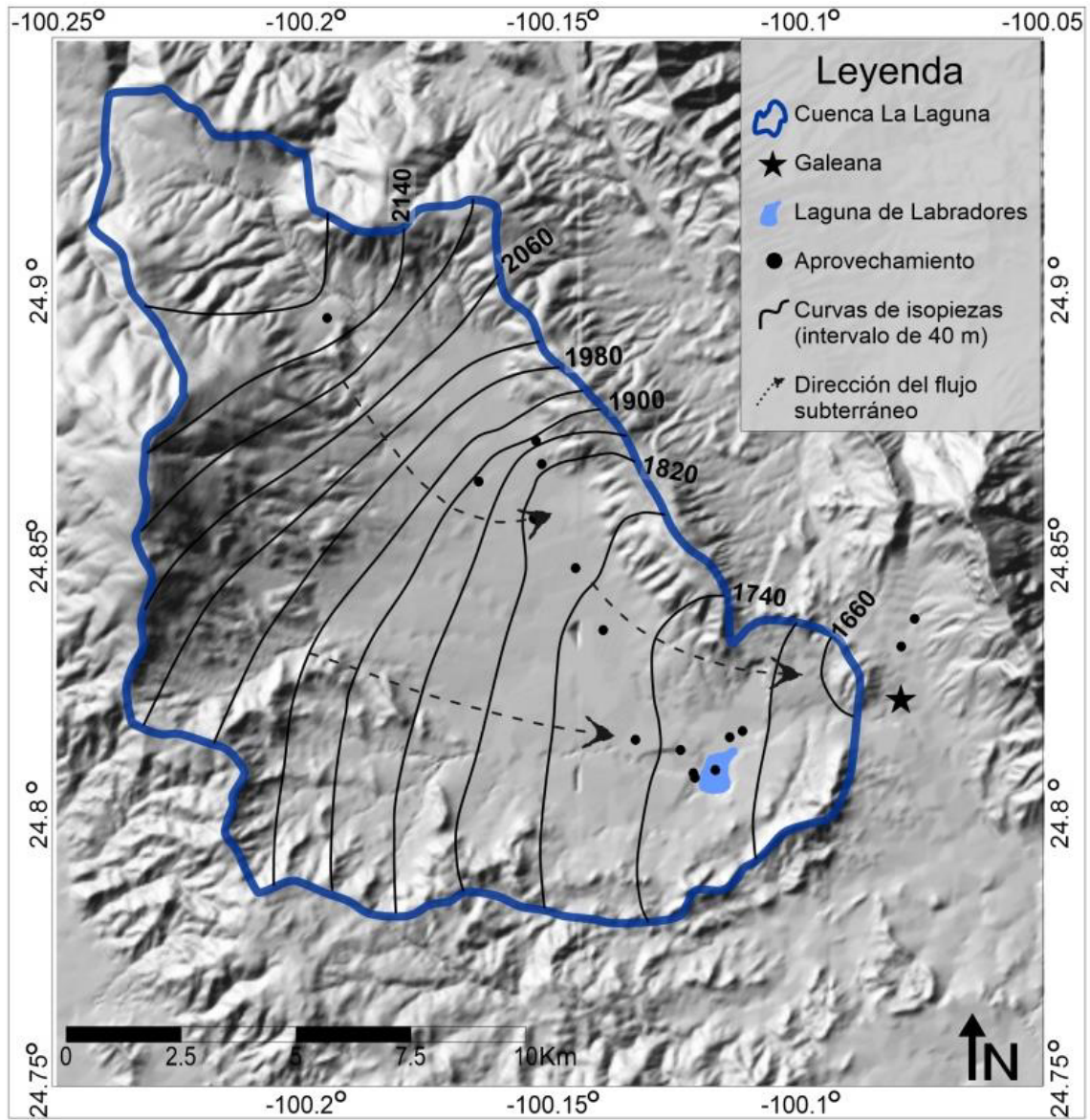


Figura 68. Carta piezométrica de la cuenca La Laguna

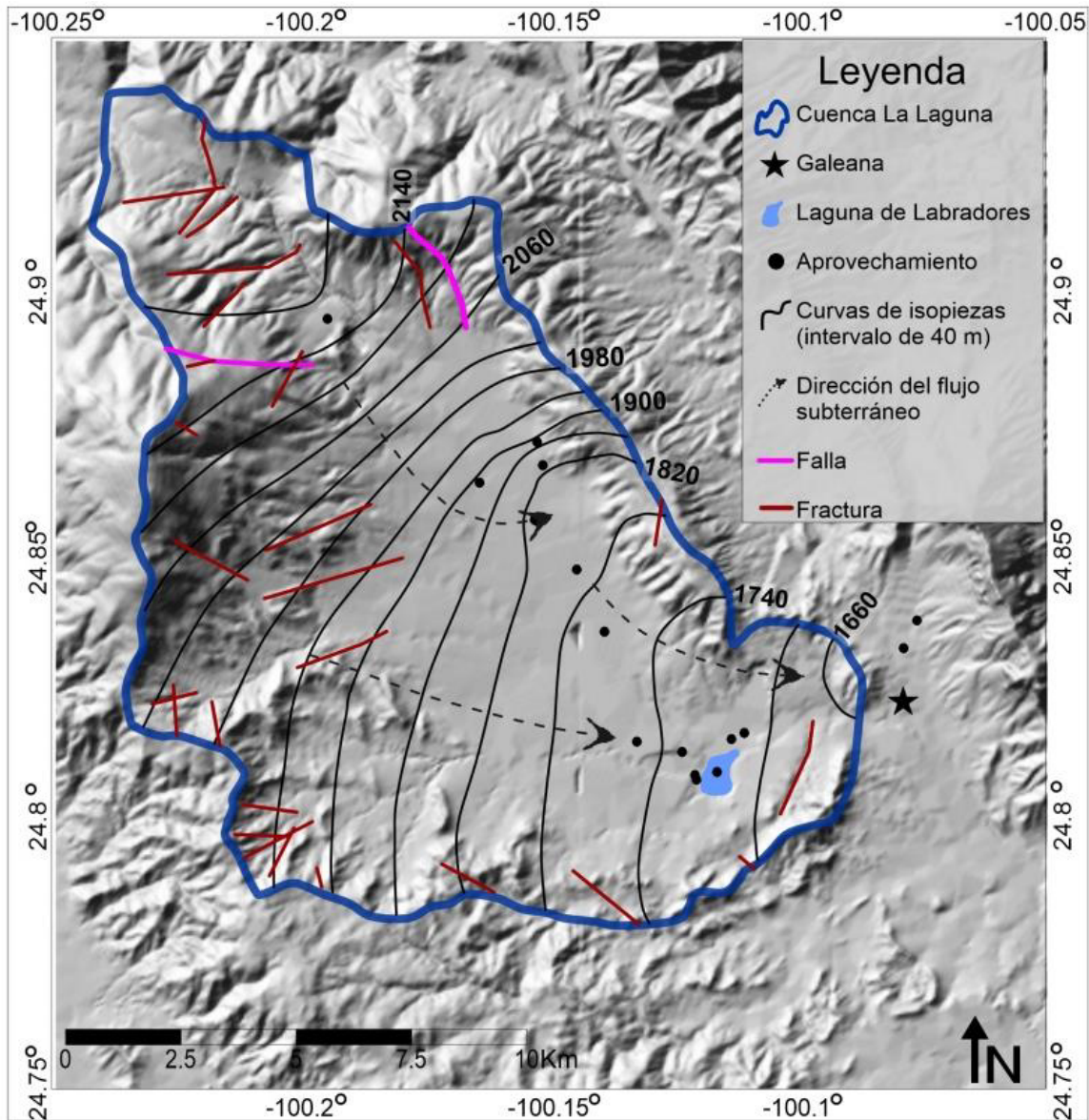


Figura 69. Carta piezométrica con fallas y fracturas de la cuenca La Laguna. Ubicación de las fallas y fracturas tomadas de la carta geológica G14C56 del INEGI.

De la carta piezométrica realizada en el área de estudio (Figuras 69 y 70), son de notarse los siguientes aspectos:

- La dirección principal de flujo corre de noroeste a sureste, y en la parte sur de la cuenca, la dirección va de oeste a este.
- Las isopiezías no tienen separaciones homogéneas entre sí. Se realizó el cálculo del

gradiente piezométrico obteniendo valores desde 1.7% en zonas donde se presentan las isopiezas a distancias de separación más cortas y de hasta 4% en zonas donde se observan las isopiezas más separadas. Esto habla de un medio muy heterogéneo y anisotrópico, lo cual era de esperarse para un acuífero kárstico fracturado.

- La separación anómala entre las isopiezas de alturas 1820 y 1780, puede ser debida a un “escalón” del acuífero causado posiblemente por un cambio estructural, o de composición litológica, y por lo tanto de permeabilidad, en esta zona. Alguna de las más probables es una falla normal o una fractura rellena que cambia el nivel de altura del acuífero.
- El manantial (al norte de la cuenca) es una surgencia que pertenece al flujo intermedio, que es el que corre a través de las partes bajas de los parteaguas y se descarga en zonas aledañas en poco tiempo, es por eso que el agua que sale por esta surgencia es potable ya que no pasa mucho tiempo en el acuífero.
- Todos los aprovechamientos de la cuenca de estudio, a excepción del manantial, contienen lo que se llama agua dura, es decir aguas con altos contenidos de sulfatos, esto debido a que pertenecen al flujo subterráneo profundo que transita la cuenca más tiempo, entrando en las partes altas de los parteaguas y recorriendo toda la cuenca a profundidad, de esta manera, el agua subterránea está en contacto con los yesos de las formaciones Zuloaga y Minas Viejas.
- Haciendo una superposición de las fallas y fracturas del área con la carta piezométrica, se observa que el sentido del flujo en casi la totalidad de la cuenca, no va en sentido de los planos de falla y fractura, esta oposición podría causar una interposición del flujo del agua. Es preciso entonces entender el tipo de falla de acuerdo a la clasificación descrita en el capítulo anterior, si las fallas son de barrera o conductivas y cuánto tiempo tarda en atravesarla o si el agua subterránea se desvía por medio de los planos de falla. Es de recalcar que la zona central no muestra fallamiento debido a la alta erosión del poljé, lo cual no permite mapear las líneas en esta zona.

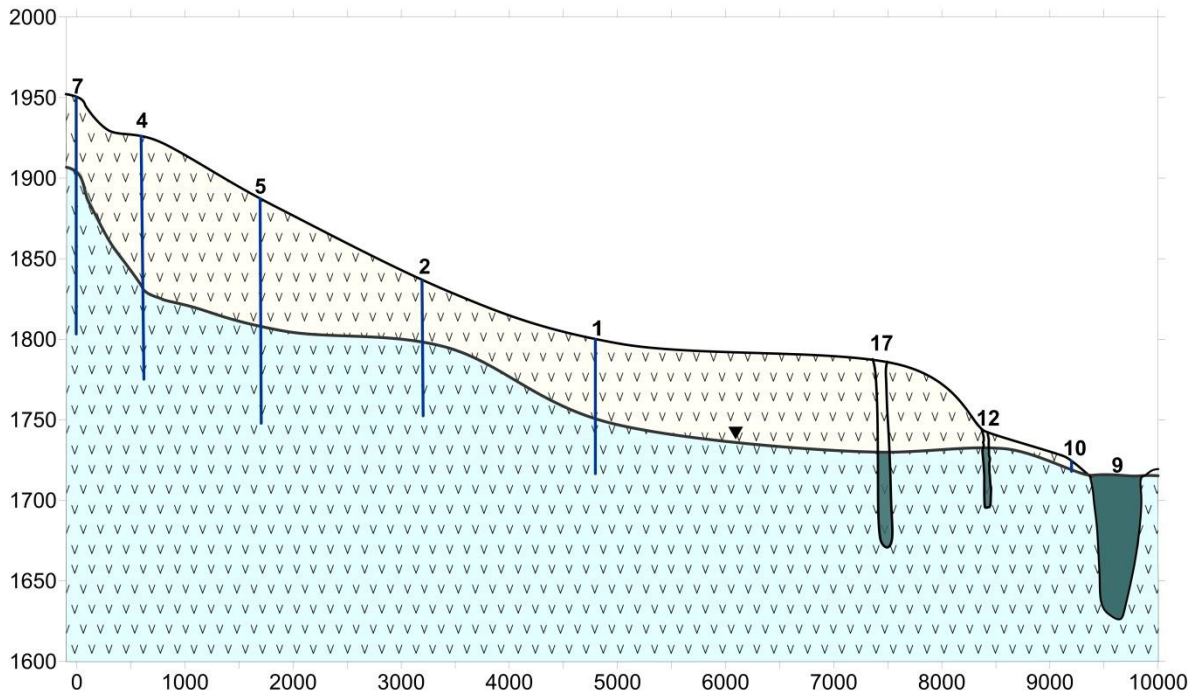


Figura 70. Perfil piezométrico extrapolando las alturas piezométricas de los aprovechamientos para hacerlas coincidir en una línea de referencia que atraviesa la cuenca. 1-La Laguna, 2-La Habana, 4-Buenavista, 5-Derramadero III, 7-Manila, 9-Laguna de Labradores, 10-Noria, 12-Pozo del Álamo, 17-Pozo del Gavilán.

6.3.3. Estimación de la velocidad de los flujos de agua subterránea y los tiempos de tránsito en la cuenca

Uno de los objetivos principales de este estudio, es conocer cuánto tiempo tarda en viajar el agua por el acuífero y aproximando la distancia que recorren los flujos, determinar la velocidad a la que viaja el agua subterránea por la cuenca La Laguna, hasta descargarse en la Laguna de Labradores. Teóricamente, la velocidad del agua pudiera ser determinada por la observación del tiempo que toma el agua en fluir, no obstante, la manera en que el agua realmente fluye, es siempre mayor porque corre en un medio geológico heterogéneo en tres dimensiones (Bögli, 1980).

Al principio de este estudio se hablaba de la caracterización de un acuífero kárstico en el área de interés, sin embargo con el análisis geológico se han podido diferenciar hasta

tres tipos de comportamiento del acuífero en la Cuenca hidrológica La Laguna (como se vio en el capítulo anterior), por lo que, para obtener tiempos y velocidades de tránsito del agua subterránea, es necesario hacer el cálculo promedio para cada uno de los tipos de acuífero que se presentan.

Es de recalcar, que además de los tres tipos de acuífero presentes en el área, también se tienen fallas y fracturas rellenas de calcita o yeso, las cuales representan barreras hidrogeológicas y podrían actuar como un medio aparte, ya que el agua tarda cierto tiempo en disolver las barreras mediante karstificación, y esto constituye un retardo en los tiempos de tránsito. Entonces es necesario estudiar los siguientes medios geológicos para conocer la velocidad y tiempo de tránsito del agua subterránea en el área de estudio:

- 1) Acuífero kárstico (Fm. Tamaulipas Superior, Tamaulipas Inferior, Minas Viejas)
- 2) Acuífero de grietas (Fm. Taraises, Zuloaga)
- 3) Acuitardo (Fm. Cuesta de Cura, La Peña, La Casita)
- 4) Fallas y fracturas rellenas de yeso y/o calcita

Para conocer la velocidad en dichos medios, deben tomarse en cuenta diversas propiedades geológicas: la conductividad hidráulica, la porosidad efectiva y la diferencia en la carga hidráulica de la zona en la cual será calculada la velocidad; estas propiedades son aplicables con la fórmula para la Velocidad Lineal Promedio (Ecuación (14)).

Los datos para los cálculos correspondientes, fueron tomados de tablas generales de Hidrogeología o Ingeniería Geológica (Tablas 6 y 7).

Tabla 6. Valores estimados de la porosidad total y efectiva para suelos y rocas comunes, Tomado de Sanders (1998).

	Porosidad total %	Porosidad efectiva %
Arcillas	40 a 60	0 a 5
Limos	35 a 50	3 a 19
Arena fina	20 a 50	10 a 28
Arena gruesa	21 a 50	22 a 35
Grava	25 a 40	13 a 26
Lutita	1 a 10	0.5 a 5
Arenisca	5 a 35	0.5 a 10
Caliza o dolomía	0.1 a 25	0.1 a 5
Caliza o dolomía karstificada	5 a 50	5 a 40
Rocas ígneas y metamórficas	0.01 a 1	0.0005

Tabla 7. Valores típicos de conductividad hidráulica. Tomado de Isherwood, 1979.

Conductividad hidráulica m/s	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}	10^{-8}	10^{-9}	10^{-10}	10^{-11}
Grado de Conductividad	Muy alto	Alto	Moderado				Bajo	Muy bajo			
Tipo de Suelo	Grava	Arenas	Arenas muy finas, limos, arcillas estratificadas				Arcillas homogéneas				
	← Lutita →										
	← Fracturada → Arenisca →										
	← Cavidades → Calizas y Dolomías → Sin fracturar →										
Tipo de Roca	← Fracturados → Basaltos → Densos										
	← Metamórficas →										
	← Sal →										
	← Rocas graníticas →										

Velocidad del agua en el acuífero kárstico

Los acuíferos kársticos, debido a que el agua se mueve por huecos de disolución en forma de canales y cavernas de diámetro irregular y de distribución heterogénea, tienen velocidades altas de flujo de hasta 150m/h; sin embargo a pesar de que el agua se mueve por cavidades en la parte subterránea, hacia la parte superficial los materiales que conforman los medios kársticos tienen muy baja porosidad por sí solos, de esta manera, otra característica notoria de los acuíferos kársticos es que llegan a tener variaciones muy grandes de velocidad y permeabilidad (Werner, 1996).

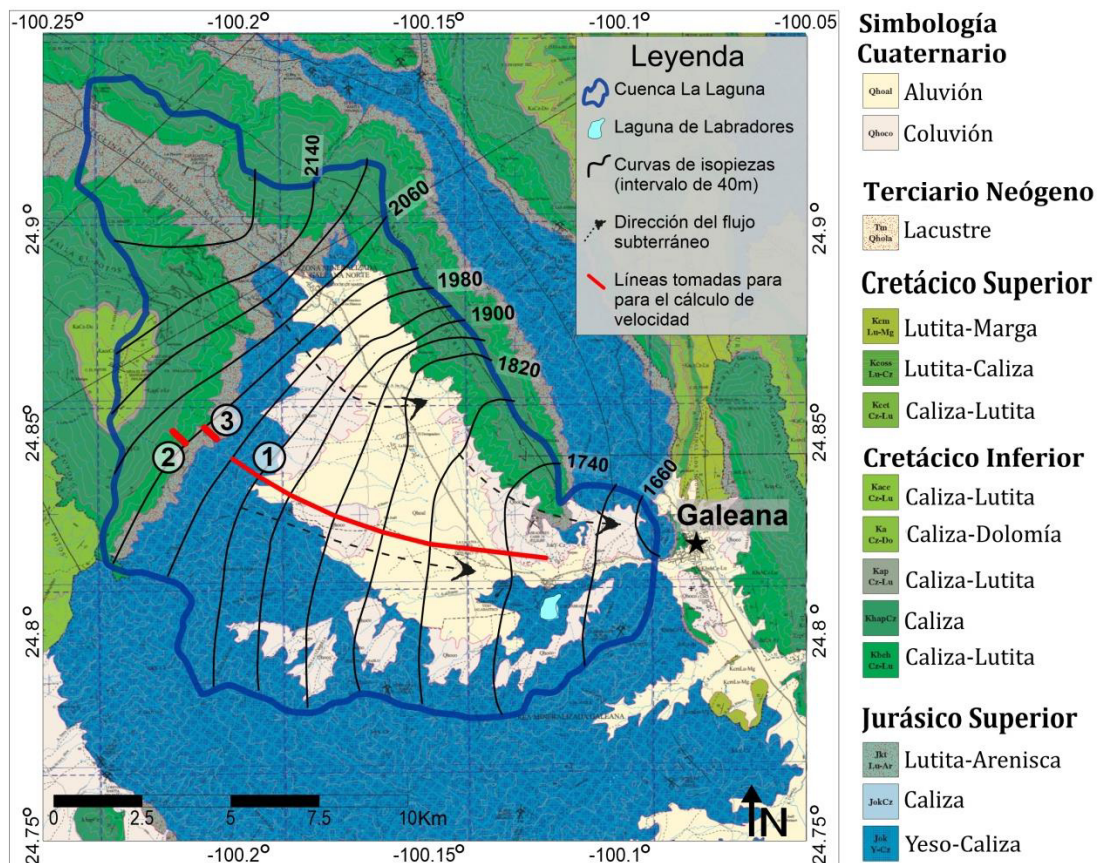


Figura 71. Carta piezométrica con geología. Se muestra la ubicación de las líneas a partir de las cuales se tomaron los gradientes y distancias para el cálculo de las velocidades de flujo; 1) Línea para el cálculo en el acuífero kárstico a través de Yeso-Caliza, 2) Línea para el cálculo en el acuífero de grietas a través de calizas-lutitas, 3) Línea para el cálculo en el acuitardo a través de lutitas-areniscas.

En el área de estudio se tienen funcionando como acuíferos kársticos las

formaciones geológicas Tamaulipas Superior, Tamaulipas Inferior y Minas Viejas; De acuerdo a las Tablas 6 y 7, debido a su alto grado de karstificación se usan los valores de porosidad efectiva $\eta_e = 40\%$ para una caliza fracturada, y valor de conductividad hidráulica K de 10^{-1} m/s para cavidades y nivel de fracturación alta.

De la carta piezométrica se eligió una línea que cruza por el acuífero kárstico a través de Yeso-Caliza (Figura 72) donde el gradiente de la carga hidráulica dh es de 280m y la distancia horizontal L entre los puntos es de 10 Km

Así aplicando la ecuación (14) para velocidad lineal promedio

$$V_L = \frac{0.1 \text{ m/s} \left(\frac{280\text{m}}{10,000\text{m}} \right)}{0.4} = 0.007 \text{ m/s}$$
$$0.007 \text{ m/s} \times 3600\text{s} = 25.2 \text{ m/h}$$
$$25.2 \text{ m/h} \times 24\text{h} = \mathbf{604.8 \text{ m/día}}$$

De este cálculo resulta un valor de 604.8 m/día o 25.2 m/h lo que es un valor muy alto de velocidad de flujo pero sí concuerda con el tipo de acuífero que es kárstico. Para este cálculo se tomaron en cuenta los valores máximos de conductividad hidráulica y de porosidad efectiva.

A partir de la velocidad calculada se puede determinar el tiempo de tránsito con la ecuación (15).

Para K de 10^{-1} m/s y η_e de 40%, en un trayecto de 10 Km. el tiempo es de:

$$t = \frac{10,000\text{m}}{604.8 \text{ m/día}} = \mathbf{16.5 \text{ días}}$$

Con lo que se obtiene un tiempo de tránsito de 16.5 días en recorrer un trayecto de 10Km, por ejemplo en la Formación Minas Viejas, en la cuenca de estudio.

Velocidad del agua en el acuífero de grietas

El mismo cálculo se realiza para obtener la velocidad lineal promedio de flujo en un

acuífero de grietas; En el área de estudio se tienen actuando como acuífero de grietas a las Formaciones Taraises y Zuloaga. En este caso se usan valores de porosidad efectiva η_e de 20% tomando en cuenta que dichas Formaciones se componen de calizas fracturadas con valor η_e de 5 a 40% y a su vez también presentan margas las cuales tienen lutitas con η_e de 0.5 a 5%, por lo que se optó por tomar el valor promedio entre el porcentaje más bajo y el más alto de las dos litologías. La conductividad hidráulica, de acuerdo a la tabla de Isherwood (1979) se observa que las calizas pueden estar en cualquier rango de conductividad hidráulica dependiendo de su nivel de fracturamiento, y si sabemos que Taraises se encuentra fracturado pero no karstificado, entonces se tomó un valor medio de K de 10^{-4} m/s.

El trayecto tomado para el cálculo (Figura 72) tiene una distancia L de 500m y un dh de 20m según lo que aparece aflorando como Calizas-Lutitas en el Cerro El Potosí, de la ecuación (14) de la Velocidad lineal promedio del flujo se obtiene:

$$V_L = \frac{10^{-4} \text{ m/s} \left(\frac{20\text{m}}{500\text{m}} \right)}{0.2} = 0.00002 \text{ m/s}$$

$$0.00002 \text{ m/s} \times 3600\text{s} = 0.072 \text{ m/h}$$

$$0.072 \text{ m/h} \times 24\text{h} = \mathbf{1.7 \text{ m/día}}$$

A partir de la velocidad calculada, se determina el tiempo de tránsito en este acuífero de grietas, tomando en cuenta a la Formación Taraises la cual se ha cartografiado con un espesor de 200m (a pesar de que en el mapa geológico ésta aflore con un espesor aparente de 500m debido a la inclinación del estrato y la forma de erosión) de la ecuación (15) se obtiene:

$$t = \frac{200\text{m}}{1.7 \text{ m/día}} = \mathbf{117.6 \text{ días}} = 3.9 \text{ meses}$$

Obteniendo un tiempo de tránsito de 117.6 días a través del acuífero de grietas de la Formación Taraises.

Velocidad del agua en el Acuitardo

Se presentan con características de acuitardo, las Formaciones La Casita y La Peña, las cuales se componen de lutitas en mayor cantidad, por lo que se decidió tomar valores de η_e de 5% ya que se presentan las lutitas un tanto fracturadas, y el valor máximo de conductividad hidráulica de las lutitas por el mismo motivo $K=10^{-5}$ m/s.

El trayecto tomado de la carta piezométrica para este cálculo (Figura 72) recorre el afloramiento de Lutitas-areniscas en el Cerro El Potosí con una distancia L de 500m y un dh de 20m, aplicando la ecuación (14) se obtiene:

$$V_L = \frac{10^{-5} \text{ m/s} \left(\frac{20\text{m}}{500\text{m}} \right)}{0.05} = 8 \times 10^{-6} \text{ m/s}$$

$$8 \times 10^{-6} \text{ m/s} \times 3600\text{s} = 0.028 \text{ m/h}$$

$$0.028 \text{ m/h} \times 24\text{h} = \mathbf{0.67 \text{ m/día}}$$

A partir de la velocidad calculada, se determina el tiempo de tránsito en un acuitardo, tomando en cuenta a la Formación La Casita la cual se ha cartografiado con un espesor aparente de 300m (a pesar de que aflore con un espesor de 500m como en el caso de Taraises, por el mismo motivo), aplicando la ecuación (15) se obtiene:

$$t = \frac{300\text{m}}{0.67 \text{ m/día}} = \mathbf{447.7 \text{ días}} = 14.9 \text{ meses}$$

Obteniendo un tiempo de tránsito de 447.7 días a través del acuitardo de la Formación La Casita.

De acuerdo a los resultados de velocidades de flujo y tiempo de tránsito se puede hacer una estimación muy general del tiempo que tarda en llegar el agua desde su recarga en los parteaguas hasta su descarga en la Laguna de Labradores. Hay que recalcar que esta estimación es muy generalizada ya que no se están tomando en cuenta factores como el ángulo de inclinación de los flujos en su descenso de los parteaguas y en su ascenso para su descarga, así como la gravedad la cual debe influir en la velocidad de los

flujos inclinados o verticales.

A partir de una línea de referencia que cruce casi toda la cuenca, tomando en cuenta como zona de recarga un punto en la Formación Tamaulipas Superior en el Cerro El Potosí, cruzando todas las formaciones geológicas a través del mismo cerro hasta llegar a la planicie conformada por la Formación Minas Viejas, y si se toma como punto de descarga la Laguna de Labradores, de acuerdo a las direcciones obtenidas en la carta piezométrica, tendríamos así una trayectoria para medir el tiempo que tarda aproximadamente en fluir el agua subterránea en la cuenca de estudio:

Si se reporta a Tamaulipas Superior con un espesor de 190 m, La Peña 30 m, Tamaulipas Inferior 550 m, Taraises 200 m, La Casita 300 m, Zuloaga 100 m y Minas Viejas 100 m (debido a que el agua viaja horizontalmente en la planicie, para Minas Viejas no se toma el espesor de la Formación Geológica, si no la distancia horizontal que recorre el agua desde la formación Zuloaga hasta la Laguna de Labradores la cual es de aproximadamente 10,000 m).

Aplicando la ecuación (14) a cada formación geológica de acuerdo a su tipo de acuífero se obtienen los datos plasmados en la Tabla (8).

En total se obtuvo un tiempo de tránsito de 627.8 días lo que corresponde a 20.9 meses en que el agua subterránea recorre la cuenca desde un punto de recarga en el Cerro El Potosí hasta la Laguna de Labradores.

A este resultado faltaría incluir el tiempo que se tarda el agua subterránea en atravesar las fallas y fracturas del área o en desviar su dirección de flujo de acuerdo a dichas barreras hidrogeológicas. Este valor no pudo ser calculado debido a la complejidad que esto representa, el cual debería ser tratado como un estudio aparte, ya que se deben tomar en cuenta factores como el grado de solubilidad del material, las condiciones de temperatura y presión del área, el contenido químico del agua que atraviesa el material y con todo esto en conjunto la velocidad de disolución de una fractura rellena de yeso o

calcita, además, medir el grosor del relleno, y debido a que es un karst muy viejo, determinar si dicho material ya ha sido disuelto con anterioridad o aún existe material suficiente que constituya una barrera hidrogeológica.

Tabla 8. Velocidad de flujo y tiempo en que el agua atraviesa las formaciones geológicas del área de estudio.

Formación Geológica	Tipo de Acuífero	Distancia recorrida [m]	Velocidad de flujo [m/día]	Tiempo de tránsito [días]
Tamaulipas superior	Kárstico	190	604.8	0.3
La Peña	Acuitardo	30	0.67	44.7
Tamaulipas Inferior	Kárstico	550	604.8	0.9
Taraises	De grietas	200	1.7	117.6
La Casita	Acuitardo	300	0.67	447.7
Zuloaga	Kárstico	100	604.8	0.1
Minas Viejas	Kárstico	10,000	604.8	16.5
Tiempo Total				627.8

Un factor importante sobre la disolución del material de relleno de las fallas y fracturas, es que, el yeso y el carbonato de calcio se pueden disolver de forma reversible, es decir que si el agua se retira de este sistema, mediante evaporación, el yeso o el carbonato de calcio precipitan exactamente de la misma forma química en la que previamente se disolvieron como sólidos (Mancebo-Piqueras, 2008). Entonces aunque el material ya hubiera sido disuelto con anterioridad en el área de estudio, es posible que se haya precipitado nuevamente, en épocas de evaporación alta y volvieran a formar la barrera. Por lo tanto sería necesario saber si se disolvió el relleno de la falla o fractura, si se precipitó nuevamente, y qué espesor tiene o qué porcentaje se volvió a formar. Por lo que, como se mencionó, debe ser tratado en otro estudio más especializado.

6.3.4. Carácter transitorio de la recarga del acuífero

Es de gran importancia conocer si el aumento del nivel freático de la Laguna de Labradores tiene relación directa con las precipitaciones y calcular el tiempo que tarda en manifestarse tal efecto; para esto se realizó una evaluación de los datos climáticos para conocer las temporadas de lluvias y la cantidad de lluvias registradas en el área de estudio, y los datos hidrométricos de algunos pozos de Agua y Drenaje de Monterrey para ver su efecto directo de recarga en el nivel piezométrico del acuífero y con esto hacer una correlación de la información.

Los datos climáticos usados para este estudio, provienen de las estaciones climatológicas Galeana SMN (19073), Galeana DGE (19085), Pablillo (19091), Ejido 18 de Marzo (19148) y La Poza (19155), del Servicio Meteorológico Nacional, los registros corresponden a los años 1970 hasta 2012.

El aumento del nivel del agua de la Laguna de Labradores ocurrió a mediados del año 2012, lo que supone un aumento del nivel piezométrico de todo el acuífero. Durante la primera etapa del estudio, al entrevistar a algunos habitantes del poblado cercano con respecto al comportamiento de la laguna, se obtuvieron indicios sobre que este aumento es cíclico, ya que dichas personas afirman haber visto este suceso hasta tres veces en su vida, lo que vendría a ser un evento con período de retorno de 15 a 20 años aproximadamente; de ser cierto, y que tuviera relación con la precipitación, debe haber un evento de alta precipitación cada período mencionado.

El aumento del nivel del agua de la Laguna ocurrió después del Huracán Alex, sin embargo no fue inmediato, la elevación del nivel de la laguna fue varios meses después durante un período de sequía en todo el estado de Nuevo León. Es por esto que además de relacionar el aumento del nivel piezométrico con las precipitaciones, también se busca relacionar los eventos de intensas sequías como parte de las condiciones necesarias para que ocurriera el desborde de la Laguna de Labradores. Para revisar esta relación se

consultaron las sequías más intensas en el trabajo de Ortega-Gaucín, graficándolo con las lluvias para observar dicha relación (Figura 73).

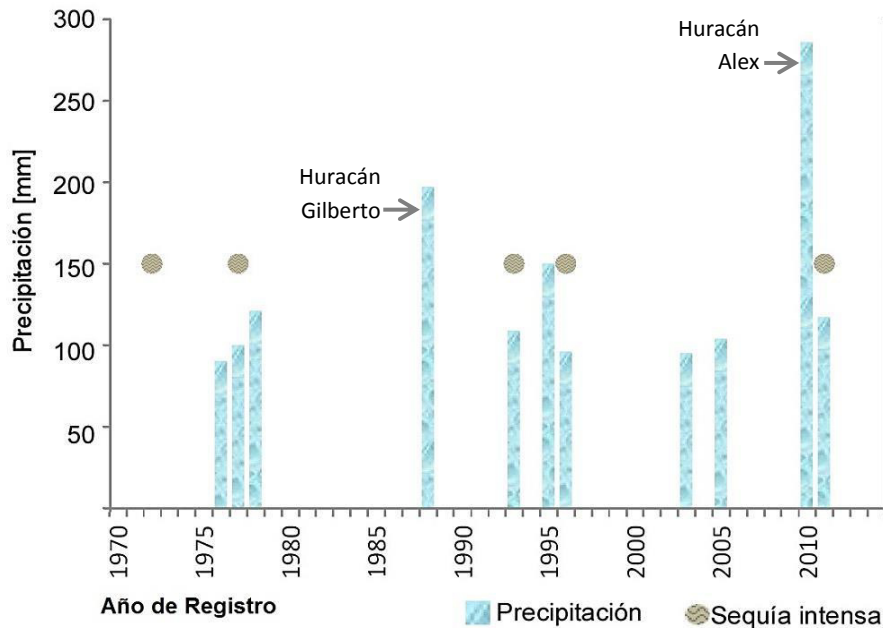


Figura 72. Registros de lluvias mayores a 90 mm/día. Sequías intensas de acuerdo al estudio de Ortega-Gaucín (2012) señaladas con un valor unitario representativo.

Con respecto a la influencia de las sequías en las oscilaciones de los niveles piezométricos, para este estudio se maneja que durante épocas secas los suelos podrían presentar una elevada tensión capilar del terreno no saturado, lo que al momento de las precipitaciones podría retrasar la infiltración y con esto, la recarga del acuífero: La compactación del suelo por el choque directo de las gotas de lluvia, causa disminución de la infiltración, los agregados de partículas son divididos por el agua que arrastra elementos más finos con mayor posibilidad de penetrar hacia el interior y bloquear poros y grietas impidiendo o retardando la infiltración y disminuye los posibles caminos de los flujos del agua subterránea. Así un suelo con excelente drenaje, puede tener una capacidad de infiltración baja debido a este sellado de la superficie y capas superiores

(Custodio y Llamas, 2001).

En base a lo dicho, en el registro de lluvias y sequías (Figura 73) se observan tres períodos que conjugan lluvias fuertes y continuas, con sequías intensas, correspondiendo a los años de 1977, 1995 y 2010, fechas que podrían equivaler a los períodos en los que la Laguna de Labradores se ha desbordado desde los años 70's, de ser cierta la hipótesis de que el fenómeno es cíclico.

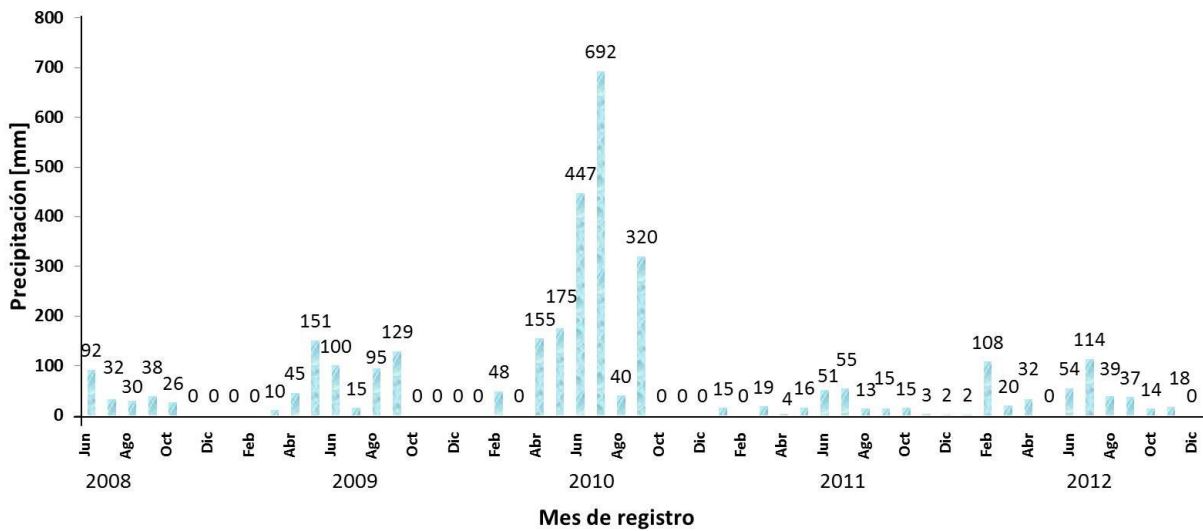


Figura 73. Precipitación acumulada mensual, registrado por la estación climatológica Ejido 18 de Marzo (19148) durante Junio de 2008 hasta Diciembre de 2012.

Sin lugar a dudas la precipitación acumulada durante los meses de Junio y Julio, que son en gran parte provenientes del Huracán Alex, son las lluvias más fuertes en la zona, comparadas con todo el registro desde 1970, indicando una cantidad extraordinaria de lluvia, lo que podría ser la causa del aumento del nivel piezométrico tanto del acuífero como de la Laguna de Labradores, por la gran cantidad de agua introducida al acuífero; sin embargo la fecha del desborde es hasta dos años después (no se sabe con exactitud en qué mes empezó a crecer la laguna), por lo que es necesario investigar con cuánto retraso se recarga el acuífero en la zona de interés.

Las variaciones estacionales quedan amortiguadas en profundidad, y cuanto más profundo es el nivel freático con tanto más retraso se produce el efecto de recarga. Lo

cual es posible observar en la comparación de dos hidrogramas de pozos del área de estudio. Para hacer la comparación de hidrogramas y observar la diferencia en el comportamiento en diferentes puntos del acuífero, se tomaron datos proporcionados por la empresa Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey, los cuales consisten en el nivel piezométrico de dos pozos ubicados en la parte central de la cuenca, desde Julio de 2010 hasta Julio de 2011, a manera de promedio mensual.

A partir de la comparación de los hidrogramas de dos pozos en la cuenca de estudio (Figura 75), son de notarse las siguientes observaciones:

1. El nivel piezométrico del pozo Buenavista se encuentra casi 20 metros por debajo del nivel piezométrico del pozo La Habana, por lo que se sigue manejando que en la zona donde se ubica el pozo Buenavista hay un escalón del acuífero (como se observó en la carta piezométrica) debido a alguna falla estructural, o alguna heterogeneidad muy alta en la permeabilidad de las rocas del acuífero.

2. Luego de las lluvias de Julio de 2010 (Huracán Alex), se observa la recarga inmediata en el pozo La Habana, con un aumento de 4 metros del nivel piezométrico entre Julio y Octubre, luego un período de recesión entre Octubre y Noviembre, seguido de un período de estabilidad de un mes, luego otra recarga de 2 metros entre Diciembre y Enero, seguido de un período de estabilidad hasta que termina el registro en Julio de 2011.

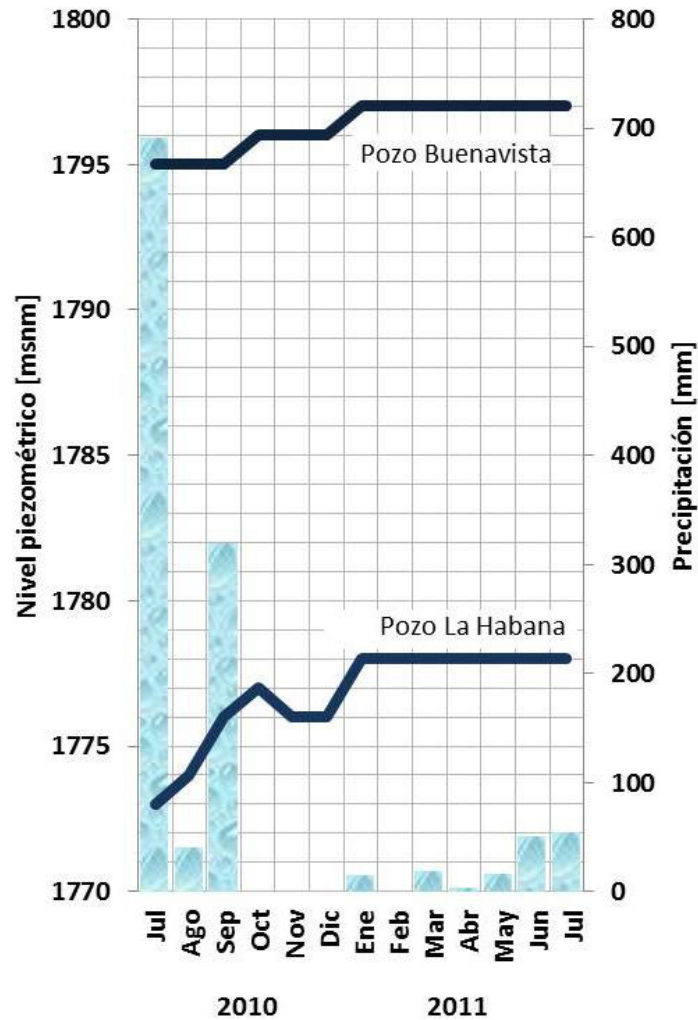


Figura 74. Comparación de hidrogramas de dos pozos de la Cuenca La Laguna y la precipitación acumulada mensual registrada en la estación climatológica Ejido 18 de Marzo (19148), durante el período Julio 2010 – Julio 2011.

3. Para el pozo Buenavista se observa la recarga de las lluvias de Julio (correspondientes al Huracán Alex) hasta el mes de Septiembre de 2010, aumentando un metro en dos meses, luego se quedó estable hasta la siguiente recarga en el mes de Diciembre con un aumento de un metro en dos meses, terminando el registro con un período de estabilidad desde Enero hasta Julio de 2011.

4. Es de notarse la diferencia en la recarga entre los dos pozos descritos; a diferencia

del pozo La Habana, el pozo Buenavista no se recarga inmediatamente, tuvo un retardo de dos meses, esto puede indicar que para el pozo La Habana hay un conducto formado de la unión de varias fracturas y cavidades, que conduce hacia esa zona, haciendo que se recargue más rápidamente a comparación del pozo Buenavista en el cual el medio pudiese ser menos heterogéneo.

5. Está reportado que para Diciembre de 2010 se registró un aumento en el nivel del agua de la Laguna (Figura 76) lo cual, al observar el comportamiento de la recarga de los pozos, se puede afirmar que es producto de las lluvias de Julio de 2010, por lo que el aumento del agua producido en 2012 no sería la recarga directa de dicha temporada de lluvias. Por lo que este aumento podría deberse entonces a la recarga en sitios más lejanos.



Figura 75. Comparación del nivel del agua de la Laguna de Labradores, teniendo como referencia las estructuras señaladas con flechas. Arriba) Autor: Trotasitios, fecha: 09-12-09; Abajo) Autor: Abernal, fecha: 15-12-10. Tomadas del blog Panoramio de Google.

Dentro de las descripciones del hidrograma de los pozos mencionados, se habla de que el aumento del nivel piezométrico es inmediato o hasta dos meses después de la recarga en el acuífero por las precipitaciones de Julio de 2010, sin embargo se trata también la posibilidad de que, viendo un registro más extenso (Figura 77) la recarga sea

hasta 21 meses después de la precipitación, sugiriendo que la curva de aumento es la que se observa en el mes de Abril de 2012, al ser la mayor recarga en el registro, y si la curva anterior de subida fuera provocada por las lluvias de Marzo-Septiembre de 2009. De ser esto cierto estaríamos hablando de recarga retardada para este acuífero, y de ser así, tomando en cuenta que estamos viendo el hidrograma de un pozo que se encuentra más o menos en la parte central de la cuenca, podría ser cierta la hipótesis que dice que el nivel del agua de la Laguna de Labradores aumentó a causa de las precipitaciones causadas por el Huracán Alex, ya que se pudo haber tardado en llegar al agua un par de meses más de lo que se tardó en llegar al pozo Buenavista.

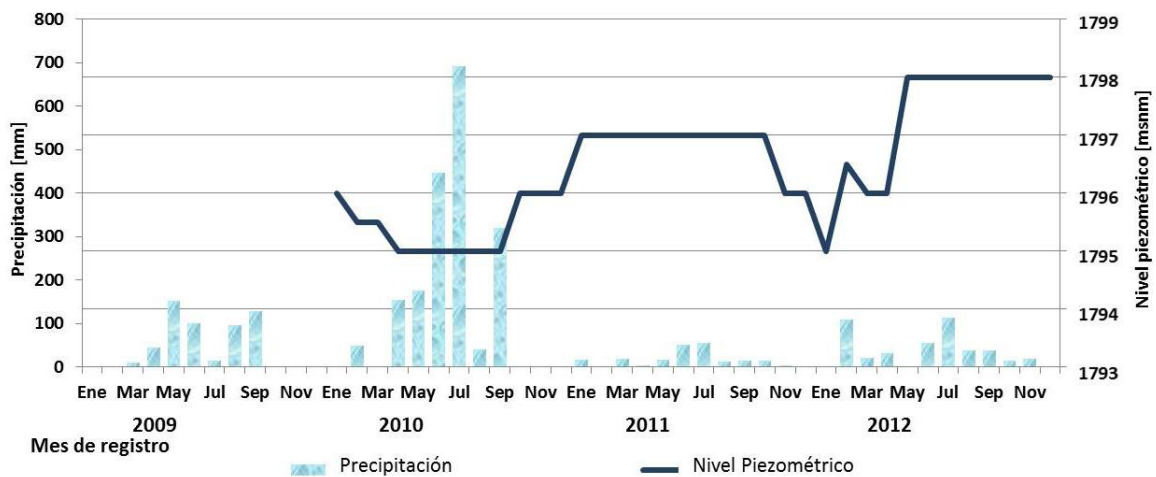


Figura 76. Registro extendido de precipitaciones y del nivel piezométrico del pozo Buenavista, desde Enero de 2009, hasta Diciembre de 2012.

Entonces, se tienen dos posibilidades de acuerdo a los gráficos comparativos de precipitación y nivel piezométrico: (Hablando del pozo Buenavista) por una parte, que la recarga haya sido dos meses después del evento de precipitación, o por otra parte, que la recarga haya sido 21 meses después; sin embargo la primera opción parece menos viable ya que si la recarga fuera dos meses después, la recarga observable en Abril de 2012 no tendría un evento de precipitación el cual pudiera causar dicha recarga, ya que, como se observa en la gráfica (Figura 77) no hay lluvias significativas en esas fechas. Este dato se va a comparar más adelante con los resultados del cálculo de velocidad de flujo.

6.4. Resultados del análisis del nivel piezométrico, sus oscilaciones y causas

De acuerdo a la carta piezométrica, la dirección principal del flujo corre en sentido NW-SE, siendo las zonas de recarga, El Cerro del Potosí, y la Sierra de Viborillas; la zona de descarga se encuentra en la parte Sureste de la cuenca, en la Laguna de Labradores como surgencia, y el flujo continúa hacia el Este desembocando en la cuenca vecina “La Vertiente de Galeana”.

La velocidad lineal promedio de flujo fue obtenida para cada uno de los tipos de acuífero presentes en el área obteniendo los siguientes resultados:

- Acuífero kárstico, $V= 604.8$ m/día
- Acuífero de grietas, $V= 1.7$ m/día
- Acuitardo, $V= 0.67$ m/día

Con las velocidades calculadas, se determinó el tiempo de tránsito del agua a través de una línea de referencia imaginaria, en cada una de las Formaciones geológicas de acuerdo al tipo de acuífero y el espesor de la formación:

- Tamaulipas superior, $t= 0.3$ días
- La Peña, $t= 44.7$ días
- Tamaulipas inferior, $t= 0.9$ días
- Taraises, $t=117.6$ días
- La Casita, $t= 447.7$ días
- Zuloaga, $t= 0.1$ días
- Minas Viejas, $t= 16.5$ días

Teniendo 627.8 días, o 20.9 meses como tiempo de tránsito total estimado, del flujo de agua subterránea en la Cuenca La Laguna, sin tomar en cuenta el retraso que pueda ocurrir por la incidencia de los flujos con fracturas o fallas perpendiculares a su

dirección, o la desviación que estas puedan causar.

En el registro climático se observa que las lluvias de Julio de 2010 (Huracán Alex) son las más altas en todo el registro (1979-2013); a su vez, también se registró una de las sequías más intensas desde 1995. Estos dos factores influyeron en la recarga del acuífero, la cual es observable en la comparación de dos hidrogramas de pozos con la precipitación, ya que se observa que a partir de Julio de 2010, el nivel piezométrico empezó a aumentar inmediatamente hasta 4 metros en el Pozo La Habana, seguido de un período de recesión, hasta Diciembre del mismo año en que volvió a aumentar 2 metros el nivel piezométrico, y luego en Mayo de 2012 dos metros más (Pozo Buenavista). En la misma comparación de los hidrogramas se pueden notar algunas diferencias en la velocidad de recarga lo que se adjudica a la ubicación de ciertos conductos kársticos los cuales pueden hacer que viaje más rápido el agua en ciertas partes de la cuenca que en otras, por ejemplo, en el Pozo La Habana la recarga se hace con mayor rapidez que en el Pozo Buenavista.

Es muy probable, que el aumento del nivel piezométrico en Diciembre de 2010, observado en los hidrogramas, se deba a la recarga que proviene de la Sierra de Viborillas ya que se encuentra a menor altitud y con esto recorre la cuenca en menor tiempo, y que el aumento del nivel piezométrico de Abril-Mayo de 2012 sea el aumento correspondiente al flujo proveniente de la recarga en el Cerro del Potosí, 21 meses después del Huracán Alex.

Capítulo 7. Discusión

El motivo de este trabajo fue conocer el motivo del aumento acelerado del nivel del agua de la Laguna de Labradores en el municipio de Galeana, Nuevo León; el desborde de la laguna afectó las casas de los alrededores, bloqueó caminos, inundó el centro recreativo y además afectó algunos cultivos en dirección aguas-abajo. La finalidad del estudio era principalmente conocer de dónde provenía tal cantidad de agua, y determinar porqué aumentó tan rápido, siendo que el municipio estaba terminando una época de intensa sequía donde no hubo precipitaciones importantes sino hasta 2 años antes del suceso del desborde.

La hipótesis del trabajo va relacionada con fenómenos climáticos de gran dimensión, hablando explícitamente del Huracán Alex, que aunque se presentó 24 meses antes del desborde, el tiempo de tránsito desde la recarga hasta la descarga pudiera ser de tal cantidad de tiempo. Sin embargo se tenía en duda que estando en un medio kárstico el agua se tardara más de un año en recorrer la cuenca y descargar en la laguna, entonces fue que se pensó que la cuenca podría ser más grande de manera subterránea, de lo que es en sus límites superficiales.

La hipótesis también habla sobre el tiempo que puede tardar el agua subterránea en recorrer la cuenca, debido a las barreras hidrogeológicas presentes en el área. Para caracterizar el medio geológico de manera más detallada, saber qué tipos de barreras hidrogeológicas hay, y determinar si la cuenca es más grande de manera subterránea que superficialmente, se hizo una descripción litológica estructural a partir de los resultados de mapeos geológicos e hidrogeológicos de otros autores, dentro y fuera de la cuenca de estudio (Sección 4.2 y 4.3).

De la descripción litológica-estructural, se pudo determinar que la cuenca no es más amplia de manera subterránea, es decir que no hay aportaciones hídricas de fuera de la cuenca y los límites superficiales son los límites subterráneos también; esto nos dice

que toda la cantidad de agua que aumentó en la Laguna de Labradores en 2012 (824,670m³ aproximadamente) sí proviene de la misma cuenca hidrogeológica La Laguna.

También, de la descripción litológica-estructural se encontraron como las barreras hidrogeológicas más importantes, las litologías casi impermeables en las Formaciones La Casita y La Peña, las cuales representan las mayores fuentes de retardo de los flujos de agua subterránea, al comportarse como acuitardos.

Sobre la aplicación del método geoelectrico de la Sección 5.2, se pudieron caracterizar tres puntos de la cuenca para reconocer litologías y estratificación, así como su comportamiento hidrogeológico. Son notables los resultados de la Línea L1 Minas Viejas, de la cual se obtuvo un perfil con distintos tipos de yesos, además de comprobar la existencia de roca anhidrita en esta zona, pudiendo clasificar este miembro de la Formación Minas Viejas como la Secuencia sulfática Inferior (Sección 3.2.2), este miembro tiene 100 metros de espesor de yesos y anhidritas, por lo que se puede deducir que por debajo de la zona donde se encuentra la Laguna de Labradores y el Pozo del Gavilán, sólo debe haber aproximadamente 100 metros del acuífero kárstico y por debajo de esto se debe encontrar la base del acuífero, esto quiere decir que la Laguna con sus 73 metros de profundidad (ver Apéndice 1) casi llega a la base del acuífero. Además en la Línea L1 Minas Viejas se esperaba encontrar el conducto que une al Pozo del Gavilán, el Pozo del Álamo y la Laguna de Labradores, sin embargo este debe encontrarse a aproximadamente 60-70 metros de profundidad y el arreglo geoelectrico de la Tomografía eléctrica de resistividad sólo permitió alcanzar 50 metros.

En la Sección 6.3.3 se calculó la Velocidad de los flujos subterráneos a partir de la carta piezométrica elaborada (Sección 6.3.2) y de la descripción litológica del área (Sección 4.2.) obteniendo que para la parte kárstica del acuífero, el agua puede viajar a 604.8 metros en un día, justo como se esperaba encontrar, la velocidad en un medio kárstico es muy rápida a través de los conductos y cavidades de disolución. También se tienen actuando litologías como acuíferos de grietas con velocidades de 1.7 metros en un

día y los acuitardos de las Formaciones La Casita y La Peña las cuales se consideran las barreras hidrogeológicas más importantes del área, como ya se mencionó en el párrafo anterior, esto se confirmó con el cálculo de velocidad el cual dio como resultado una Velocidad de 67 centímetros al día a través de dichas Formaciones. Sobre esto es importante decir que el agua cuando llega a una barrera hidrogeológica, puede desviar su dirección a través del plano de la barrera, o bien, puede atravesarla (como se vio en la Sección 4.1.1), entonces en el área de estudio, el agua subterránea al incidir con los acuitardos, se desvía y puede formar manantiales, pero también atraviesa el acuitardo muy lentamente; esto fue comprobado con las mediciones de geoeléctrica de la Sección 6.2.

A partir del cálculo de las velocidades, se hizo una sumatoria de acuerdo a las Formaciones geológicas que atraviesa el agua subterránea en la cuenca, y su comportamiento hidrogeológico, para tener un tiempo de tránsito promedio y determinar cuánto tiempo tarda en viajar el agua desde que se recarga en los cerros, hasta que se descarga en la Laguna de Labradores. Se obtuvo una suma de 624.6 días, o bien 20.8 meses. Este dato fue comparado con los resultados de la Evaluación de la recarga de la Sección 6.3.4 en donde, con los hidrogramas y los datos de precipitación se pudo observar que la recarga fue 22 meses después del Huracán Alex. En las curvas de los hidrogramas se puede notar otro evento de recarga en el mes de Diciembre de 2010, dos meses después del Huracán Alex, es posible que este evento se deba a la recarga proveniente de la Sierra de Viborillas ya que esta zona se encuentra más cercana y con menor altitud, lo que produce un tiempo más corto de tránsito a comparación con el tiempo que se tarda el agua en fluir desde el Cerro del Potosí. En total se registró un aumento del nivel piezométrico de 3 metros en el Pozo Buenavista, desde Julio de 2010 (Huracán Alex) hasta Mayo de 2012, este valor es el mismo para el aumento registrado en el nivel del agua de la Laguna de Labradores.

En cuanto a las fallas y fracturas rellenas de yeso y calcita, también son barreras hidrogeológicas, sin embargo no fueron tomadas en cuenta para el cálculo del tiempo de

tránsito en la cuenca, ya que se cree que estas debieron haberse disuelto por karstificación, debido a que la edad de este karst es desde el Mioceno (13 Ma) y Pleistoceno (2Ma) según los dos ciclos de karstificación en el área (Sección 1.6). Sin embargo en la Sección 6.3.3 se habló sobre la reconsolidación del yeso y el carbonato de calcio por su proceso reversible de disolución en ambientes secos con alta evaporación, esto podría llegar a ser muy importante ya que, como se habló en la Sección 6.3.4, en el área de estudio se presentó una intensa sequía durante el año 2011, misma que pudo haber ocasionado ese ambiente ideal para la reconsolidación del material de relleno de las fallas, volviendo a reconstituir lo que sería la barrera hidrogeológica y retardando más el flujo del agua subterránea por su incidencia directa con dichas fallas y fracturas. Esto ya no pudo estudiarse a detalle en este trabajo, debido a la complejidad que representa, ya que tendrían que estudiarse muchos otros factores de solubilidad, química del agua, y de las rocas, etc. sin embargo se presenta como otra posible causa del retardo del flujo de las aguas subterráneas en la cuenca La Laguna.

Capítulo 8. Conclusiones y Recomendaciones

Como se mencionó al inicio del presente trabajo, el estudio del agua es complejo y cada acuífero kárstico es diferente y tiene sus propias características; en este estudio se empezó hablando de un acuífero kárstico en el cual la surgencia principal, La Laguna de Labradores, había tenido un aumento anormal de su nivel piezométrico, en una época de intensa sequía, sin embargo la clave del entendimiento de este problema no se encontraba en el acuífero kárstico si no en un acuitardo presente en la cuenca, cercano a la zona de recarga. Se obtuvo que los flujos del agua subterránea que atraviesan este acuitardo, al contener litologías casi impermeables, tienden a desviar las trayectorias del agua, y además, como no existe la impermeabilidad absoluta, los flujos logran atravesar el acuitardo a una velocidad 1000 veces menor a la velocidad a la que transita por un acuífero kárstico. Este factor, conjugado con la presencia del Huracán Alex, el cual ha tenido la mayor cantidad de agua precipitada en todo el registro (1970-2013) de precipitaciones en Galeana, hizo que al infiltrarse el agua y recorrer la cuenca, se tardara hasta 22 meses en observarse el aumento de tal cantidad de agua en la Laguna de Labradores.

Se determinó otro factor importante que puede retardar el tránsito del agua en la cuenca de estudio, la posible reconsolidación del mineral yeso y calcita en épocas secas. Este factor no pudo ser estudiado por completo por lo que se recomienda hacer estudios de solubilidad e hidrogeoquímica para conocer el grado de disolución tanto de los yesos de la Formación Minas Viejas, como de los yesos y calcita de las fallas y fracturas, así como estudiar la posible reconsolidación de estos minerales y la reconstitución de barreras hidrogeológicas.

Es de recalcar la posibilidad de un período de retorno de la oscilación en el nivel de la laguna, de acuerdo al registro climatológico, de sequías, y a los comentarios de los habitantes del lugar, este aumento del nivel freático ocurre cada 15-20 años. Por lo que es

de gran importancia este dato para las autoridades municipales, ya que luego de 15 años podría esperarse nuevamente este aumento y podrían prevenirse cualquier tipo de daños en la zona.

Como recomendación para tener una mayor precisión en los datos en cuanto a velocidades de flujo del agua subterránea, se sugiere realizar ensayos de trazadores dentro de la cuenca, en distintas zonas para describir la anisotropía de las velocidades en el acuífero kárstico. Además se recomienda hacer análisis isotópicos para conocer con exactitud la procedencia del agua subterránea, es decir las zonas de recarga que alimentan el acuífero, y la edad de las aguas subterráneas.

Se recomienda también hacer un estudio sobre la subsidencia de la dolina que contiene la Laguna de Labradores, ya que con los datos de altitud obtenidos en campo y los datos de la literatura, es notable la variación en el nivel del suelo, así como la profundidad de la laguna, esto es indicador de subsidencia activa (aunque de manera muy lenta como ocurre en casi todos los procesos geológicos). Su estudio puede prevenir afectaciones a los poblados cercanos, en el futuro.

Bibliografía

- AGUILAR-PÉREZ, J.** (2002). *Rudistas Caprínidos en el Cerro de Labradores, Galeana, Nuevo León, México*. Tesis de Maestría, UANL, Facultad de Ciencias de la Tierra, Linares, N. L. México; 75 p.
- ALEJANDRO-TORRES, F.** (2010). *Análisis estructural de las rocas del Triásico en el Distrito Minero de Galeana, Nuevo León*. Tesis de Licenciatura, UANL, Facultad de Ciencias de la Tierra, Linares, N. L. México; 130 p.
- BACALOWICZ, M.** (2005). *Karst groundwater: A challenge for new resources*. Hydrogeology Journal, Springer; v. 13, pp. 148-160.
- BAIR, S. y LAHM, T.** (2006). *Practical Problems in Groundwater Hydrology*. Prentice Hall, Pearson Education. New Jersey, USA; 167 p.
- BARRERA-NAVARRO, R.** (1991). *Mapeo geológico en el área de las lajas negras al norte de Galeana, Nuevo León, y el desarrollo facial de la Formación Minas Viejas*. Tesis de Licenciatura, UANL, Facultad de Ciencias de la Tierra, Linares, N.L. México; 83 p.
- BÖGLI, A.** (1980). *Karst hydrology and physical speleology*. Springer Verlag. Heidelberg, Germany; 284 p.
- BONELL, M.** (1969). *L'effect barométrique dans les puits en relation avec le coefficient d'emmagas, nement et l'étanchéité du toit des nappes captives*. Bulletin du Bureau de Techerches Géologiques et Minières Section III. Hydrogéologie; v. 2, pp. 57-76.
- BUTLER, D.K.** (2005). *Near Surface Geophysics*. Society of Exploration Geophysicists. Tulsa OK., USA; 1st ed. 732 pp.
- CHAPA-GUERRERO, J.R., MEIBURG, P., SCHETELIG, K.** (1994). *Riesgos geológicos en la Sierra Madre Oriental (Estado de Nuevo León), México*. Zentralblatt für Geologie und Paläontologie, Teil I, Stuttgart, Deutschland; pp. 555-566.
- CHAPMAN, R.E.** (1981). *Geology and Water: An introduction to fluid mechanics for geologists*. Martinus Nijhoff / Dr. W. Junk Publishers, The Hague, Holland; 1st ed. 228 p.

- CHAVARRÍA-IGLESIAS, J.M.** (1998). *Estudios geológicos, hidrogeoquímicos e hidrogeológicos en la Sierra de Viborillas, Galeana, Nuevo León*. Tesis de Licenciatura, UANL, Facultad de Ciencias de la Tierra, Linares, N. L. México; 118 p.
- CHÁVEZ-HERNÁNDEZ, G.** (2011). *Modelación 3D de datos de tomografía de resistividad eléctrica (TRE) con arreglo tipo "L"*. Tesis de Maestría, Universidad Nacional Autónoma de México, D.F., México; 88 p.
- CHÁVEZ-SEGURA, R.** (2011). *Detección de zonas de riesgo (cavidades) a lo largo del colector de drenaje poniente de la Ciudad de Guatemala*. Informe final, Instituto de Geofísica, UNAM, D.F., México; 27 p.
- CONAGUA (COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA)** (2009). *Actualización de la disponibilidad media anual de agua subterránea. Acuífero (1914) Citrícola Sur, Estado de Nuevo León*. Diario Oficial de la Federación: 28 de Agosto de 2009; 21 p.
- CONEY, P.J.** (1983). *Un modelo tectónico de México y sus relaciones con América del Norte, América del Sur y el Caribe*. Revista del Instituto Mexicano del Petróleo, v. 15, núm. 1, pp. 6-15.
- CORREA-RUBIO, C.R.** (1998). *Estudios geológicos e hidrogeoquímicos en el área del Puente de Dios, Galeana, Nuevo León, México*. Tesis de Licenciatura, UANL, Facultad de Ciencias de la Tierra, Linares, N. L. México; 100 p.
- CRUZ-VÁZQUEZ, R.** (2012). *Análisis Bioestratigráfico con base en amonitas de una nueva sección de la formación Taraises (Cretácico Inferior) en el área de Galeana, Nuevo León, México*. Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de estudios superiores de Iztacalco. México. 62 p.
- CUSTODIO, E. y LLAMAS, M.R.** (1996). *Hidrología subterránea*. 2ª ed. Omega, Barcelona, España. Tomo I :1157 p. y Tomo II: 2350 p.
- DARCY, H.** (1856). *Les Fontaines Publiques de la Ville de Dijon*. Dalmont Paris, 647 p.
- DE LEÓN-GUTIÉRREZ, A.** (1991). *Mapeo geológico en el área de Galeana, Nuevo León y el desarrollo facial de la Formación Cupido*. Tesis de Licenciatura, UANL, Facultad de Ciencias de la Tierra, Linares, N.L. México. 122 p.
- DEMING D.** (2002). *Introduction to hydrogeology*. 1st ed. McGraw-Hill Company Inc. New

York, NY, USA; 468 p.

DROGUE, C. (1974). *Structure de certains aquifères karstiques d`après les résultats de travaux de forage*. CR Acad Sci Paris, serie III (278), pp. 2621-2624

EGUILUZ-DE ANTUÑANO, S., ARANDA-GARCÍA, M. y MARRETT, R. (2000). *Tectónica de la Sierra Madre Oriental, México*. Boletín de la sociedad geológica mexicana; v. LIII, pp. 1-26.

ERASO, A. (1986). *Método de predicción de las direcciones principales de drenaje en el karst*. Kobie, Madrid, España; v. 15, pp. 15-122.

FERNÁNDEZ, E., HERRERO, N., LARIO, J., ORTIZ, I., PEIRO, R. y ROSSI, C. (1995). *Introducción a la geología kárstica*. 1ª ed. Federación Española de Espeleología; 192 p.

FORD, D.C. & WILLIAMS, P.W. (2007). *Karst Geomorphology and Hydrology*. 2a ed. Chapman & Hall, Chichester, England; 576 p.

FREEZE, R.A. & CHERRY J.A. (1979). *Groundwater*. Prentice Hall, Nueva Jersey, USA; 604 p.

GARCÍA-MARÍN, J. H. (2012). *Control estructural de los depósitos de barita en el poblado de San Marcos dentro del Distrito Minero de Galeana, Nuevo León*. Tesis de Licenciatura, UANL, Facultad de Ciencias de la Tierra, Linares, NL, México; 103 p.

GRACIA-MARROQUÍN, D.A. (2009). *Análisis geométrico y cinemático de pliegues y fallas en el área del Cerro del Potosí, Galeana, NL*. Tesis de Licenciatura, UANL, Facultad de Ciencias de la Tierra, Linares, NL, México; 124 p.

GARZA-TÁMEZ, D. I. (2009). *Estudio hidrogeoquímico de las aguas subterráneas en el sur del estado de Nuevo León*. Tesis de Licenciatura, UANL, Facultad de Ciencias de la Tierra, Linares, NL, México; 164 p.

GASULLA M. (1999). *Obtención de imágenes de impedancia eléctrica del subsuelo. Aplicación a la detección de objetos locales*. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Catalunya, Departamento de Ingeniería Electrónica. España. Paginación multiple.

GOLDHAMMER, R.K. (1999). *Middle Jurassic-Upper Cretaceous paleogeographic evolution and sequence-stratigraphic framework of the northwest gulf of Mexico Rim*. American Association of Petroleum Geologists Memoir 75, pp. 45-81.

GOLF-RACHT, T.D. (1982). *Fundamentals of Fractured Reservoir Engineering*. 1ª ed. Elsevier Scientific Publishing Company, New York, USA; 732 p.

GONZÁLEZ- DE VALLEJO, L.I. (2004). *Ingeniería Geológica*. 1ª ed. Pearson Educación, Madrid, España; 715 p.

GÖTTE, M. (1988). *Estudio geológico-estructural de Galeana, Nuevo León (México) y sus alrededores*. Actas de la Facultad de Ciencias de la Tierra, UANL, v.3, pp. 61-87.

GÖTTE, M. & MICHALZIK, D. (1992). *Stratigraphic relations and facies sequences of an Upper Jurassic evaporitic ramp in the Sierra Madre Oriental (Mexico)*. Zentralblatt für Geologie und Paläontologie, Teil I, Stuttgart, Germany; pp. 1445-1466.

GRAY, G. & LAWTON, T. (2011). *New constraints on timing of Hidalgoan (Laramide) deformation in the Parras and La Popa basins. NE Mexico*. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana; v.63, núm. 2, pp. 333-343.

HUBBERT, M.K. (1940). *The theory of ground-water motion*. The Journal of Geology, v. 48, num. 8, Part 1, pp. 785-944.

HUÍZAR-ÁLVAREZ, R. y OROPEZA-OROZCO, O. (1989). *Geomorfología kárstica de la región de Galeana, estado de Nuevo León*. Revista del Instituto de Geología de la UNAM; V.8, núm. 1, pp. 71-83.

HUMPHREY, W.E. (1949). *Geology of Sierra de Los Muertos area, Mexico (with descriptions of Aptian cephalopods from the La Peña Formation)*. Geological Society of America, Bulletin, Tulsa, USA; v. 60, pp 89-176.

HUMPHREY, W.E. (1954). *Estudios estratigráficos de la Sierra de Cruillas, Tamaulipas y El Fraile, Nuevo León*. Informe inédito. NE-M-586. Petróleos Mexicanos.

IMLAY, R.W. (1938). *Studies of the mexican geosyncline*. Geological Society of America Bulletin; v.49, pp. 1651-1694.

IMLAY, R.W. (1937). *Geology of the middle part of the Sierra de Parras, Coahuila, México*. Geological Society of America Bulletin; v. 48, pp. 567-630.

INEGI (INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA, GEOGRAFÍA E INFORMÁTICA) (1986).

Síntesis Geográfica del Estado de Nuevo León. México; 170 p.

ISHERWOOD, D. (1979). *Geoscience data base handbook for modelling nuclear waste repository*, California, USA, v. 1; 327 pp.

KESLER, S.E., JONES, L.M. & RUIZ J. (1988). *Strontium and sulfur isotope geochemistry of the Gelana Barite District, Nuevo Leon, Mexico*. *Economic Geology*; v. 83, pp.1907-1917.

KROEGER, K.F. & STINNESBECK, W. (2003). *The minas Viejas formation (Oxfordian) in the area of Galeana northeastern Mexico: Significance of Syndepositional Volcanism and related barite genesis in the Sierra Madre Oriental*. *The Circum-Gulf of Mexico and the Caribbean: Hydrocarbon habitats, basin formation, and plate tectonics: American Association of Petroleum Geologists memoir*; v.79, pp. 515-528.

LARA-TRISTÁN, C. A. (1991). *Mapeo geológico en el área de San Lucas, al norte de Galeana, Nuevo León y desarrollo facial de la formación Taraises en la región de Galeana, Nuevo León*. Tesis de Licenciatura, UANL, Facultad de Ciencias de la Tierra, Linares, NL, México; 114 p.

LEDEZMA-ESTRADA, R.C. (2010). *Hidrogeología de la margen norte del Cerro El Potosí Galeana, Nuevo León, México*. Tesis de Licenciatura, UANL, Facultad de Ciencias de la Tierra, Linares, NL, México; 119 p.

LEHMANN, O. (1932). *Die Hydrographie des Karstes*. Leipzig, Franz Deuticke; 212 p.

LLOPIS-LLADÓ, N. (1970). *Fundamentos de Hidrogeología Cárstica (Introducción a la espeleología)*. 1ª ed. Blumé; Madrid, España; 269 p.

LÓPEZ-MEDINA, M.E. (2010). *Estudio mineralógico y geoquímico de la Formación La Casita en el área de Potrero Prieto, Galeana, NL, México*. Tesis de Licenciatura, UANL, Facultad de Ciencias de la Tierra, Linares, N. L. México; 103 p.

MANCEBO-PIQUERAS, J. A. (2008). *Karstología de Yesos. Algunas aplicaciones en Ingeniería Civil*. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, Departamento de Ingeniería y Morfología del terreno, Madrid, España; 189 p.

MANGIN, A. (1978). *Contibution à l'étude hydrodinamique des aquifères karstiques*. Thèse de doctorat, Université de Dijon, Moulis, France; 261 p.

MOCTEZUMA-NAVARRO, K.M. (2011). *Estimación de la magnitud y distribución de la recarga directa en la región de Linares, Nuevo León mediante el método de balance de cloruros*. Tesis de Licenciatura. UANL, Facultad de Ciencias de la Tierra, Linares NL, México; 146 p.

MORTIMER L. & SIMMONS C.T. (2011). *The role of in situ stress in determining hydraulic connectivity in a fractured rock aquifer (Australia)*. Hydrogeology Journal, Springer-Verlag. v. 19, pp. 1293-1312.

MUIR, J.M. (1936). *Geology of the Tampico Region*. American Association of Petroleum Geologists Bulletin; Tulsa, Oklahoma, USA, 280 p.

MUÑOZ-DELGADO, M.C. (2003). *Geografía (2º Bachillerato)*. 1a ed. Grupo Anaya. Madrid, España; 431 p.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL (NRC) (1996). *Rock Fractures and fluid flow: contemporary understanding and applications*. National Academy of Sciences, Washington, DC, USA; 568 p.

ORELLANA-SILVA, E. (1982). *Prospección geoelectrica (en corriente continua)*. 2ª ed. Ediciones Paraninfo. Madrid, España; 580 p.

ORTEGA-GAUCÍN, D. (2012). *Sequía en Nuevo León. Vulnerabilidad, impactos y estrategias de mitigación*. 1ª ed. Instituto del agua del estado de Nuevo León. Apodaca, N.L. México; 222 p.

PADILLA-Y SÁNCHEZ, R.J. (1978). *Bosquejo geológico-estructural de la Sierra Madre Oriental en el área de Linares-Galeana-San Roberto, estado de Nuevo León*. Revista del Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México; v.2, núm. 1, pp. 48-54.

PADILLA-Y SÁNCHEZ, R.J. (1982). *Geologic evolution of the Sierra Madre Oriental between Linares, Concepción del Oro, Saltillo and Monterrey, México*. Ph. D. Dissertation, University of Texas at Austin, USA; 217 p.

PADILLA-Y SÁNCHEZ, R.J. (1985). *Las estructuras de la curvatura de Monterrey, estados de Coahuila, Nuevo León, Zacatecas y San Luis Potosí*. Revista del Instituto de Geología de la UNAM; v. 6, núm. 1, pp. 1-20.

PEÑA-PONCE, V.H. (1992). *Mapeo geológico en el área de puerto pastores al sureste de Galeana, Nuevo León y estudio bioestratigráfico en la parte superior de la formación Taraises en el área de San Lucas, Galeana, Nuevo León*. Tesis de Licenciatura, UANL, Facultad de Ciencias

de la Tierra, Linares, N.L. México; 109 p.

PICHARDO-BARRÓN, Y. (2002). *Evolución paleogeográfica de la fauna arrecifal del Cerro de Labradores, Galeana, Nuevo León, México*. Tesis de Maestría, UANL, Facultad de Ciencias de la Tierra, Linares, N.L. México, 129 p.

RAZACK M. (1980). Approche quantitative de l'effet d'échelle sur le relevé de la fracturation par photo-interpretation dans l'étude de la géometrie des réservoirs fissurés. *Memories hors série de la Société géologique de France*, v.11 pp. 81-90

REITMAN N.G., GE, S. & Mueller, K.(2014). *Groundwater flow and its effect on salt dissolution in Gypsum Canyon watershed, Paradox Basin, southeast Utah, USA*. *Hydrogeology Journal*, v. 22; pp. 1403-1419.

RODRÍGUEZ-PIMIENTA, M. (2003). *Estudio gravimétrico en el valle de Potosí, Galeana, Nuevo León*. Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ciencias de la Tierra, Linares, NL, México; 90 p.

SALAMA, R.B., OTTO, C.J., & FITZPATRICK, R.W.(1998). *Contributions of groundwater conditions to soil and water salinization*. *Hydrogeology Journal*, Springer; v. 7, pp. 46-64.

SAMPER-CALVETE, F.J. & GARCÍA-VERA, M.A. (1998). *Inverse modeling of groundwater flow in the semiarid evaporitic closed basin of Los Monegros, Spain*. *Hydrogeology Journal*; v. 6, pp. 33-49.

SANDERS, L. (1988). *A manual of Field Hydrogeology*. Prentice-Hall, 381 p.

SERVICIO GEOLÓGICO MEXICANO (2007). *Carta Geológica-Minera, Galeana G14C56, Nuevo León*.

SHAPIRO, A.M. (2007). *Integrated multi-scale characterization of groundwater flow and chemical transport in fractured crystalline rock at the Mirror Lake site*. *AGU Geophysics*; v.171, pp. 201-225.

SINGHAL B. & GUPTA R. (1999) *Applied Hydrogeology of fractured rocks*. 1st ed. Springer, 401 p.

TAVERA-AMEZCUA, E. (1960). *Yacimientos de barita en el Distrito Minero de Galeana, Nuevo*

León. Boletín Consejo de Recursos Naturales No Renovables, México; v. 55, 70 p.

TÓTH, J. (2009). *Gravitational systems of groundwater flow*. 1st ed. Cambridge Universtiy Press, New York, USA; 297 p.

WENZENS, G. (1973). *Investigaciones geomorfológicas en la región cárstica del norte de San Luis Potosí y sur de Nuevo León*. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana; v.34, núm. 1 y 2, pp. 71-91.

WERNER, J. (1996). *Introducción a la Hidrogeología*. Universidad Autónoma de Nuevo León, México; 174 p.

ZÚÑIGA-LARA, R. (2011). *Detección de zonas de riesgo a lo largo del colector de drenaje poniente de la ciudad de Guatemala*. Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México, D.F. México; 85 p.

REFERENCIAS ELECTRÓNICAS

Blog de fotografías Panoramio
panoramio.com

- Trotasitios, Laguna de Labradores
<http://www.panoramio.com/photo/29729698>

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA)
conagua.gob.mx

- *Atlas digital del agua en México; 2012*
<http://www.conagua.gob.mx/atlas/>

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI)
inegi.org.mx

- *Simulador de Flujos de agua de cuencas hidrográficas (SIATL)*
http://antares.inegi.org.mx/analisis/red_hidro/SIATL/

Servicio Meteorológico Nacional (SMN)
smn.cna.gob.mx

Apéndice 1: Medición de profundidad de la laguna

A manera de descripción morfológica de la Laguna de Labradores, se realizaron una serie de mediciones de profundidad hasta la base de la laguna, en una lancha proporcionada por Protección Civil de Galeana. Las mediciones se hicieron con un cordel de albañil y una pesa de 3 kilos, el cordel tenía en total 90 metros. La metodología fue recorrer la laguna en la lancha escogiendo ciertos puntos con un GPS, en cada uno de los puntos se dejó caer el cordel con la pesa y hasta sentir un tope (Figura 77). En algunas ocasiones el cordel seguía corriendo después de sentir un tope pero a velocidad menor y se pudo observar que la cuerda se inclinaba hacia el Este de la laguna (Figura 78), esto se puede explicar de dos maneras (Figura 79): 1) La base de la estructura tiene cierta inclinación que puede arrastrar la pesa en la dirección de la pendiente por tener esta un lado redondeado, 2) existe un flujo más profundo con dirección oeste-este el cual puede mover la pesa por la fuerza del flujo y 3) por succión de un sumidero.



Figura 77. Medición de la profundidad de la laguna, con utilización del cordel y pesa.

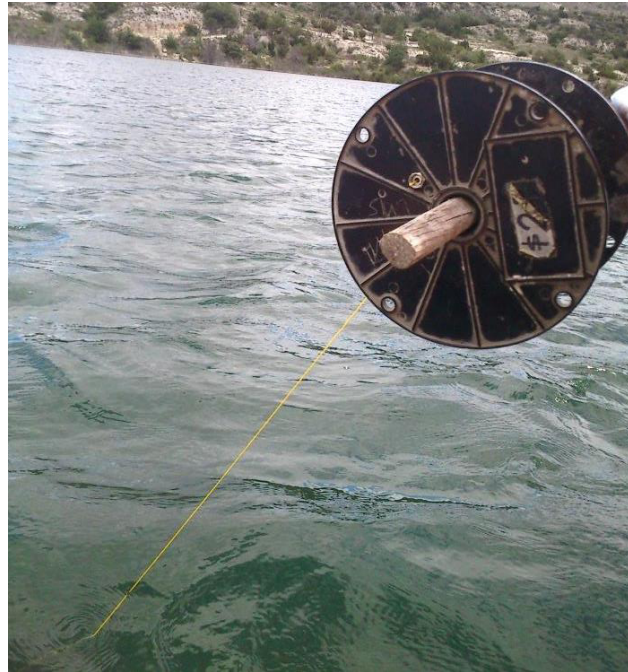


Figura 78. Inclínación del cordel durante las mediciones.

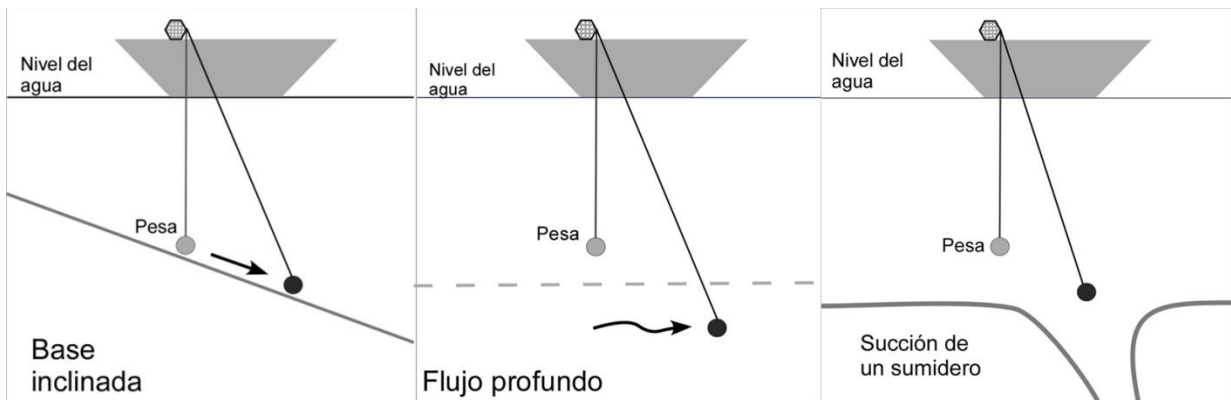


Figura 79. Posibles causas de la inclinación del cordel durante las mediciones.

A partir de las mediciones tomadas en la laguna, se realizó un modelo de la misma en 2D y 3D (Figuras 80 y 81) en donde se puede observar que la parte más profunda de la laguna está hacia la parte SE, esto contraria el hecho de la inclinación de la cuerda durante las mediciones con el cordel, así que esta inclinación se debe a algún flujo profundo, más fuerte proveniente de las cavidades mayores que posiblemente unen a las dolinas El Pozo

del Gavilán , el Pozo del álamo, y la Laguna de Labradores.

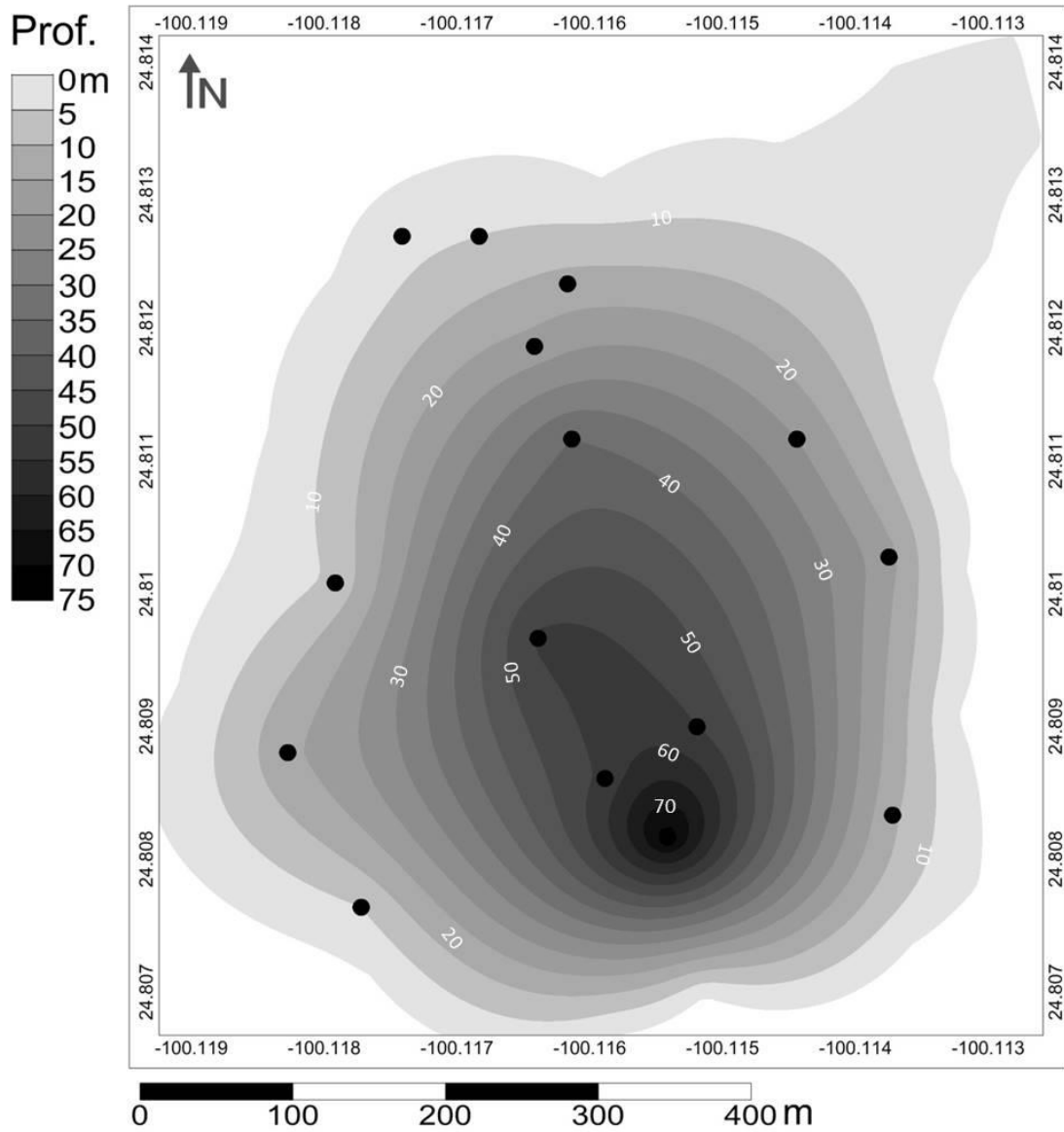


Figura 80. Modelo de profundidades de la Laguna de Labradores.

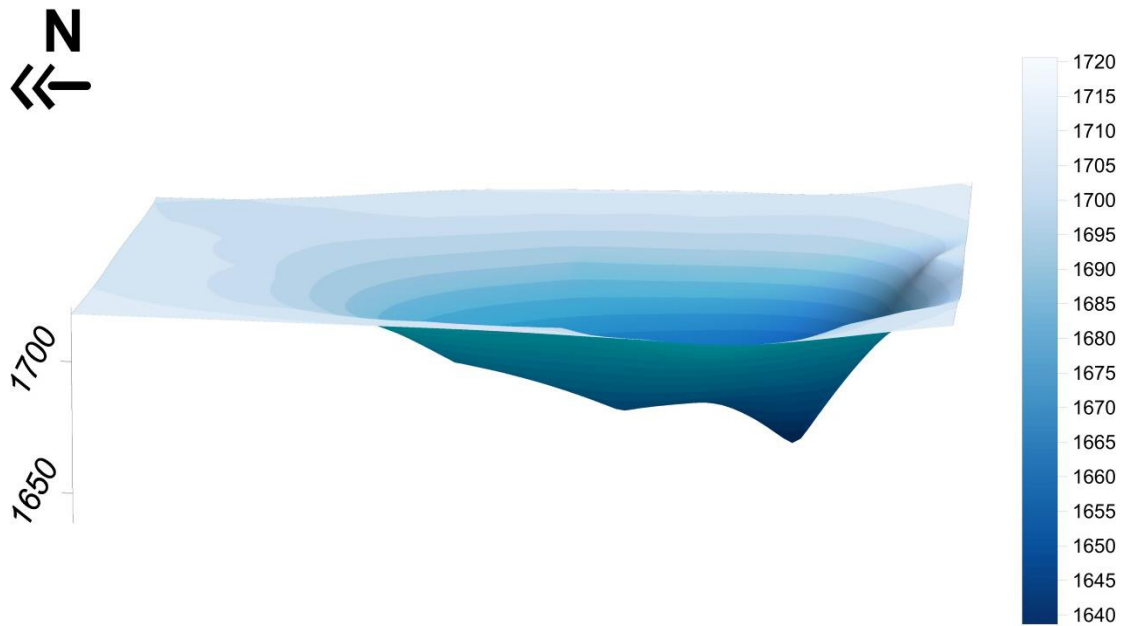


Figura 81. Modelo 3D de la Laguna de Labradores de acuerdo a las mediciones con el cordel.

La medición más profunda fue en el punto con coordenadas: N24°48'29.4'' W100°06'55.5'' con una profundidad de 73 metros a una altura de 1637msnm. Con este dato se puede decir que se espera que la laguna tenga de profundidad aproximadamente 73 metros, lo cual es comparativo con el dato de Huízar-Álvarez y Oropeza-Orozco (1989), quienes daban un dato de 80 metros y Chapa-Guerrero y colaboradores (1994) de 50 metros.

Apéndice 2: Fotografías



