



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE AGUASCALIENTES**

CENTRO DE CIENCIAS DEL DISEÑO Y DE LA CONSTRUCCIÓN

DEPARTAMENTO DE GEOTECNIA E HIDRÁULICA

TESIS

**Estudio mediante el uso de simulaciones numéricas para
determinar las características de velocidad y volumen de
recarga natural al acuífero del valle de Aguascalientes a través
de Discontinuidades Superficiales**

PRESENTA

Sergio Joel Hernández Guerra

**PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN INGENIERÍA CIVIL
CON ESPECIALIDAD EN AMBIENTAL**

TUTOR

Dr. Martín Hernández Marín

COMITÉ TUTORAL

Dr. Jesús Pacheco Martínez

Mtra. Norma González Cervantes

Aguascalientes, Ags. 15 de Noviembre de 2018



UNIVERSIDAD AUTONOMA
DE AGUASCALIENTES

FORMATO DE CARTA DE VOTO APROBATORIO

M. EN FIL. OMAR VÁZQUEZ GLORIA
DECANO DEL CENTRO DE CIENCIAS
DEL DISEÑO Y DE LA CONSTRUCCIÓN
P R E S E N T E

Por medio del presente como Tutor designado del estudiante **SERGIO JOEL HERNÁNDEZ GUERRA** con ID **140291** quien realizó la tesis titulada: **ESTUDIO MEDIANTE EL USO SIMULACIONES NUMÉRICAS PARA DETERMINAR LAS CARACTERÍSTICAS DE VELOCIDAD Y VOLUMEN DE RECARGA NATURAL AL ACUÍFERO DEL VALLE DE AGUASCALIENTES A TRAVÉS DE DISCONTINUIDADES SUPERFICIALES**, y con fundamento en el Artículo 175, Apartado II del Reglamento General de Docencia, me permito emitir el **VOTO APROBATORIO**, para que él pueda proceder a imprimirla, y así como continuar con el procedimiento administrativo para la obtención del grado.

Pongo lo anterior a su digna consideración y sin otro particular por el momento, me permito enviarle un cordial saludo.

ATENTAMENTE

“Se Lumen Proferre”

Aguascalientes, Ags., a 13 de noviembre de 2018.

Dr. en C. Martín Hernández Marín
Tutor de tesis

M. en C. Norma González Cervantes
Asesor de tesis

Dr. en C. Jesús Pacheco Martínez
Asesor de tesis

- c.c.p.- Sergio Joel Hernández Guerra
- c.c.p.- Dr. Ricardo Arturo López León - Secretaría de Investigación y Posgrado
- c.c.p.- M. en Ing. Ma. Guadalupe Lira Peralta - Jefatura del Depto. de Geotecnia e Hidráulica
- c.c.p.- Dr. Martín Hernández Marín - Consejero Académico
- c.c.p.- Archivo

Dra. María del Carmen Martínez Serna
Dirección General de Investigación y Posgrado
PRESENTE

Por medio de este conducto informo que el documento final de tesis titulado: "ESTUDIO MEDIANTE EL USO SIMULACIONES NUMÉRICAS PARA DETERMINAR LAS CARACTERÍSTICAS DE VELOCIDAD Y VOLUMEN DE RECARGA NATURAL AL ACUÍFERO DEL VALLE DE AGUASCALIENTES A TRAVÉS DE DISCONTINUIDADES SUPERFICIALES".
Presentado por el sustentante: Sergio Joel Hernández Guerra con ID: 140291, egresado de la Maestría en Ingeniería Civil cumple las normas y lineamientos establecidos institucionalmente. Cabe mencionar que el autor cuenta con el voto aprobatorio correspondiente.

Para efecto de los trámites que al interesado convengan, se extiende el presente, reiterándole las consideraciones que el caso amerite.

ATENTAMENTE

Aguascalientes, Ags., 15 de noviembre de 2018
"SE LUMEN PROFERRE"


M. en Fil. Omar Vázquez Gloria
Decano del Centro de Ciencias del Diseño y de la Construcción

c.c.p. - Dr. Ricardo Arturo López León – Secretario de Investigación y Posgrado del CCDC.
c.c.p. - Dr. Miguel Ángel Soto Zamora – Secretario Técnico de la Maestría en Ingeniería Civil.
c.c.p. - Dr. Martín Hernández Marín – Tutor de tesis.
c.c.p. - Ing. Sergio Joel Hernández Guerra – Egresado de la Maestría en Ingeniería Civil.
c.c.p. - Lic. Delia Guadalupe López Muñoz – Jefe Sección de Certificados y Títulos.
c.c.p. - Archivo

OVG/rtv

AGRADECIMIENTOS

A CONACyT por el apoyo económico que permitió enfocarme en mis estudios de maestría y en la realización de este trabajo de investigación.

A la Universidad Autónoma de Aguascalientes la cual me brindó las herramientas necesarias que forman la base de este estudio.

Principalmente a mi tutor el Dr. Martín Hernández Marín por todo su apoyo y su constante atención, no solo al estudio, también a mi persona, gracias por su paciencia y dedicación.

A mis asesores la Mtra. Norma González Cervantes y el Dr. Jesús Pacheco Martínez por guiarme, corregirme y brindarme los conocimientos necesarios para el desarrollo de este trabajo.

A mis padres que siempre me han apoyado para seguir adelante, cuyo esfuerzo me sirve de ejemplo y ha permitido traerme hasta este punto, siempre preocupados porque no me faltara nada y brindándome los consejos que me forman como persona.

A mis amigos de la maestría con los que pasamos dos años apoyándonos entre nosotros.

ÍNDICE GENERAL

1 INTRODUCCIÓN	10
1.1 Prólogo	10
1.2 Objetivo General	11
1.3 Objetivos Particulares	11
1.4 Alcances	11
1.5 Justificación	13
1.6 Hipótesis	13
2 ESTADO DEL ARTE	15
3 MARCO TEÓRICO	27
3.1 Discontinuidades superficiales.....	27
3.2 Subsistencia	29
3.3 Infiltración y Humedad del suelo	30
3.4 Nivel freático	31
3.5 Ecuación de Richards	31
3.6 Prospección Geofísica	32
3.7 Resistividad eléctrica	33
3.8 Modelación numérica.....	36
3.9 Normas y lineamientos	36
4 MARCO METODOLÓGICO	39
4.1 Delimitación de la zona de estudio	39
4.2 Aplicación de métodos geofísicos.....	41
4.3 Pruebas de laboratorio.....	42
4.4 Elaboración de modelos	45
5 RESULTADOS.....	48
5.1 Contenido de humedad.....	48
5.2 Composición granulométrica	48
5.3 Densidad de suelos	50
5.4 Resistividad vs. contenido de humedad.....	50
5.5 Resistividad vs. Porcentaje de sal en solución de agua	51
5.6 Perfiles de resistividad	53
5.7 Resultados modelo conceptual	58

5.8 Resultados simulación numérica 60

6 DISCUSION DE RESULTADOS 75

6.1 Prueba ASTM G 187 75

6.2 Perfiles de resistividad 75

6.3 Modelo conceptual 79

6.4 Simulaciones numéricas 81

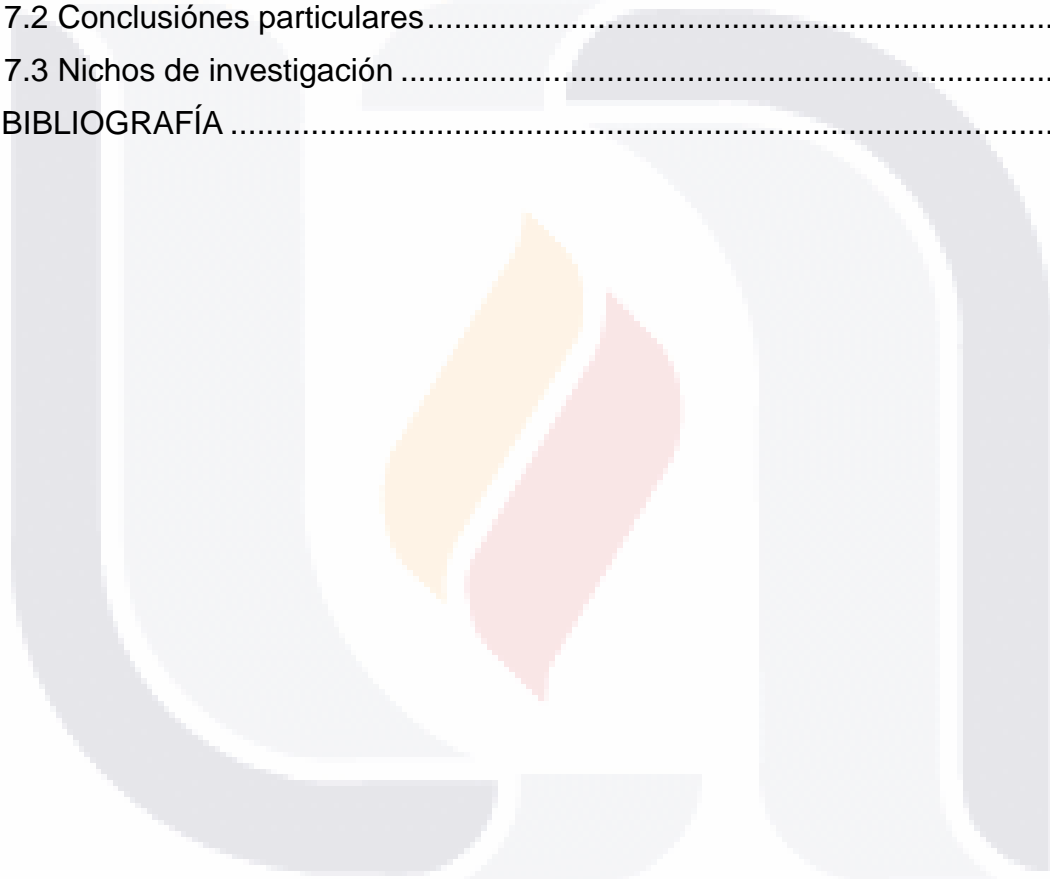
7 CONCLUSIONES 85

7.1 Conclusión general 85

7.2 Conclusiones particulares 86

7.3 Nichos de investigación 88

8 BIBLIOGRAFÍA 89



INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Modelo 3D de una falla con su delimitación de zona de falla. Rojo = Falla; amarillo = zona de falla; azul = zona dañada (Romano <i>et al.</i> , 2017).....	17
Figura 2. Comparación entre un TER (Tomografía eléctrica de resistividad) y un perfil GPR (Radar de penetración del suelo) (Teatini <i>et al.</i> , 2015).....	18
Figura 3. Saturación de agua a lo largo de una sección vertical N-S y W-E a través del estanque de infiltración al comienzo de la infiltración y después de 16, 30 y 50 días (Teatini <i>et al.</i> , 2015).....	19
Figura 4. Vista de la Falla Oriente. Se puede observar la gran magnitud que pueden llegar a tener las discontinuidades.	28
Figura 5. Ejemplo de una vialidad dañada al sur de la ciudad de Aguascalientes, debido a los efectos del hundimiento diferencial.....	29
Figura 6. Ubicación de los puntos de estudio en el Estado de Aguascalientes.....	39
Figura 7. Fotografía de la zona estudio ubicada en el parque ecológico "El caracol".	40
Figura 8. Fotografía de la zona estudio ubicada en el Parque ecológico "La Pona."	41
Figura 9. Método de prueba estándar para la medición de la resistividad del suelo, usando el método de caja de suelo con dos electrodos. La imagen de esta figura muestra el suelo dentro de la caja y los electrodos conectados a ambos extremos de la caja.	43
Figura 10. Saturación de suelo seleccionado, para obtener diferentes contenidos de humedad.....	44
Figura 11. Aplicando bomba de vacío para determinar el peso específico relativo de salidos del suelo.	45
Figura 12. Curva granulométrica.....	49
Figura 13. Gráfica de contenido de humedad vs. resistividad.....	51
Figura 14. Porcentaje de sal en solución con agua vs. resistividad.	52
Figura 15. Ubicación del perfil en planta, zona "El Caracol".	53
Figura 16. Perfil de tomografía eléctrica resistiva del sitio "El Caracol", electrodos colocados a cada 10 metros. La ubiccion y orientación del perfil se observa en la figura 15.....	54
Figura 17. Perfil de tomografía eléctrica resistiva del sitio "El Caracol", electrodos colocados a cada 2.50 metros. Comparte la ubiccion y la orientación del TER 01	55
Figura 18. Ubicación del perfil en planta, zona "La Pona".....	55
Figura 19. Perfil de tomografía eléctrica resistiva del sitio "L a Pona", electrodos colocados a cada 5 metros. La ubicacion y orientación del perfil se observan en la figura 18.	56
Figura 20. Perfil de tomografía eléctrica resistiva del sitio "La Pona", electrodos colocados a cada 2.50 metros. Comparte la ubiccion y la orientación del TER 03.....	57

Figura 21. Fotografía del pozo de visita ubicado en la zona del sitio donde se levantaron los perfiles de las TER 03 Y 04. 57

Figura 22. Modelo coneptual en el sitio “El Caracol”, con un ancho de zona de falla propuesto de 10 metros..... 58

Figura 23. Modelo coneptual en el sitio “El Caracol”, con un ancho de zona de falla propuesto de 20 metros..... 59

Figura 24. Modelo coneptual en el sitio “La Pona”, con un ancho de zona de falla propuesto de 20 metros..... 59

Figura 25. Simulación de flujo a través de la zona de falla de 10.00 metros con valor de conductividad hidráulica vertical de 4.9E-04 m/s (escenario 1) La escala de colores muestra el grado de saturación efectiva la cual carece de unidades, o en otras palabras es adimensional donde el 1 representa el 100% de saturacione en este caso representado por el color rojo..... 62

Figura 26. Valores del tiempo de transito dentro de la zona de falla para el escenario 1. La línea punteada azul es la gráfica de la función lineal..... 63

Figura 27. Simulación de flujo a través de la zona de falla de 10.00 metros con valor de conductividad hidráulica vertical de 5.0E-4 m/s. La escala de colores muestra el grado de saturación efectiva la cual carece de unidades, o en otras palabras es adimensional donde el 1 representa el 100% de saturacione en este caso representado por el color rojo..... 64

Figura 28. Valores del tiempo de transito dentro de la zona de falla para el escenario 2. La línea punteada azul es la gráfica de la función lineal..... 64

Figura 29. Simulación de flujo a través de la zona de falla de 10.00 metros con valor de conductividad hidráulica vertical de 6.1E-6 m/s. La escala de colores muestra el grado de saturación efectiva la cual carece de unidades, o en otras palabras es adimensional donde el 1 representa el 100% de saturacione en este caso representado por el color rojo..... 65

Figura 30. Valores del tiempo de transito dentro de la zona de falla para el escenario 3. La línea punteada azul es la gráfica de la función lineal..... 66

Figura 31. Simulación de flujo a través de la zona de falla de 20.00 metros con valor de conductividad hidráulica vertical de 4.9E-4. La escala de colores muestra el grado de saturación efectiva la cual carece de unidades, o en otras palabras es adimensional donde el 1 representa el 100% de saturacione en este caso representado por el color rojo..... 67

Figura 32. Valores del tiempo de transito dentro de la zona de falla para la simulación 04. La línea punteada azul es la gráfica de la función lineal 67

Figura 33. Simulación de flujo a través de la zona de falla de 20.00 metros con valor de conductividad hidráulica vertical de 5.0E-5 m/s. La escala de colores muestra el grado de saturación efectiva la cual carece de unidades, o en otras palabras es adimensional donde el 1 representa el 100% de saturacione en este caso representado por el color rojo..... 68

Figura 34. Valores del tiempo de transito dentro de la zona de falla para el escenario 5. La línea punteada azul es la gráfica de la función lineal..... 68

Figura 35. Simulación de flujo a través de la zona de falla de 20.00 metros con valor de conductividad hidráulica vertical de $6.1E-6$ m/s. La escala de colores muestra el grado de saturación efectiva la cual carece de unidades, o en otras palabras es adimensional donde el 1 representa el 100% de saturacione en este caso representado por el color rojo..... 69

Figura 36. Valores del tiempo de transito dentro de la zona de falla para el escenario 6. La línea punteada azul es la gráfica de la función lineal..... 70

Figura 37. Simulación de flujo a través de la zona de falla de 10.00 metros con valor de conductividad hidráulica vertical de $4.9E-4$ m/s. La escala de colores muestra el grado de saturación efectiva la cual carece de unidades, o en otras palabras es adimensional donde el 1 representa el 100% de saturacione en este caso representado por el color rojo..... 71

Figura 38. Grafica para conocer el tiempo en el que ha alcanzado la saturación efectiva en el punto A. 71

Figura 39. Simulación de flujo a través de la zona de falla de 10.00 metros con valor de conductividad hidráulica vertical de $5.0E-5$ m/s. La escala de colores muestra el grado de saturación efectiva la cual carece de unidades, o en otras palabras es adimensional donde el 1 representa el 100% de saturacione en este caso representado por el color rojo..... 72

Figura 40. Gráfica para conocer el tiempo en el que ha alcanzado la saturación efectiva en el punto A. 72

Figura 41. Simulación de flujo a través de la zona de falla de 10.00 metros con valor de conductividad hidráulica vertical de $6.1E-6$ m/s. La escala de colores muestra el grado de saturación efectiva la cual carece de unidades, o en otras palabras es adimensional donde el 1 representa el 100% de saturacione en este caso representado por el color rojo..... 73

Figura 42. Grafica para conocer el tiempo en el que ha alcanzado la saturación efectiva en el punto A. 73

Figura 43. Interpretación del Perfil eléctrico (TER) obtenido en zona de estudio El Caracol, en función del tamaño de las partículas..... 77

Figura 44. Interpretación del Perfil eléctrico (TER) obtenido en zona de estudio El Caracol, en función del tamaño de las partículas..... 77

Figura 45. Croquis elaborado en campo en la zona de "El Caracol" donde era apreciable una columna estratigráfica y su ubicación en la interpretación del TER..... 78

Figura 46. Columna estratigráfica realizada sobre los primeros 5 m de la zona de estudio "El Caracol"..... 78

Figura 47. Modelo conceptual de la zona de estudio de "El Caracol" y con un ancho de zona de falla de 10 m. 79

Figura 48. Modelo conceptual de la zona de estudio de "El Caracol" y con un ancho de zona de falla de 20 m. 80

Figura 49. Modelo conceptual de la zona de estudio de "La Pona", con un ancho de zona de falla de 20 m. 80

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Distribución de material por tamaño de partícula. 49

Tabla 2. Resistividad de la muestra de suelo en función del contenido de humedad. 51

Tabla 3. Resistividad de la muestra de suelo en función porcentajes de salinidad. El contenido de salinidad (cloruro de sodio) representa el peso de sal con respecto al peso de agua agregada al suelo. 52

Tabla 4. Valores de conductividad hidráulica y ancho de falla utilizados en los diferentes escenarios. 61

Tabla 5. Resumen de los tiempos obtenidos en cada variante de las simulaciones realizadas. 81



RESUMEN

En el presente estudio se presenta la caracterización hidráulica de la falla Oriente en dos de sus puntos ubicados en el valle de Aguascalientes para determinar la velocidad del flujo de agua que pasa a través de ellos. La hidroestratigrafía del valle contiene una espesa zona vadosa constituida por depósitos fluvio-aluviales y rocas sedimentarias con grado de litificación variable, en donde tienen lugar varios procesos hidromecánicos, como la aparición de discontinuidades superficiales, las cuales se cree que pueden funcionar como zonas de recarga ya que podrían favorecer la infiltración de agua de la superficie hacia el acuífero regional. En general, la metodología consistió en obtener en campo perfiles 2D de resistividad eléctrica, en ciertas zonas de la falla Oriente dentro de la mancha urbana de la ciudad de Aguascalientes, realizar pruebas en laboratorio con muestras de material adyacente a la discontinuidad superficial, y diseñar modelos numéricos para entender la dinámica del flujo utilizando el software Comsol Multiphysics, mediante el cual se aplicó una física basada en el modelo matemático de la ecuación de Richards. Con los datos obtenidos se pudo conocer la estratigrafía de la zona de estudio y determinar la presencia de humedad y su relación con la discontinuidad superficial, la cual podría funcionar como un canal que favorezca la infiltración de aguas pluviales y permitir la recarga del acuífero. Mediante los modelos numéricos que se aplicaron se obtuvieron resultados que permitieron conocer posibles tiempos de tránsito de agua subterránea a través de una discontinuidad. Se estimó una velocidad mínima de $1.35E-05$ m/s y una máxima de $8.44E-08$ m/s para la zona analizada.

Palabras clave: Falla Oriente, infiltración, simulación numérica, geofísica.

ABSTRACT

In the present study, the hydraulic characterization of two points on the Oriente fault located in the Aguascalientes valley is presented to determine the speed of water flow to pass through it. The hydrostratigraphy of the valley contains a thick vadose zone constituted by fluvio-alluvial deposits and sedimentary rocks with a variable degree of lithification, where several hydromechanical processes take place, such as the appearance of surface discontinuities, which are believed to work as recharge zones since they could favor the infiltration of water from the surface towards the regional aquifer. In general, the methodology consisted in obtaining in the field 2D profiles of electrical resistivity, in certain areas of the Oriente fault within the urban area of the city of Aguascalientes, performing laboratory tests with samples of material adjacent to the surface discontinuity, and designing numerical models to understand the dynamics of the flow using the software Comsol Multiphysics, by means of which, a physics was applied based on the mathematical model of the Richards equation. With the obtained data, it was possible to know the stratigraphy of the study area and determine the presence of humidity and its relationship with the surface discontinuity, which could function as a flow channel that favors the infiltration of rainwater and allow the recharge of the aquifer. Through the numerical applied models, results were obtained that allowed to know possible transit times of groundwater through a discontinuity. It was estimated a minimum speed of $1.35E-05$ m/s and a maximum of $8.44E-08$ m/s for the analyzed area

Key words: Oriente fault, infiltration, numerical simulation, geophysics.



1 INTRODUCCIÓN

1.1 Prólogo

Aguascalientes sufre un problema de abastecimiento de agua potable ya que el acuífero fue declarado en veda por tiempo indefinido desde 1963 (DOF, 1963). Dicho acuífero posee una disponibilidad negativa desde hace ya varios años, en efecto la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) dictaminó en 2012 como sin disponibilidad al acuífero del valle de Aguascalientes. A partir de la extracción desmedida del agua del acuífero del valle, se ha presentado el problema de la degradación del suelo, así como múltiples casos de fracturamiento a causa del fenómeno de subsidencia.

El valle de Aguascalientes se encuentra delimitado por dos fallas geológicas de origen tectónico, la falla Oriente y la falla Poniente, que dieron origen al graben de Aguascalientes, precursor del valle. Por sus características geológicas e hidrológicas, estas discontinuidades representan posibles puntos de recarga ya que favorecen la infiltración de agua que llega al Acuífero.

Existen estudios previos que demuestran la capacidad que pueden tener las discontinuidades para trabajar como conductos que aceleran la recarga natural de los mantos acuíferos o como barreras hidráulicas que retardan dicho proceso (Burbey, 2002), lo que hace necesario la elaboración de estudios que pronostiquen la influencia de las fallas presentes en el valle de Aguascalientes, para determinar si estas favorecen o no la recarga natural del acuífero del Valle de Aguascalientes.

1.2 Objetivo General

El objetivo del presente estudio es determinar características de velocidad de infiltración a través de discontinuidades presentes en el valle de Aguascalientes mediante el desarrollo de modelos numéricos y exploración geofísica.

1.3 Objetivos Particulares

A) Revisar la bibliografía referente a trabajos y estudios similares previos para conocer acerca de las investigaciones que hasta ahora hay sobre las discontinuidades geológicas y su relación con la infiltración de agua al subsuelo.

B) Realizar trabajos de exploración geofísica de resistividad eléctrica para detectar las discontinuidades geológicas así como los estratigrafía que integrará los modelos conceptuales y que delimitará la geometría de los modelos numéricos, complementado con pruebas de laboratorio para determinar la resistividad eléctrica en función de la humedad y de la salinidad.

C) Desarrollar modelos numéricos con las condiciones de los puntos de estudio de la falla Oriente, variando los parámetros hidráulicos, así como la profundidad y el ancho de influencia de la zona de falla.

1.4 Alcances

A continuación, se enumeran los alcances que delimitan los objetivos que se quieren alcanzar en el presente trabajo de investigación los cuales se han descrito previamente, cuyo desarrollo marca la pauta que habrá de llevarse a lo largo del desarrollo de la tesis y asegurar su culminación.

1) El trabajo de investigación que se pretenden realizar está delimitado geográficamente por el estudio de la falla Oriente, ya que delimita al graben de

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

Aguascalientes, específicamente en la zona Este, particularmente en dos puntos, los cuales se encuentran dentro de la zona urbana de la ciudad de Aguascalientes.

2) La primera parte de este trabajo de investigación está enfocada en la obtención de parámetros cualitativos, para lo cual fue necesario la aplicación de técnicas de campo, estas fueron pruebas de prospección geofísica, en específico tomografías eléctricas de resistividad levantadas con el método Dipolo-dipolo, permitiendo observar la estratigrafía de las zonas estudio, lo que delimita la geometría de las simulaciones numéricas.

3) Se asignaron los parámetros hidráulicos de la curva de retención de Van Genuchten (1970) dependiendo del tipo de material que se observe en cada estrato, así como a la zona de falla la cual marcara la pauta para las diferentes condiciones de cada simulación, las cuales varían en función del ancho de influencia de la zona de falla y de las diferentes conductividades hidráulicas asociadas a esta, encontradas en la literatura como las propuestas por Ochoa-González (2015).

4) Finalmente conjugando los parámetros de los primeros dos puntos se desarrollaron las simulaciones numéricas como se comentó en el punto anterior modificando los parámetros hidráulicos de la zona de falla y el ancho de esta, para obtener tiempos de tránsito y comparar con el trabajo que se han desarrollado en la zona de estudio (Zermeño, 2016), que proporciona tiempos de tránsito en el valle de Aguascalientes, y poder determinar cómo se ve afectado el proceso de recarga en la zona de Aguascalientes y cuánto tiempo se puede reducir debido al tránsito a través de la falla.

1.5 Justificación

Actualmente la crisis sobre el recurso hídrico afecta a todo el mundo, siendo las poblaciones localizadas en climas áridos y semiáridos las más afectadas (Burbey, 2002). Este es el caso del estado de Aguascalientes, en donde el descenso del nivel freático ha sido bastante crítico en los últimos años, y ha provocado la reactivación de fallas geológicas, así como la aparición de nuevas fracturas formadas a partir de la subsidencia.

A partir de dicho problema surgen cuestiones para saber cómo es que dichas discontinuidades intervienen en el proceso de recarga natural. El problema es la falta de más estudios y trabajos de investigación sobre los procesos de recarga natural a un acuífero y como se ve afectado por la presencia de fracturas y fallas geológicas en la zona del valle de Aguascalientes. En particular, Hace falta el desarrollo de modelos que permitan pronosticar y evaluar la relación entre las discontinuidades superficiales presentes en el valle de Aguascalientes con el proceso de recarga natural.

1.6 Hipótesis

“Las discontinuidades geológicas presentes en el valle de Aguascalientes pueden estar funcionando como conductos ante el flujo de agua de lluvia que aceleran el proceso de recarga natural al acuífero”.



2 ESTADO DEL ARTE

Rawling et al. (2001) menciona que las fallas compuestas de arcilla, aunque se encuentren flanqueadas por zonas estructuralmente heterogéneas, así como zonas dañadas pueden actuar como una barrera que limiten el flujo a través de ellas. Describe que, fallas con gran desplazamiento de sedimentos poco litificados pueden tener poco potencial para actuar como conductos de flujo vertical y algunas veces tienen un efecto mayor en el flujo horizontal, este comportamiento lo adjudica a un núcleo compuesto por suelos finos y la falta de fracturas asociadas a la falla (Rawling, et al., 2001).

De acuerdo con (Mozley y Goodwin, 1995) otra de las circunstancias que pueden impedir el flujo de un fluido a través de una falla es la precipitación de cementantes de calcio como el caliche y que impedirán el paso del fluido. La orientación de cementantes encontrados en zonas de falla pueden determinar la orientación del flujo a través de la orientación de las partículas estudiadas mediante análisis microestructural. Estos autores consideran principalmente tres variables que originaran la orientación de los cementantes: la deformación, el clima y el flujo de agua subsuperficial, siendo que la orientación del cementante suele coincidir más con el del flujo de agua subsuperficial, aunque no es suficiente un análisis microestructural para definir el flujo del fluido. Adicionalmente estos autores también resumen el estudio de la relación de las fallas y los fluidos en 5 enfoques: 1) estudio de las fallas en relación con cambios de permeabilidad 2) análisis geoquímicos de las fallas 3) modelado de flujo de fluidos dentro de las fallas y rocas adyacentes 4) estudios de cambios de carga hidráulica 5) análisis de datos de presión de datos de yacimientos. De los cuales son de particular interés para este estudio el número 1 y el número 3.

Entre estudios de las fallas y cambios en la permeabilidad destaca el trabajo de Antonellini y Aydin (1994), quienes mediante mapeo geológico y pruebas de permeabilidad determinaron que en una zona de falla se puede encontrar valores

de permeabilidad de hasta tres órdenes de magnitud menor que la roca circundante. La intensidad de fracturamiento asociada a la falla y el contenido de arcilla controlan en gran medida la reducción de permeabilidad.

Los cambios de permeabilidad asociados a zonas de falla que sugieren que la estructura del núcleo de falla se comporta independiente a la zona de falla lo que conduce a una anisotropía en la permeabilidad, por lo tanto las zonas de falla bien desarrolladas pueden llevar a un flujo de fluido mejorado (Evans, Forster, & Goddard, 1997).

Para el enfoque de modelado de flujo (Bernard *et al.*, 1989) describen el efecto de una falla en el flujo como una cuantificación numérica para situaciones simples caracterizadas principalmente por el ancho de falla y la relación de anisotropía de permeabilidad con el suelo adyacente a la zona de falla.

Romano (2017) realizó un modelo 3D donde define a las fallas como regiones de heterogeneidad y cuya permeabilidad influye fuertemente al flujo de fluido subsuperficial, dichas fallas están definidas por dos partes, de nuevo se menciona el núcleo de la falla, donde se aprecia un desplazamiento y donde se ubica una zona de deslizamiento localizada y estrecha con un alto índice de deformación y la zona de falla donde también se aprecia un índice deformación menor y la presencia de fracturas, para lo cual genera un modelo simplificado donde distribuye geométricamente en tres dimensiones estas zonas, el cual se observa en la figura 1.

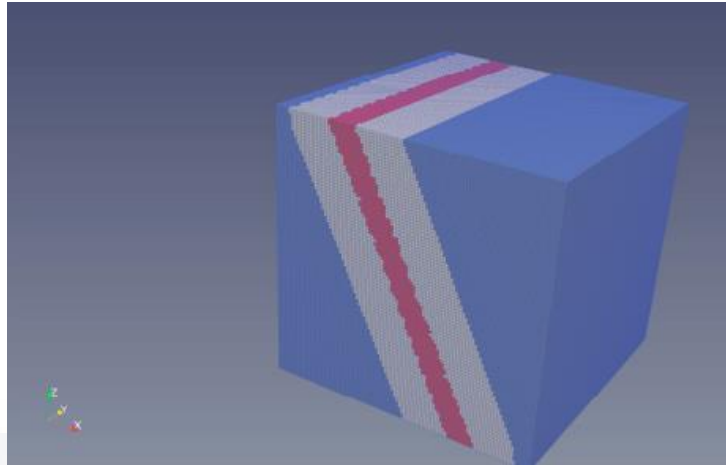


Figura 1. Modelo 3D de una falla con su delimitación de zona de falla. Rojo = Falla; amarillo = zona de falla; azul = zona dañada (Romano *et al.*, 2017).

En cuanto a estudios que evalúen el comportamiento hidráulico de las fallas y lo comparen con estudios de prospección geofísica Ball *et al.* (2010) estudió la falla *Elkhorn* en Denver Colorado, en donde después de comparar un análisis de cuatro pozos instalados cerca de la falla con perfiles de resistividad levantados en la zona de falla, consideró dos escenarios para explicar el cambio en el gradiente hidráulico a través de la falla, el primero, una yuxtaposición de permeabilidades diferentes relacionadas a sus correspondientes unidades de roca, y el segundo, el concepto de una estructura completamente distinta e hidrológicamente correspondiente a la zona de falla, el cual consideró como aproximado a la realidad ya que los perfiles mostraron una complejidad mayor que una simple combinación de permeabilidades.

(Gannon *et al.*, 2011) realizaron estudios de resistividad eléctrica, geofísica, registro de pozo, mapeo del nivel de agua, edad del agua subterránea, química del agua subterránea y pruebas de bombeo, empleando todas estas herramientas para determinar el efecto de la falla *Chatham* en Virginia, Estados Unidos, en el flujo de agua y si esta, afectaba actividades mineras que se tienen pensado llevar a cabo en la zona, el resultado de su investigación arrojó que en efecto la falla favorece el flujo, aunque un muy poca medida, por lo que no implica ningún riesgo para dichas actividades.

Teatini *et al.*, (2005) mencionaron que los métodos de prospección geofísica aportan información valiosa para la generación de modelos y simulaciones hidrogeológicas en pruebas de recarga y manejo de infiltración, ya que sirven para la ubicación, las propiedades y la geometría de las estructuras hidrogeológicas y que tienen una fuerte intervención en el agua infiltrada. En su trabajo conjugan estudios geofísicos (figura 2) para una caracterización hidrogeológica, con la generación de simulaciones numéricas (figura 3) para comprender el proceso de recarga.

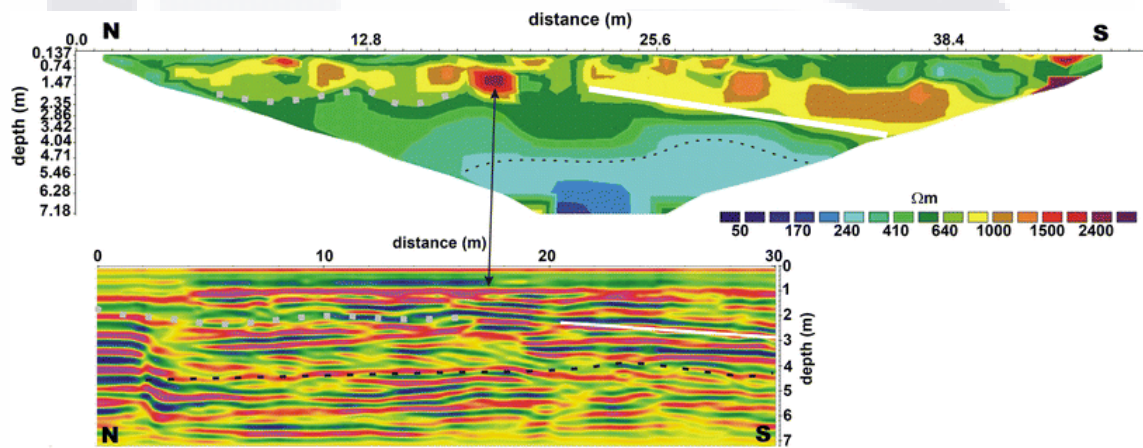


Figura 2. Comparación entre un TER (Tomografía eléctrica de resistividad) y un perfil GPR (Radar de penetración del suelo) (Teatini *et al.*, 2015).

En su trabajo de investigación Teatini *et al.*, (2015) describen como “las simulaciones numéricas permiten representar con más detalle el comportamiento en el tiempo y espacio”. En su trabajo demuestra como un enfoque multidisciplinario es capaz de ofrecer resultados que permiten acercarse a conocer el proceso de recarga, pero se tienen que hacer pruebas reales de recarga en campo para poder tener soluciones más concluyentes en el tema, las cuales deben monitorearse continuamente y usarse posteriormente para calibrar modelos más confiables.

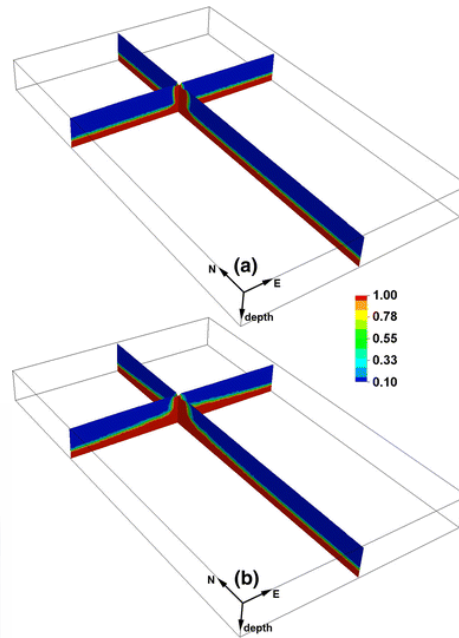


Figura 3. Saturación de agua a lo largo de una sección vertical N-S y W-E a través del estanque de infiltración al comienzo de la infiltración y después de 16, 30 y 50 días (Teatini *et al.*, 2015).

Carreón-Freyre *et al.*, (2005) realizaron una revisión del modelo existente sobre sistema acuífero del valle de Querétaro en donde integró una interpretación de las estructuras estratigráficas estudiadas a partir de registros litológicos con ayuda de pozos de extracción y pozos de monitoreo, incluyendo datos de niveles piezométricos para una zona que presenta un comportamiento similar al del valle de Aguascalientes, ya que presenta un descenso de la carga hidráulica entre 10 y 160 metros en las últimas décadas. En su análisis piezométrico muestra que dicho descenso presenta un comportamiento diferencial e infiere que dicho comportamiento está relacionado directamente con la presencia de discontinuidades estratigráficas y estructurales, sugiere que existe una influencia importante de las fallas en el flujo de agua subterránea. Por lo que proponen un modelo del acuífero de tipo multicapa con un sistema de flujo que varía a nivel local y regional. Este tipo de modelo ha sido estudiado por autores como Ruud y Kabala (1997) y Chen (2003), los cuales son caracterizados por grandes cambios en la conductividad hidráulica principalmente en la dirección vertical.

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

Hernandez-Marin y Burbey (2009) relacionan el flujo de agua con la deformación cerca de una zona de falla, en donde proponen una serie de modelos en donde modifican al ancho de falla, la recarga o descarga y el material perteneciente a la zona de falla, principalmente estudian los desplazamientos verticales y horizontales, así como la presencia de esfuerzos de tensión que están directamente relacionados con la generación de fracturas. Denotan que la deformación resultante depende principalmente de cómo el flujo de agua subterránea está relacionado localmente con la deformación del suelo. También mencionan que una zona de falla está dominada por la arena, lo que permitirá un flujo significativo de agua subterránea a través de la zona de falla, esto en base a los resultados de los modelos generados en su trabajo, aunque no haya un cambio en la carga hidráulica en pozos cercanos a la zona de falla.

Entre los varios autores que han estudiado el tema de las fallas geológicas y su intervención en el proceso de infiltración, así como la relación entre las propiedades hidráulicas y mecánicas de dichas estructuras geológicas, Martínez-Noguez *et al.*, (2013) son algunos de los que han profundizado más en el tema, proponen el estudio mediante simulación, de la relación entre la infiltración de agua de lluvia a través de una zona de fractura y la deformación del suelo a su alrededor. La metodología que usan es la modelación a través de dos etapas. Primero evalúan la infiltración a través de un modelo de flujo en medios porosos de dos fases, donde utilizan una ecuación de continuidad por cada fase, una para la fase líquida y una para la fase gaseosa. Entre los parámetros que maneja se encuentra la porosidad, la densidad, el grado de saturación. También utilizan la ley de Darcy para introducir los diferentes grados de permeabilidad y permeabilidad relativa. Para la simulación implementan la herramienta MUFTE-UG (*Multiphase flow, transport and energy on unstructured grids*), y el programa Plaxis (Waterman *et al.*, 2004). En una segunda etapa plantean un modelo elástico-lineal con criterio de fractura Mohr-Coulomb para determinar la deformación, la cual incluye los parámetros de los módulos de elasticidad de Young, relación de Poisson, ángulo de fricción y la cohesión, y aplican la Ley de

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

Hooke. Con dicho modelo descomponen los esfuerzos tanto plásticos como elásticos. Obteniendo seis ecuaciones en término de los esfuerzos principales. Para finalizar, comparan los resultados obtenidos durante las variaciones de los parámetros utilizados durante la modelación, y consideran dos aspectos principalmente, la infiltración que se tiene para cada caso y la deformación del suelo. Por ejemplo, para el caso uno donde plantea una columna de agua de 1-5 cm con un ancho de falla de 20 cm prácticamente no se presenta infiltración ni deformación, ya que la capa arcillosa con muy baja permeabilidad actúa como una barrera; al plantear una columna de agua superior a los 5 cm con un ancho de falla de 40 cm la infiltración aumenta considerablemente pero así también la deformación del suelo en los alrededores esto debido por el aumento de peso entre otros parámetros, observando claramente una mayor deformación vertical que horizontal pero presente en ambos sentidos. Sin embargo, para un ancho de falla de 80 cm, el grado de infiltración es mayor, el tiempo en el que el agua llega de la superficie a la zona del suelo saturado es muy corto y esto no produce cambio significativo en los esfuerzos de los estratos de la capa vadosa, por lo que la deformación es menor. Los autores plantean en sus conclusiones que consideran este caso como interesante para una opción de recarga de un acuífero a través de una zona de falla.

En otro trabajo más reciente (Martínez-Noguez y Hinkelmann, 2015), utilizan simulaciones numéricas, modelando la infiltración y la deformación del suelo, solo que en este caso, en las condiciones iniciales plantea la extracción de agua a través de un pozo que produce un cono de abatimiento en el nivel del agua circundante al pozo, donde propone que dicha condición puede causar hundimiento. Incluyen además en su modelo una falla geológica que funge como barrera hidráulica, además agregan una infiltración rápida a través de la discontinuidad simulando una tormenta.

Hablando de la permeabilidad en la zona de falla, (Caine *et al.*, 1996), dicen que la permeabilidad del núcleo de falla puede estar dominada por la permeabilidad

del grano, pero que la permeabilidad de la zona de abertura está dominada por las propiedades hidráulicas de la red de fracturas. Por lo que son dos parámetros que hay que considerar en conjunto con las propiedades mecánicas y la arquitectura de la falla, las cuales determinan como va a trabajar hidráulicamente una discontinuidad. Son varios los parámetros que estos autores detallan en su estudio, tanto cualitativos como cuantitativos donde describen cada una de estas características que determinarán la permeabilidad de los estratos en una fractura.

Ciertos parámetros más específicos también determinarán la función del tipo de falla, en ese aspecto Bense y Person (2006), modelan el impacto de una zona de falla a patrones de flujo de poca profundidad. En su trabajo, estos autores definen el núcleo de falla como el lugar geométrico en donde ocurre la mayor parte de deformación por cizallamiento, mientras que la red de fracturas las considera como la zona entre el núcleo y la falla sin estado inalterado. Teniendo cada una cierta característica de permeabilidad independiente una de la otra. Estos autores además desarrollan una metodología que divide su trabajo en dos partes, en la primera desarrollan un algoritmo para optimizar los parámetros de permeabilidad de los diferentes estratos que interactúan con un plano de falla, y en la segunda parte desarrollan modelos para determinar el flujo de fluidos y el transporte de solutos a través de dicho plano de falla a lo largo de 5 acuíferos de diferente profundidad y contenidos de arenas y arcillas en cada uno de los estratos que los componen. Observan que la heterogeneidad litológica, el ancho de falla y la anisotropía hidráulica pueden determinar el funcionamiento hidráulico de una falla. En sus resultados se observa que la falla trabaja como un conducto vertical que favorecerá la infiltración cuando se tiene una falla con permeabilidad fuertemente anisotrópica.

Existen tres métodos utilizados para caracterizar el flujo de las aguas subterráneas en un sistema regional, los cuales son la medición de carga hidráulica, ensayos con trazadores y simulación numérica (Apaydin, 2010). Bajo este criterio, Apaydin (2010) aplica los dos primeros métodos mencionados

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

anteriormente en su trabajo de investigación en donde evalúan la situación hidrogeológica de la zona de *Beypazari*, en Turquía, una zona afectada por una serie de fallas y pliegues, formando tres subsistemas de confinamiento de aguas subterráneas. Este autor utiliza una metodología que le permite evaluar las mediciones en diferentes pozos de extracción, así como nuevos pozos de observación cerca de las zonas de fractura, donde puede ver las variaciones del nivel piezométrico; y utiliza isótopos de deuterio ($2H$), oxígeno 18 ($18O$) y tritio ($3H$) para seguir el flujo del agua subterránea. De esta manera observa que las fallas presentes en la zona de estudio actúan como barreras hidráulicas a lo largo de los tres subsistemas.

Dentro de los estudios actuales aplicados al valle de Aguascalientes se puede encontrar un trabajo de tesis (Campos-Moreno, 2016) en la cual, se evalúa de igual manera la capacidad de infiltración a través de la falla oriente, una de las que delimitan el graben de Aguascalientes. Es un trabajo que determina la factibilidad de infiltración a través de una porción de la falla oriente, posteriormente propone la evaluación de diferentes consideraciones de construir un embalse que propicie un gasto constante hacia la falla. El autor toma una metodología de análisis de datos geoespaciales para determinar las aportaciones de una subcuenca al área de estudio. Posteriormente realiza trabajos de resistividad eléctrica para observar cómo actúa la discontinuidad al vaciar 10,000 litros de agua a través de la discontinuidad geológica, y realiza trabajos de sísmica de refracción, con el fin de determinar la estratigrafía de la zona de estudio. En sus conclusiones, establece que efectivamente existe un gasto que demanda la discontinuidad geológica, para el cual propone el dimensionamiento de un embalse proyectado aguas arriba de la falla geológica para no verse afectado por la misma. De acuerdo con los resultados obtenidos en este trabajo, existe un mayor desplazamiento de líquido en el eje vertical, haciendo énfasis en que las observaciones en este sentido se ven limitadas por las mediciones someras de 9 metros a lo más.

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

Dicho estudio se complementó con una campaña de 1 año para monitorear la deformación en dos transectos perpendiculares a esta falla indica una actividad de deformación continua con valores máximos de descenso vertical de 43 mm en la pared colgante (Hernandez-Marin *et al.*, 2017).

Otro trabajo de investigación que cabe mencionar, no tanto por el efecto de las fallas en el flujo subterráneo, sino por el aspecto de flujo a través de la zona vadosa, es el desarrollado en el valle de Aguascalientes por Zermeño (2016), el cual se enfoca en el estudio del comportamiento de la zona vadosa y su participación en el proceso de recarga al manto acuífero. La zona vadosa es la franja de suelo insaturadas que delimita la superficie y el nivel freático, y en donde ocurren diferentes procesos hidrogeológicos, entre el que destaca el proceso de infiltración (Jin *et al.*, 2014). En dicho trabajo se realiza un modelo numérico para determinar tiempos de tránsito a lo largo de la zona vadosa del graben del valle de Aguascalientes. Zermeño (2016) divide su trabajo de investigación en tres partes. En la primera parte determina las condiciones geohidrológicas de la zona de estudio a través de sondeos eléctricos, historial en pozos perforados a lo largo de la región, así como estudios geológicos previos. En su segunda parte se enfoca a determinar propiedades hidráulicas a lo largo de la zona de estudio, para lo cual implementa el programa ROSSETA con datos granulométricos, menciona la complejidad de recabar datos más precisos, aun así, los datos obtenidos a través del programa permitirán determinar los parámetros hidráulicos necesarios, como lo son la conductividad hidráulica y permeabilidad. Con los datos obtenidos de las primeras dos partes, es posible realizar la tercera que consta de la elaboración de los modelos matemáticos que arrojaran los tiempos de tránsito a través de la zona no saturada hasta el acuífero. Zermeño (2016) obtiene múltiples tiempos de tránsito a lo largo del graben del valle de Aguascalientes, lo que le permiten realizar un mallado de los diferentes tiempos que van desde los trece años hasta los ciento setenta años, a consecuencia de las diferentes condiciones encontrados como lo son la variabilidad del nivel freático y los arreglos de las unidades hidrogeológicas, Sin embargo, en este

trabajo no se consideran los potenciales efectos de las fallas en ese tiempo de tránsito. Más recientemente, esos datos de los modelos unidimensionales elaborados por Zermeño (2016) se complementaron con un análisis geoespacial. Los resultados del análisis geoespacial se basaron en el método del proceso jerárquico analítico (AHP), el cual indicó que el área óptima para la recarga de agua subterránea es la zona inferior del valle, en particular la porción influenciada por las discontinuidades de la superficie (Hernández Marin et al., 2018).





3 MARCO TEÓRICO

3.1 Discontinuidades superficiales

Las fallas son discontinuidades en la corteza terrestre a lo largo de las cuales ha tenido lugar un desplazamiento apreciable (Tarbuk y Lutgens, 2005). Aunque a partir de actividades antropogénicas como puede ser la extracción de agua, están pueden ser reactivadas y presentar de nuevo un desplazamiento entre sus bloques (Martin Hernandez-Marin y Burbey, 2009).

En las fallas que presentan principalmente paralelo a la inclinación de la superficie denominado comúnmente como buzamiento se le denominan fallas con desplazamiento vertical. Este tipo de movimiento puede provocar pequeños resaltes denominados escarpes de falla (Tarbuk y Lutgens, 2005). Comúnmente se denomina a la superficie que se encuentra por encima de la falla se denomina techo de falla mientras que la superficie inferior se nombra muro de falla.

En el Valle de Aguascalientes pueden observarse fallas de tamaño muy pequeño, con longitudes de algunos decímetros y desplazamientos en el orden de los milímetros, los cuales se denominan como fisuramientos (definidos así en este trabajo), hasta fracturas de dimensiones demasiado grandes, con longitudes de varios de kilómetros y aberturas de varios de metros como es el caso que se puede observar en la figura 4.



Figura 4. Vista de la Falla Oriente. Se puede observar la gran magnitud que pueden llegar a tener las discontinuidades.

Las fallas poseen elementos que se repiten en todas ellas; plano de falla o superficie a lo largo de la cual se ha producido la fractura y se ha realizado el desplazamiento relativo de ambos bloques (Custodio y Llamas, 1976). En ese aspecto, al desnivel que se produce entre ambos bloques se le conoce como el escarpe de falla, el cual a menudo tapado parcial o totalmente por material adyacente debido a la erosión y al desplazamiento asociado, puesto que algunas veces, este es el resultante de un movimiento en las tres direcciones del espacio.

La influencia que las fallas tienen sobre la deformación y el flujo de agua subterránea ha sido ampliamente discutida. Se acepta que las fallas pueden influir en el flujo de agua subterránea de tres maneras diferentes: como una barrera, como un conducto y como una compleja combinación de barrera-conducto (Hernandez-Marin y Burbey, 2009).

3.2 Subsistencia

El fenómeno de subsidencia es el hundimiento de la superficie terrestre, dicho fenómeno se refiere a movimientos verticales, el desplazamiento es principalmente hacia abajo, aunque la deformación horizontal asociada a menudo tiene efectos perjudiciales (Galloway y Burbey, 2011). Un ejemplo de dichos efectos se observa en la figura 5, donde se puede apreciar infraestructura dañada debido al efecto de la subsidencia presente en el valle de Aguascalientes.



Figura 5. Ejemplo de una vialidad dañada al sur de la ciudad de Aguascalientes, debido a los efectos del hundimiento diferencial.

Entre condiciones relacionadas con la subsidencia destacan: un sistema de estratos heterogéneos con sedimentos de origen aluvial o fluvial con bajos o medios niveles de consolidación, así como zonas con climas áridos semiáridos lo que implica que la evapotranspiración es mayor que la precipitación, son factores relacionados con la subsidencia (Burbey, 2002).

El agrietamiento y la aparición de discontinuidades en valles aluviales son el resultado de la subsidencia. Esto sucede generalmente cuando el desplazamiento vertical se da de una manera diferencial, por lo que finalmente, se ha aceptado que el agotamiento del agua subterránea es la causa principal de la aparición de estas discontinuidades (Hernández-Marín, *et al.*, 2015).

Normalmente los valles conformados por rellenos fluviales y lacustres, donde el acuífero es principalmente granular, poco consolidado y geológicamente reciente, se suele presentar subsidencia, generada en la mayoría de los casos por la extracción excesiva del recurso hídrico subterráneo (Pacheco-Martínez *et al.*, 2013; Burbey, 2002). En la mayoría de los valles sometidos a deformación superficial, el desplazamiento vertical, también conocido como hundimiento de la tierra o subsidencia, generalmente resulta de la compactación de las capas compresibles de baja permeabilidad cuando su estrés efectivo se incrementa gradualmente como resultado de la liberación lenta de agua de su poro estructura (Hernández-Marín y Burbey, 2009).

3.3 Infiltración y Humedad del suelo

“La infiltración se puede definir como el movimiento del agua a través de la superficie del suelo y hacia dentro del mismo, producido por la acción de fuerzas capilares y gravitacionales” (Aparicio, 1992). El agua precipitada sobre la superficie de la tierra queda detenida, escurre a través de ella, o bien penetra hacia el interior, de esta última fracción es cuando se dice que se ha infiltrado (Custodio y Llamas, 1976). La humedad del suelo se refiere al volumen de agua que se infiltra y que se mantiene en el suelo, antes de alcanzar el nivel freático, en el suelo deben distinguirse dos zonas:

Zona saturada. Es la zona en la cual el volumen ocupado por los poros o vacíos que existen entre los granos que componen el suelo está completamente lleno de agua.

Zona no saturada. Es la zona en la cual el volumen ocupado por los poros o vacíos existe entre los granos que componen el suelo está ocupado por agua y aire. Representa la capa del suelo comprendida entre la superficie del terreno y la superficie de un acuífero o estrato completamente saturado (Monsalves, 1999).

3.4 Nivel freático

“El nivel freático es el límite superior de la zona de saturación y un elemento muy importante del sistema de aguas subterráneas. Además, es importante para predecir la productividad de los pozos y explicar los cambios de flujo” (Tarbuk y Lutgens, 2005). La profundidad del nivel freático es muy variable y puede inclusive llegar a ser superficial hasta alcanzar decenas de metros en algunos lugares. Como es el caso en algunas zonas del valle Aguascalientes, en donde actualmente, el promedio del nivel freático es de 120 metros (Zermeño, 2016).

La superficie freática casi nunca es horizontal, generalmente tiene una forma similar al terreno superficial. Sin embargo, existen más factores que contribuyen a la irregularidad del nivel freático. Una es que el agua subterránea se desplaza muy despacio y a velocidades variables. En casos de zonas con mucha sequía, el nivel freático puede descender bastante, incluso para secar los pozos de extracción. Otros factores que afectan la forma del nivel freático son los diferentes valores de precipitación en ciertas zonas y de permeabilidad en el suelo.

3.5 Ecuación de Richards

Existe una opción alterna a la ley de Darcy, esta es la ecuación de Richards, misma que se aplica en flujo a través de medios porosos no saturados. La siguiente expresión denota dicha ecuación (1):

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{d}{dz} \left[D(\theta) \left(\frac{d\theta}{dz} \right) \right] \quad (1)$$

Donde, θ es el contenido volumétrico del agua en $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$, D es la difusividad m^2/s , z es la altura con respecto a un plano de referencia en metros y t es el tiempo en segundos.

Esta ecuación ha sido modificada para estar en función de las diferentes condiciones de humedad del suelo, y la transmisibilidad. La permeabilidad y la transmisibilidad están ligadas a las características físicas del subsuelo. Esta ecuación modificada por Van Genuchten (1980) está en función de las relaciones constitutivas (ecuación 2).

$$\theta(h) = (\theta_s - \theta_r)[1 + |\alpha h|^n]^{-m} + \theta_r \quad (2a)$$

$$k(h) = k_s \frac{[1 - |\alpha h|^{n-1} [1 + |\alpha h|^n]^{-m}]^2}{[1 + |\alpha h|^n]^{\frac{m}{2}}} \quad (2b)$$

Donde θ es el contenido de agua, h la altura de presión, θ_s y θ_r los contenidos de agua saturado y residual, respectivamente, α , n y m son parámetros empíricos de ajuste y k es la conductividad hidráulica en m/s (Van Genuchten, 1980).

Con la finalidad de facilitar la aplicación de la ecuación de Richards, diversos investigadores han trabajado en la caracterización de diferentes tipos de suelos, desarrollando curvas características donde relacionan el contenido de humedad y el potencial hidráulico (Zermeño, 2016).

3.6 Prospección Geofísica

Para el estudio detallado del subsuelo se recurre a las prospecciones geofísicas cuya utilización es eficaz y rápida. Por lo general, éstas van acompañadas de estudios geológicos y sondeos exploratorios directos.

Los métodos de prospección geofísica se caracterizan por el estudio de las variaciones en el espacio de un parámetro físico de las rocas o los suelos. Entre ellos, los que se utilizan más frecuentemente en los estudios hidrogeológicos son la prospección eléctrica o de resistividades (Murillo-Montoya, 2007). Entre los diferentes métodos eléctricos, las tomografías eléctricas son conocidos por la

sencillez de su aplicación, donde el principal objetivo es determinar la configuración estratigráfica en el subsuelo (Brunet *et al.*, 2010).

3.7 Resistividad eléctrica

Los métodos eléctricos han sido reconocidos como un método no invasivo para el estudio del subsuelo, donde sus principales aplicaciones han sido determinar espesores de suelo, profundidades del lecho rocoso, cuantificación de propiedades hidrológicas del suelo, estudios para pozos de agua subterránea (Dafonte *et al.*, 2013). La resistividad se ve afectada por factores como, la porosidad, el contenido de agua, la distribución y tamaño de las partículas, contenido de minerales, composición química del suelo, temperatura, entre otros, por lo que siempre van acompañados de estudios geológicos para una correcta interpretación. En este aspecto, se encuentra el estudio de Salas-García *et al.*, (2011), realizado sobre el área fracturada del acuífero del valle de Toluca, donde se utilizan sondeos verticales para obtener características litológicas y formar secciones hidrogeológicas para modelar flujo de contaminantes.

La resistividad eléctrica (ρ) de un material describe la dificultad que encuentra la corriente eléctrica a su paso por él. De igual manera se puede definir la conductividad (σ) como la facilidad que encuentra la corriente eléctrica al atravesar el material (IMT, 2010).

La resistividad es una de las magnitudes que varía bastante de un material a otro. En un medio homogéneo e isótropo, el valor de la resistencia en cualquier punto se considera igual. Sin embargo, el suelo es un medio heterogéneo y anisótropo, por tanto, es de esperarse que los valores de resistividad dependan de varios factores. Se pueden mencionar los siguientes:

- Naturaleza del tipo de suelo o material
- Humedad

- Temperatura
- Estratigrafía

Los suelos pueden ser buenos, regulares o malos conductores de la corriente eléctrica, por lo tanto, la resistividad de algún material puede variar en un rango muy amplio. Por ejemplo, los valores de resistividad de una roca están en función de sus minerales, de su porosidad, de la cantidad de agua que tiene, así como de la salinidad de dicha agua (IMT, 2010).

Método de prueba estándar para la medición de la resistividad del suelo usando el método de la caja de suelo con dos electrodos

Este método de ensayo cubre el equipo y procedimientos para la medición de la resistividad del suelo, para muestras extraídas del suelo, para su uso en la evaluación y control de la corrosión de estructuras enterradas. Se basa en el estándar ASTM designación G187-12a.

Los procedimientos del método de ensayo son para las mediciones de resistividad de muestras de suelo en estado saturado y en la condición tal como se recibió. Dicho suelo se introduce a una caja de acrílico cuyas dimensiones tienen que ser bien conocidas, dicha caja tiene en sus extremos dos electrodos conectados a un resistivímetro. Se aplica un voltaje a los electrodos opuestos y se mide la corriente resultante y mediante la ley de ohm revela la resistencia mediante la ecuación 3, en la cual se calcula la resistividad a partir de la resistencia y las dimensiones de la caja:

$$\rho \text{ (ohm - cm)} = AR/d \quad (3)$$

En donde ρ es la resistividad, A es el área expuesta de las caras de los electrodos en cm^2 , R es la resistencia medida en ohms y d es la distancia entre los electrodos en metros.

El proceso comienza obteniendo la cantidad necesaria de suelo en función de la cantidad de pruebas que se vayan a llevar cabo, posteriormente el suelo es limpiado manualmente de materia orgánica, se elimina también piedras pequeñas y gravas, para un caso más practica las muestras son cribadas por la malla del número 4.

Se agrega el suelo a la caja en incrementos constantes y tratando de conseguir un acomodo homogéneo de las partículas presionando suavemente con la mano, al mismo tiempo que se agrega agua destilada y desionizada para saturar el suelo, finalmente se conecta el resistímetro a los electrodos de la caja.

El método de prueba está enfocado para proporcionar una medición precisa y rápida de la resistividad del suelo para ayudar a determinar la naturaleza corrosiva de los suelos. El método está bajo la jurisdicción del comité ASTM en corrosión de metales y es responsabilidad del subcomité ASTM en corrosión de suelos.

Perfil de resistividad (tomografía eléctrica)

El perfil de resistividad es un método de exploración geofísica muy utilizado en estudios debido a su principio físico simple y a que presenta una adquisición de datos eficiente. Las mediciones de resistividad se realizan en la superficie del terreno, obteniendo resistividades aparentes, las cuales representan las variaciones de la resistividad del subsuelo, reflejando alteraciones verticales o horizontales de la resistividad del subsuelo. Esta técnica es ampliamente utilizada en aguas subterráneas, ingeniería civil e investigación. Comúnmente denominados como perfiles TER (Tomografía eléctrica resistiva).

3.8 Modelación numérica

Al momento de representar los procesos que se llevan a cabo en la naturaleza, existen algún tipo de problemas que no pueden ser resueltos analíticamente o de manera exacta y cuya solución debe ser abordada con ayuda de algún procedimiento numérico.

Un método numérico es un procedimiento mediante el cual se obtiene, casi siempre de manera aproximada, la solución de ciertos problemas realizando cálculos puramente aritméticos y lógicos. “Específicamente se trata de un procedimiento, el cual consiste en una lista finita de instrucciones que especifican una secuencia de operaciones algebraicas y lógicas, que producen una aproximación de la solución del problema” (Asmar, 1999).

3.9 Normas y lineamientos

Sobre el proceso de recarga de acuíferos existen dos normas las cuales estipulan las condiciones en que se requieren para poder llevar a cabo un proceso de recarga de acuíferos. Las cuales son muy claras en cuanto a las características que debe tener el agua que se va a captar o en su caso tratar para poder ser inyectada al acuífero. Siempre cuidando las unidades hidrogeológicas para evitar cualquier tipo de contaminación.

La primera norma que llama la atención cuando se trata de recarga de acuíferos es la Norma Oficial Mexicana NOM-014-CONAGUA-2003, “Requisitos para la recarga artificial de acuíferos con agua residual tratada”. La cual tiene como objetivo establecer los requisitos que deben cumplir: la calidad del agua, la operación y el monitoreo utilizados en los sistemas de recarga artificial de acuíferos con agua residual tratada.

Al hablar sobre calidad de agua, esta norma toma como referencia a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, “Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización”. Esta norma marca la pauta sobre la calidad del agua que está destinada para consumo humano y entre las características física, químicas y microbiológicas que marca los límites permisibles. La potabilización del agua proveniente de una fuente en particular, debe justificarse con estudios de calidad y pruebas de tratabilidad a nivel de laboratorio para asegurar su efectividad.





MARCO METODOLÓGICO

4 MARCO METODOLÓGICO

4.1 Delimitación de la zona de estudio

El criterio para la selección del área de estudio se basó en caracterizar la falla Oriente, siendo esta falla una de las representativas en el estado, ya que cruza toda la ciudad de Aguascalientes. Se pretende enfocar el estudio principalmente a la zona urbana donde cruce la falla, por lo que se propusieron dos zonas de estudio, para llevar a cabo la aplicación de las pruebas de campo. En la figura 6 se puede observar de color amarillo la zona de estudio dentro del complejo ecológico “El Caracol” y de color verde la zona de estudio dentro del parque ecológico “La Pona”.

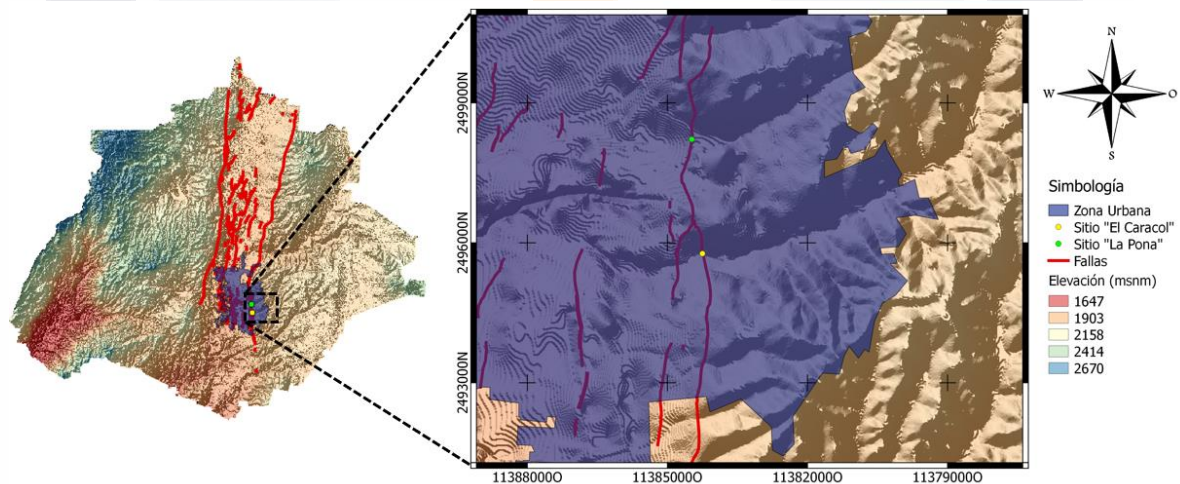


Figura 6. Ubicación de los puntos de estudio en el Estado de Aguascalientes.

Para escoger las zonas de estudio se tomaron en cuenta las condiciones de accesibilidad con la se contaba, para poder realizar las pruebas de campo sobre la misma falla. Se escogieron zonas ubicadas dentro del complejo ecológico “El Caracol” y el parque ecológico “La Pona” ya que dichas zonas se encuentran dentro de la mancha urbana y permiten implementar el arreglo dipolo-dipolo, usando el equipo IRIS – SYSCAL, para obtener un perfil de resistividad en 2 dimensiones.

La primera zona se localiza en el desarrollo especial Parque Ecológico “El Caracol”, con coordenadas 782545E, 2420732N y se muestra en la figura 7.



Figura 7. Fotografía de la zona estudio ubicada en el parque ecológico "El caracol".

La segunda zona es la que encuentra hacia el centro de la ciudad y está dentro del desarrollo especial Parque “La Pona” con coordenadas 782237E, 2423058N (figura 8). En dicha zona, se puede apreciar cómo es que en la falla se encuentra activa, ya que en dirección norte del punto de estudio se pueden observar infraestructura dañada sobre una vialidad y el muro perimetral de un fraccionamiento de reciente creación.



Figura 8. Fotografía de la zona estudio ubicada en el Parque ecológico "La Pona."

En las zonas se cumple con el aspecto de accesibilidad, debido a daños a la infraestructura aledaña se infiere que están activas, y a excepción de la porción de la falla Oriente que se encuentra dentro del desarrollo especial Parque Ecológico "El Caracol", todas cuenta con una separación considerable entre el techo y el muro, así como una profundidad no despreciable, dichas condiciones son más apreciables al norte y al sur de la ciudad.

4.2 Aplicación de métodos geofísicos

Se pretendía caracterizar mediante la aplicación de método geofísico, la estructura de un suelo fracturado por una falla superficial normal activa, y de esta manera, proporcionar parámetros para la realización posterior de modelos que simulen el flujo de agua a través de dichas discontinuidades. El método implementado fue la tomografía eléctrica resistiva (TER), la cual, es empleada para conocer cómo varían las resistividades aparentes en el subsuelo, a partir de unos perfiles bidimensionales.

El equipo utilizado fue el IRIS – SYSCAL, con el que se implementó el arreglo dipolo-dipolo, el cual arroja un perfil de las resistividades del subsuelo en dos dimensiones,

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

y con el cual, se realizaron dos mediciones por porción de falla, en la primera se realizó el arreglo con un tendido de 24 electrodos con una separación de 10 metros entre ellos, localizado en una línea de superficie perpendicular a la falla, y tratando que esta se encuentre al centro del tendido. Con dicho arreglo se obtuvo un perfil con información hasta una profundidad de 45 metros aproximadamente. El segundo arreglo consistió en un tendido con 24 electrodos, solo que con una separación entre electrodos de 2.50 metros, colocado de igual manera, en una línea de superficie perpendicular a la falla y con ésta al centro del tendido. Este arreglo arrojó un perfil de dos dimensiones con una profundidad aproximada de 12.5 metros, pero con una resolución mayor de los primeros estratos.

Posteriormente Los datos obtenidos se procesaron con el software de interpretación bidimensional de tomografía eléctrica RES2DINV, finalmente se graficaron con el software Surfer.

4.3 Pruebas de laboratorio

Se aplicaron pruebas controladas de resistividad sobre suelos seleccionados, la cual sirvió como apoyo a las interpretaciones hechas sobre las pruebas de prospección geofísica realizadas en campo, con el fin de que el análisis estratigráfico fuera más preciso. Este método de prueba estándar para la medición de la resistividad del suelo se realizó usando el método de la caja de suelo con dos electrodos, como se muestra en la figura 9.



Figura 9. Método de prueba estándar para la medición de la resistividad del suelo, usando el método de caja de suelo con dos electrodos. La imagen de esta figura muestra el suelo dentro de la caja y los electrodos conectados a ambos extremos de la caja.

Para evaluar la resistividad de suelos en el laboratorio mediante esta técnica se siguió el procedimiento estandarizado de prueba ASTM G 187, el cual indica que debe colocarse la muestra de material dentro de una caja rectangular de acrílico, la cual tiene conectados en los extremos los electrodos de corriente por medio de los cuales se induce y se recibe corriente eléctrica desde una fuente de poder o batería. La figura 10 muestra el procedimiento de humedecimiento del suelo a probar en la caja.

De esta manera se midió la resistencia del suelo que se colocó dentro de la caja, el cual fue saturado en diferentes porcentajes, en función del contenido de humedad, y finalmente se compactó manualmente.



Figura 10. Saturación de suelo seleccionado, para obtener diferentes contenidos de humedad.

Para realizar la caracterización geotécnica se realizaron varias pruebas de laboratorio, con el fin de identificar el tipo de suelo que está presente en las zonas de estudio. Las pruebas que se llevaron a cabo para caracterizar el material adyacente a las discontinuidades fueron:

a) *Determinación del contenido de humedad del suelo*, que es la relación, entre el peso del agua contenida en una muestra del suelo y el peso de su fracción sólida. En este caso, se consideró que el peso del agua de la masa del suelo es la diferencia entre el peso inicial de la muestra de suelo y el que resultó después de haber secado al horno después de 24 horas.

b) *Determinación del peso específico relativo de sólidos del suelo (Densidad de Sólidos)*, definido como la relación adimensional entre el peso de los sólidos de un suelo, dividido entre el producto del volumen de los sólidos de este y el peso específico del agua (figura 11).



Figura 11. Aplicando bomba de vacío para determinar el peso específico relativo de salidos del suelo.

c) *Determinación de la composición granulométrica del suelo mediante el uso de mallas.* Esta prueba consistió en separar por tamaños las partículas de un suelo, pasándolo a través de una sucesión de mallas y posteriormente pesar las porciones retenidas en cada una de ellas, expresando dichos retenidos como porcentajes en peso de la muestra total.

4.4 Elaboración de modelos

Con la información recopilada en la prospección geofísica, la cual se interpreto con ayuda de las pruebas de laboratorio, se determinaron los modelos conceptuales que delimitan las condiciones geométricas de las simulaciones; mientras que los parámetros hidráulicos que solicita el software para correr las simulaciones se extrajeron de la literatura, tomando valores de suelos similares a los encontrados en las zona de estudio y que las pruebas de laboratorio ayudaron a caracterizar.

En cuanto a la geometria de las simulaciones, el ancho de la zona de falla fue la variable que cambio de un modelo a otro, el primero, mas conservador con un ancho

de 10 metros suponiendo que la conductividad hidráulica asociada a esta zona se limita únicamente a los espacios vacíos interconectados por las fisuras y fracturamientos que podemos apreciar en la superficie, los cuales se ubican en los primeros metros aledaños a la falla; el siguiente modelo no tan conservador se llevó a cabo con un ancho de falla de 20 metros, dicho valor se determinó ya que en los perfiles TER se aprecia una zona de falla con un ancho superior a los 10 metros, el cual se corrobora con el ancho de falla delimitado por Burbey (2009).

En cuanto a los parámetros hidráulicos el único que varió de una simulación a otra fue la conductividad hidráulica asociada a la zona de falla, ya que se tomaron de la literatura, de una falla presente en el valle de Querétaro (Ochoa-González et al., 2015) y de una falla presente en el valle de las Vegas (Martín Hernández-Marín y Burbey, 2009), valles con problemas similares al valle de Aguascalientes.

El programa utilizado fue *Comsol Multiphysics*, el cual contiene el módulo *Subsurface Flow* mismo que está enfocado al modelado de flujo en medios porosos no saturados, y que está desarrollado para trabajar con la física de las ecuaciones de Richards las cuales son las que se planean utilizar para el desarrollo de los modelos numéricos en este trabajo de investigación.

Posterior al desarrollo de múltiples simulaciones numéricas, se analizaron los resultados obtenidos en cada modelo numérico para evaluar cada uno de los escenarios planteados y poder desarrollar un pronóstico enfocado a las propiedades hidráulicas en las fracturas tipo estudiadas en el valle de Aguascalientes y su relación con la recarga natural del manto acuífero propio del valle.



5 RESULTADOS

A continuación, se muestran los resultados obtenidos para entender mejor el comportamiento hidráulico de la falla oriente. Primeramente, la caracterización del material extraído de la porción de la Falla Oriente ubicada dentro del parque desarrollo ecológico “La Pona”, localizado dentro de la zona urbana de la Ciudad de Aguascalientes.

5.1 Contenido de humedad

Primero se determinó el contenido de humedad del suelo, para lo cual se realizaron un total de 6 pruebas con muestras recolectadas sobre el plano de falla, a una profundidad de 1 metro, de donde se obtuvo un promedio de 2.43 % de contenido de humedad.

5.2 Composición granulométrica

De igual manera se llevó a cabo la determinación de la composición granulométrica del suelo mediante el uso de mallas. Donde se puede observar que se trata principalmente de gravas y de donde se obtuvo la curva granulométrica mostrada en la figura 12. Al realizar la granulometría, basada en el manual M-MMP-1-06, se obtiene la siguiente distribución del material con respecto a su tamaño de partícula. La tabla 1 muestra los datos generales determinado durante este procedimiento, mientras que los siguientes datos algunos datos de la prueba.

Peso total de la muestra = 3.035 kg

Fracción retenida en la malla N° 4 = 1.7403 Kg

Fracción que pasa la malla N° 4 = 1.292 Kg

Tabla 1. Distribución de material por tamaño de partícula.

	Malla	Abertura (mm)	Peso Retenido (kg)	% Retenido Parcial	% Retenido Acumulado	% Que Pasa
Gravas	2"	50.000	0	0.00%	0.00%	100.00%
	1 1/2"	37.500	0	0.00%	0.00%	100.00%
	1"	25.000	0.487	16.05%	16.05%	83.95%
	3/4"	19.000	0.169	5.57%	21.61%	78.39%
	1/2"	12.500	0.297	9.79%	31.40%	68.60%
	3/8"	9.500	0.247	8.14%	39.54%	60.46%
	4	4.750	0.543	17.89%	57.43%	42.57%
Arenas	10	2.000	0.407	13.41%	70.84%	29.16%
	20	0.850	0.085	2.80%	73.64%	26.36%
	40	0.425	0.27	8.90%	82.54%	17.46%
	60	0.250	0.241	7.94%	90.48%	9.52%
	100	0.150	0.148	4.88%	95.35%	4.65%
	200	0.075	0.129	4.25%	99.60%	0.40%
Finos	Charola		0.012	0.40%	100.00%	0.00%
Σ			3.035	100.00%		

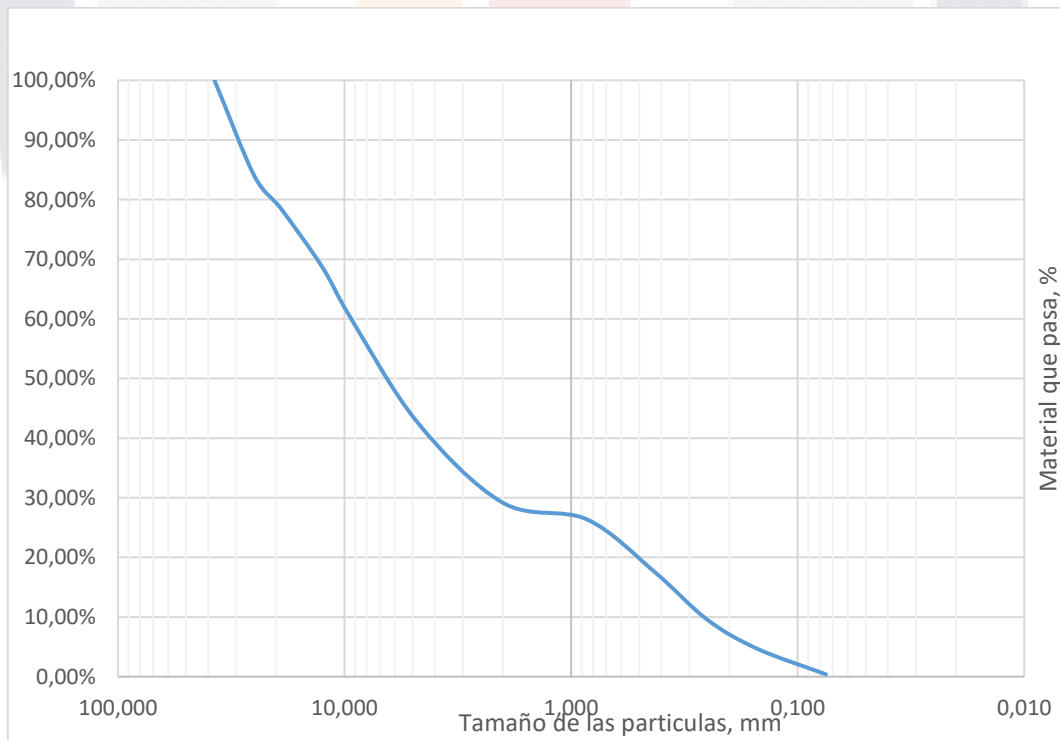


Figura 12. Curva granulométrica.

Se prosiguió a calcular el coeficiente de uniformidad C_u y de curvatura C_c , para determinar el tipo de suelo, para ello se requirió encontrar el tamaño de la partícula en donde se encuentra el 10%, 30% y 60% del material que pasa entre las mallas, llamados D_{10} , D_{30} y D_{60} respectivamente. Estos últimos términos se obtienen de la curva granulométrica.

$$D_{10} = 0.26 \quad D_{30} = 2 \quad D_{60} = 9$$

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} = \frac{9}{0.26} = 34.62$$

$$C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}} = \frac{2^2}{0.26 \times 9} = 1.71$$

Clasificando el suelo, se obtiene como resultado que se trata de una grava bien graduada con las siguientes características granulométricas del suelo: más del 50% del peso del suelo (57.43%) se retiene en la malla N° 4, menos del 5% en masa pasa la malla N° 200, su coeficiente de uniformidad es mayor a 4 (34.62) y su coeficiente de curvatura se encuentra entre 1 y 3 (1.71).

5.3 Densidad de suelos

También se realizó la prueba para determinar el peso específico relativo de sólidos del suelo también conocida como densidad de solidos. En este caso se obtuvieron de dos mediciones, resultando de 2.49 y de la otra 2.46, obteniendo un promedio de 2.475.

5.4 Resistividad vs. contenido de humedad

Los datos de resistividad en función de la humedad en campo y en laboratorio arrojaron resultados variados: Dentro del trabajo de laboratorio, mediante una

primera experimentación de un grupo de 5 muestras de 500 gr cada una, a las cuales se les agregaron diferentes cantidades de agua, los resultados se muestran en la siguiente tabla y su gráfica en la figura 13.

Tabla 2. Resistividad de la muestra de suelo en función del contenido de humedad.

Resistencia (Kilo ohms)	Resistencia (ohms)	Resistividad (ohm-m)	contenido de Humedad (%)
4,28	4280	24,47404877	38,27%
5,57	5570	31,85057281	30,24%
9,64	9640	55,12379208	25,02%
24,53	24530	140,2683216	18,04%
45,84	45840	262,1239242	13,31%

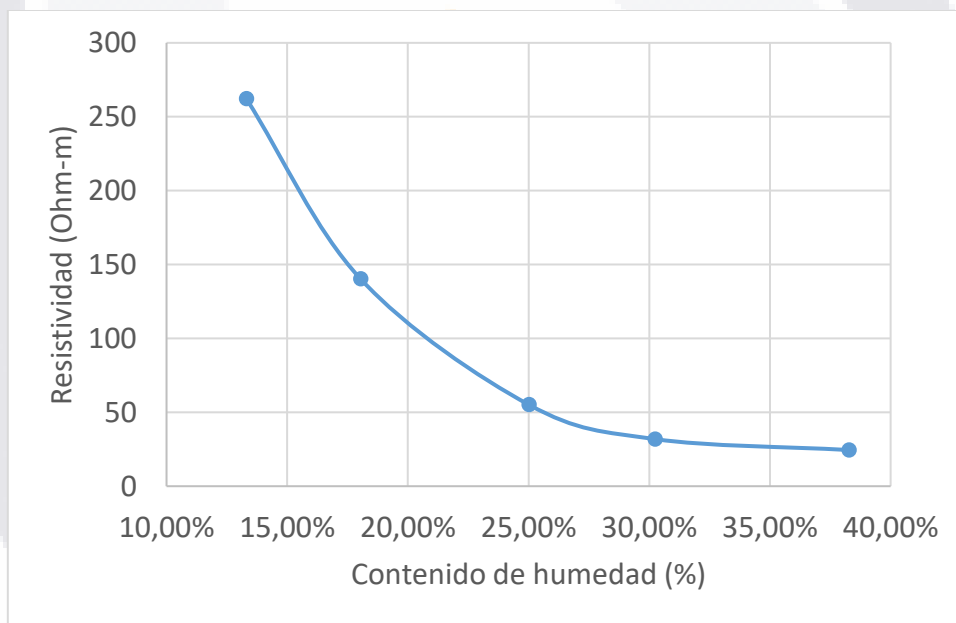


Figura 13. Gráfica de contenido de humedad vs. resistividad.

5.5 Resistividad vs. Porcentaje de sal en solución de agua

El agua destilada no es tan conductividad como se podría pensar, la presencia de minerales y sales en ella es la que la convierte en un conductor de corriente eléctrica. Por lo que la presencia de sales tiene mucha influencia en la calidad de suelo.

Se realizó un experimento de agregar sal común (cloruro de sodio) al agua que humedeció a las muestras mientras se medía la resistividad mediante la caja de suelos. Particularmente la presencia de sal común en los suelos es una variable que afecta directamente cuando se trabaja con resistividad, así que se llevó a cabo la aplicación del método de prueba estándar para la medición de la resistividad del suelo usando el método de la caja de suelo con dos electrodos, agregando diferentes porciones de cloruro de sodio a un agua carente de este, obteniendo los datos mostrados en la tabla 3 y figura 14.

Tabla 3. Resistividad de la muestra de suelo en función porcentajes de salinidad. El contenido de salinidad (cloruro de sodio) representa el peso de sal con respecto al peso de agua agregada al suelo.

Resistencia (Kilo ohms)	Resistencia (ohms)	Resistividad (ohm-m)	Porcentaje de sal en solución con agua (%)	Temperatura (°C)
5,43	5430	31,05001981	0,00%	22
0,18	180	1,029282425	4,00%	22
0,11	110	0,629005926	8,00%	21
0,09	90	0,514641212	12,00%	21
0,07	70	0,400276499	16,00%	23
0,07	70	0,400276499	20,00%	23
0,06	60	0,343094142	24,00%	23

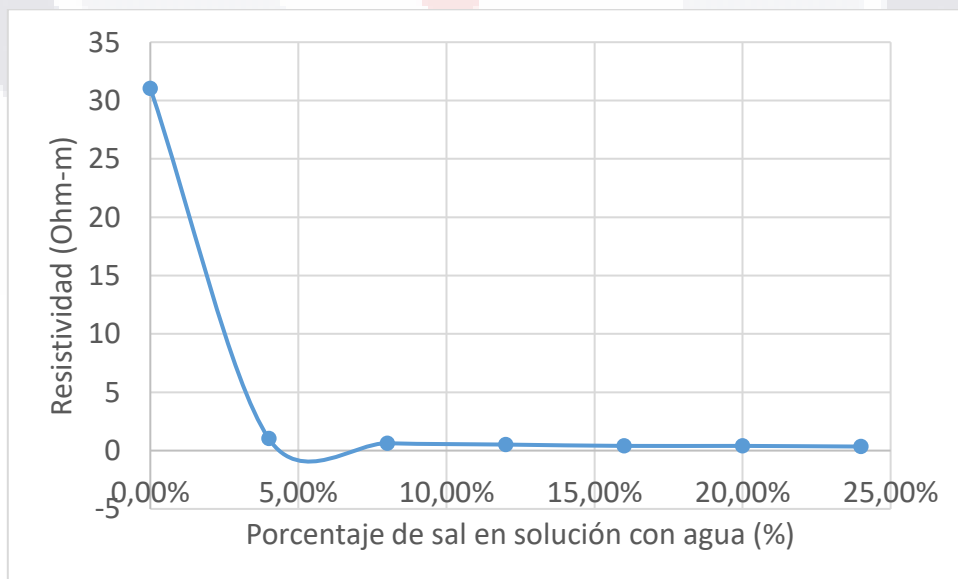


Figura 14. Porcentaje de sal en solución con agua vs. resistividad.

5.6 Perfiles de resistividad

A continuación, se muestran los perfiles realizados en los dos puntos o porciones de la falla Oriente. Los primeros dos se obtuvieron de la primera zona de estudio que se localiza dentro del desarrollo especial Parque Ecológico “El Caracol” (figura 15). Como se mencionó anteriormente, un perfil se obtuvo a partir de un arreglo dipolo-dipolo con separaciones entre electrodos a cada 10 metros, lo que nos dio una longitud total de 240 metros, ubicándose la falla al centro, quedando 12 electrodos hacia el lado Este y los otros 12 hacia el lado Oeste (figuras 18 y 19).

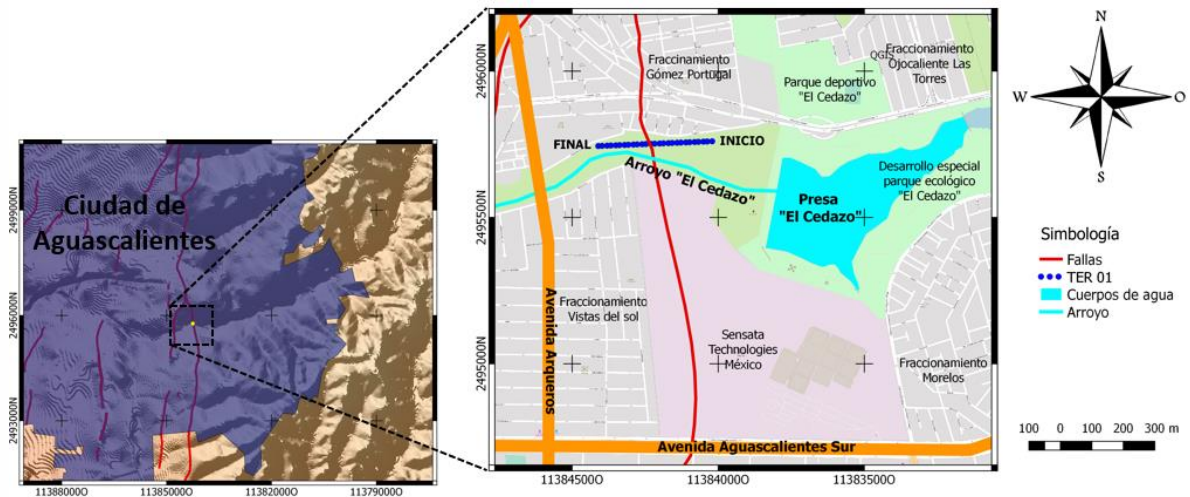


Figura 15. Ubicación del perfil en planta, zona “El Caracol”.

En la figura 16 se puede observar el primer perfil de resistividad, los cuales se denominarán tomografías electricas de resistividad el cual se realizó con un arreglo dipolo-dipolo con espacio entre electrodos de 10 metros alcanzando asi una profundidad de 45 metros aproximadamente y se obtuvo un porcentaje de error de 17.2 %, despues de haberlo sometido a una ajuste de datos automatico con el apoyo de software Prosys II. Los valores de resistividad que se obtuvieron abarcaron desde 2.44 ohm/m hasta poco mas de 289.5 ohmXm.

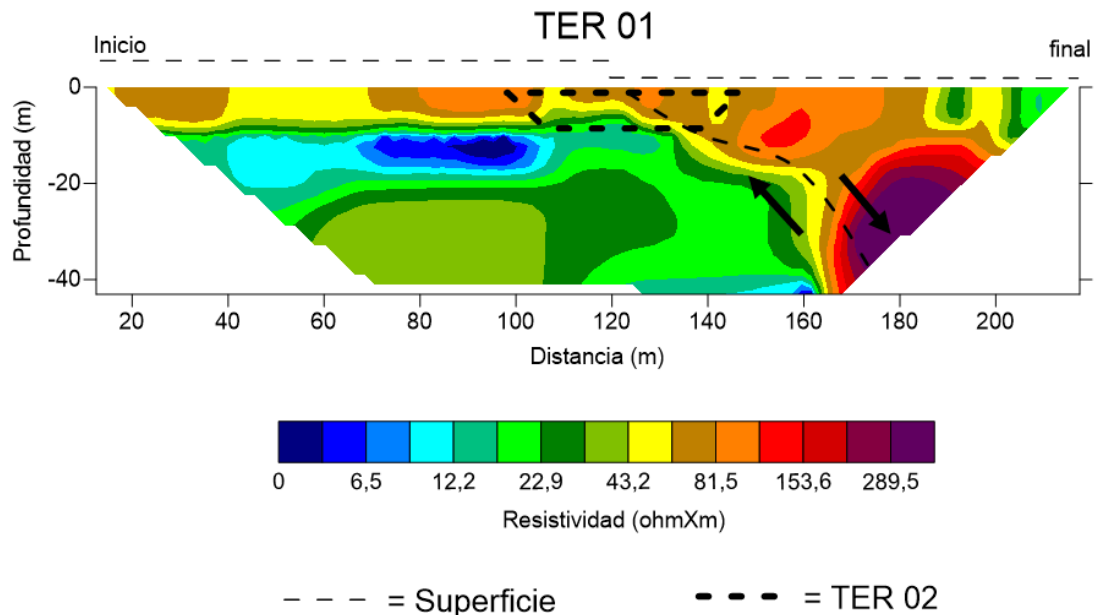


Figura 16. Perfil de tomografía eléctrica resistiva del sitio “El Caracol”, electrodos colocados a cada 10 metros. La ubiccion y orientación del perfil se observa en la figura 15.

El siguiente perfil (figura 17) se obtuvo también a partir de un arreglo dipolo-dipolo, ahora la separación entre electrodos fue 2.5 metros, lo que nos dió una longitud total de 60 metros, ubicando la falla al centro, quedando 12 electrodos hacia el lado Este y los otros 12 hacia el lado Oeste. Lo que nos muestra un perfil similar al anterior solo que este cuenta con una profundidad menor, de 12.5 metros aprox., lo que permiten obtener una resolución mas precisa sobre los puntos que toma el equipo.

Podemos ver que los rangos de la resistividad permanecen muy cercanos a los del primer perfil. Podemos ver mas claro el plano de falla en color amarillo con valores de resistividad cerca de los 153.6 hasta 289.5 ohmXm.

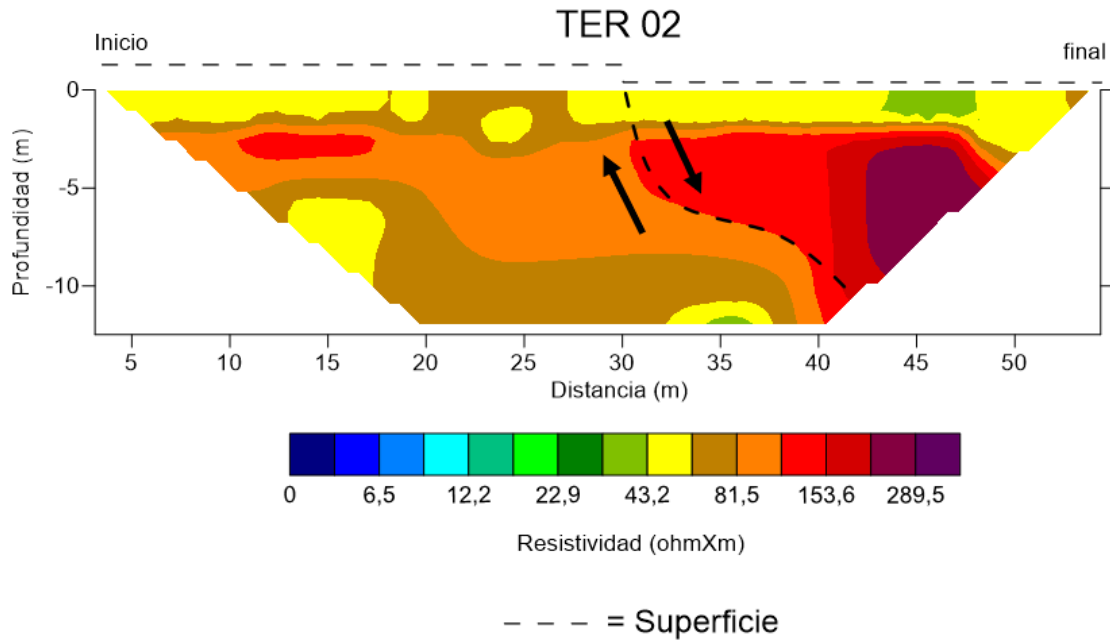


Figura 17. Perfil de tomografía eléctrica resistiva del sitio “El Caracol”, electrodos colocados a cada 2.50 metros. Comparte la ubiccion y la orientación del TER 01

Los siguientes dos perfiles se realizaron en un segundo punto de la Falla Oriente que encuentra hacia el centro de la ciudad y está dentro del desarrollo especial Parque “La Pona” (figura 18). Dadas las condiciones los perfiles que se realizaron esta vez fue con el mismo arreglo dipolo-dipolo solo que con una separación entre electrodos a cada 5 y 2.5 metros.

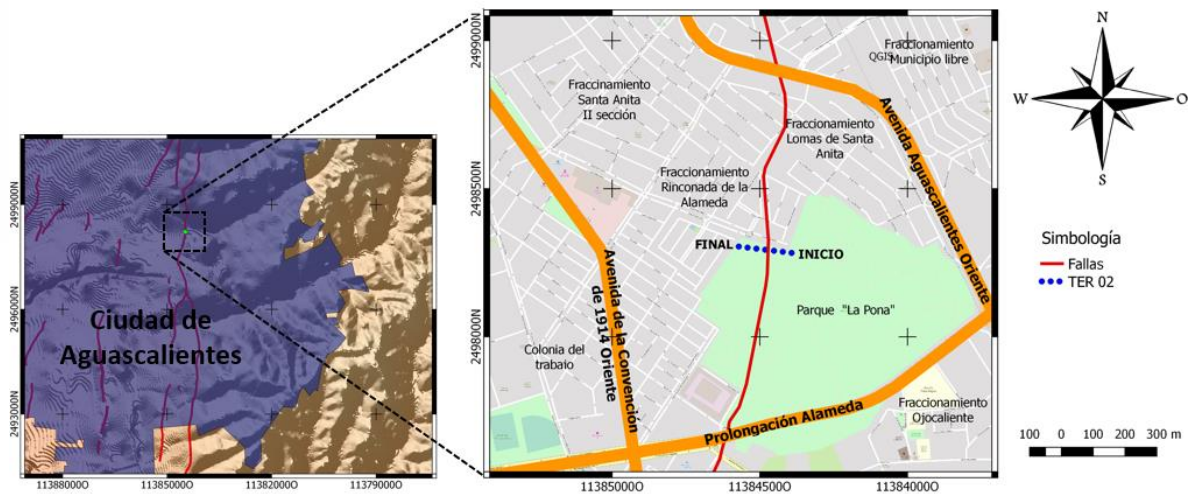


Figura 18. Ubicación del perfil en planta, zona “La Pona”.

En la figura 18 se puede observar en planta el acomodo del levantamiento que se llevó a cabo para obtener el perfil de tomografía eléctrica de resistividad que se muestra en la figura 19, para este caso dadas las condiciones del sitio los electrodos se colocaron a cada 5 metros, con lo que obtuvo una profundidad de poco más de 23 metros con una longitud de 100 metros. Ahora los valores de resistividad rondan entre 0 ohmXm y 162.5 ohmXm.

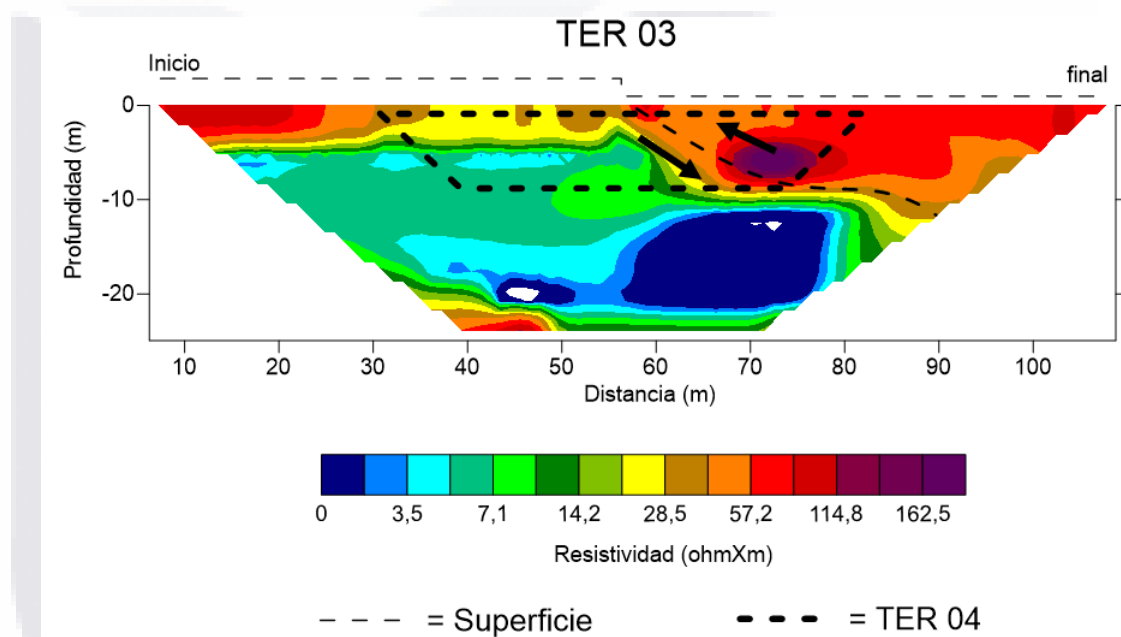


Figura 19. Perfil de tomografía eléctrica resistiva del sitio “L a Pona”, electrodos colocados a cada 5 metros. La ubicación y orientación del perfil se observan en la figura 18.

Finalmente, el último perfil levantado en este mismo punto cuenta con una separación entre electrodos de 2.5 metros con 16 niveles obteniendo un perfil que cuenta con 13 metros de profundidad aproximadamente. Se puede observar en la figura 20 que cuenta con una zona con valor de resistividad de 0 ohmXm. Dicha zona comienza justo donde se ubica la falla, lo cual nos podría indicar la presencia de humedad en esa zona, cabe señalar que paralelo al perfil se encontraba un pozo de visita hidrosanitario (Figura 21), por lo que esos valores tan bajos podrían estar relacionados con una fuga de aguas negras y grises en la tubería de saneamiento dañada por la falla. Esta zona también se aprecia en el perfil anterior (figura 19).

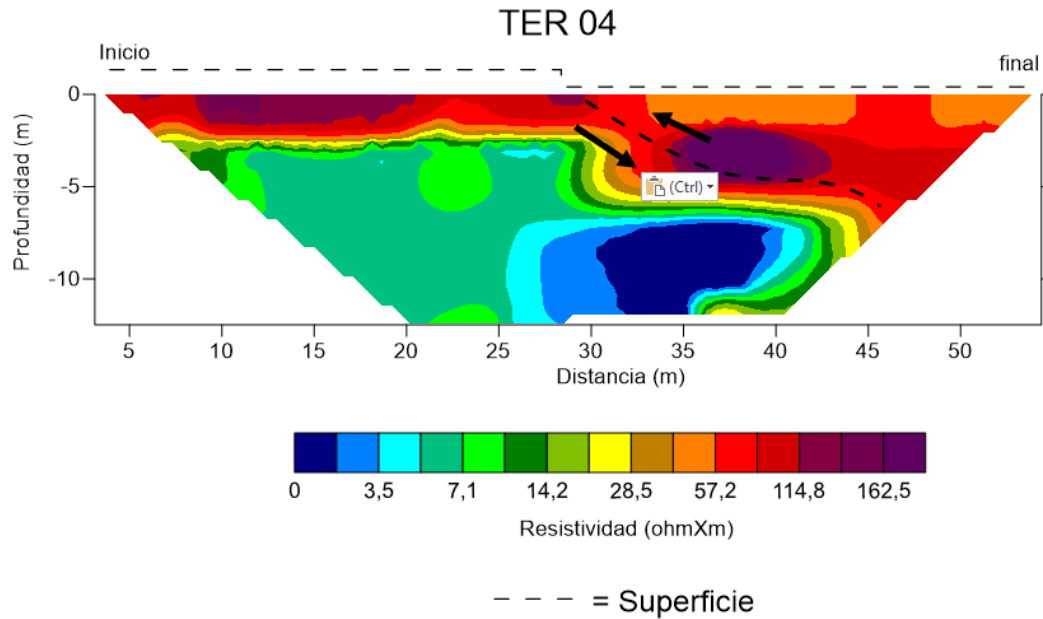


Figura 20. Perfil de tomografía eléctrica resistiva del sitio “La Pona”, electrodos colocados a cada 2.50 metros. Comparte la ubicación y la orientación del TER 03.



Figura 21. Fotografía del pozo de visita ubicado en la zona del sitio donde se levantaron los perfiles de las TER 03 Y 04.

5.7 Resultados modelo conceptual

Los resultados de los modelos conceptuales se muestran en las figuras 22, 23 y 24. Los primeros dos modelos son los que se interpretaron a partir del perfil de resistividad levantado en la zona de “El Caracol”. El primer modelo (figura 22) cuenta con una zona de falla de 10 metros de ancho, ya que para realizar las simulaciones se consideraron los primeros tres escenarios con un interpretación mas conservadora en la que la zona de falla propuesta esta mas relacionada con las afectaciones, las fracturas y fisuramientos asi como el escarpe observados en la superficie.

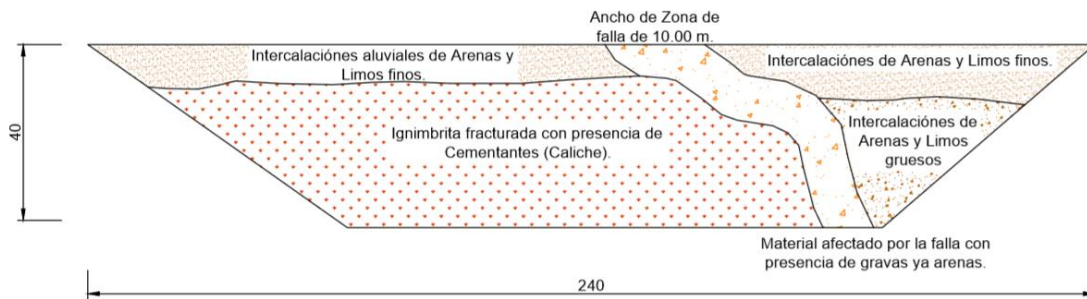


Figura 22. Modelo conceptual en el sitio “El Caracol”, con un ancho de zona de falla propuesto de 10 metros

El siguiente modelo es una segunda propuesta del sitio “El Caracol”, ya que en el perfil TER se muestra una zona resistiva alta con un ancho mayor a los 10 metros, por lo que se propuso un ancho de falla de 20 metros (figura 23), lo que nos permite observar una zona de falla similar a la del perfil y que concuerda con valores revisados en trabajos previos, en particular con el de Burbey (2009). Y lo que nos permitirá elaborar tres escenarios mas y ver como varía el tiempo de transito al aumentar en 10 metros la zona de falla con respecto a las simulaciones que se realicen con el primer modelo (figura 22).

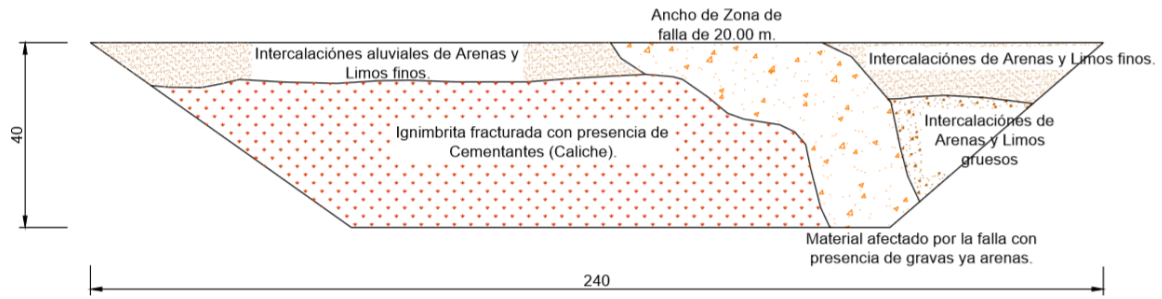


Figura 23. Modelo coneptual en el sitio “El Caracol”, con un ancho de zona de falla propuesto de 20 metros.

Finalmente el ultimo modelo (figura 24), es el propuesto a partir de la interpretación del perfil de resitividad levantado en el sitio de “La Pona”. En el cual podemos observar que tenemos los mismo estratos observados en el sitio de “El Caracol”, solo que a una menor profundidad ya que las circunstancias del sitio no permitieron levantar un perfil con mayor profundidad.

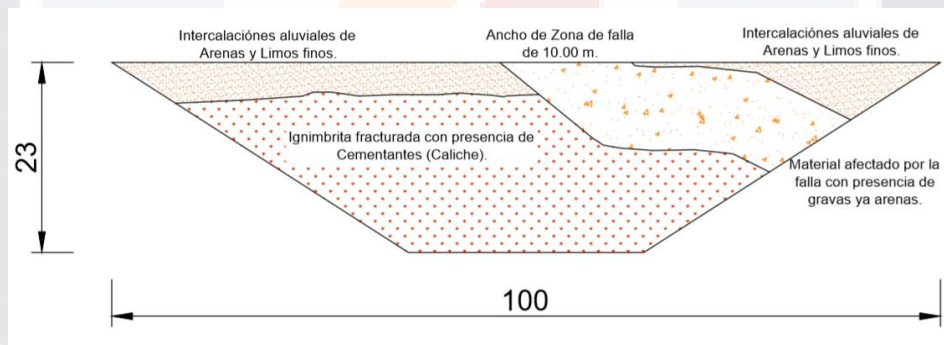


Figura 24. Modelo coneptual en el sitio “La Pona”, con un ancho de zona de falla propuesto de 20 metros.

5.8 Resultados simulación numérica

A continuación, se muestran los resultados de las simulaciones, en donde se obtuvo el valor de los tiempos de tránsito a través de la zona de falla. Para lo cual se propusieron dos zonas de falla como se describió en la metodología, la primera conservadora de 10.00 metros debido a las fisuras y fracturamientos que podemos apreciar en la superficie los cuales se ubican en los primeros metros aledaños a la falla y para los casos de este trabajo se asocia al núcleo de falla y otra de 20.00 metros de ancho dicho valor se determinó ya que en los perfiles TER se aprecia una zona de falla con un ancho superior a los 10 metros, por lo que se toma el ancho de falla encontrado en la literatura, delimitado por Burbey (2009) y en este caso se asocia a la zona de falla, no solo al núcleo, en el caso de las conductividades hidráulicas asociadas a dicha zona se extrajeron de la literatura estudiada, principalmente de fallas estudiadas en el valle de Querétaro, (Ochoa-González *et al.*, 2015) y de las Vegas, Nevada, EUA (Burbey, 2009).

Para parámetros de retención de agua de van Genuchten insaturada se tomaron de suelos estudiados en la ciudad de Aguascalientes caracterizados por Zermeño (2016), y que presentan características similares a los sitios caracterizados en este trabajo, exclusivamente para el caso de los estratos compuestos principalmente por las arenas y limos descritos en el modelo conceptual.

Para la ignimbrita y la zona de falla los parámetros para curva de retención de Van Genuchten (1980) se tomaron de los datos de Simunek, *et al.*, (2013) quienes describen parámetros obtenidos mediante simulaciones para la matriz de una roca y para zonas fracturadas.

Se simuló un total de 6 escenarios para la geometría propuesta para la zona de estudio "El Caracol". Las primeras tres con una zona de falla constante de 10.00 metros de ancho, debido a que se consideró un ancho de falla conservador asociado al núcleo de falla, considerando un valor de 10 metros alrededor de la falla, y

variando los valores de conductividad hidráulica a cada simulación, los primeros dos determinados por (Ochoa-González *et al.*, 2015) y uno por (Burbey, 2009), mientras que el segundo grupo de tres escenarios simularon una zona de falla de 20.00 metros de ancho, dicho ancho se determino de este valor ya que en los perfiles TER se observaron valores de resistividad altos relacionado con zonas de falla y fracturamiento en una zona mayor a los 10 metros propuestos en los primero tres escenarios, por lo que estas simulaciones contienen una ancho de falla sin asociarlo al núcleo de falla sino a la zona de falla observada en los perfiles TER, por lo que se propuso un ancho de falla mayor y que concordara con los encontrados en la literatura, en especifico con los obtenidos por (Burbey, 2009). De igual manera se prosiguió, variando la conductividad hidráulica de dicha zona de falla con los valores de (Ochoa-González *et al.*, 2015) y uno por (Burbey, 2009). En la tabla 4 se muestran las características de ancho de falla y conductividad hidráulica de la misma para cada escenario simulado en el sitio de “El Caracol”.

Tabla 4. Valores de conductividad hidráulica y ancho de falla utilizados en los diferentes escenarios.

	Conductividad hidráulica (m/s)	Ancho de falla (m)
Escenario 1	4,90E-04	10
Escenario 2	5,00E-05	10
Escenario 3	6,00E-06	10
Escenario 4	4,90E-04	20
Escenario 5	5,00E-05	20
Escenario 6	6,00E-06	20

En todas las simulaciones se colocó una carga hidráulica de 44 mm en la superficie, que es el promedio normal de precipitación en Aguascalientes. Dicho dato se tomó como la carga hidráulica en el modelo.

A continuación, se muestran las simulaciones de los diferentes escenarios, en los cuales se anotó el tiempo en que la saturación alcanza la parte más baja del modelo, además de una gráfica donde se evalúan los puntos dentro de la zona de falla a cada 5.00 metros y por lo tanto, se muestra el tiempo en que se logra la saturación efectiva en dicho punto. A partir de esa gráfica, se genera la función de tendencia lineal que describe la relación entre el tiempo en que se logra la saturación efectiva total y la distancia vertical, para así, poder determinar el tiempo de transito hasta el nivel estático para cada una de las condiciones, asumiendo que las condiciones debajo del área simulada son similares a las que se están simulando. La figura 25 muestra el resultado de simulación del escenario 1, en el cual, se necesitan 109 días para que el frente de humedad alcance los 40 metros que es el la mayor profundidad del modelo.

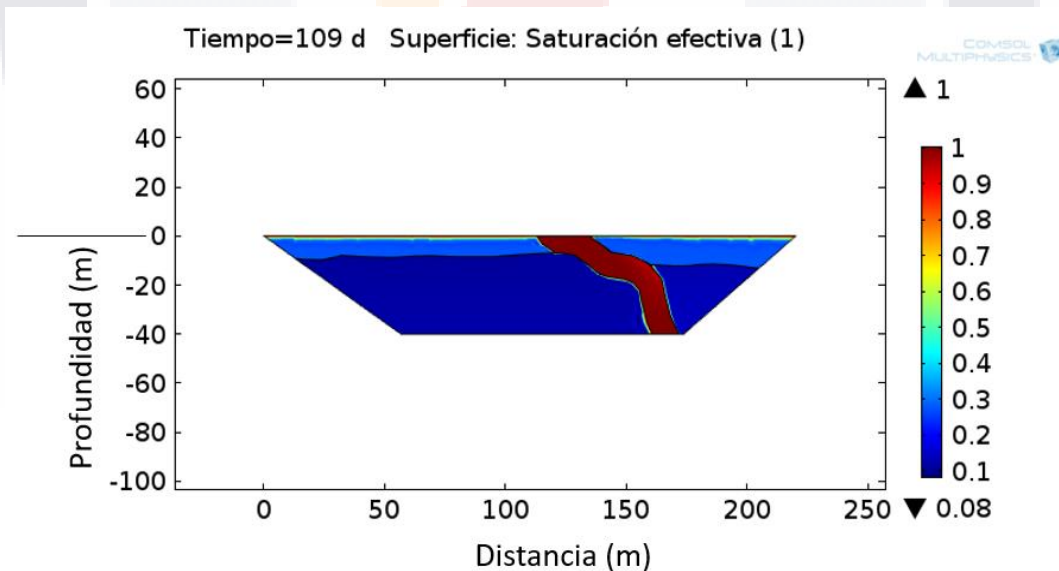


Figura 25. Simulación de flujo a través de la zona de falla de 10.00 metros con valor de conductividad hidráulica vertical de $4.9E-04$ m/s (escenario 1) La escala de colores muestra el grado de saturación efectiva la cual carece de unidades, o en otras palabras es adimensional donde el 1 representa el 100% de saturación en este caso representado por el color rojo.

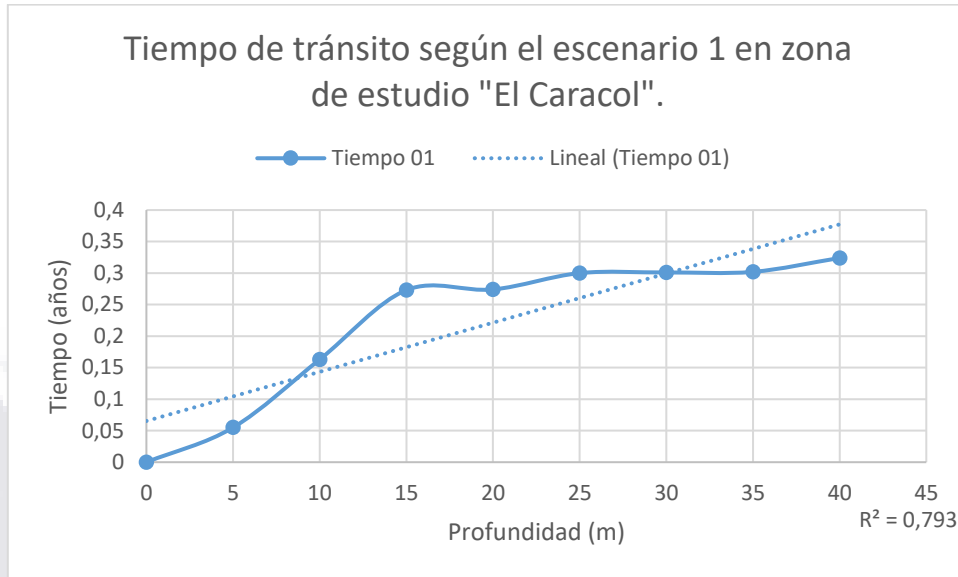


Figura 26. Valores del tiempo de tránsito dentro de la zona de falla para el escenario 1. La línea punteada azul es la gráfica de la función lineal.

La ecuación obtenida a partir del gráfico de la figura 26 muestra que la función lineal se ajusta a $t = 0.0078 * P + 0.0653$. Si se sabe que el nivel estático en la zona de estudio se encuentra hasta aproximadamente los 250 metros entonces aplicando esa ecuación hasta esa profundidad, el tiempo de tránsito sería de 2.05 años.

La figura 27 muestra el resultado de simulación del escenario 2, el cual tiene la misma geometría que el primero pero con diferente valor de conductividad hidráulica. En este caso, son necesarios 912 días para el tiempo de tránsito de agua a través de la zona de influencia de la falla. En la figura 28 se obtiene la función lineal $t = 0.064 * P + 0.3122$, mediante la cual el tiempo estimado para que se alcance el nivel freático sería de 16.31 años

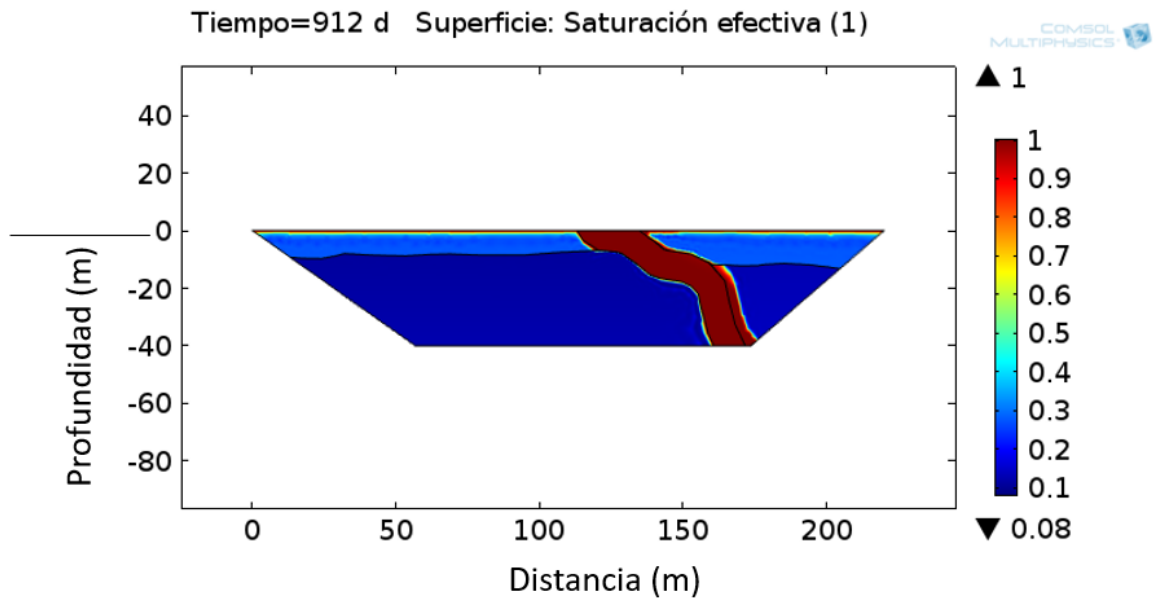


Figura 27. Simulación de flujo a través de la zona de falla de 10.00 metros con valor de conductividad hidráulica vertical de $5.0E-4$ m/s. La escala de colores muestra el grado de saturación efectiva la cual carece de unidades, o en otras palabras es adimensional donde el 1 representa el 100% de saturacion en este caso representado por el color rojo.

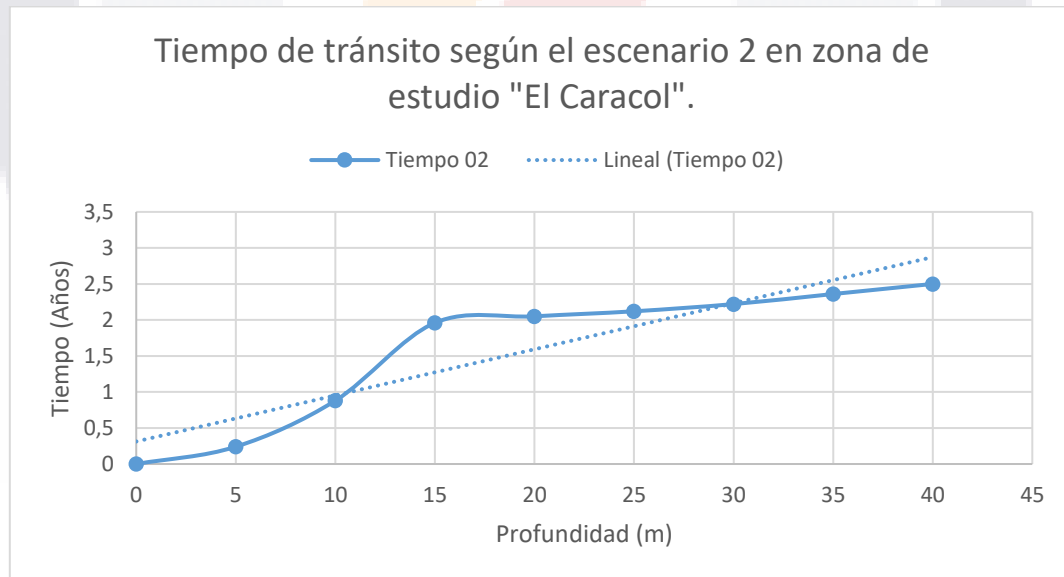


Figura 28. Valores del tiempo de transito dentro de la zona de falla para el escenario 2. La línea punteada azul es la gráfica de la función lineal.

Por su parte, la figura 29 muestra el resultado de la simulación para el escenario 3, en el cual se puede apreciar incluso que la lámina de agua de la superficie alcanza

a humedecer algunos metros de profundidad en la zona no influenciada por la falla. En este caso, el tiempo que toma al frente de humedad alcanzar la base es de 9385 días. Mientras que, con base en la gráfica de la figura 30, que arrojó la funciónlineal $t = 0.7405 * P - 0.9132$, indica que se necesitan 184.5 años para que el agua alcance el nivel freático.

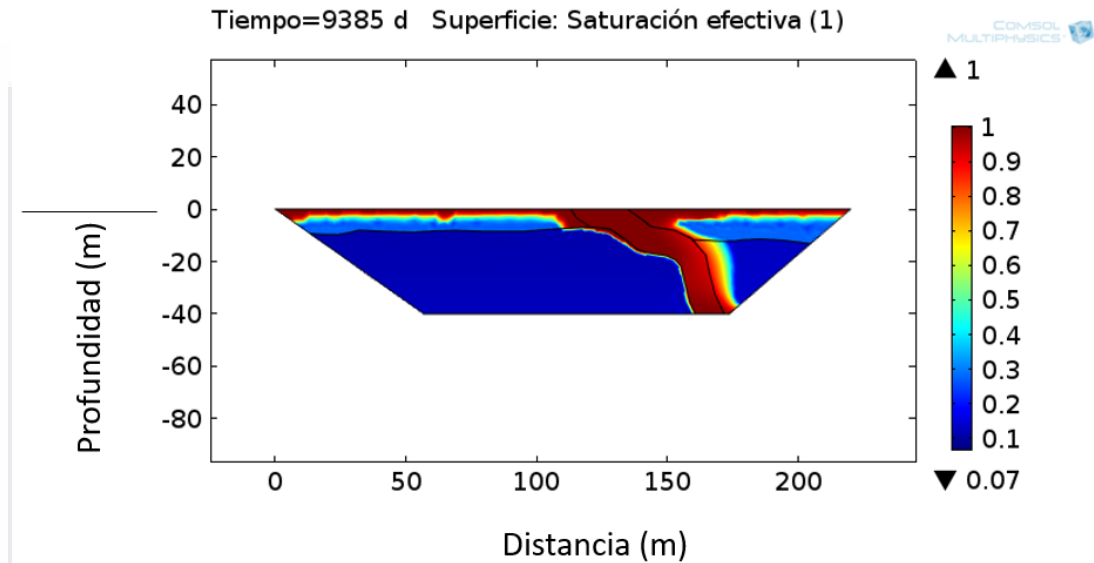


Figura 29. Simulación de flujo a través de la zona de falla de 10.00 metros con valor de conductividad hidráulica vertical de $6.1E-6$ m/s. La escala de colores muestra el grado de saturación efectiva la cual carece de unidades, o en otras palabras es adimensional donde el 1 representa el 100% de saturacione en este caso representado por el color rojo.

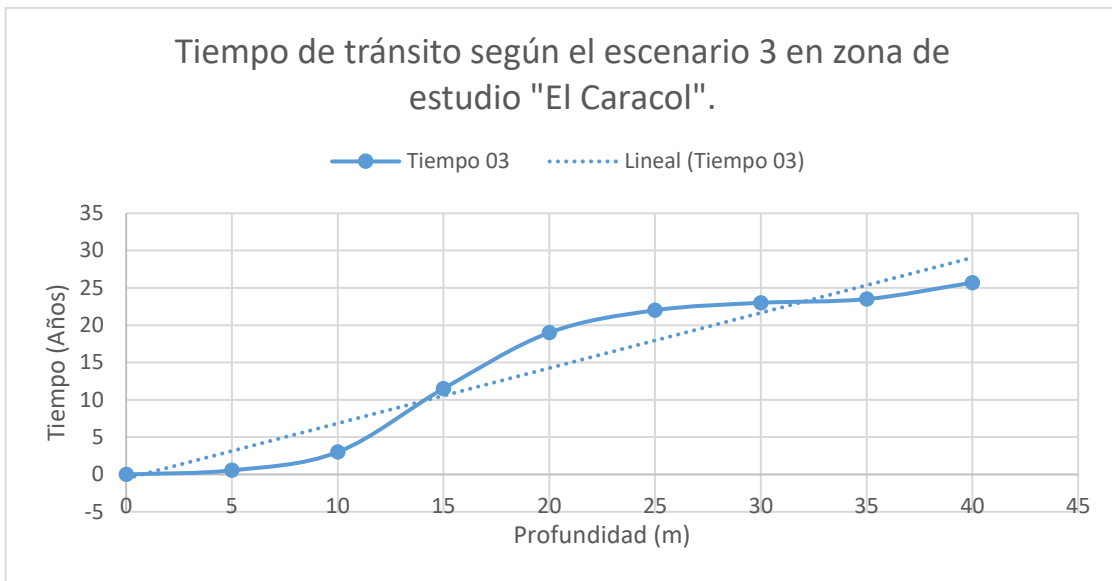


Figura 30. Valores del tiempo de tránsito dentro de la zona de falla para el escenario 3. La línea punteada azul es la gráfica de la función lineal.

Las siguientes simulaciones y sus respectivas gráficas ahora corresponden a los escenarios con una zona de falla de 20.00 metros. Para esto, la figura 31 muestra el resultado del modelo, en el que se puede apreciar que se necesitan 58.4 días para que el frente de humedad alcance la base. Por su parte, el gráfico de variación tiempo vs profundidad arroja la relación lineal $t = 0.0041 * P - 0.0044$, la cual permite estimar que se necesita un tiempo de 1.02 años para que el agua alcance el acuífero.

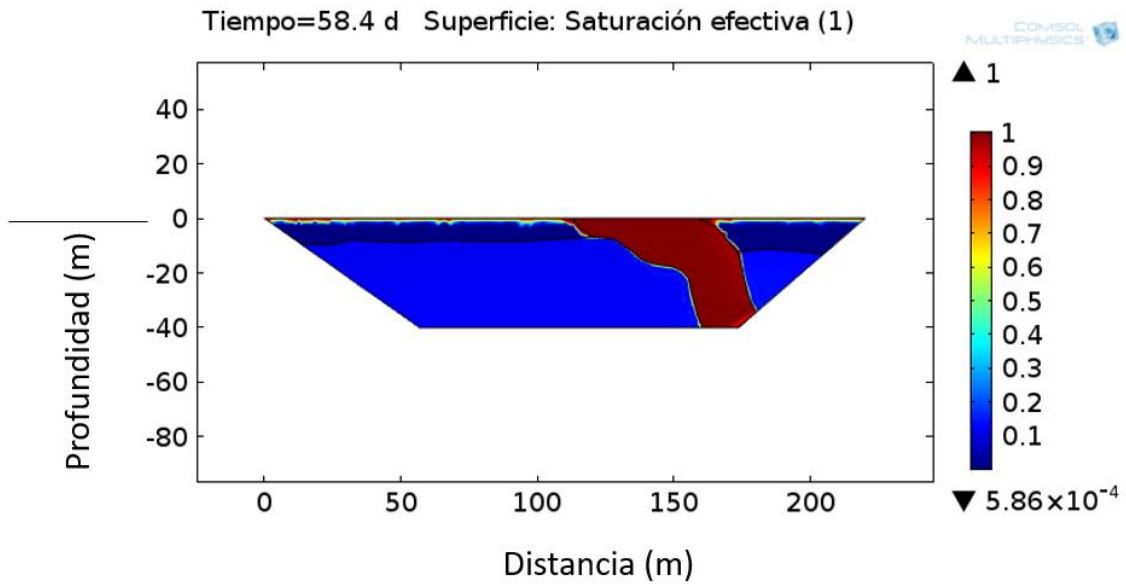


Figura 31. Simulación de flujo a través de la zona de falla de 20.00 metros con valor de conductividad hidráulica vertical de $4.9E-4$. La escala de colores muestra el grado de saturación efectiva la cual carece de unidades, o en otras palabras es adimensional donde el 1 representa el 100% de saturación en este caso representado por el color rojo.

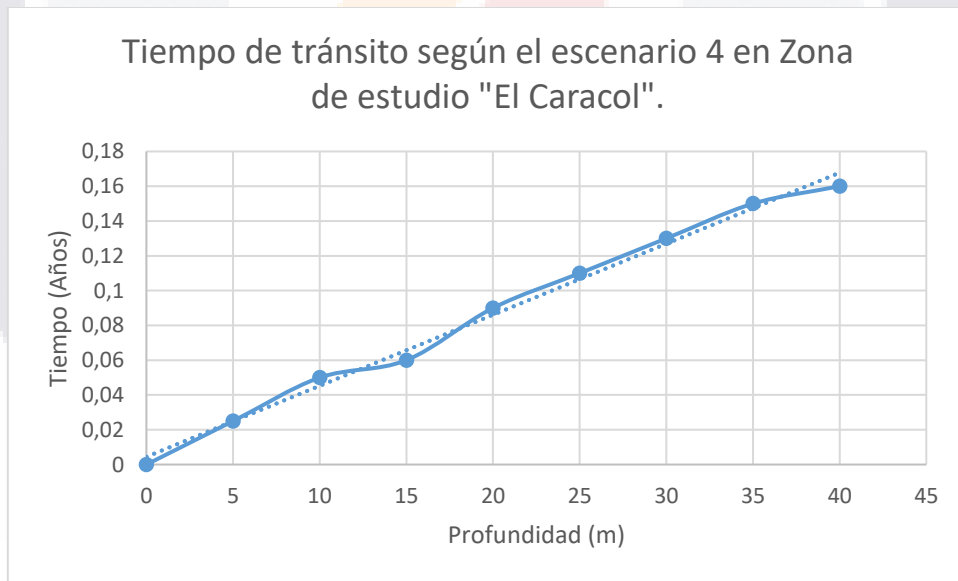


Figura 32. Valores del tiempo de tránsito dentro de la zona de falla para la simulación 04. La línea punteada azul es la gráfica de la función lineal

En el escenario 5, con el resultado de la simulación mostrado en la figura 33, se obtiene un tiempo de 565 días para se alcance la base del modelo, y mediante la

gráfica de la figura 34, se necesita un tiempo de 10.67 años para que se alcance el acuífero, según la ecuación de variación lineal $t = 0.043 * P - 0.0727$.

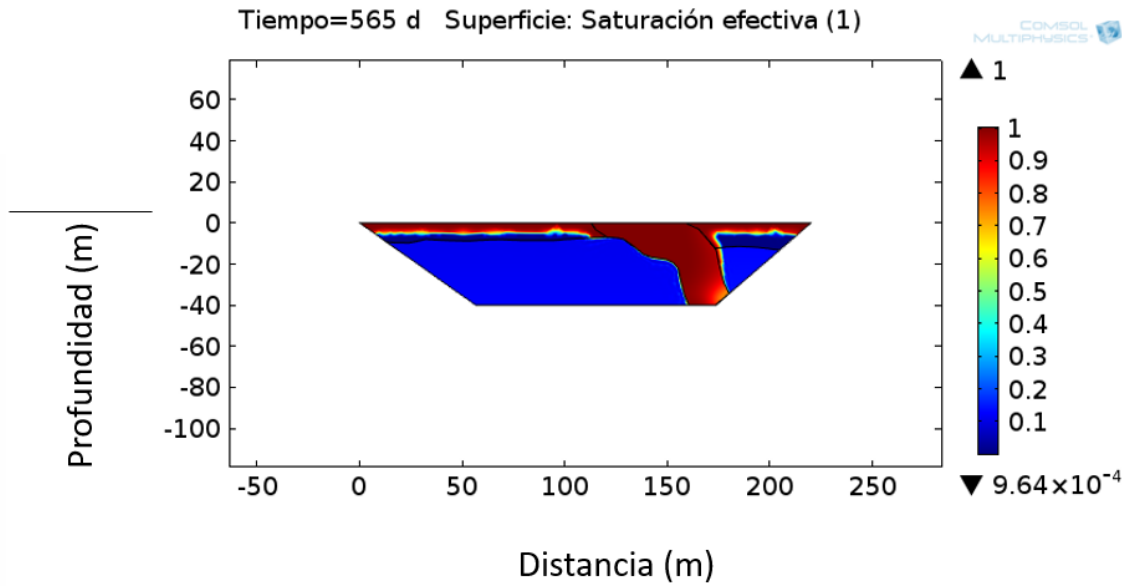


Figura 33. Simulación de flujo a través de la zona de falla de 20.00 metros con valor de conductividad hidráulica vertical de 5.0E-5 m/s. La escala de colores muestra el grado de saturación efectiva la cual carece de unidades, o en otras palabras es adimensional donde el 1 representa el 100% de saturacion en este caso representado por el color rojo.

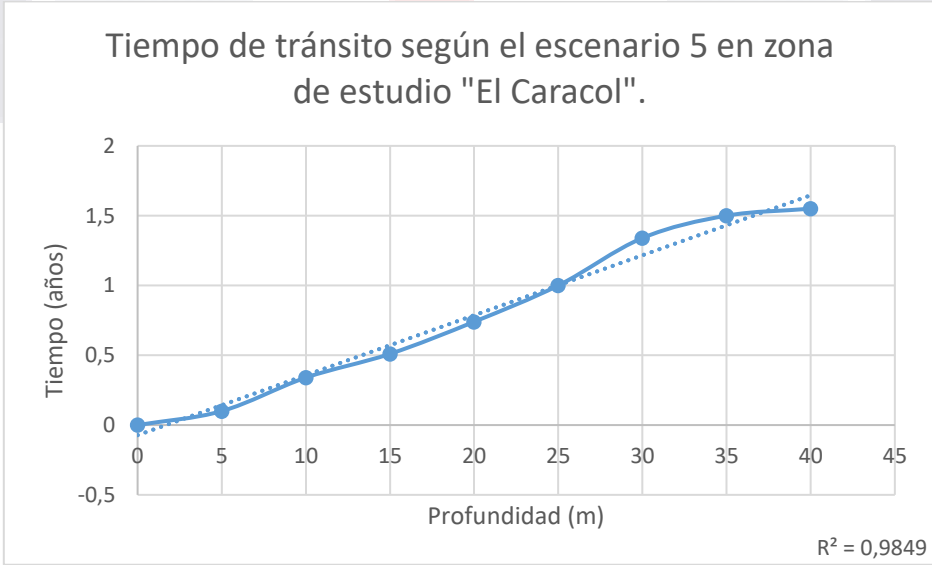


Figura 34. Valores del tiempo de transito dentro de la zona de falla para el escenario 5. La línea punteada azul es la gráfica de la función lineal.

La figura 35 muestra los resultados de la simulación para el escenario 6, que resulta en tiempo de tránsito de agua de 565 días en el modelo, y aplicando la ecuación $t = 0.318 * P - 0.6267$, obtenida del gráfico de la figura 36, se obtiene un tiempo de tránsito desde la superficie hasta el nivel freático de 78.87 años. En el siguiente capítulo se resumen y discuten los resultados de los tiempos de tránsito simulados para el modelo de unos 40 metros de profundidad y para una profundidad de 250 metros correspondiente a la ubicación del nivel freático del acuífero.

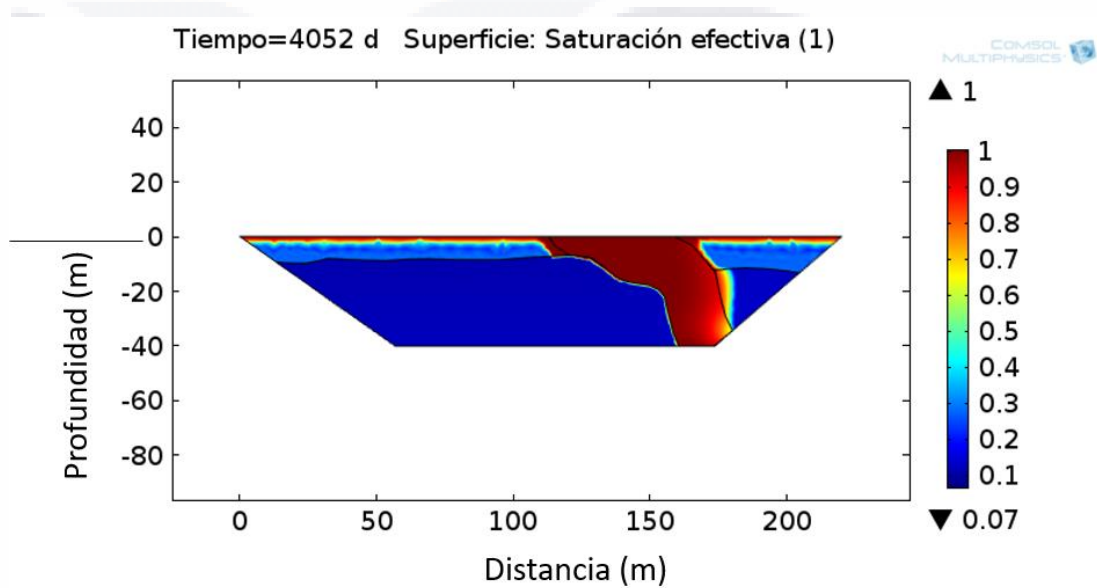


Figura 35. Simulación de flujo a través de la zona de falla de 20.00 metros con valor de conductividad hidráulica vertical de $6.1E-6$ m/s. La escala de colores muestra el grado de saturación efectiva la cual carece de unidades, o en otras palabras es adimensional donde el 1 representa el 100% de saturación en este caso representado por el color rojo.

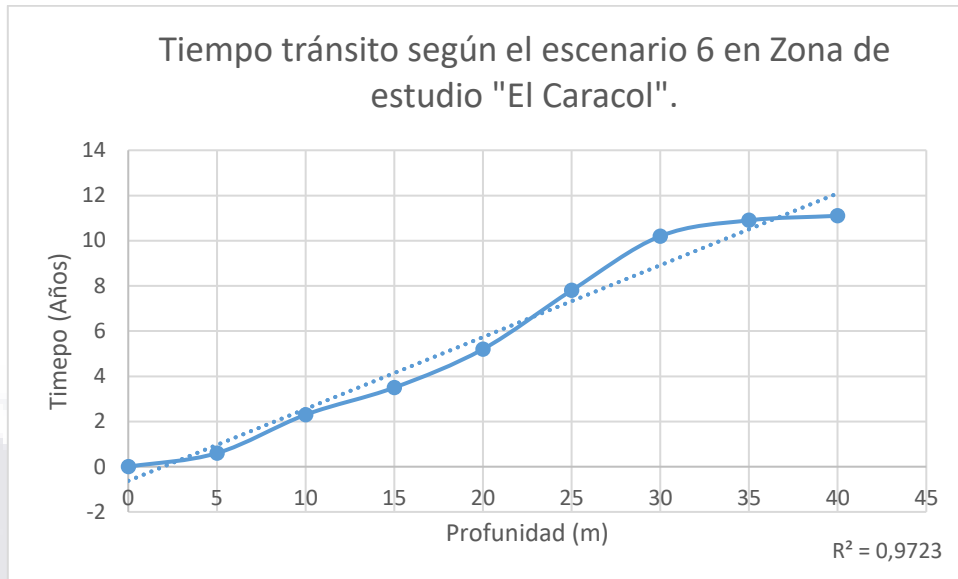


Figura 36. Valores del tiempo de transito dentro de la zona de falla para el escenario 6. La línea punteada azul es la gráfica de la función lineal.

Finalmente se muestran las simulaciones obtenidas a partir del perfil de resistividad de la zona de estudio de “La Pona”. Para las cuales, debido a la poca profundidad del sondeo de resistencia eléctrica que se les practicó, no se realizó una gráfica para determinar una ecuación lineal en función de la profundidad. En este caso, las simulaciones (figuras 37,39 y 41) solo sirvieron para estimar el tiempo en el que la saturación efectiva total alcanzó un punto de control seleccionado en la zona de falla en su parte más profunda, según la geometría del resistivograma obtenido y a la inclinación de la zona de falla. Para el análisis de este sitio, se graficó la saturación efectiva en función de la profundidad en el punto de control(figuras 38,40 y 42).

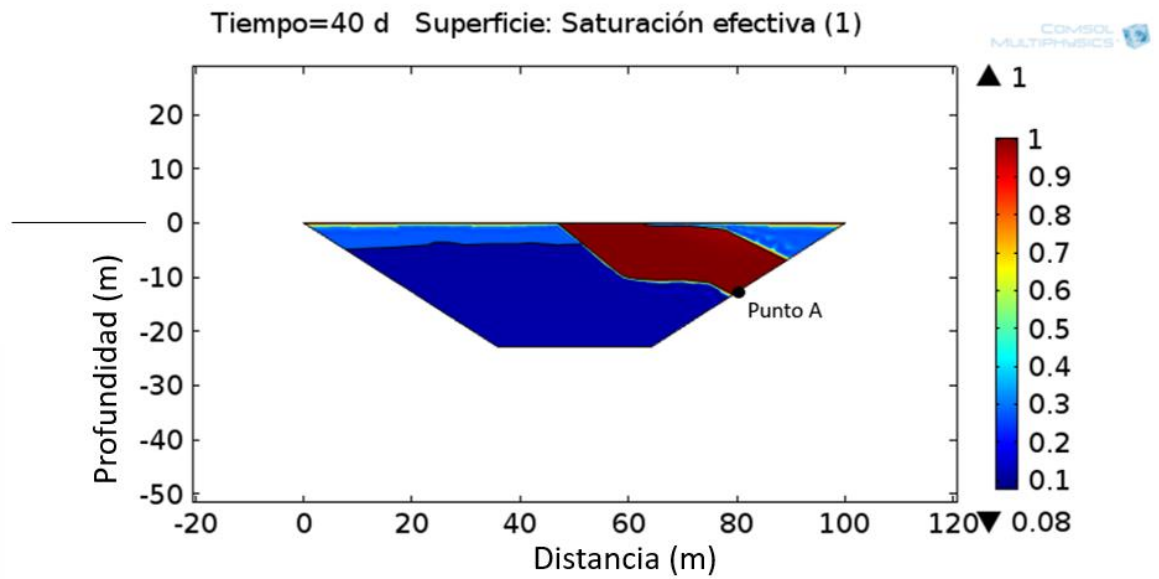


Figura 37. Simulación de flujo a través de la zona de falla de 10.00 metros con valor de conductividad hidráulica vertical de $4.9E-4$ m/s. La escala de colores muestra el grado de saturación efectiva la cual carece de unidades, o en otras palabras es adimensional donde el 1 representa el 100% de saturacion en este caso representado por el color rojo.

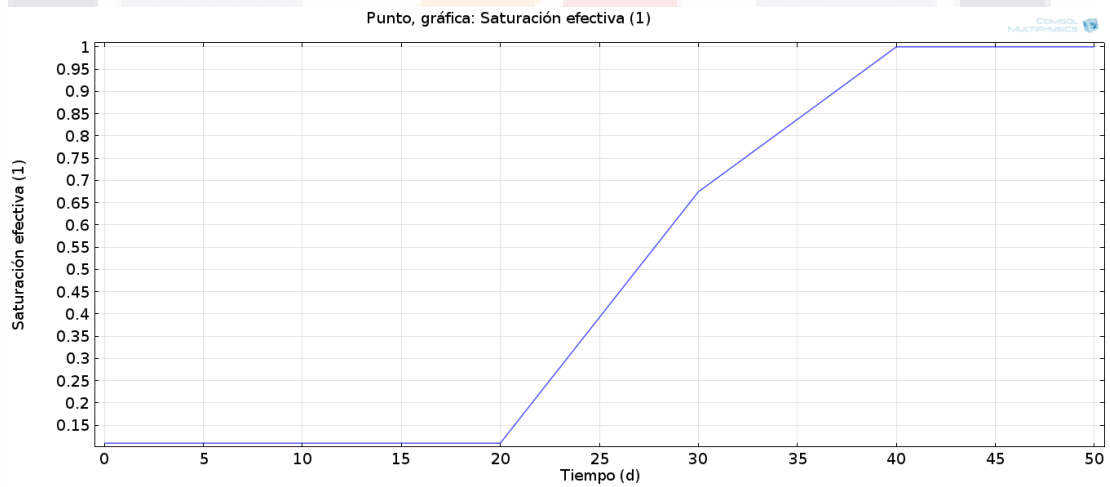


Figura 38. Grafica para conocer el tiempo en el que ha alcanzado la saturación efectiva en el punto A.

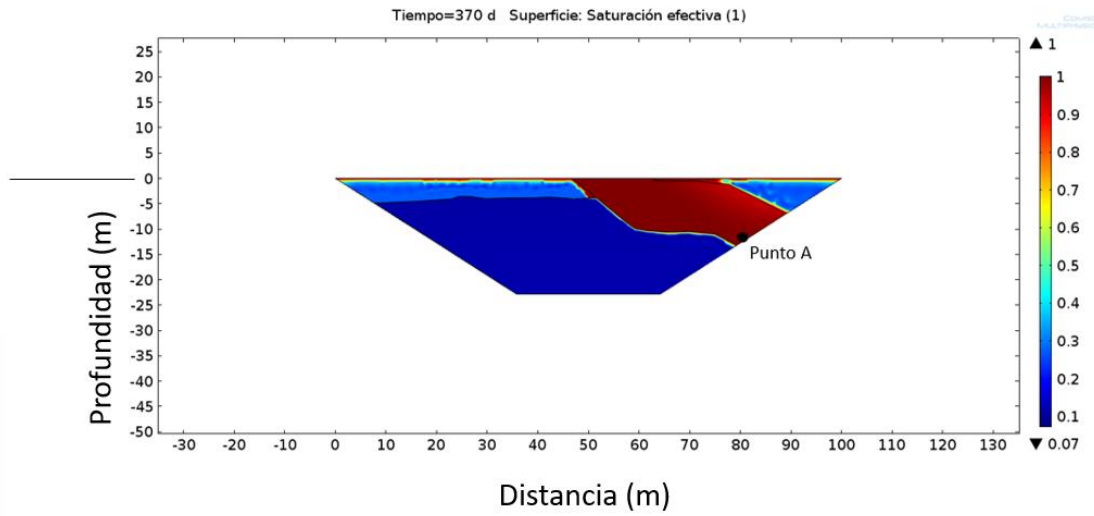


Figura 39. Simulación de flujo a través de la zona de falla de 10.00 metros con valor de conductividad hidráulica vertical de $5.0E-5$ m/s. La escala de colores muestra el grado de saturación efectiva la cual carece de unidades, o en otras palabras es adimensional donde el 1 representa el 100% de saturación en este caso representado por el color rojo.

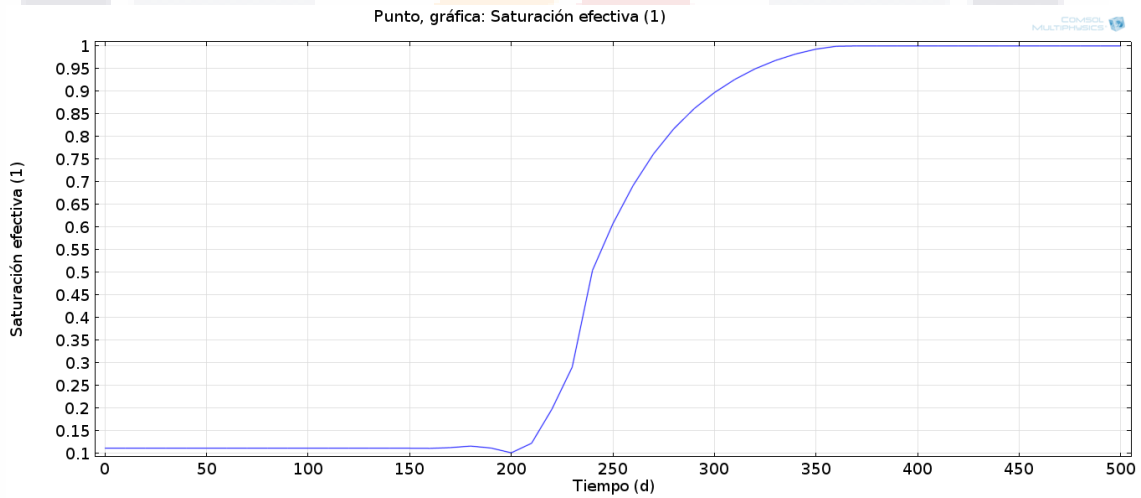


Figura 40. Gráfica para conocer el tiempo en el que ha alcanzado la saturación efectiva en el punto A.

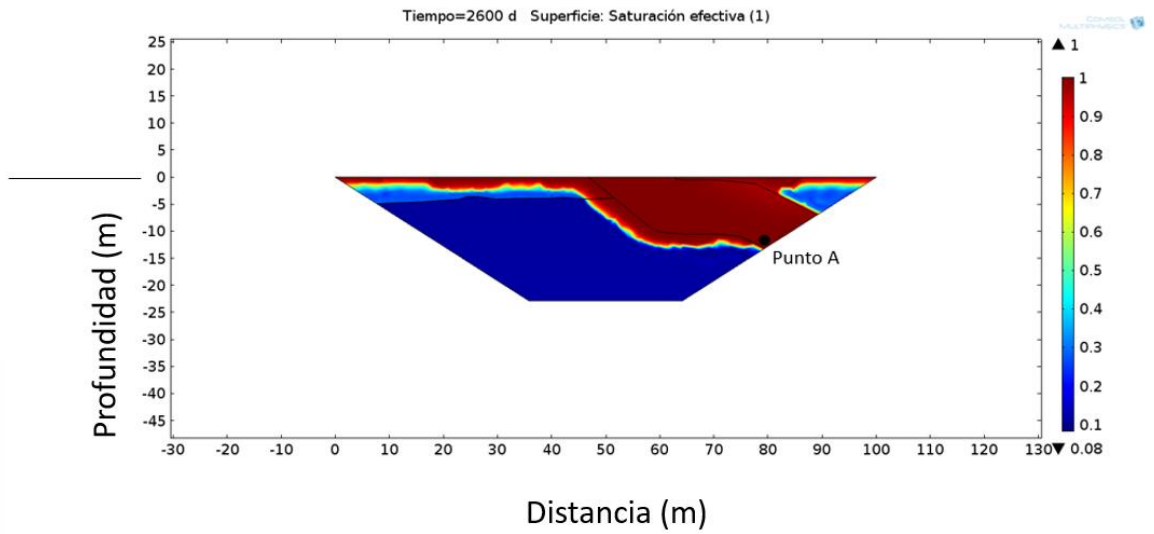


Figura 41. Simulación de flujo a través de la zona de falla de 10.00 metros con valor de conductividad hidráulica vertical de $6.1E-6$ m/s. La escala de colores muestra el grado de saturación efectiva la cual carece de unidades, o en otras palabras es adimensional donde el 1 representa el 100% de saturación en este caso representado por el color rojo.

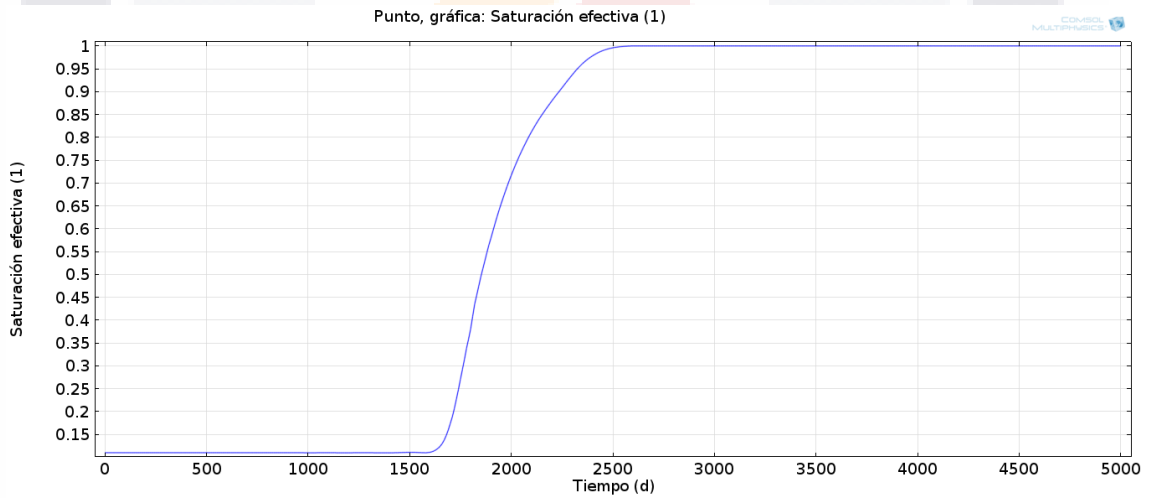


Figura 42. Grafica para conocer el tiempo en el que ha alcanzado la saturación efectiva en el punto A.



DISCUSIÓN DE RESULTADOS

6 DISCUSION DE RESULTADOS

6.1 Prueba ASTM G 187

En la figura 13, se observa que la presencia del agua influye a gran medida al cálculo de la resistividad eléctrica del suelo, por ejemplo, debido a que el material de estudio se limpió y se secó, disminuyó su contenido de agua y minerales, los cuales son responsables de otorgarle al suelo una vía para transmitir la corriente eléctrica (I). Al eliminar esta vía, la corriente requiere un mayor potencial (V) para transmitirse entre electrodos, retomando que el potencial está controlado por la siguiente ecuación: $V = RI$, por lo tanto, al ser la corriente I constante e incrementarse el potencial de voltaje, al despejar la resistencia R, se observa que ésta es proporcional al voltaje (V); por ello el primer punto tiende a infinito, debido a la dificultad que tiene la corriente de pasar de un electrodo a otro.

El análisis de la resistividad eléctrica es muy semejante al análisis del párrafo anterior, solamente que en ésta se debe de integrar el análisis sobre un área determinada A, y la influencia de su longitud d, con el fin de analizar bajo las mismas condiciones geométricas, las diversas muestras a estudiar. Debido que el estudio aplicado en esta investigación fue *in situ*, se desconocen las condiciones del suelo, pudiendo existir grietas, fallas, pliegues, presencia de cuerpos de agua o minerales, u otras discontinuidades.

6.2 Perfiles de resistividad

A partir de los perfiles de resistividad obtenidos se puede observar que la falla tiene buzamiento orientado hacia el poniente, en ambos casos, tanto en la zona de “La Pona” como en el centro ecológico “El Caracol. Se observa que la falla a cierta profundidad tiene un comportamiento de una falla listrica. Ya que su buzamiento no es constante a lo largo de la falla, mostrando cierta tendencia hacia una dirección horizontal.

En ambos sitios donde se levantaron los perfiles se pueden apreciar las estructuras geológicas que están presentes en ambos perfiles, el primer estrato con resistividades que oscilan entre los 43.2 y 81.5 ohmXm ubicado en la parte superior de las del perfil TER-01, que es la misma estructura que en el perfil TER-03 tiene valores entre 28.5 y 57.2, debajo se observa una estructura con resistividades entre 12.2 y 22.9 en el perfil TER-01 y que podemos ver reflejada en el perfil TER-03 en la zona que tiene valores de resistividad de 7.1 y 14.2 ohmXm. La zona de falla fue identificada en ambos perfiles por las zonas con resistividades más altas de 162.5 en el perfil TER-03 y llegando hasta valores de 289 en el perfil TER-01.

Lo que se resalta es una zona con resistividades realmente bajas, inclusive valores de 0, lo que nos indica una sección con altos niveles de conductividad a una profundidad de 10 metros aprox. algo que podría estar relacionado con la presencia de humedad, y que se definen como anomalías en las figuras 43 y 44. Cabe señalar que en el caso de la TER-01 podría estar relacionado con la presencia de un arroyo intermitente ubicado en la superficie, pero en el caso del TER-03, como ya se mencionó, a unos metros de donde se realizó el perfil se encontraba un registro del sistema de alcantarillado el cual cruza a través de la falla, lo que nos indicaría una posible zona de contaminación al haber daños a la infraestructura sanitaria. Después de analizar los valores de resistividad obtenidos en los perfiles TER se pueden hacer las interpretaciones geológicas mostradas en las figuras 43 y 44, las cuales representan un primer acercamiento a lo que definió el modelo conceptual, y a partir de él las simulaciones numéricas.

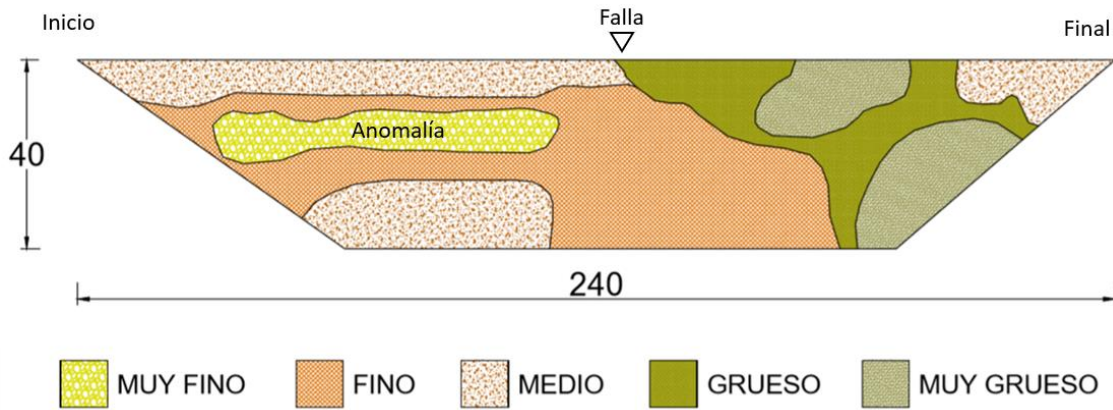


Figura 43. Interpretación del Perfil eléctrico (TER) obtenido en zona de estudio El Caracol, en función del tamaño de las partículas.

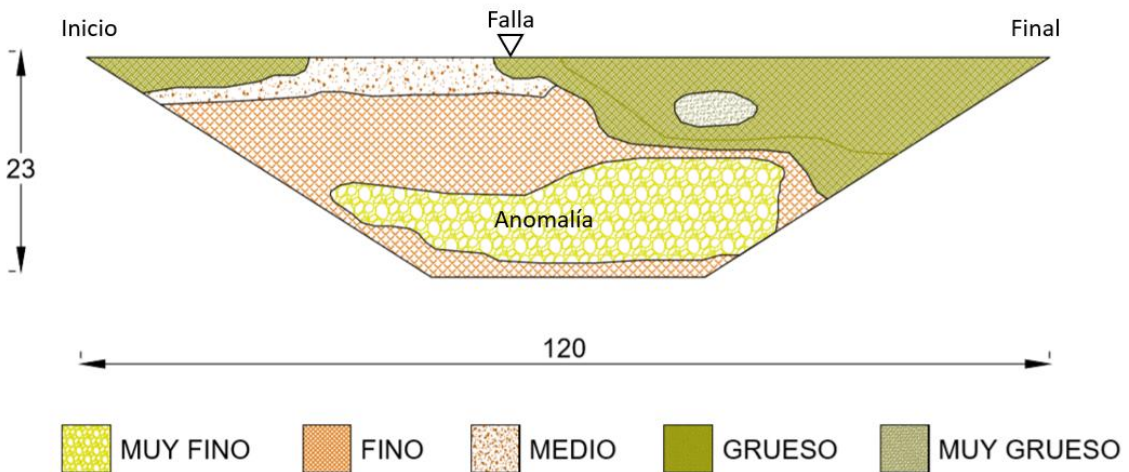


Figura 44. Interpretación del Perfil eléctrico (TER) obtenido en zona de estudio El Caracol, en función del tamaño de las partículas.

Fue necesario validar las interpretaciones de las resistividades obtenidas en la tomografía eléctrica de resistividad con los datos levantados en campo y la caracterización del material en laboratorio. Para esto, primero se observó el material de la zona, que se definió como de grano grueso, mientras que con las pruebas de granulometría se definió un suelo con alto contenido de gravas. En el caso de los suelos adyacentes a la zona de falla se compararon resistividades relacionadas con arenas con presencia de finos, lo cual concuerda con el croquis levantado en campo en la zona de “El Caracol” y el cual se muestra en la figura 45. Estos datos

permitieron realizar una columna estratigráfica con 5 m de profundidad, como se muestra en la figura 46.

CROQUIS LEVANTADO EN LA ZONA DE ESTUDIO "EL CARACOL".

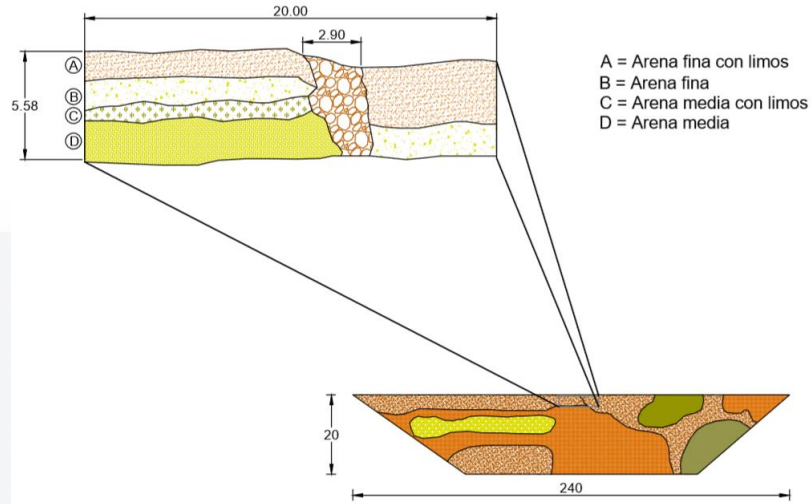


Figura 45. Croquis elaborado en campo en la zona de "El Caracol" donde era apreciable una columna estratigráfica y su ubicación en la interpretación del TER.

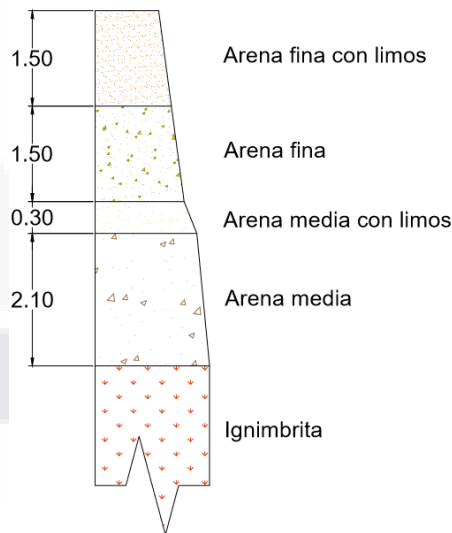


Figura 46. Columna estratigráfica realizada sobre los primeros 5 m de la zona de estudio "El Caracol".

6.3 Modelo conceptual

Para afinar la interpretación de los TER, se consultó la información existente sobre la zona de estudio. En ese aspecto Pacheco-Martínez *et al.*, (2013) determinó una secuencia geológica compuestas por sedimentos aluviales poco consolidados con presencia de arena de gravas y arenas. Por otro lado, se observó en campo que la falla de Oriente actualmente se extiende a través de riolita terciaria y las capas estratigráficas cuaternarias, las cuales son las que han sufrido hundimiento. Sin embargo, en la riolita no se han observado deformaciones en las últimas décadas, a comparación, como se mencionó, en las capas sedimentarias (Pacheco-Martínez *et al.*, 2013). Esto es un indicador que permite asumir que esta falla se reactivó después de un tiempo considerable inactiva, aunque no se descarta otros agentes en la reciente actividad de las fallas, como el tectonismo (Hernandez-Marin *et al.*, 2017).

Después de analizar la información, los modelos conceptuales quedaron conformados como se muestran en las figuras 47, 48 y 49. Para su posterior manejo en las simulaciones numéricas, como se puede corroborar en el capítulo de simulaciones, se puso especial énfasis en el ancho de influencia de la falla, su geometría, y la configuración estratigráfica.

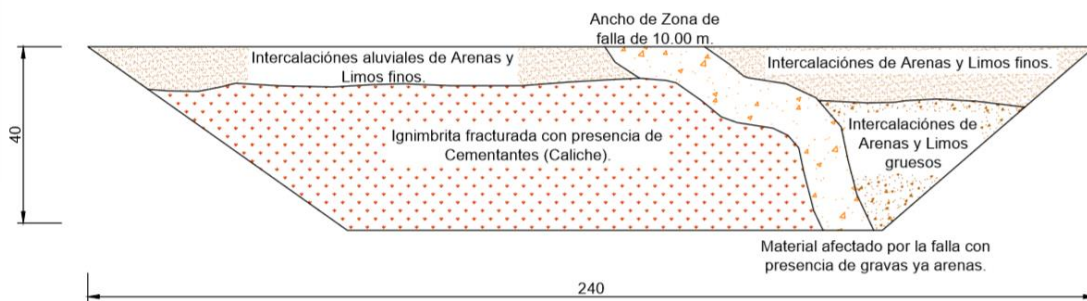


Figura 47. Modelo conceptual de la zona de estudio de “El Caracol” y con un ancho de zona de falla de 10 m.

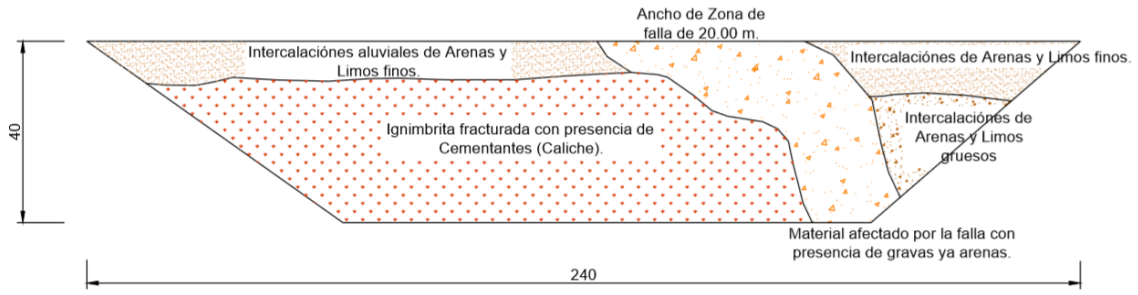


Figura 48. Modelo conceptual de la zona de estudio de “El Caracol” y con un ancho de zona de falla de 20 m.

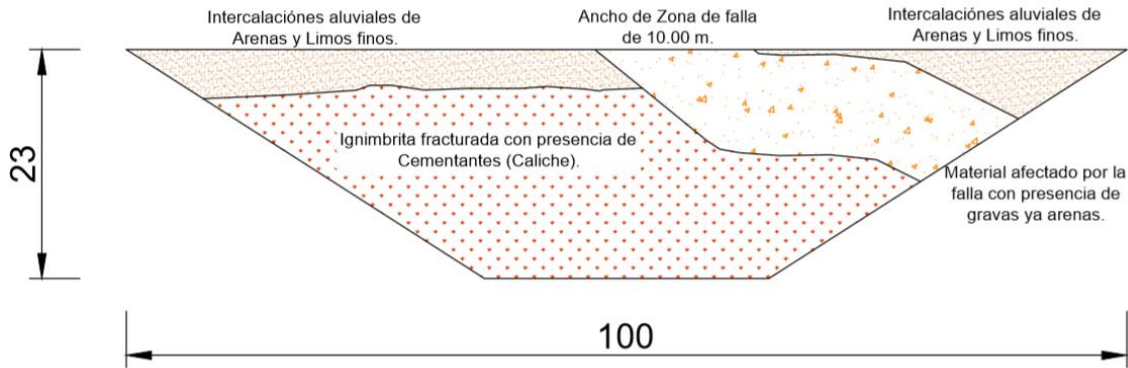


Figura 49. Modelo conceptual de la zona de estudio de “La Pona”, con un ancho de zona de falla de 20 m.

6.4 Simulaciones numéricas

Un resumen de los tiempos obtenidos en cada una de las simulaciones con su correspondiente condición de ancho de falla y del valor de la conductividad hidráulica asociada a este se muestra en la tabla 5.

Tabla 5. Resumen de los tiempos obtenidos en cada variante de las simulaciones realizadas.

	Conductividad hidráulica (m/seg)	Ancho de falla (m)	Tiempo de tránsito hasta los 40 m de profundidad (días)	Tiempo de tránsito hasta los 40 m de profundidad (años)	Velocidad de infiltración (m/s)
Simulación 01	4,90E-04	10	109,00	0,30	7,27149E-06
Simulación 02	5,00E-05	10	912,00	2,50	8,69071E-07
Simulación 03	6,00E-06	10	9385,00	25,71	8,44531E-08
Simulación 04	4,90E-04	20	58,40	0,16	1,35718E-05
Simulación 05	5,00E-05	20	565,00	1,55	1,40282E-06
Simulación 06	6,00E-06	20	4052,00	11,10	1,95605E-07

De la tabla 7 puede observarse que los tiempos obtenidos de tránsito a lo largo de la falla son mucho más cortos cuando se aumenta un orden de magnitud en la conductividad hidráulica, por lo que se considera a esta variable es la que realmente determina los tiempos de tránsito a través de zonas no saturadas con presencia de fallas. Si se comparan los tiempos de tránsito de agua a través de la zona vadosa con aquellos obtenidos por Zermeño (2016), se puede apreciar que en este trabajo los tiempos obtenidos son sustancialmente menores para conductividades hidráulicas de la zona de falla del orden de E-04 m/s.

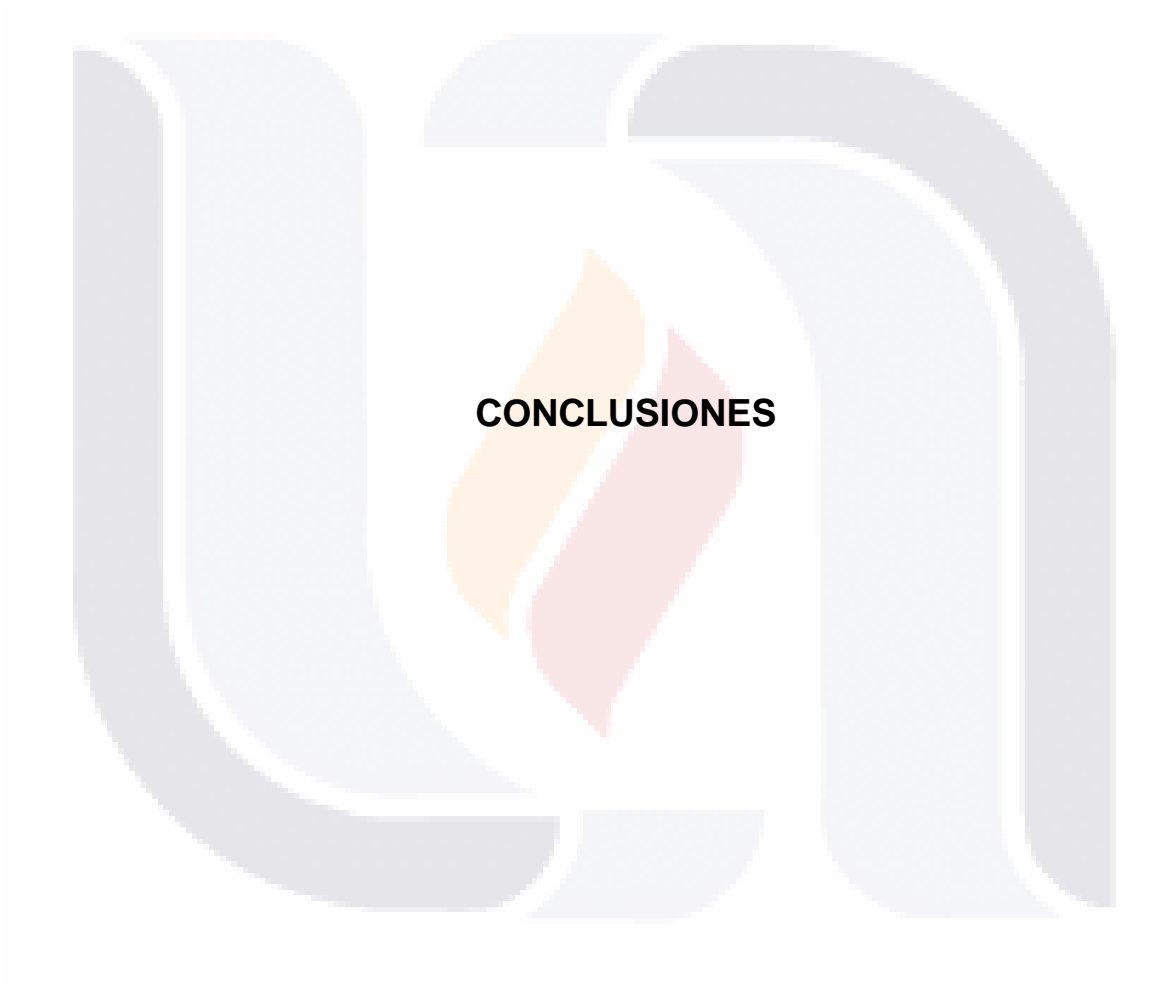
El tiempo más corto obtenido en este trabajo es de poco más de año con una ancho de zona de falla de 20 metros, dato obtenido en base a ecuación de tendencias generadas a partir de las gráficas del tiempo contra profundidad para un espesor de la zona vadosa de 250 metros, como es el caso de la zona de estudio, dicho espesor se estimó a partir del trabajo de Hernández-Marín *et al.*, (2018). Los tiempos de tránsito de agua a través de la zona vadosa obtenidos por Zermeño (2016) para la región donde se encuentra la zona de estudio “El Caracol” y “La Pona” rondan entre los 80 y 130 años, mientras que los obtenidos en este trabajo para una zona de falla de 10 m de ancho son 1.02 años para una conductividad hidráulica en el orden de E-04 y de 16.31 años para una conductividad hidráulica en el orden de E-05. Estos resultados de tiempos de tránsito permiten asumir que las zonas de falla podrían funcionar hidráulicamente como un conducto que acelera el proceso de recarga para los puntos de estudios de la falla Oriente, con posibilidad de que a todo lo largo de esta falla, el funcionamiento hidráulico sea el mismo.

Un caso que cabe comentar es sobre los resultados obtenidos cuando se asignaba una conductividad hidráulica del orden de E-06 a la zona de falla, la cual es similar al de los sedimentos finos presentes en el valle, según Zermeño (2016). Bajo estas condiciones, el tiempo simulado fue de 180 años de tránsito de agua a través de la zona vadosa, un tiempo mayor a los presentados por Zermeño (2016). Debido a este resultado, se estimó que la velocidad mínima obtenida a partir de las simulaciones es de $1.35E-05$ m/s para el caso de un ancho de falla de 20 m y una conductividad hidráulica de $4,90E-04$ asociada a esta zona, mientras que la velocidad máxima es de $8.44E-08$ m/s para el caso de un ancho de falla de 10 m y una conductividad hidráulica de $6,00E-06$ m/s. la velocidad se obtuvo considerando la longitud de la falla en la geometría del modelo y el tiempo de transito del agua obtenido de las simulaciones.

En el caso del volumen que puede transitar a través de la zona de falla se tomó un volumen unitario considerando el área en el modelo conceptual bidimensional con

una profundidad de un metro. Posteriormente con base a los valores de relación de vacíos obtenido por Frias Guzmán y Hernández Marín (2018), para suelos presentes en el valle de Aguascalientes, se tomó un valor de 0.70, finalmente despejando la ecuación de relación de vacíos se obtiene el volumen de vacío que es el volumen por el cual puede transitar el agua, obteniendo un valor de 271.81 m^3 para un ancho de falla de 10 metros y de 492.37 m^3 para el ancho de falla de 20 metros.





7 CONCLUSIONES

7.1 Conclusión general

El objetivo principal del presente estudio fue determinar las características de velocidad de infiltración de agua a través de una falla, en específico la falla Oriente, que delimita el graben de Aguascalientes, y aunque no se obtuvieron parámetros hidráulicos a partir de pruebas de laboratorio o de campo, como podría ser el caso de los valores de conductividad hidráulica, se puede decir que los valores extraídos de la literatura son una aproximación muy cercana de los posibles valores que se pudieran obtener mediante experimentación. Además, el hecho de tomar diferentes ordenes de magnitud de la conductividad hidráulica en los diferentes escenarios simulados, nos permite observar el comportamiento de la velocidad a través de la falla con diferentes condiciones. Con trabajos de investigación posteriores se puede obtener el valor de la conductividad hidráulica con pruebas de campo o de laboratorio y conocer en que orden de magnitud o cual es el valor específico que corresponde a la conductividad hidráulica en la zona de falla de la zona de estudio y poder corroborar con los datos obtenidos en este trabajo, aunque estos datos se limitarían a la superficie. Cabe la pena recalcar que los tiempos de tránsito obtenidos en el presente estudio son menores con respecto al único trabajo realizado en la zona de estudio (Hernández Marín et al., 2018; Zermeño, 2016), lo que podría indicar que efectivamente éstas zonas de falla, al menos en los dos sitios de estudio trabajan como un conducto ante el flujo de agua y, por lo tanto, el proceso de recarga ocurre de una manera más rápida.

Para determinar las condiciones hidráulicas de una zona de falla y conocer su comportamiento hidráulico ante el flujo subterráneo vertical, es decir, conocer si esta está funcionando como un conducto o como barrera ante el flujo en sentido vertical, requiere de un trabajo conjunto de diferentes métodos, tanto de campo como de laboratorio y de gabinete.

En este trabajo se esperaba que se cumpliera que los puntos de estudio en la falla Oriente funcionaran como canales para poder ser reconocidos como zonas de recarga potencial, lo cual presenta una zona con potencial para su aprovechamiento con respecto a la falta de agua cada vez más crítica en el valle de Aguascalientes. El considerar los resultados obtenidos en este trabajo son importantes no solo por el beneficio que pueden aportar estas zonas de falla a la recarga sino también por el daño que se puede ocasionar por potencial contaminación el acuífero, ya que los contaminantes podría estar descendiendo rápidamente al acuífero sin suficiente filtración de las sustancia contaminantes. El segundo caso requeriría especial atención y estudios minuciosos ya que, como se observó en el sitio de “La Pona”, existe infraestructura sanitaria posiblemente dañada por la falla Oriente, provocando un fuga potencial de aguas residuales. Dicha fuga podría estar fluyendo a través de la falla geológica y presentando un caso de contaminación al acuífero, lo que hace necesaria una revisión del sistema de drenaje o tal vez realizar un estudio con trazadores químicos que nos permitan detectar las direcciones del flujo, y complementar el estudio con sondeos geofísicos.

7.2 Conclusiones particulares

A continuación se enumeran las siguientes conclusiones particulares:

A) Se revisó la bibliografía referente a trabajos y estudios sobre la relación de las discontinuidades y la infiltración de agua al subsuelo, lo que permitió conocer que las fallas pueden trabajar como conductos cuando el tipo de suelo presente en la zona de falla contiene en su mayoría arenas y gravas o fracturas conectadas, mientras que las zonas de falla con mayor presencia de suelos finos o conductos cerrados (por ejemplo con sustancias precipitadas) tenderá a actuar como una barrera. Con lo observado en campo, con previas investigaciones (Hernandez-Marín 2017) y con las pruebas de laboratorio y campo, se determinó realizar simulaciones en las que la zona de falla actuaracomo un conducto. De igual manera

se encontró que, en un estudio sobre el comportamiento de infiltración a través de discontinuidades se requieren de varios enfoques, para atacar en conjunto de estudios de campo, como en este caso las pruebas de prospección geofísica, que complementaron las simulaciones numéricas. Adicionalmente, a partir de la revisión de la literatura, la realización de las simulaciones numéricas permitieron establecer los parámetros hidráulicos que fueron asociados a los estratos de los modelos y de la zona de falla.

B) Los trabajos de exploración geofísica de resistividad eléctrica fueron la base para establecer la geometría de los modelos, así como detectar la zona de falla y su ancho de influencia. Además, la interpretación de los modelos permitió a poder definir los estratos y asociarlos con los valores de los parámetros hidráulicos, en este caso la conductividad hidráulica y los valores de la curva de retención de Van Genuchten, en función de los valores de resistividad observados. En el caso de la prueba de granulometría permitió observar que en efecto los suelos presentes dentro de la zona de falla tienen alto contenido de gravas, lo cual, refuerza la suposición de que los valores de conductividad son altos.

En cuanto al método de prueba estándar para la medición de la resistividad del suelo utilizando el método de la caja de suelo con dos electrodos, en el caso de la variación de resistividad en función del contenido de humedad, esta prueba ayudó a identificar las áreas en los perfiles que tenían un alto contenido de humedad, mientras que el caso de resistividad en función del porcentaje de sal en solución de agua no tuvo gran aplicabilidad ya que los valores de resistividad relacionados con el menor porcentaje de sal se comportaba prácticamente igual que los valores con mayor porcentaje de sal en las pruebas realizadas, por lo que se considera que no realiza un aporte directo a tomar en cuenta en la interpretación de los resultados de este estudio.

C) Al desarrollar modelos numéricos con las condiciones de los puntos de estudio de la falla Oriente, y variando los parámetros hidráulicos, así como la profundidad y

el ancho de influencia de la zona de falla, se concluye que la velocidad de infiltración de agua a través de una discontinuidad depende principalmente de dos factores: el ancho de influencia de la zona de falla y la conductividad hidráulica de ésta zona. Los aspectos a recalcar son que entre las características que debe tener una zona de falla para que pueda ser considerada canal de recarga, es que se debe de tratar de una falla normal que genere los esfuerzos que darán lugar a desplazamientos principalmente verticales y agrietamientos, y principalmente que se trate de una falla activa, ya que de lo contrario, eventualmente los poros interconectados por efecto de la porosidad secundaria se verán rellenos con material sedimentario de arrastre y por las sustancias diluidas en el agua que podrían precipitarse, y si no hay esos esfuerzos que resquebrajen los sedimentos, el tránsito de fluidos se verá restringido.

7.3 Nichos de investigación

Para futuras investigaciones que pretendan complementar la comprensión de la infiltración de agua a través de discontinuidades presentes en el valle de Aguascalientes deberá aplicar estudios geofísicos a mayor profundidad, para poder observar si efectivamente las fallas se siguen comportando igual que a los primeros 40 metros que es la profundidad de los modelos realizados en este estudio y que supuso un comportamiento lineal hasta llegar a los 250 metros, que la profundidad promedio del nivel estatico en este valle. De igual manera se deberán corroborar los valores de los parámetros hidráulicos utilizados en las simulaciones de este estudio, como es el caso de la conductividad hidráulica y los valores para curva de retención de Van Genuchten, esto se podrá lograr mediante pruebas de campo o de laboratorio. Y finalmente se podría complementar el estudio de infiltración a través de discontinuidades mediante la aplicación de pruebas con trazadores para establecer la dirección del flujo.

8 BIBLIOGRAFÍA

Aparicio M., F. J. (1992). Fundamentos de Hidrología de superficie. México: Limusa.

Apaydin, A. (2010). Relation of tectonic structure to groundwater flow in the Bey pazari region, NW Anatolia, Turkey. *Hydrogeology Journal*, 18(6), 1343-1356. <https://doi.org/10.1007/s10040-010-0605-1>.

Asmar C., I. F. (1999). Métodos numéricos. Un primer curso (Segunda). Medellín, Colombia: Universidad Autónoma de Colombia.

ASTM. (2012). Standard Test Method for Measurement of Soil Resistivity using the Two Electrode Soil Box Method (G187 12a), American Society of Testing Materials.

Bense, V. F., y Person, M. A. (2006). Faults as conduit-barrier systems to fluid flow in siliciclastic sedimentary aquifers. *Water Resources Research*, 42(5), W05421. <https://doi.org/10.1029/2005WR004480>.

Bernard, D., Danis, M., y Quintard, M. (1989). Effects of permeability anisotropy and throw on the transmissivity in the vicinity of a fault. <https://doi.org/10.1029/GM047p0119>.

Brunet, P., Clément, R., y Bouvier, C. (2010). Monitoring soil water content and deficit using Electrical Resistivity Tomography (ERT) : a case study in the Cevennes area, France. *Journal of Hydrology*, 380(1-2), 146-153.

- Burbey, T. J. (2002). The influence of faults in basin-fill deposits on land subsidence, Las Vegas Valley, Nevada, USA. *Hydrogeology Journal*, 10(5), 525-538.
- Caine, J. S., Evans, J. P., y Forster, C. B. (1996). Fault zone architecture and permeability structure. *Geology*, 24(11), 1025-1028.
[https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1996\)024<1025:FZAAPS>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1996)024<1025:FZAAPS>2.3.CO;2)
- Campos-Moreno, G. E. (2016). Estimación del volumen de escurrimiento y su potencial de infiltración a través de una discontinuidad geológica en el valle de Aguascalientes. Universidad Autónoma de Aguascalientes, Tesis de maestría, Aguascalientes, México.
- Carreón-Freyre, D., Cerca, M., Luna-González, L., y Gámez-González, F. J. (2005). Influencia de la estratigrafía y estructura geológica en el flujo de agua subterránea del Valle de Querétaro. *Revista mexicana de ciencias geológicas*, 22, 1-18.
- Chen, G., J. (2003). Analysis of pumping in multilayered and poroelastic half space. *Computers and Geotechnics*, 30(1), 1-26.
[https://doi.org/10.1016/S0266-352X\(02\)00034-4](https://doi.org/10.1016/S0266-352X(02)00034-4).
- CONAGUA. (2012). Atlas del agua en México 2012 (Atlas) (p. 142). Comisión Nacional del Agua (CONAGUA).
- DOF. (1963). Decreto por el que se establece veda por tiempo indefinido para el alumbramiento de aguas del subsuelo en la zona que comprende todo el Estado de Aguascalientes (Decreto) (pp. 573–575). Distrito Federal: Diario Oficial de la Federación.

- Dafonte, J., Raposo, J., Valcárcel-Armesto, M., Fandiño, M., M. Martinez, E., J. Rey, B., y Cancela, J. J. (2013). Utilización de la tomografía eléctrica para estimar el contenido de agua en el suelo en Viño bajo diferentes sistemas de riego. *Estudios en la Zona no Saturada del Suelo. Vol XI*. Universidade de Santiago de Compostela, p. 57-62.
- Evans, J. P., Forster, C. B., y Goddard, J. V. (1997). Permeability of fault-related rocks, and implications for hydraulic structure of fault zones. *Journal of Structural Geology*, 19(11), 1393-1404. [https://doi.org/10.1016/S0191-8141\(97\)00057-6](https://doi.org/10.1016/S0191-8141(97)00057-6).
- Galloway, D. L., y Burbey, T. J. (2011). Review: Regional land subsidence accompanying groundwater extraction. *Hydrogeology Journal*, 19(8), 1459-1486. <https://doi.org/10.1007/s10040-011-0775-5>
- Gannon, J., Burbey, T., Bodnar, R., y Aylor, J. (2011). Geophysical and geochemical characterization of the groundwater system and the role of Chatham Fault in groundwater movement at the Coles Hill uranium deposit, Virginia, USA (Vol. 20). *Hydrogeology Journal*, 20(1): 45-60 <https://doi.org/10.1007/s10040-011-0798-y>.
- Hernández Marin, M., Guerrero, L., Zermeño-Villalobos, A., Rodríguez-González, L., Burbey, T., Pacheco Martínez, J., Martínez-Martínez, S., I., y González-Cervantes, N. (2018). Spatial and temporal variation of natural recharge in the semi-arid valley of Aguascalientes, Mexico. *Hydrogeology Journal*, 26(8): 2811–2826. <https://doi.org/10.1007/s10040-018-1819-x>.

Hernandez-Marin, M. (1), Pacheco-Martínez, J. (2), Burbey, T. J. (3), Carreón-Freyre, D. C. (4), Ochoa-González, G. H. (5), Campos-Moreno, G. E. (6), y de Lira-Gómez, P. (6). (2017). Evaluation of subsurface infiltration and displacement in a subsidence-reactivated normal fault in the Aguascalientes Valley, Mexico. *Environmental Earth Sciences*, 76(24).

<https://doi.org/10.1007/s12665-017-7163-y>.

Hernández-Marín, M., González-Cervantes, N., Pacheco-Martínez, J., y Frías-Guzmán, D. H. (2015). Discussion on the origin of surface failures in the Valley of Aguascalientes, México. En *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences* (Vol. 372, pp. 235-238). Copernicus GmbH. <https://doi.org/10.5194/piahs-372-235-2015>.

Hernandez-Marin, Martin, y Burbey, T. J. (2009). The role of faulting on surface deformation patterns from pumping-induced groundwater flow (Las Vegas Valley, USA). *Hydrogeology Journal*, 17(8), 1859.

<https://doi.org/10.1007/s10040-009-0501-8>

Instituto Mexicano del transporte. (2010). Evaluación de la resistividad en campo y en laboratorio y su aplicación a pavimento. Sanfandilla, Queretaro.

Humberto Frías-Guzmán, D. y Hernández Marin, M. (2018). Experimental Study on Tensile Strength of Undisturbed and Disturbed Sandy Soil Samples from Aguascalientes Valley, Mexico. *Geotechnical and Geological Engineering*,

<https://doi.org/10.1007/s10706-018-0653-1>

- Martinez-Noguez, I., y Hinkelmann, R. (2015). Land subsidence caused by a single water extraction well and rapid water infiltration. *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*, 372, 33.
- Monsalves, R. (1999). Hidrología en la Ingeniería. Bogota, Colombia: Alfaomega S.A.
- Mozley, P., y Goodwin, L. (1995). Patterns of cementation along a Cenozoic normal fault: A record of paleoflow orientations (Vol. 23).
[https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1995\)023<0539:POCAAC>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1995)023<0539:POCAAC>2.3.CO;2)
- Murillo Montoya, D. (2007). Aplicación ambiental del método de resistividad eléctrica en el modelado del acuífero costero en playa Panamá, Guanacaste, *Gosta Rica*. <https://doi.org/10.15517/rgac.v0i38.4214>
- Ochoa-González, G. H., Carreón-Freyre, D., Cerca, M., y López-Martínez, M. (2015). Assessment of groundwater flow in volcanic faulted areas. A study case in Queretaro, Mexico. *Geofísica Internacional*, 54(3), 199-220.
- Pacheco-Martínez, J., Hernandez-Marín, M., Burbey, T. J., González-Cervantes, N., Ortiz-Lozano, J. Á., Zermeño-De-Leon, M. E., y Solís-Pinto, A. (2013). Land subsidence and ground failure associated to groundwater exploitation in the Aguascalientes Valley, México. *Engineering Geology*, 164, 172-186.
<https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2013.06.015>.
- Rawling, G., Goodwin, L., y Wilson, J. (2001). Internal architecture, permeability structure, and hydrologic significance of contrasting fault-zone types (Vol. 29). [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(2001\)029<0043:IAPSAH>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(2001)029<0043:IAPSAH>2.0.CO;2).

- Romano, V., De'Haven Hyman, J., Karra, S., Valocchi, A. J., Battaglia, M., y Bigi, S. (2017). Numerical modeling of fluid flow in a fault zone: a case of study from Majella Mountain (Italy). *Energy Procedia*, 125, 556-560.
- Simunek, J., Jirka, Šejna, M., Saito, H., Sakai, M., y Van Genuchten, M. (2013). The Hydrus-1D Software Package for Simulating the Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably Saturated Media, Version 4.17, HYDRUS Software Series 3, *Department of Environmental Sciences*, University of California Riverside, Riverside, California.
- SY, H., Jin, M., Liang, X., y Lin, D. (2014). Changes of vertical groundwater recharge with increase in thickness of vadose zone simulated by one-dimensional variably saturated flow model (Vol. 25).
<https://doi.org/10.1007/s12583-014-0486-7>.
- Tarbuk, E. J., y Lutgens, F. K. (2005). *Ciencias de la tierra. (Octava)*. Madrid, España: Pearson Education, S.A.
- Teatini, P., Comerlati, A., Carvalho, T., Gütz, A.-Z., Affatato, A., Baradello, L., ... Paiero, G. (2015). Artificial recharge of the phreatic aquifer in the upper Friuli plain, Italy, by a large infiltration basin. *Environmental Earth Sciences*, 73(6), 2579-2593. <https://doi.org/10.1007/s12665-014-3207-8>
- Van Genuchten, M. (1980). *A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils*1 (Vol. 44).
<https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x>.
- Zermeño, A. (2016). Utilización de modelos numéricos para entender el rol de la zona vadosa en el proceso de recarga natural. El caso del valle de

Aguascalientes. Universidad Autónoma de Aguascalientes, Tesis de maestría. Aguascalientes, México.

