



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA  
DE AGUASCALIENTES**

**CENTRO DE CIENCIAS DEL DISEÑO Y LA CONSTRUCCIÓN  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL**

**TESIS**

**MODELACIÓN FÍSICO Y NUMÉRICA DE LA INFILTRACIÓN A TRAVÉS  
DE POZOS INACTIVOS DENTRO DEL VALLE DE AGUASCALIENTES**

**PRESENTA**

Irving Enrique Servín Díaz

**PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN INGENIERÍA CIVIL EN  
EL ÁREA AMBIENTAL**

**TUTORA**

Mtra. En Ing. Ma. Guadalupe Lira Peralta

**COMITÉ TUTORIAL**

Dra. En C. Lilia Guerrero Martínez

Dr. En C. Martín Hernández Marín

**DR. EN C.T.C HÉCTOR HOMERO POSADA ÁVILA**  
**DECANO DEL CENTRO CIENCIAS DEL DISEÑO Y LA CONSTRUCCIÓN**

**PRESENTE**

Por medio del presente como **Miembros del Comité Tutorial** designado del estudiante **IRVING ENRIQUE SERVIN DIAZ** con ID 152937 la tesis titulada: **MODELACIÓN FÍSICO Y NUMÉRICA DE LA INFILTRACIÓN A TRAVÉS DE POZOS INACTIVOS DENTRO DEL VALLE DE AGUASCALIENTES**, un trabajo propio, innovador, relevante e inédito y con fundamento en el Artículo 175, Apartado II del Reglamento General de Docencia damos nuestro consentimiento de que la versión final del documento ha sido revisada y las correcciones se han incorporado apropiadamente, por lo que nos permitimos emitir el **VOTO APROBATORIO**, para que él pueda proceder a imprimirla así como continuar con el procedimiento administrativo para la obtención del grado.

Ponemos lo anterior a su digna consideración y sin otro particular por el momento, le enviamos un cordial saludo.

**ATENTAMENTE**  
**"Se Lumen Proferre"**

**Aguascalientes, Ags., a día 15 de junio de 2021**



M. en Ing. Ma. Guadalupe Lira Peralta  
**Tutora de Modelación físico y numérica de la infiltración a través de pozos inactivos dentro del valle de Aguascalientes**



Dra. En C. Lilia Guerrero Martínez  
**Co-Tutora de Modelación físico y numérica de la infiltración a través de pozos inactivos dentro del valle de Aguascalientes**



Dr. En C. Martín Hernández Marín  
**Asesor de Modelación físico y numérica de la infiltración a través de pozos inactivos dentro del valle de Aguascalientes**

c.c.p.- Interesado  
c.c.p.- Secretaría Técnica del Programa de Posgrado

Elaborado por: Depto. Apoyo al Posgrado.  
Revisado por: Depto. Control Escolar/Depto. Gestión de Calidad.  
Aprobado por: Depto. Control Escolar/ Depto. Apoyo al Posgrado.

Código: DO-SEE-FO-16  
Actualización: 00  
Emisión: 17/05/19

Fecha de dictaminación dd/mm/aaaa: 16/06/2021

**NOMBRE:** IRVING ENRIQUE SERVIN DIAZ **ID** 152937  
**PROGRAMA:** MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL **LGAC (del posgrado):** APLICACIÓN DE CIENCIAS DE LA TIERRA EN PROYECTOS DE INFRAESTRUCTURA  
**TIPO DE TRABAJO:** ( X ) Tesis ( ) Trabajo Práctico  
**TÍTULO:**  
**IMPACTO SOCIAL (señalar el impacto logrado):** Buscar una metodología alterna para combatir la escases de agua provocada por el desbalance hídrico

INDICAR SI NO N.A. (NO APLICA) SEGÚN CORRESPONDA:

INDICAR	SI	NO	N.A. (NO APLICA)	SEGÚN CORRESPONDA:
<b>Elementos para la revisión académica del trabajo de tesis o trabajo práctico:</b>				
SI				El trabajo es congruente con las LGAC del programa de posgrado
SI				La problemática fue abordada desde un enfoque multidisciplinario
SI				Existe coherencia, continuidad y orden lógico del tema central con cada apartado
SI				Los resultados del trabajo dan respuesta a las preguntas de investigación o a la problemática que aborda
SI				Los resultados presentados en el trabajo son de gran relevancia científica, tecnológica o profesional según el área
SI				El trabajo demuestra más de una aportación original al conocimiento de su área
SI				Las aportaciones responden a los problemas prioritarios del país
SI				Generó transferencia del conocimiento o tecnológica
SI				Cumple con la ética para la investigación (reporte de la herramienta antiplagio)
<b>El egresado cumple con lo siguiente:</b>				
SI				Cumple con lo señalado por el Reglamento General de Docencia
SI				Cumple con los requisitos señalados en el plan de estudios (créditos curriculares, optativos, actividades complementarias, estancia, predoctoral, etc)
SI				Cuenta con los votos aprobatorios del comité tutorial, en caso de los posgrados profesionales si tiene solo tutor podrá liberar solo el tutor
N.A.				Cuenta con la carta de satisfacción del Usuario
SI				Coincide con el título y objetivo registrado
SI				Tiene congruencia con cuerpos académicos
SI				Tiene el CVU del Conacyt actualizado
NO				Tiene el artículo aceptado o publicado y cumple con los requisitos institucionales (en caso que proceda)
<b>En caso de Tesis por artículos científicos publicados</b>				
N.A.				Aceptación o Publicación de los artículos según el nivel del programa
N.A.				El estudiante es el primer autor
N.A.				El autor de correspondencia es el Tutor del Núcleo Académico Básico
N.A.				En los artículos se ven reflejados los objetivos de la tesis, ya que son producto de este trabajo de investigación.
N.A.				Los artículos integran los capítulos de la tesis y se presentan en el idioma en que fueron publicados
N.A.				La aceptación o publicación de los artículos en revistas indexadas de alto impacto

Con base a estos criterios, se autoriza se continúen con los trámites de titulación y programación del examen de grado:

SI  X  
 No

FIRMAS

Elaboró:

\* NOMBRE Y FIRMA DEL CONSEJERO SEGÚN LA LGAC DE ADSCRIPCIÓN:

DR. MARIO EDUARDO ZERMENO DE LEÓN

NOMBRE Y FIRMA DEL SECRETARIO TÉCNICO:

DR. MARTÍN HERNÁNDEZ MARÍN

\* En caso de conflicto de intereses, firmará un revisor miembro del NAB de la LGAC correspondiente distinto al tutor o miembro del comité tutorial, es grado por el Decano

Revisó:

NOMBRE Y FIRMA DEL SECRETARIO DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO:

DR. ALEJANDRO ACOSTA COLLAZO

Autorizó:

NOMBRE Y FIRMA DEL DECANO:

DR. en C. T. C. HÉCTOR HORTALIZA POSADA ÁVILA

**Nota: procede el trámite para el Depto. de Apoyo al Posgrado**

En cumplimiento con el Art. 105C del Reglamento General de Docencia que a la letra señala entre las funciones del Consejo Académico: ... Cumplir la eficiencia terminal del programa de posgrado y el Art. 105F las funciones del Secretario Técnico, llevar el seguimiento de los alumnos.

## Agradecimientos

Agradezco al Consejo de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por su apoyo y patrocinio recibido durante mi estancia en la maestría lo que conllevó a poder realizar esta investigación. También quiero agradecer a la Universidad Autónoma de Aguascalientes, mi alma mater, por todo el apoyo recibido y los valores que me enseñaron a lo largo de mis estudios. De igual manera quiero agradecer a CCAPAMA y a CONAGUA por la atención recibida y por la información necesaria que me brindaron para poder realizar mi investigación.

Agradezco de manera especial a mi tutora la Mtra. Ma. Guadalupe Lira Peralta por su gran atención y apoyo recibido en toda mi estancia de la maestría, de igual manera agradezco de manera especial a mi cotutora la Dra. Lilia Guerrero Martínez por el gran apoyo que me brindó y toda la paciencia que tuvo conmigo de principio a fin. De igual manera agradezco al Dr. Martín Hernández Marín y a todo mi comité por guiarme, orientarme, revisarme y corregirme en la investigación de mi tesis.

## Dedicatoria

Dedico esta tesis a mi esposa Marcela Nohemí Pedroza Zermeño por apoyarme en todo momento, también por su atención, su cariño brindado, por decirme que, si se puede. por no dejarme caer y por ser una familia para mí, muchas gracias Collins.

Dedico esta tesis a mi padre Enrique Servín Ramírez, a mi madre Hilda Diaz Trejo y a mi hermana Karen Jared Servín Diaz por su maravilloso apoyo, su gran afecto hacia a mí, el cual me hace seguir esforzándome cada día y también por ser un gran ejemplo para mí, los quiero mucho, gracias.

Por último, dedico esta tesis a mis amigos y compañeros de ambiental, con los cuales pase grandes momentos de estrés, diversión, viajes, aventuras, angustias, entre otras cosas. Muchas gracias amigos.

## ÍNDICE

### Contenido

1. Resumen .....	6
2. Abstract.....	7
3. Introducción.....	8
4. Objetivos.....	9
4.1. Objetivo general .....	9
4.2. Objetivos particulares.....	9
4.3. Preguntas de investigación.....	9
5. Hipótesis .....	9
6. Justificación .....	10
7. Estado del arte .....	12
8. Marco teórico.....	16
8.1. Infiltración.....	16
8.2. Conductividad hidráulica .....	17
8.3. Zonas de recarga.....	17
8.4. Pozos hidráulicos.....	19
8.5. Zona de estudio .....	20
8.6. Geología del Valle de Aguascalientes.....	21
8.6.1. Geología del subsuelo .....	21
8.7. Hidrogeología del valle .....	22
8.8. Clima .....	22
8.9. Modelación física.....	23
8.10. Modelación numérica .....	23
9. Metodología.....	25
9.1. Zona de estudio .....	25
9.2. Experimento en campo.....	29
9.2.1. Método sónico.....	29
9.2.2. Método sónico.....	33

9.3. Modelo numérico .....	38
9.4. Modelo físico.....	42
10. Resultados.....	48
10.1. Experimento en campo .....	48
10.2. Modelo numérico.....	51
10.2.1. Primera parte.....	52
10.2.2. Segunda parte.....	59
10.3. Modelo Físico.....	68
11. Conclusión.....	70
12. Recomendaciones .....	71
Fuentes de consulta.....	72

**Ilustraciones**

Ilustración 1. Esquema de un pozo de suministro.....	20
Ilustración 2. Plano del Valle de Aguascalientes.....	21
Ilustración 3. Mapa de los pozos abandonados de CCAPAMA y CONAGUA en el Valle de Aguascalientes. ....	26
Ilustración 4. Ubicación de la zona de estudio. ....	28
Ilustración 5. Localización de la zona de estudio. ....	28
Ilustración 6. Vista frontal de la ubicación del pozo inactivo.....	29
Ilustración 7. Dispositivos utilizados para grabar el sonido producido dentro del pozo. ....	30
Ilustración 8. Pozo inactivo número 4. ....	31
Ilustración 9. Sonda para medir la profundidad del nivel de agua dentro del pozo.....	31
Ilustración 10. Grabaciones realizadas por un aparato de sonido, mediante el software <i>Wavepad</i> . .....	32
Ilustración 11. Amplitud de espesor y longitud de onda mediante el software <i>Wavepad</i> . ....	32
Ilustración 12. Pipa de agua con capacidad de 10000 litros de agua.....	33
Ilustración 13. Llenado de la cubeta para calcular el caudal de vaciado. ....	35
Ilustración 14. Vaciado de agua potable dentro del pozo. ....	37

Ilustración 15. Grabación del sonido producido dentro del pozo por medio de dispositivos de sonido..... 37

Ilustración 16. Modelo esquemático del pozo inactivo y la estratigrafía de la zona. .... 39

Ilustración 17. Modelo físico. .... 44

Ilustración 18. Circuito eléctrico creado para medir el nivel de agua dentro del modelo físico. . 45

Ilustración 19. Demostración del funcionamiento del circuito eléctrico al entrar en contacto con el agua. .... 45

Ilustración 20. Medición de los niveles de agua dentro del modelo físico con ayuda del circuito eléctrico..... 46

Ilustración 21. Apertura del molde debido a la presión del agua y del material..... 47

Ilustración 22. Ruptura del molde del modelo físico por la parte inferior..... 47

Ilustración 23. Modelo numérico, conductividad promedio (corte frontal)..... 53

Ilustración 24. Modelo numérico, conductividad promedio (vista superior)..... 53

Ilustración 25. Modelación numérica, conductividad mínima (vista superior). .... 54

Ilustración 26. Modelación numérica, conductividad mínima (corte frontal). .... 54

Ilustración 27. Modelo numérico, conductividad máxima (vista superior). .... 56

Ilustración 28. Modelo numérico, conductividad máxima (corte frontal). .... 56

Ilustración 29. Modelo numérico, conductividad promedio multiplicada por 6 (vista superior). 57

Ilustración 30. Modelo numérico, conductividad promedio multiplicada por 6 (corte frontal). .. 57

Ilustración 31. Modelo numérico, conductividad promedio dividida entre 6 (corte frontal). .... 58

Ilustración 32. Modelo numérico, conductividad promedio dividida entre 6 (vista superior). .... 58

Ilustración 33. Modelo numérico del experimento (vista superior)..... 60

Ilustración 34. Modelo numérico del experimento (corte frontal)..... 60

Ilustración 35. Modelo numérico, prueba de vaciado 1 (conductividad hidráulica 0.0075 m/s).. 61

Ilustración 36. Modelo numérico, prueba de reposo 1 (conductividad hidráulica 0.0075 m/s). .. 61

Ilustración 37. Modelo numérico, prueba de vaciado 2 (conductividad hidráulica 0.0075 m/s).. 62

Ilustración 38. Modelo numérico, prueba de reposo 2 (conductividad hidráulica 0.0075 m/s). .. 62

Ilustración 39. Modelo numérico, prueba de vaciado 3 (conductividad hidráulica 0.0075 m/s).. 63

Ilustración 40. Modelo numérico, prueba de reposo 3 (conductividad hidráulica 0.0075 m/s). .. 63

Ilustración 41. Modelo numérico, prueba de vaciado 4 (conductividad hidráulica 0.0075 m/s).. 64

Ilustración 42. Modelo numérico, prueba de reposo 4 (conductividad hidráulica 0.0075 m/s). .. 64

Ilustración 43. Modelo numérico, prueba de vaciado 5 (conductividad hidráulica 0.0075 m/s).. 65  
 Ilustración 44. Modelo numérico, prueba de reposo 5 (conductividad hidráulica 0.0075 m/s). .. 65  
 Ilustración 45. Modelo numérico, prueba de vaciado 6 (conductividad hidráulica 0.0075 m/s).. 66  
 Ilustración 46. Modelo numérico, prueba de reposo 6 (conductividad hidráulica 0.0075 m/s). .. 66  
 Ilustración 47. Modelo numérico, prueba de vaciado 7 (conductividad hidráulica 0.0075 m/s).. 67  
 Ilustración 48. Modelo numérico, prueba de reposo 7 (conductividad hidráulica 0.0075 m/s). .. 67

**Gráficas**

Gráfica 1. Experimento Recarga-Infiltración. .... 51  
 Gráfica 2. Experimento en el modelo físico. .... 69

**Tablas**

Tabla 1. Promedio de la prueba de profundidad del pozo. .... 33  
 Tabla 2. Periodos de vaciado y medición ..... 34  
 Tabla 3. Estratigrafía de la zona de estudio. .... 39  
 Tabla 4. Valores estimados de la conductividad hidráulica en m/día. .... 41  
 Tabla 5. Valores estimados de conductividad hidráulica (m/s). .... 42  
 Tabla 6. Medidas para el molde del modelo físico. .... 42  
 Tabla 7. Escalamiento de la estratigrafía de la zona de estudio para el modelo físico. .... 43  
 Tabla 8. Resultados del experimento en pozo. .... 49  
 Tabla 9. Gasto de bombeo promedio (lps.)..... 52  
 Tabla 10. Error porcentual, conductividad promedio. .... 53  
 Tabla 11. Error porcentual, conductividad mínima. .... 55  
 Tabla 12. Error porcentual, conductividad máxima..... 56  
 Tabla 13. Error porcentual, conductividad hidráulica promedio multiplicada por 6. .... 57  
 Tabla 14. Error porcentual, conductividad hidráulica promedio dividida entre 6. .... 58  
 Tabla 15. Experimento en modelo físico. .... 68

**Ecuaciones**

Ecuación 1. Distancia de viaje de sonido. .... 29  
 Ecuación 2. Profundidad del nivel estático. .... 29

Ecuación 3. Área de la cubeta. .... 34  
Ecuación 4. Volumen de la cubeta. .... 35  
Ecuación 5. Caudal de vaciado. .... 35  
Ecuación 6. Volumen de vaciado (t=120seg). .... 36  
Ecuación 7. Volumen de vaciado (t=101seg). .... 36  
Ecuación 8. Infiltración. .... 50



## 1. Resumen

A través de una metodología que implicó la utilización de experimentación y modelaciones, en este estudio se evaluó la capacidad de infiltración de agua de un pozo inactivo en el Valle de Aguascalientes, con la finalidad de comprobar si puede ser utilizado como recarga hidráulica de aguas subterráneas. En el valle de Aguascalientes, la sobreexplotación del acuífero es provocada por un desbalance hídrico, esto es, que la cantidad de agua que se extrae del acuífero es mayor a la que se infiltra, provocando el descenso del nivel freático, lo que genera que varios pozos queden deshabilitados, ya sea porque tienen poca profundidad o por los costos de operación, donde al ir descendiendo el nivel freático, las perforaciones llegan a ser muy profundas y muy costosas, o en su caso, que el agua a esa profundidad pueda contener minerales pesados, lo que ocasiona que el agua extraída del pozo pueda requerir un tratamiento especial.

Según la norma NOM-004-CNA-1996 (NOM CNA., 1997), una vez que los pozos se vuelven inactivos, se pueden usar como pozos de monitoreo o en su defecto, ser debidamente rellenados y sellados para evitar contaminar el acuífero por medio de alguna potencial filtración de contaminantes. Sin embargo, en ninguna parte de esa norma se especifica que estos pozos pueden ser utilizados para efectuar procesos de recarga, por lo que, esta investigación trata evaluar la viabilidad de que los pozos inactivos puedan servir como puntos de infiltración hacia el acuífero, por medio de tres metodologías: modelación física, modelación numérica y experimentación en el pozo de estudio, en donde, estas metodologías arrojaron diferentes resultados con mínimos valores de discrepancia, concluyendo que al menos el pozo estudiado puede servir como punto de recarga directa hacia el acuífero.

## 2. Abstract

Through a methodology that involved the use of experimentation and modeling, in this study the water infiltration capacity of an inactive well in the Aguascalientes Valley was evaluated, in order to verify if it can be used as a hydraulic recharge of underground water. In the Aguascalientes valley, the overexploitation of the aquifer is caused by a water imbalance, that is, the amount of water that is extracted from the aquifer is greater than that which is infiltrated, causing the drop in the water table, which generates wells are disabled, either because they are shallow or because of operating costs, where as the water table decreases, the drilling becomes very deep and very expensive, or where appropriate, that the water at that depth may contain minerals heavy, which means that the water drawn from the well may require special treatment.

According to standard NOM-004-CNA-1996 (NOM CNA., 1997), once the wells become inactive, they can be used as monitoring wells or, failing that, be properly filled and sealed to avoid contaminating the aquifer by means of some potential leakage of contaminants. However, nowhere in this standard is it specified that these wells can be used to carry out recharge processes, therefore, this research tries to evaluate the viability that inactive wells can serve as infiltration points into the aquifer, through of three methodologies: physical modeling, numerical modeling and experimentation in the study well, where these methodologies yielded different results with minimal discrepancy values, concluding that at least the well studied can serve as direct recharge point towards the aquifer.

### 3. Introducción

La escasez de agua es un problema que afecta al ser humano a nivel mundial debido al alto consumo y demanda; tomando en cuenta que el agua dulce que se encuentra en el planeta es sólo un pequeño porcentaje, en donde, una pequeña porción es para el consumo humano, el problema de abastecimiento es aún mayor.

En el estado de Aguascalientes, México, el consumo de agua se ha incrementado debido al crecimiento de la población, la industria y el sector agrícola, lo que genera que el líquido se agote a mayor velocidad (Hermosillo H., 2018). Por lo que se han realizado diversas investigaciones acerca de la recarga de los acuíferos, dentro de las cuales se encuentran análisis urbanísticos (Vázquez M., 2018), sistemas de información geográficos (Rodríguez L., 2016), análisis de variación de niveles de agua subterránea y precipitación (Guerrero L., 2016), entre otros. Con la finalidad de poder estimar el volumen de recarga que se efectúa en el Valle de Aguascalientes y combatir el agotamiento del recurso hídrico. Sin embargo, no se han analizado los pozos abandonados como posibles puntos de infiltración de agua superficial, para recarga del acuífero, como una forma de estimar la infiltración en zonas puntuales a través de modelaciones físicas y numéricas.

## 4. Objetivos

### 4.1. Objetivo general

Establecer el potencial del aporte hidráulico al acuífero del Valle de Aguascalientes por medio del análisis de la infiltración de agua en un pozo inactivo representativo, mediante experimentación en la zona de estudio y la realización de modelaciones físico y numéricas.

### 4.2. Objetivos particulares

- a) Recolectar información existente del acuífero del Valle de Aguascalientes, haciendo énfasis en la infiltración, pozos de recarga, parámetros hidráulicos e hidroestratigrafía.
- b) Revisar los pozos abandonados en el Valle de Aguascalientes.
- c) Seleccionar un pozo representativo de la zona de estudio.
- d) Realizar un experimento en el sitio de estudio para determinar el proceso de infiltración que existe por medio del pozo inactivo.
- e) Establecer un modelo físico a escala del pozo seleccionado que represente las condiciones hidroestáticas de la zona.
- f) Establecer un modelo numérico del pozo seleccionado.
- g) Cuantificar el aporte hidráulico del pozo.

### 4.3. Preguntas de investigación

- ¿Pueden ser utilizados los pozos abandonados dentro del Valle de Aguascalientes para la recarga natural del acuífero?

## 5. Hipótesis

Los pozos inactivos pueden utilizarse como canales de infiltración para un aporte potencial hacia el acuífero.

## 6. Justificación

El agua es un recurso vital cada vez más solicitado debido a diversos factores, tales como: el aumento de la población, escasez del líquido, difícil obtención, etc. Con respecto a la necesidad del agua en la población y el paso del tiempo, el resultado es que se reduce el volumen aprovechable del líquido. Las zonas donde la escasez de agua es aún mayor, se clasifican como: áridas, semiáridas, peráridas y superáridas (Holdridge L., 1967). Dos terceras partes del territorio mexicano se consideran zonas áridas o semiáridas, incluyendo el estado de Aguascalientes, en donde, en la mayor parte de estas zonas la precipitación anual no supera los 500 mm (CONAGUA, 2018a), donde dicho volumen de precipitación es menor al volumen de evapotranspiración, generando poca infiltración de agua hacia el acuífero (Holdridge L., 1967).

Para combatir la sobreexplotación de las aguas subterráneas en el estado, varios investigadores han estudiado el proceso de recarga por diferentes métodos, realizando: análisis urbanísticos (Vázquez M., 2018), sistemas de información geográficos (Rodríguez L., 2016), análisis de variación de niveles de agua subterránea y precipitación (Guerrero L., 2016), entre otros. Sin embargo, no se ha investigado acerca de los pozos abandonados como puntos de recarga, por lo tanto, si se conoce el proceso de infiltración que ocurre en los pozos abandonados en el Valle de Aguascalientes se podría analizar su potencial aporte hidráulico al acuífero para poder combatir el agotamiento hídrico.

Dentro del estado de Aguascalientes para combatir la escasez de agua el Gobierno del Estado por medio de una empresa privada realizó un estudio para poder efectuar la recarga artificial, pero debido a factores diversos como la investigación, política, normativa, aceptación, entre otros, no se logró concretar, por tanto, el medio más importante para efectuar la recarga en el Estado es por medio de la precipitación (recarga directa) y la recarga sub-horizontal, debido a que la recarga artificial en este momento no es viable y aun no se realizan otros métodos para poder recargar el acuífero.

Teniendo en consideración la gran cantidad de volumen de agua por precipitación que no se aprovecha de manera adecuada, sobre todo en zona metropolitana, la cual, genera inundaciones,

afectaciones en obras públicas, contaminación, colapso de sistemas de alcantarillados, entre otros, por este motivo se busca utilizar esta agua para ser reubicada en pozos de infiltración.

Antiguamente se pensaba que no existía infiltración en zonas secas, pero estudios recientes como el de *Analysis of rainfall-infiltration recharge to groundwater* de Wu (1994), entre otros, indican que puede haber infiltración en zonas áridas y semi-áridas incluso cuando la evapotranspiración supera la precipitación, tomando en cuenta esta situación, se puede establecer que la infiltración en el Valle de Aguascalientes mediante pozos inactivos puede ser viable, por lo que se plantea un análisis de infiltración en las zonas con los pozos abandonados que avale la hipótesis de que pueden servir como conductos de infiltración.

De acuerdo a los datos anteriores, en esta investigación se efectuará un análisis del potencial de recarga, que se comprobará mediante experimentos de infiltración en un pozo inactivo representativo, para luego comparar los resultados obtenidos con las modelaciones numéricas creadas a partir de los datos obtenidos en campo y el modelo físico a escala elaborado a partir de los materiales de la estratigrafía de la zona de estudio. Cabe destacar que este tipo de investigación es novedosa y no cuenta con antecedentes previos, por lo cual puede ser de gran relevancia para combatir la escasez de agua dentro del Valle de Aguascalientes.

## 7. Estado del arte

El planeta tierra está cubierto por 70% de agua, la cual se divide en agua dulce y salada, esta última ocupa un 97% del total de la superficie, distribuida principalmente en los mares y océanos, el 3% restante lo ocupa el agua dulce, sin embargo, la mayoría de agua dulce se encuentra en los glaciares, dejando un pequeño porcentaje de agua disponible al resto del planeta. De ese porcentaje de agua destinado al consumo humano, en su mayoría se utiliza para los sectores agrícola y urbano, los cuales incrementan al mismo ritmo del incremento poblacional, por tanto, mientras la demografía incrementa, también lo hacen las zonas urbanas y hectáreas destinadas al uso agrícola debido a la mayor demanda de alimento animal y vegetal. El agua también es utilizada en otros sectores como la industria, la construcción, el turismo, etc., lo que conlleva a un mayor consumo de agua disponible (Martínez, 2017), generando no sólo sobre explotación de aguas superficiales y subterráneas, sino que también inundaciones debido a la modificación del uso de suelo a causa de caminos y obras que impiden la infiltración del agua precipitada.

Según la *Comisión Nacional del Agua* (CONAGUA, 2018b) México cuenta con una estimación total de 1,449,471 millones m<sup>3</sup> anuales de precipitación, de los cuales, sólo el 6.4% se infiltra para recarga de acuíferos dado que el 21.4% escurre por los lechos de agua y el 71.2% se evapotranspira. El análisis del agua renovable se basa en tres perspectivas:

- *Distribución temporal*, son las temporadas del año cuando ocurre precipitación.
- *Distribución espacial*, es la investigación de los lugares donde ocurre precipitación.
- *Área de análisis*, trata de la problemática del agua y sus variaciones.

La actividad humana es muy importante en el ciclo hidrológico, de tal manera que se necesita un balance en las zonas de recarga y descarga, con la finalidad de que no se extraiga una mayor cantidad de agua que la infiltrada para recargar el acuífero y no generar una sobreexplotación, en algunos sitios, los pozos de extracción son tan profundos que la calidad del agua comienza a deteriorarse por la cantidad de minerales pesados que contiene (Monforte, *et.al.*, 2009).

Los países del mundo están enfrentando la problemática que genera la sobreexplotación y la escasez de agua, tal es el caso de los países bajos que han realizado estudios para la recuperación de sus acuíferos, por medio de diversos métodos como: la utilización de los acuíferos salinos para uso de riego en temporadas de alta demanda de agua, la reducción de la contaminación del agua por uso de productos químicos y la inyección por métodos artificiales, con el fin de aumentar la salinización y recuperación del nivel freático. Además, la recarga de pozos profundos se ha vuelto una opción viable para el suministro de agua, comparando el número de pozos de recarga en Estados Unidos entre los años de 1999 a 2009, el incremento fue de cuatro veces el número de pozos (Antoniou, *et.al.*, 2017)

Es necesario, cuantificar la tasa de recarga y determinar el volumen con el que cuenta el acuífero para determinar la gestión de recursos de determinadas zonas. Por medio de la recarga se presenta la infiltración de agua a través de la zona vadosa hasta llegar y formar parte de los acuíferos subterráneos, en donde, existen dos tipos de recargas: *la indirecta que se genera por la percolación de los lechos de agua (ríos, lagos, humedales y depresiones) y la directa, que se presenta por medio de la precipitación (De Vries, et.al., 2002).*

Existen diferentes tipos de estudios de recarga según la estimación de la recarga y la escala que se desea obtener, los cuales son: *la recarga regional, evalúa a gran escala los recursos hídricos, principalmente los acuíferos, pero como es un estudio a nivel regional, no puede utilizarse para estimar la variabilidad de la recarga a nivel local; y los estudios de calidad del agua, se encargan del estudio de transporte de contaminantes por medio del agua (Scanlon, et.al., 2006).*

En el Valle de Aguascalientes existen varios factores que dificultan o impiden la infiltración del agua hacia el acuífero como son: la precipitación, infiltración, evapotranspiración, ubicación, permeabilidad del suelo, además del cambio del uso de suelo por la urbanización, lo que suele generar inundaciones en temporadas pluviales, entre otras. Por tal motivo, la recarga de acuíferos subterráneos es una actividad que cada vez toma mayor fuerza debido a que es la mejor opción para el almacenamiento de agua, la generación de reservorios subterráneos y el incremento de nivel de los acuíferos.

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

A la recarga artificial según Custodio y Llamas (1983) se le conoce como la técnica que inyecta agua en el acuífero de forma no natural, con la finalidad de incrementar el volumen de las aguas subterráneas, además de mejorar su calidad. En donde, los modelos se realizarán con base al experimento en campo que, simula el proceso de la recarga artificial, es decir, inyectándole agua superficial a los pozos inactivos, con la finalidad de definir la capacidad de infiltración que tiene el suelo en ese punto y estimar su aporte al acuífero. Para efectuar la recarga artificial se tiene que verificar que la calidad del agua a inyectar sea igual o superior de la que se encuentra en el acuífero y además corroborar que la zona no se encuentre saturada (Guerrero, *et.al.*, 2018).

Para investigar el proceso de recarga existen diversos métodos como: las medidas directas, el balance hídrico, trazadores, aproximaciones de Darcy y métodos empíricos (Vélez, *et.al.*, 2004). Por tanto, se considera que las modelaciones entran en al menos una categoría de las mencionadas previamente.

Vanegas (2018) dice que con base a experimentos realizados se determina que el diámetro de un pozo no tiene relación con el gasto y el volumen de agua a infiltrar, en cambio la profundidad y la ubicación si son determinantes. Por tanto, el pozo seleccionado para este experimento y las modelaciones pueden arrojar resultados más determinantes debido a que se trata de un pozo profundo que se ubica en una zona seca y despoblada en un radio de 161 metros.

Según Gailey (2017), los estudios y modelaciones realizados en pozos se efectúan principalmente en zonas afectadas por la actividad humana, debido al impacto positivo o negativo que se puede generar en el gradiente hidráulico, en donde, el impacto más significativo es el uso del suelo, debido a la interacción que se genera entre el agua y los contaminantes como lo son pesticidas, detergentes, aceites, grasas, etc. Además, el contacto entre el agua y los diversos contaminantes puede afectar al acuífero a través de la infiltración de agua en pozos inactivos, debido a que los pozos no cuentan con estratos de suelos que sirvan como filtros purificadores, motivo que provoca una infiltración de agua de manera acelerada, sin purgación de contaminantes.

Como el territorio de la ciudad de Aguascalientes no es extenso, resulta beneficioso para efectuar la recarga del acuífero por precipitación (Vázquez, 2018). En donde, la recarga del acuífero sería

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

viable siempre y cuando se mantuviera un balance hídrico, de tal manera que no se extrajera mayor cantidad de agua de la que se recarga. Por esto, Guerrero-Martínez (2018), en su investigación *Evaluación de la recarga natural del acuífero del Valle de Aguascalientes mediante el análisis de variación de niveles de agua subterránea y datos de precipitación.*, analiza las zonas de recarga dentro del Valle de Aguascalientes por medio de pozos y el método de *Water Table Fluctuations* (WTF), en donde, menciona que en el municipio de Tepezalá se efectúa una gran cantidad de recarga, mientras que en Aguascalientes es muy bajo el nivel debido a la sobreexplotación, sin embargo, se desconoce el comportamiento de la infiltración al momento de inyectarle agua a un pozo que se encuentra inactivo, por esto, en caso de tener una alta velocidad de infiltración se puede determinar que este tipo de pozos pueden ser viables para efectuar recarga en el acuífero.

Para el caso de estudio se efectuaron modelaciones físicas, en donde, es importante mencionar que, son representaciones a escala de la realidad, en este caso, sirven para determinar el potencial del aporte que tienen los pozos inactivos hacia el acuífero de Aguascalientes. Para esto, se tomaron en cuenta las etapas de un estudio de modelación, las cuales son: definición del problema, adquisición y revisión de datos; descripción del reservorio y diseño del modelo; ajuste de historia y predicción (Loli, 1993).

Para este caso de estudio se decidió analizar a los pozos inactivos como un medio alternativo para efectuar la recarga, determinando si pueden servir como canales de infiltración hacia el acuífero por medio de experimentación en la zona de estudio y modelaciones física y numérica.

## 8. Marco teórico

La finalidad de la investigación es generar la recarga del acuífero mediante técnicas alternas para combatir la escasez de agua en el estado de Aguascalientes, en este caso se optó por investigar los pozos inactivos como canales de infiltración, donde se decidió experimentar en la zona de estudio y posteriormente elaborar un modelo numérico y un modelo físico para observar el proceso de infiltración desde otra perspectiva. Para esto, es importante conocer los parámetros generales como la infiltración y la conductividad hidráulica debido a que estos parámetros pueden indicar la posible generación de recarga en el acuífero. En donde, existen otros parámetros que pueden afectar la infiltración y la recarga, como la geología de la zona, infiltración, permeabilidad, temperatura, cobertura vegetal, entre otros, estos parámetros en conjunto indican donde puede efectuarse de mejor manera la recarga.

### 8.1. Infiltración

La infiltración es un proceso físico que obedece un movimiento vertical o subhorizontal del agua desde la superficie hasta el subsuelo, el cual, determina la recarga que el acuífero recibe. Para esto, existen tres procesos diferentes en la precipitación: *la detención superficial*, que es la acumulación de agua en la superficie, este proceso depende de las características topográficas, geológicas y climatológicas del terreno; *la infiltración*, este proceso depende de las condiciones geológicas del sitio como la permeabilidad, compactación, saturación del terreno, etc.; y *la escorrentía superficial*, que sucede cuando el agua superficial no es retenida, por tanto, no se infiltra, entonces dependiendo de la topografía del terreno el agua comienza a escurrir (Juncosa, 2005).

La permeabilidad del suelo tiene gran relevancia en el proceso de infiltración, debido a que existe una relación entre la permeabilidad y los canales capilares ya que por medio de ellos el agua desciende por gravedad hasta formar parte del reservorio hidrológico, cuando sucede la infiltración, los canales capilares se van llenando, por lo que, la cantidad de agua infiltrada por unidad de tiempo disminuye debido a que el suelo se comienza a saturar (Juncosa, 2005).

Según Juncosa (2005), la infiltración depende de diversos factores tales como:

- La presencia de precipitación, porque la infiltración se genera a partir de la misma.
- Las zonas de vida, las zonas denominadas áridas, semi-áridas y súper-áridas se caracterizan porque el porcentaje de evapotranspiración supera al porcentaje de precipitación, por lo que la cantidad de agua total a infiltrar se pierde debido a la evaporación y transpiración de las plantas.
- La topografía de la zona, en donde, si el agua precipita en lugares planos o huecos existe mayor probabilidad de infiltración debido a que se retiene el agua en esos sitios, en cambio si la precipitación ocurre en lugares donde la topografía está llena de pendientes se favorece el efecto de la escorrentía superficial, fluyendo el agua hacia zonas bajas, en donde la infiltración no se generará en esos sitios.
- La temperatura, dado a que en sitios donde la temperatura es lo suficientemente baja, el agua en lugar de fluir o infiltrarse se congela y la capa de hielo que se forma dificulta o impide la infiltración; en caso contrario cuando la temperatura es lo suficientemente alta el agua sufre el efecto de la evaporación, por tanto, el volumen de agua a infiltrar es mínimo.
- El contenido de humedad del suelo, existe una relación entre el nivel de saturación del suelo y el proceso de infiltración, ya que, entre más saturado se encuentre el suelo menor será el volumen de agua a infiltrar debido a que en esa situación los poros no estarán vacíos, sino que contendrán agua, lo cual, entorpecerá el proceso de la infiltración.

## **8.2. Conductividad hidráulica**

La conductividad hidráulica es la propiedad del agua sub-superficial o subterránea de poder atravesar o moverse por los medios litológicos, además, está relacionada con la porosidad, permeabilidad, saturación del suelo y las propiedades del fluido, como la viscosidad y la densidad. A su vez, la conductividad hidráulica está en función de “distancia entre tiempo”, por lo que sus unidades pueden ser m/día, m/seg., etc. (Barbecho, *et.al.*, 2012).

## **8.3. Zonas de recarga**

Según Cruz, entre otros (2011), la recarga se define como la cantidad de agua que se infiltra por el suelo hasta llegar al acuífero y formar parte del reservorio hidrológico. En donde, existen diferentes

tipos de recargas agrupadas en dos términos, recarga vertical y recarga horizontal. La recarga vertical es conocida por ser la infiltración del agua pluvial, pero también ocurre por la infiltración de agua a través de algún canal o río, la recarga por riego y la recarga artificial. La recarga horizontal se da por medio del aporte de algún otro acuífero, esto se logra por medio de la gravedad o por la topografía que existe entre los acuíferos.

Las zonas de descarga son aquellas en donde se encuentra el término de la escorrentía superficial, por lo cual estas zonas están representadas por lagos, manantiales, suelos salinos y un nivel de agua somero que, por medio de las zonas de descargas se puede analizar el funcionamiento del agua subterránea. En cambio, las zonas de recarga son difíciles de identificar debido a la infiltración de agua, por tanto, no existe un registro superficial visible de estas zonas, en donde, algunas características son: el nivel freático se encuentra a mayores profundidades; existen mayores registros de acides en el suelo; y la vegetación representativa es xerofita, debido a que cuentan con raíces largas para alcanzar mayores profundidades (Peñuela, *et.al.*, 2012). Según Faustino (2006), las zonas de recarga se clasifican en los siguientes tipos:

- **Zonas de recarga superficial:** Son aquellas que corresponden a prácticamente toda la cuenca exceptuando las zonas impermeables.
- **Zonas de recarga subsuperficial:** Son aquellas zonas de la cuenca capaces de retener el agua o almacenarla.
- **Zonas de recarga subterránea:** Son aquellas zonas de la cuenca donde ocurre la recarga vertical por medio de la infiltración y logran un aporte al acuífero.
- **Zonas de recarga sobterránea:** Son aquellas zonas de la cuenca donde existen fallas geológicas y se genera percolación por la misma.

Existen diferentes factores que afectan la recarga como lo son: la temperatura, el clima, la topografía, los niveles de precipitación del sitio, el suelo y la cobertura vegetal (Matus, *et. al.*, 2009). Un método para obtener las zonas de recarga puede ser por medio de los factores anteriormente mencionados y un coeficiente propuesto para cada factor, posteriormente con ayuda del software QGIS realizar los cálculos correspondientes (Vázquez, 2018).

## 8.4. Pozos hidráulicos

El pozo de suministro o extracción es una estructura hidráulica que se utiliza para captar y suministrar agua subterránea a la población, la industria y el ámbito agrícola. Su sitio de colocación depende de diversos factores como: las características del acuífero, calidad del agua y el nivel estático. Los pozos de exploración sirven para obtener las características antes mencionadas y además conocer la estratigrafía y la litología del sitio donde se pretende colocar el pozo de bombeo. Según la Comisión Nacional del Agua, (2007), existen 3 procesos básicos para iniciar con la extracción de agua del pozo, el ademado, engravado y cementación, las cuales son:

- **El ademado** comienza con una limpieza utilizando agua a través del pozo para desazolvarlo, posteriormente se evalúa el tipo de tubería y numeración de los tramos a utilizar según el diseño del pozo. La colocación de la tubería solamente se efectuará holgadamente para evitar daños a la estructura del pozo y al acuífero, la unión es determinada por el material de la tubería, si los tramos son de acero la unión se realizará mediante el uso de soldadura, en cambio si son de PVC la unión de los tramos será por medio de coples o roscas. Una vez colocada la tubería, esta se gira y se tensa para que permanezca verticalmente.
- **El engravado** es prácticamente un filtro de grava que se coloca entre el ademe y las paredes de perforación del pozo, la utilidad del engravado es asegurar la verticalidad de la tubería.
- **La cementación** consiste en un sellado del ademe o contrademe, este sello consiste en dar rigidez a la cámara de bombeo y prevenir la infiltración de contaminantes por medio del agua superficial hacia el acuífero.

Los pozos de suministro se vuelven pozos inactivos o abandonados debido a diversos factores, por ejemplo, el agotamiento del recurso hídrico, el descenso del nivel freático, la calidad del agua debido a metales pesados encontrados en el agua a mayores profundidades, costos de operación, entre otros. Algunos pozos inactivos siguen siendo monitoreados para supervisar el nivel del agua además de verificar que estos no sean puntos de infiltración de contaminantes (CONAGUA, 2007). En la ilustración 1 se puede ver un ejemplo de pozo de suministro (Varga, *et.al.*, 2002).

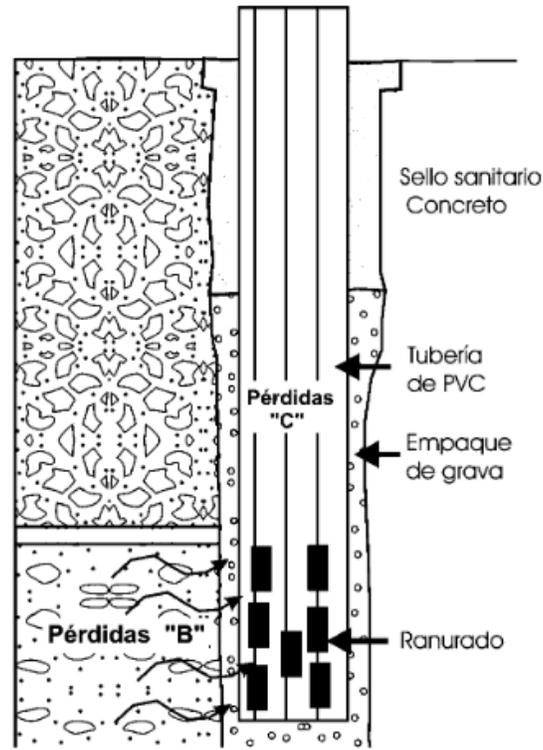


Ilustración 1. Esquema de un pozo de suministro.

### 8.5. Zona de estudio

La zona de estudio corresponde a la cuenca del Valle de Aguascalientes con denominación 0101, ubicada dentro del estado de Aguascalientes, de acuerdo a su división geopolítica comprende los municipios de Aguascalientes, Asientos, Calvillo, Cosío, Jesús María, Pabellón de Arteaga, Rincón de Romos, San Francisco de los Romo, San José de Gracia y Tepezalá. En la ilustración 2, se elaboró un plano de la ubicación del Valle de Aguascalientes de acuerdo a la definición del Valle realizada por Guerrero-Martínez (2016).

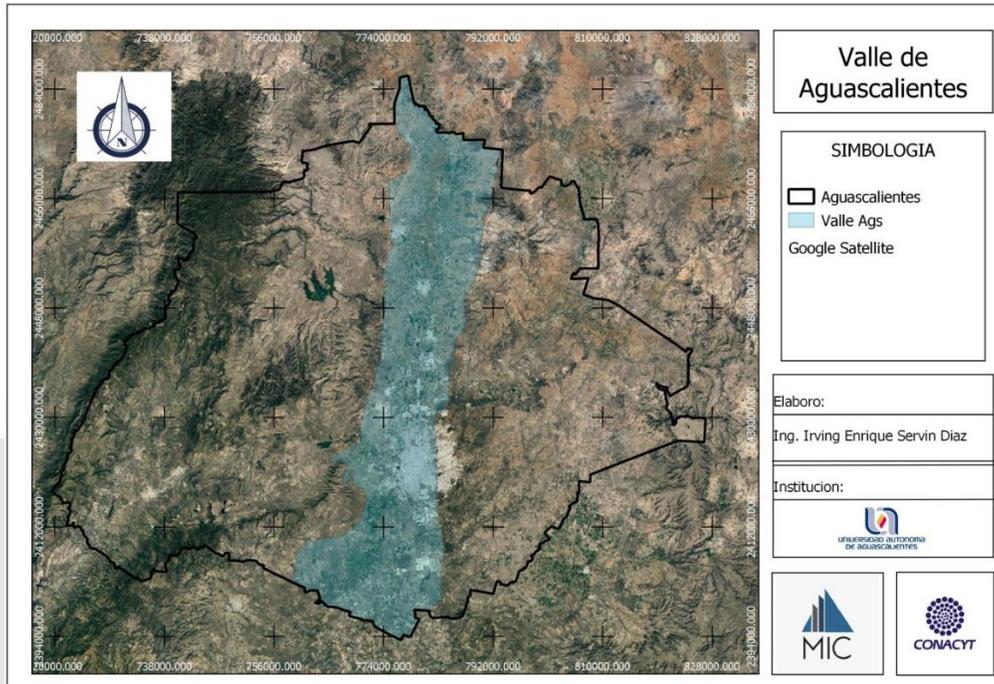


Ilustración 2. Plano del Valle de Aguascalientes.

Elaboración propia a partir de Guerrero-Martínez (2016), Evaluación de la recarga natural del acuífero del Valle de Aguascalientes mediante el análisis de variación de niveles de agua subterránea y datos de precipitación.

## 8.6. Geología del Valle de Aguascalientes

Según la CONAGUA (2018a), las partes elevadas del valle tienen un origen relacionado con el de la Sierra Madre Occidental, la cual nació de dos secuencias ígneas: una en su parte inferior que consta principalmente de rocas ígneas debido a flujos piroclásticos y flujos ignimbritos; y la parte superior cubierta de una gran capa de ignimbritas. Durante el neógeno se rellenaron las fosas tectónicas por medio de areniscas arcillosas, capas de conglomerados y gravas empacadas de arena gruesa, mediana y cenizas, con espesores superiores a los 200 metros.

### 8.6.1. Geología del subsuelo

La geología del subsuelo fue obtenida debido a estudios previos y cortes estratigráficos obtenidos por la elaboración de pozos subterráneos; mediante los cuales se determina que el valle está constituido en su parte superior por depósitos granulares los cuales tienen un origen aluvial y fluvial, de igual manera, en la parte elevada del valle se encuentran conglomerados polimícticos. En la parte inferior del valle se encuentran rocas volcánicas de composición riolítica

principalmente tobas acidas, ignimbritas y riolitas. Además, en la parte inferior también se encuentran rocas de origen sedimentario como, areniscas, calizas y lutitas, las cuales presentan permeabilidad por fracturamiento. (CONAGUA, 2018a).

### **8.7. Hidrogeología del valle**

El acuífero del Valle de Aguascalientes pertenece a la región hidrológica No. 12 conocida como Lerma-Chapala-Santiago, su ubicación más precisa es en la cuenca del Rio verde y la subcuenca del Rio San Pedro (CONAGUA, 2018a).

Según el Instituto del agua del estado de Aguascalientes, en el Valle de Aguascalientes existen tres medios desde el punto de vista hidrogeológico:

- Medio poroso con permeabilidad primaria y secundaria e intergranular y de fracturas.
- Medio fracturado con permeabilidad secundaria.
- Medio de doble porosidad con permeabilidad combinada, intergranular y de fracturas.

Estos medios hidrogeológicos conforman un acuífero libre heterogéneo y además sirven para controlar el movimiento del agua subterránea.

### **8.8. Clima**

El clima en el estado de Aguascalientes se clasifica como semi-árido, anualmente los valores de temperatura, precipitación y evaporación son de 17.1°C, 510.6 mm y 2010.4 mm respectivamente, en donde, los periodos con mayor intensidad de lluvia se producen en verano, mientras que en los periodos restantes la intensidad disminuye (CONAGUA, 2018a).

Según el Gobierno del Estado de Aguascalientes (2019) existen tres tipos de clima en el estado:

- **Semi-árido.** También conocido como estepario, este tipo de climas se caracterizan porque la evaporación supera la precipitación, las especies vegetativas predominantes son matorral desértico y vegetación xerófila, que cubren el 86.3% de la superficie del territorio.
- **Heladas.** La frecuencia de heladas en este tipo de clima es de 10 a 80 días al año, sin embargo, Aguascalientes presenta un rango de heladas de 20 a 40 días con periodo de noviembre a febrero.
- **Granizadas.** El rango de granizadas dentro del estado se divide en tres según el territorio del estado: de 0 a 2 días anuales en un 80% del territorio; de 2 a 4 días anuales en el 18% del territorio; y sin un patrón definido en el 2% restante del territorio.

## 8.9. Modelación física

La modelación física es una representación a escala de la realidad, el propósito de este tipo de modelaciones es investigar materiales, situaciones y comportamientos específicos, por lo que, se tiene que elaborar el prototipo con las características físicas y químicas más acercadas a la realidad. Pérez J., entre otros (2013), mencionan que no existe una normativa que explique cómo elaborar los modelos físicos, por tanto, es indispensable que la persona encargada de elaborar el o los modelos tenga conocimiento, ya sea de hidráulica, geotecnia, estructuras, entre otras, además de tratar de que el prototipo tenga las características más acercadas a la realidad, para estudiar el comportamiento que tendrá el modelo al momento de ensayarlo.

La ventaja que presentan los modelos físicos es que pueden estudiar el comportamiento de diferentes materiales en diversas situaciones de modo que se pueden evaluar costos, riesgos, soluciones, etc. La desventaja que existe es la falta de información que permite elaborar un modelo que contenga los elementos más apeados a la realidad (Pérez, *et.al.*, 2013).

## 8.10. Modelación numérica

La modelación numérica es una representación de la realidad de acuerdo a dimensiones reales en la hidrogeología. La modelación numérica se utiliza para representar las condiciones del acuífero,

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

pozos de recarga, estructuras hidráulicas subterráneas, etc., además, sirve para predecir futuras situaciones con base a diferentes condiciones (Chenini, *et.al.*, 2010).

A lo largo de los años han sido desarrollados varios modelos de diferente complejidad para investigar diferentes casos de estudio. La elaboración de modelos numéricos requiere que el encargado de realizar los modelos tenga el conocimiento suficiente para, obtener los datos de campo de manera correcta, ingreso de datos y manejo eficiente del software de modelado, e interpretación científica de los datos obtenidos (Betancur, *et.al.*, 2009).

En esta investigación se elaborarán modelos numéricos por medio del software MODFLOW, el cual, es un software en modelaje de diferencias finitas que permite simular flujo de aguas subterráneas en tres dimensiones. El software es de carácter gratuito y *open source*, lo cual, permite realizar mejoras por parte de los usuarios e ir mejorando el programa (Betancur, *et.al.*, 2009).

El concepto surgió en 1981, MODFLOW (*modular finite-difference ground-water flow model*) que nace para diseñar modelos de aguas subterráneas por medio de una idea del Servicio Geológico de los Estados Unidos de América, USGS. El software MODFLOW fue publicado en 1983 pero fue en 1987 cuando empezó a ser ampliamente utilizado, posteriormente con las modificaciones y mejoras elaboradas por los usuarios surge MODFLOW2000 que es el software pionero del programa que se utiliza actualmente (Betancur, *et.al.*, 2009).

## 9. Metodología

La metodología consiste en analizar el proceso de infiltración que se genera en un pozo inactivo representativo de la zona, con la finalidad de determinar si los pozos inactivos pueden ser útiles para generar procesos de recarga en el acuífero, para analizar el proceso de infiltración, se utilizaron tres metodologías distintas: modelación física, modelación numérica y experimento en el pozo.

### 9.1. Zona de estudio

Para determinar la zona de estudio, se realizó un análisis previo en el cual la primera acción fue la recopilación de la información acerca de los pozos que se encuentran inactivos en el área de estudio, por lo que se recurrió a la Comisión Ciudadana de Agua Potable y Alcantarillado del Municipio de Aguascalientes (CCAPAMA) y a la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), que son las dependencias encargadas del manejo del agua en el municipio y en el estado de Aguascalientes.

Por parte de CCAPAMA se tienen registrados un total de 27 pozos inactivos a lo largo del municipio, en donde 21 se encuentran dentro de la mancha urbana y solo 6 se localizan en zonas rurales. Mientras que en CONAGUA se tienen registrados en la actualidad 360 pozos inactivos distribuidos a lo largo del estado, los cuales se clasifican por el tipo de uso: agrícola, domestico, industrial, pecuario, público, público urbano y de servicios. Además, la división de pozos inactivos que CONAGUA maneja para cada estado, es la siguiente:

- Aguascalientes: 122
- Asientos: 3
- Cosío: 20
- Jesús María: 51
- Pabellón de Arteaga: 47
- Rincón de Romos: 66

- San Francisco de los Romo: 26
- Tepezalá: 25

En la ilustración 3 se elaboró un mapa donde se observan los pozos inactivos que se encuentran dentro del Valle de Aguascalientes, en donde, los puntos de color azul son los pozos inactivos registrados en CONAGUA, mientras que los rojos son los registrados en CCAPAMA.

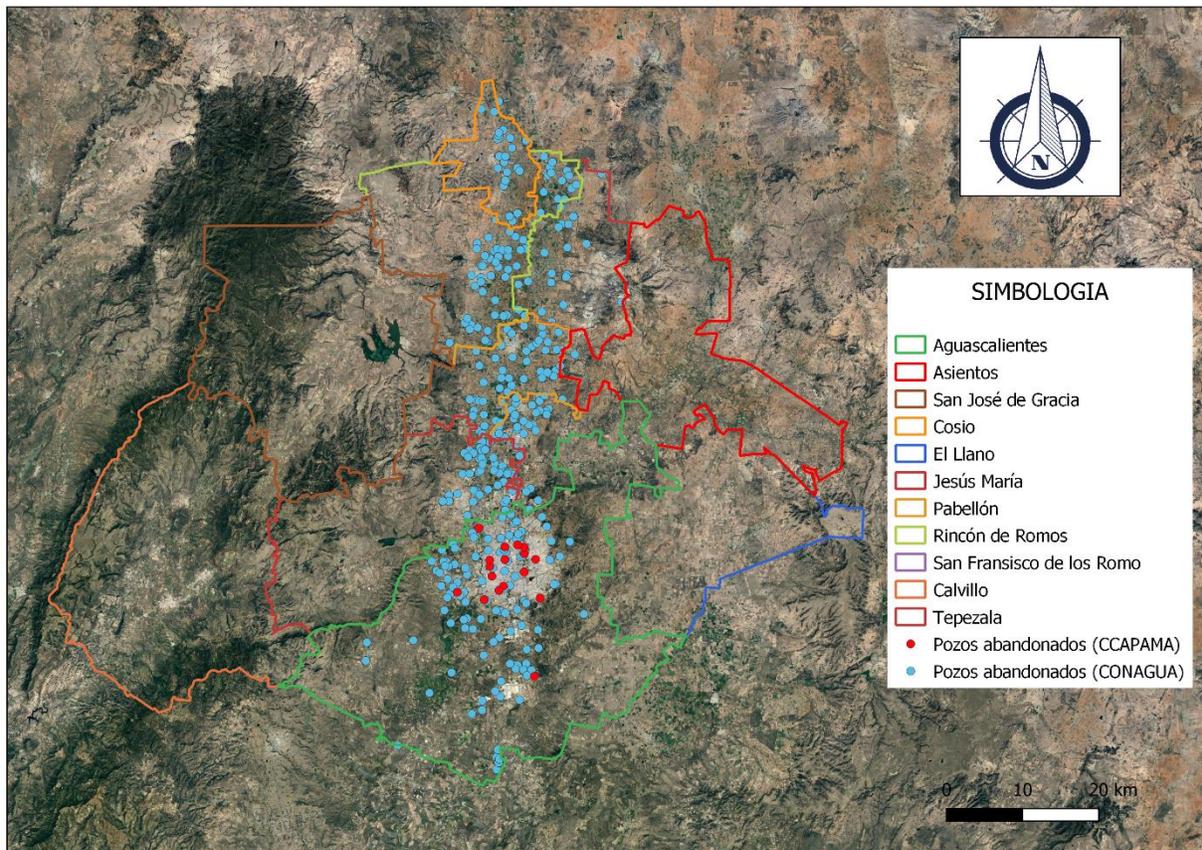


Ilustración 3. Mapa de los pozos abandonados de CCAPAMA y CONAGUA en el Valle de Aguascalientes.

Elaboración propia a partir de los datos proporcionados en el 2018 por CCAPAMA y CONAGUA.

Una vez obtenidos los datos de todos los pozos inactivos que contiene el estado de Aguascalientes, se procedió a pedir los permisos necesarios a las dependencias encargadas CCAPAMA y CONAGUA para realizar la campaña experimental en ciertos pozos inactivos, en ambos casos su respuesta fue negativa debido a que la mayoría de los pozos ya habían sido rellenados y sellados para impedir la contaminación del acuífero, mientras tanto, los pozos que podrían servir para

realizar la investigación no son de la propiedad de alguna de las dos dependencias. Ante esta situación el director de CONAGUA recomendó utilizar los pozos de la Universidad Autónoma de Aguascalientes (UAA) debido a que son propiedad de la misma.

Posteriormente se realizó la gestión dentro de la UAA, con la opción de elegir entre dos pozos, el pozo ACIUAA y el Pozo 4, de los cuales se muestra la ubicación a continuación, ambos pozos se encuentran en el campus de La Posta UAA. En donde, las condiciones del pozo de ACIUAA y el pozo 4, son las siguientes: pozo de la ACIUAA se encuentra seco, pero aún no ha sido rellenado y sellado, mientras que el pozo número cuatro aún tiene agua, pero se encuentra inactivo debido a que la bomba solo extrae 4 litros por segundo, por tanto, no es viable debido a la cantidad de energía eléctrica que consume la bomba en comparación con la cantidad de agua que extrae. Según la información anterior, se determinó que el pozo 4 resulta más viable, ya que, aunque está inactivo aun contiene agua, la cual, se necesita para implementar el método sónico que consiste en golpear el tubo del ademe para producir sonido dentro del pozo y grabar el eco que se produce, que determina mediante fórmulas la profundidad en la que se encuentra el nivel del agua.

En la ilustración 4 se observa la zona de estudio de manera general, mientras que en la ilustración 5 se observa la zona de estudio a una escala más pequeña que permite identificar a detalle su ubicación y en la ilustración 6 se observa la ubicación del pozo con vista frontal para distinguir el terreno que es una zona árida.

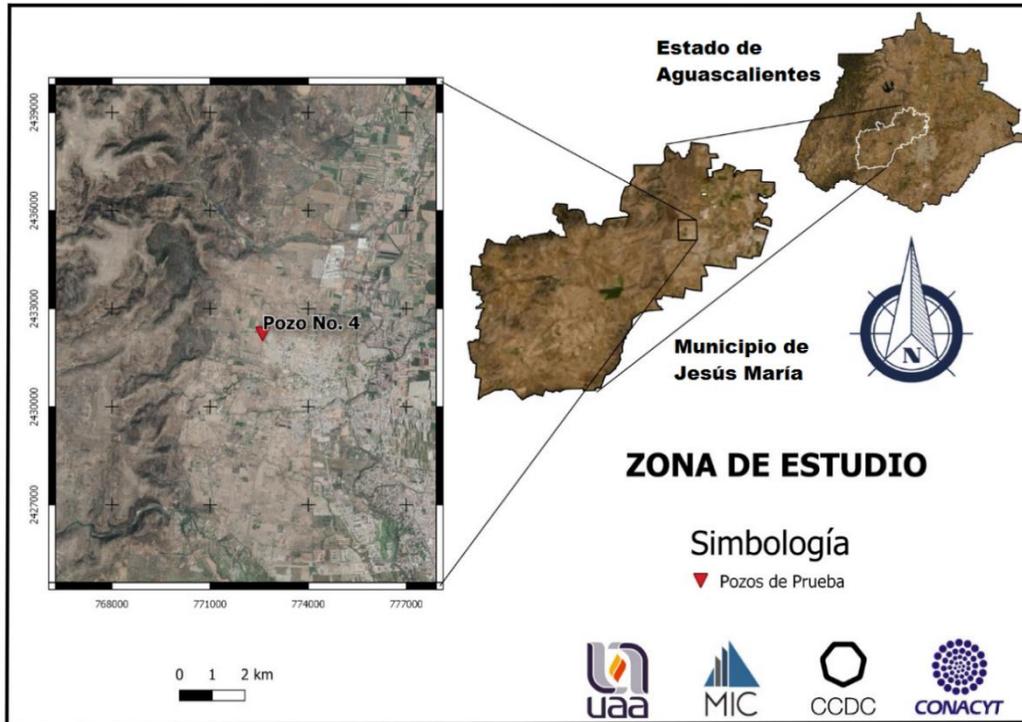


Ilustración 4. Ubicación de la zona de estudio.

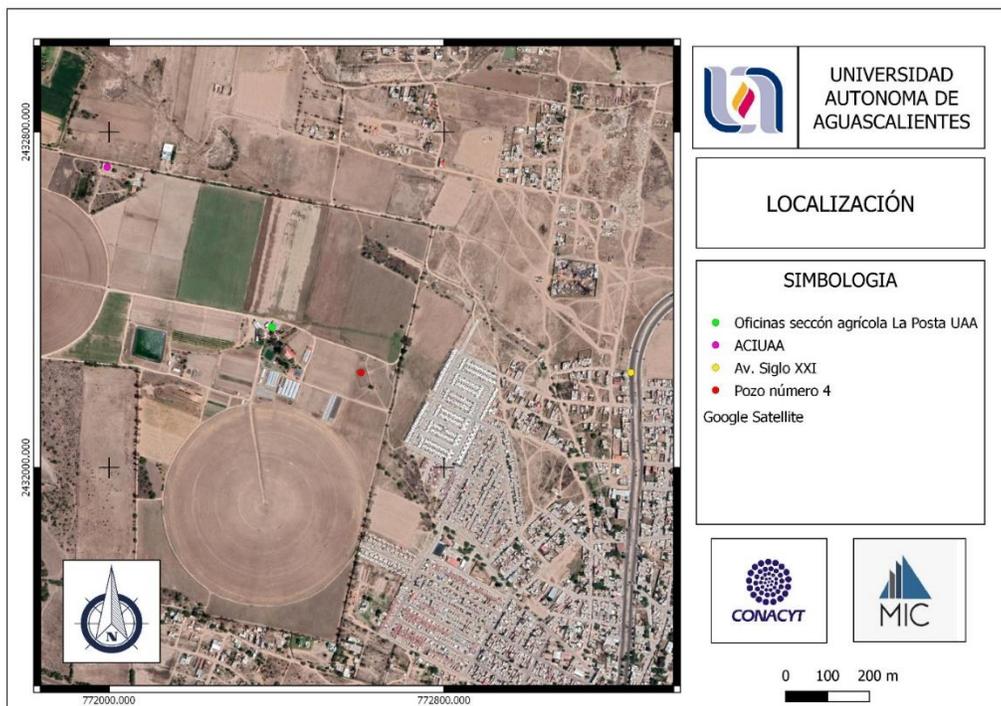


Ilustración 5. Localización de la zona de estudio.



Ilustración 6. Vista frontal de la ubicación del pozo inactivo.

Al tener definido el pozo que se utilizará para la investigación, se divide la investigación en tres partes: experimento en campo, modelo numérico y modelo físico. A continuación, se describen.

## 9.2. Experimento en campo

### 9.2.1. Método sónico

El método propuesto para medir la profundidad de agua dentro del pozo después del momento del vaciado se conoce como *método sónico* el cual consiste en realizar una grabación del golpe al tubo del ademe y el posterior análisis de la onda. En donde, mediante el software *Wavepad* se analizó la longitud de onda, con la finalidad de medir el momento en que se produce el eco, después, se realizaron los cálculos para determinar el nivel del agua, a través de la ecuación 1 y 2

$$Dv = (v)(t)$$

**Ecuación 1**

$$P=Dv/2$$

**Ecuación 2**

En donde:

$D_v$ = Distancia de viaje de sonido m

$v$ = Velocidad del sonido, igual a 343 m/seg

$t$ =Tiempo entre ecos en seg

$P$ =Profundidad del nivel estático en m

Se optó por este método debido a la practicidad y a los buenos resultados que ofrece, en donde, con un aparato de grabación y el software, se determina la profundidad del nivel estático, sin tener que recurrir a la sonda, ya que, al estar deshabilitado el pozo, la sonda no está fija y el proceso de medición llevaría un tiempo aproximado de 30 minutos por medición, lo cual, representaba demasiado tiempo comparado con los intervalos de infiltración.

Para la aplicación del método sónico se utilizaron cuatro aparatos de sonido que grabaron el sonido emitido al golpear una tapa de metal que se colocó encima del ademe para producir un sonido más fuerte y claro. Se realizó dicho procedimiento seis veces, con la finalidad de que al reproducir el sonido en el software se pudiera comparar la longitud de onda entre ecos. En la ilustración 7 se muestra el momento en el que se golpea la tapa metálica, además se observan los aparatos de medición.



Ilustración 7. Dispositivos utilizados para grabar el sonido producido dentro del pozo.

La primera acción a realizar fue medir la profundidad del nivel estático a través de la sonda, mediante el método sónico con la finalidad de obtener una referencia en las variaciones ofrecidas durante el experimento, además del error entre ambas metodologías. En la ilustración 8 se puede observar la condición en la que se encuentra el pozo inactivo, el cual, está cubierto por una roca.



Ilustración 8. Pozo inactivo número 4.

En la ilustración 9 se observa el momento en que se introdujo la sonda para medir la profundidad del nivel estático.



Ilustración 9. Sonda para medir la profundidad del nivel de agua dentro del pozo.

Una vez realizado el experimento en campo, se analizaron las ondas de sonido para la determinación de la profundidad inicial del nivel freático. En la ilustración 10 se observa el software *Wavepad*, en donde, se aprecian los cinco golpes que se le dieron a la tapa metálica y los ecos producidos.

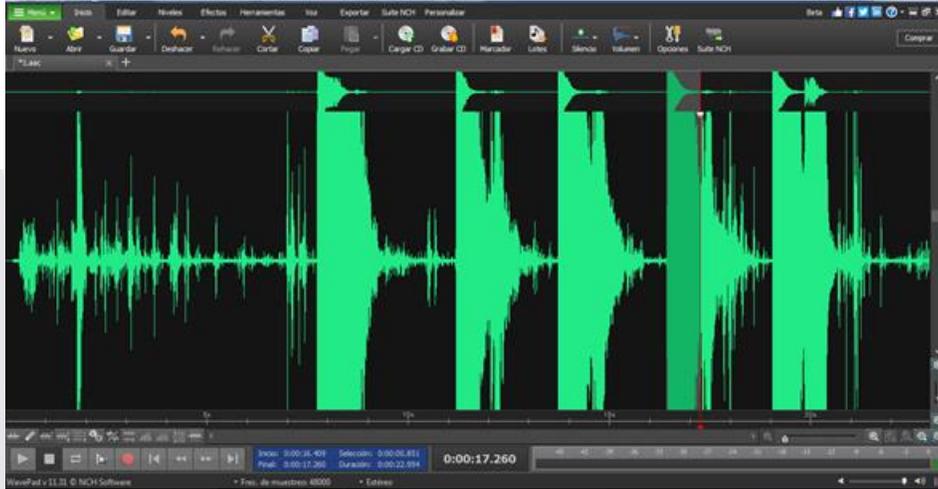


Ilustración 10. Grabaciones realizadas por un aparato de sonido, mediante el software *Wavepad*.

En la ilustración 11 se aprecian la longitud y el espesor de la onda producida al generar el eco analizada con la ayuda del software *Wavepad* de manera amplificada.



Ilustración 11. Amplitud de espesor y longitud de onda mediante el software *Wavepad*.

Una vez analizados los sonidos mediante el software *Wavepad*, los resultados obtenidos fueron los siguientes:

Tabla 1. Promedio de la prueba de profundidad del pozo.

Aparato de grabación	Profundidad (mts.)
1	164.47
2	163.61
3	163.95
4	153.32
$\Sigma$	161.3375

Dado que el resultado de la medición con la sonda resulto de 162 metros de profundidad y la medición con el método sónico de 161.3375 metros de profundidad del agua dentro del pozo, entonces, se tiene una discrepancia muy pequeña con un valor de 0.6625 metros, por tanto, se determina que el método sónico es viable para realizar las mediciones en el experimento de vaciado de agua.

**9.2.2. Método sónico**

De manera general el experimento en pozo consiste en vaciar una cantidad de 10 m<sup>3</sup> de agua equivalentes a una pipa de agua potable (ver Ilustración 12), en donde, el vaciado se realiza en diferentes lapsos de tiempo (ver tabla 2), para poder tomar el tiempo de vaciado y espera entre cada lapso, así, efectuar las mediciones de niveles de agua dentro del pozo por medio del método sónico.



Ilustración 12. Pipa de agua con capacidad de 10000 litros de agua.

En la tabla 2 se pueden observar los periodos y tiempos de medición, en donde, el tiempo de vaciado dura aproximadamente 15 minutos, por tanto, se plantearon 7 pruebas de vaciado con periodos de 2 minutos cada una, a excepción de la última que no completó el tiempo establecido debido a que se terminó el agua. Las mediciones se realizaron a los minutos 1, 2 y 3 después del vaciado, posteriormente se retomó el vaciado hasta completar las 7 pruebas, con excepción de la última donde el periodo de medición fue hasta el minuto 14.

Tabla 2. Periodos de vaciado y medición

Periodos	Tiempo total
Vaciado 1	2 min
Medición 1	3 min
Vaciado 2	2 min
Medición 2	3 min
Vaciado 3	2 min
Medición 3	3 min
Vaciado 4	2 min
Medición 4	3 min
Vaciado 5	2 min
Medición 5	3 min
Vaciado 6	2 min
Medición 6	3 min
Vaciado 7	1.4 min
Medición 7	14 min

Para determinar el caudal y la velocidad de vaciado de la pipa, que tuvo como referencia el análisis posterior, en donde, se utilizó una cubeta de 19 litros, así como el análisis del gasto de vaciado. En las ecuaciones 3 y 4 se muestran las características de la cubeta y en la ecuación 5 se muestra el gasto de vaciado.

Diámetro de la cubeta: 0.282 m

Altura de la cubeta: 0.363 m

$$A = \frac{\pi D^2}{4}$$

$$A = \frac{\pi (0.282m)^2}{4}$$

$$A = 0.063 m^2$$

**Ecuación 3**

$$V = A \cdot a$$

$$V = 0.063 \text{ m}^2 \cdot 0.363 \text{ m}$$

$$V = 0.022 \text{ m}^3$$

**Ecuación 4**

$$Q = \frac{V}{t}$$

$$Q = \frac{0.022 \text{ m}^3}{3.35 \text{ seg}}$$

$$Q = 0.0067 \frac{\text{m}^3}{\text{seg}}$$

**Ecuación 5**

En donde:

A= Área de la cubeta

D= Diámetro de la cubeta

V= Volumen de la cubeta

a= Altura de la cubeta

Q= Caudal

t= Tiempo

En la ilustración 13 se observa el momento de vaciado de agua a la cubeta, posteriormente el cálculo del caudal de vaciado.



Ilustración 13. Llenado de la cubeta para calcular el caudal de vaciado.

Dado que el tiempo de vaciado de la pipa tarda aproximadamente 15 minutos, se plantearon 7 pruebas con un vaciado de 2 minutos cada una para poder calcular el volumen de agua utilizado para cada prueba por medio de la ecuación 6

$$V = Qt \quad \text{Ecuación 6}$$
$$V = \left(0.0067 \frac{m^3}{seg}\right) * (120 \text{ seg.})$$
$$V = 0.804 m^3$$

En donde:

V= Volumen

Q= Caudal

t= Tiempo, el cual es igual a 120 segundos

Al realizar el experimento en el pozo, se realizó una modificación porque al minuto 1 se escuchaba que el agua seguía cayendo dentro del pozo, por lo que, al llegar a la cuarta prueba se hicieron mediciones al minuto 2 y 3, para que al analizar la medición en el software no hubiera interferencias en el eco. En la última medición, el agua no llegó a los 2 minutos de vaciado, debido a que el agua de la pipa se terminó, por lo que la prueba 7 solo cuenta con 1 minuto 40 segundos, del cual, se calculó el volumen de vaciado a partir de la ecuación 7.

$$V = Qt \quad \text{Ecuación 7}$$
$$V = \left(0.0067 \frac{m^3}{seg}\right) * (101 \text{ seg.})$$
$$V = 0.676 m^3$$

En donde:

V= Volumen

Q= Caudal

t= Tiempo, el cual es igual a 101 segundos

En las ilustraciones 14 y 15 se observa el momento en el que se vacía agua al pozo y se realiza la medición con los aparatos de sonido respectivamente.



Ilustración 14. Vaciado de agua potable dentro del pozo.



Ilustración 15. Grabación del sonido producido dentro del pozo por medio de dispositivos de sonido.

Una vez terminado el experimento en campo, se procedió a realizar el trabajo de gabinete a través del análisis de las grabaciones, con la finalidad de obtener la profundidad en la que se encuentra el agua después de cada prueba de vaciado, posteriormente, se determinó cómo se desarrolla el proceso de infiltración dentro del pozo.

### 9.3. Modelo numérico

Los modelos numéricos se elaboraron en el software ModFlow mediante la plataforma de ModelMuse, las unidades en las que se trabajó fueron metros y segundos, con la versión de software ModFlow NWT capaz de recrear el flujo superficial y subterráneo, además de los niveles de agua, la exageración vertical en todos los modelos se utilizó con un valor de 3 para poder apreciar de mejor manera las capas inferiores.

La estratigrafía del pozo inactivo fue proporcionada por la encargada de la zona agrícola de la Posta UAA, el cual, cuenta con una profundidad de 400 metros, alrededor de él se localizan siete estratos subterráneos; cabe resaltar que la estratigrafía utilizada fue la del pozo 4 debido a que no se contaba con la información del pozo de la ACIUAA, pero debido a su cercanía y a las características del Valle de Aguascalientes, dicha estratigrafía cuenta como representativa de la zona. Para tener un mejor concepto de la estratigrafía y dimensiones del pozo, se elaboró un modelo conceptual de los estratos y del pozo (ver ilustración 16), en donde se distinguen siete capas de suelo, el pozo inactivo y su profundidad, a su vez, se observa la profundidad a la que se encuentra el nivel del agua dentro del pozo. En la tabla 2 se aprecian las siete capas de suelo divididas por estratos y la profundidad de cada estrato y su respectiva altura sobre el nivel del mar.

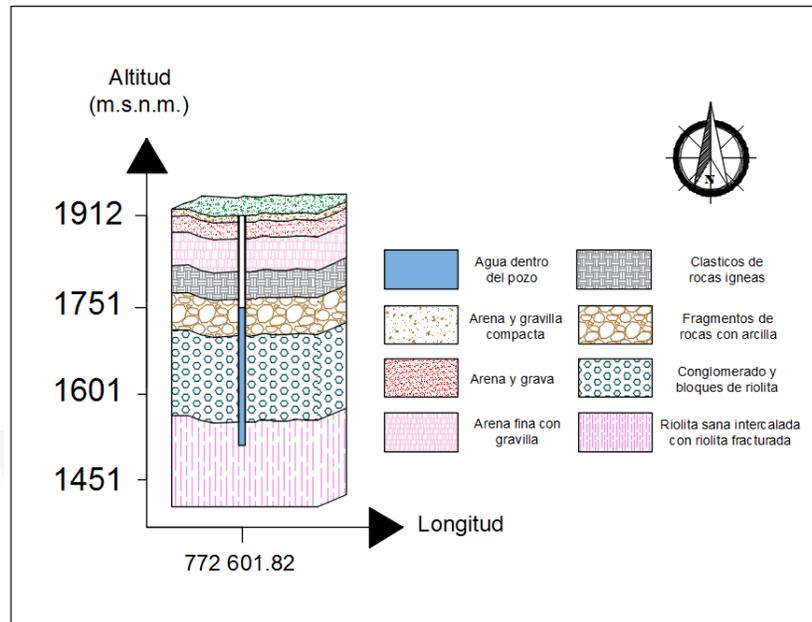


Ilustración 16. Modelo esquemático del pozo inactivo y la estratigrafía de la zona.

Tabla 3. Estratigrafía de la zona de estudio.

Estratos	Profundidad	Altura (m.s.n.m)
Arena y gravilla compacta	0.00 m	1912.00 m
Arena y grava de composición riolítica	12.00 m	1900.00 m
Arena fina con gravilla intercalaciones de tobas	40.00 m	1860.00 m
Clásticos de rocas ígneas con arcilla	98.00 m	1762.00 m
Fragmentos de roca con arcillas	146.00 m	1616.00 m
Conglomerado y bloques de riolita	210.00 m	1406.00 m
Riolita sana	360.00 m	1046.00 m

Una vez ingresadas las capas representativas de la estratigrafía, se determinó un polígono de acuerdo a la ubicación del pozo inactivo y la capacidad de procesamiento de la computadora, esto va de la mano con la elaboración de la malla debido a que, si se tiene un polígono grande y una malla estrecha, el programa no corre, entonces, se realizaron varios intentos con diferentes anchos de malla, en donde, la malla seleccionada para el modelo resultó ser de 100x100m debido a las dificultades con el aparato de cómputo. El polígono se realizó por medio del software QGIS. Posteriormente, se añadió la topografía del polígono, obtenida mediante el software Surfer.

Para la representación del pozo de infiltración, se subdividió la malla en el área del pozo quedando con un ancho de 10 metros. Al pozo se le indicó el gasto de infiltración que corresponde al gasto

de vaciado en el lapso de 2 minutos y 1 minuto con 40 segundos, los cuales corresponden a 6 periodos de vaciado normales y un último periodo reducido por el volumen restante de agua respectivamente.

Luego a cada capa se le colocaron las conductividades hidráulicas, donde el proceso de la obtención de conductividad hidráulica se realizó de manera teórica, es decir, una vez obtenida la estratigrafía de la zona, se indagó en documentos científicos, en donde, los autores obtuvieron el valor de las conductividades hidráulicas de estratos similares. De acuerdo a la investigación de Barbecho J., entre otros (2012), se elaboró la tabla 4, en donde, se representan los valores de la conductividad hidráulica en unidades de metros por día.

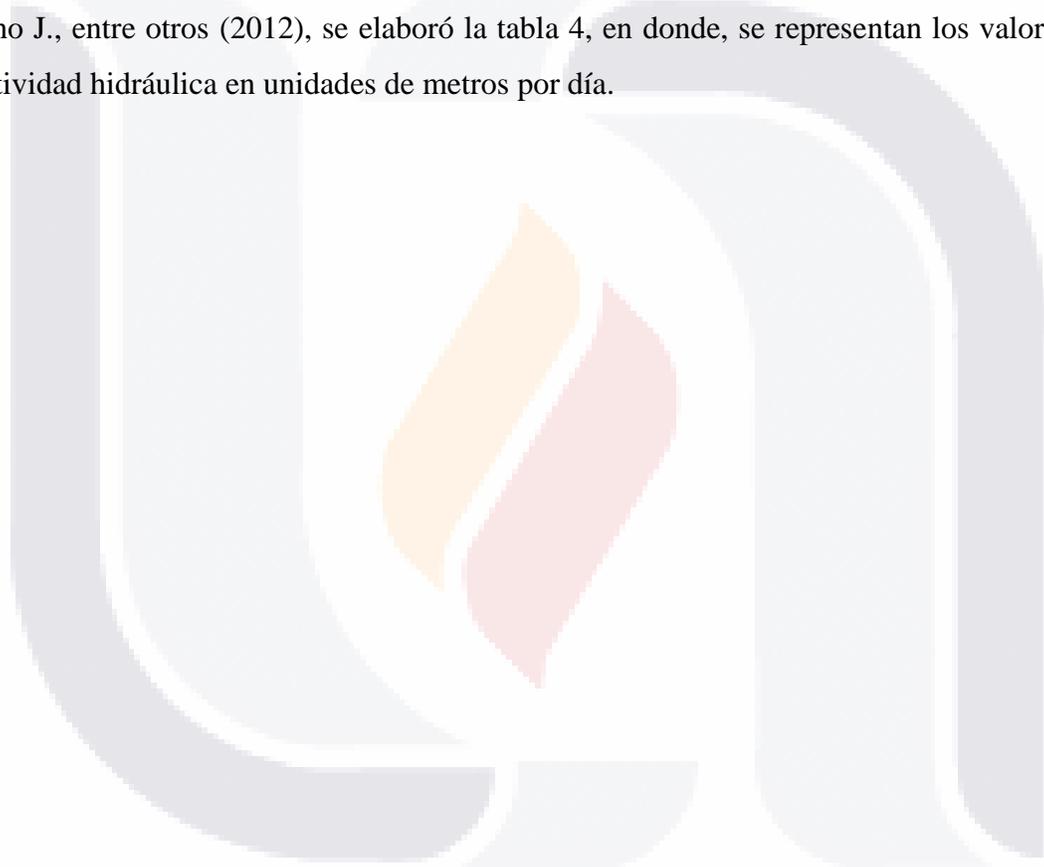


Tabla 4. Valores estimados de la conductividad hidráulica en m/día.

VALORES ESTIMADOS DE LA CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA (METROS/DÍA)							
		Domenico	Smith & W	Freeze	Fetter	Sanders	Barbecho & Calle
Sedimentos	Grava	25 a 2500	$100 a 10^{-4}$	$100 a 10^{-6}$	10 a 1000		
	Grava con arena						
	Arenisca						0.023 a 0.383
	Arena gruesa	0.1 a 500	0.01 a 1000	1 a 1000	1 a 100	1 a 100	
	Arena media	0.1 a 50			0.01 a 1		
	Arena fina	0.02 a 20			0.001 a 0.1		
	Arena arcillosa			0.01 a 100	0.001 a 0.1	0.01 a 1	
	Silt, Loess	$10^{-4}$ a 2	$10^{-4}$ a 1	$10^{-4}$ a 1		$10^{-4}$ a 1	
	Arcilla	$10^{-6}$ a $4 * 10^{-4}$	$10^{-7}$ a $10^{-3}$			$10^{-6}$ a $10^{-3}$	$9.2 * 10^{-3}$ a 0.522
	Arcilla marina inalterada	$10^{-7}$ a $2 * 10^{-4}$		$10^{-11}$ a $10^{-7}$			
Rocas Sedimentarias	Conglomerado						$9.2 * 10^{-9}$ a 0.693
	Calizas carstificadas	0.1 a 2000	0.05 a 0.5	0.1 a 1000		$0.1 a 10^{-7}$	
	Calizas, dolomias	$10^{-4}$ a 0.5	0.001 a 0.5	$10^{-4}$ a 1		$10^{-4}$ a 1	
	Areniscas	$3 * 10^{-5}$ a 0.5	$10^{-5}$ a 1	$10^{-5}$ a 1			
	Argilitas (siltstone)	$10^{-6}$ a 0.001					
	Pizarras sedimentarias (Shale intactas)	$10^{-8}$ a $2 * 10^{-4}$	$10^{-8}$ a $10^{-4}$	$10^{-4}$ a $10^{-8}$		$10^{-4}$ a $10^{-8}$	
	Pizarras sed. (Shale) Fracturadas / alteradas		$10^{-4}$ a 1				
Rocas cristalinas	Basalto inalterado, sin fracturar		$10^{-6}$ a $10^{-3}$			$10^{-6}$ a $10^{-3}$	
	Basalto fracturado/vesicular cuaternario		10 a 1000			$0.1 a 10^{-6}$	
	Escorias basálticas		0.001 a 1000				0.001
	Riolita						
	Basalto permeable	0.03 a 2000		0.02 a 1000			
	Rocas ígneas y metamórficas sin fracturar	$10^{-9}$ a $10^{-5}$	$10^{-9}$ a $10^{-5}$	$10^{-9}$ a $10^{-5}$		$10^{-9}$ a $10^{-5}$	
	Rocas ígneas y metamórficas fracturadas	0.001 a 25	$10^{-5}$ a 1	0.0005 a 20		$10^{-5}$ a 1	
	Granito alterado	0.3 a 5					
Gabro alterado	0.05 a 0.3						

Como se puede ver en la tabla 4, los autores discrepan los valores para las conductividades hidráulicas similares, es por ello que se elaboró una tabla con los tipos de suelos que contiene la zona de estudio y un rango de valores para cada uno, en donde, los valores se separaron por máximos y mínimos y se obtuvo el promedio para utilizarlos en el modelo (ver tabla 5).

Tabla 5. Valores estimados de conductividad hidráulica (m/s).

Valores estimados de la conductividad hidráulica (metros/seg.)			
Estratos	Mínima	Promedio	Máxima
Arena y gravilla compacta	5.2199E-06	0.00304896	0.00609236
Arena y grava de composición riolítica	5.2315E-05	0.00418634	0.00832037
Arena fina con gravilla intercalaciones de tobas	1.7361E-06	0.00150486	0.00300799
Clásticos de rocas ígneas con arcilla	1.5512E-08	3.4386E-05	6.8756E-05
Fragmentos de roca con arcillas	1.91E-08	4.1088E-07	7.6403E-07
Conglomerado y bloques de riolita	5.7871E-09	2.011E-06	4.0162E-06
Riolita sana	1.1574E-08	1.1574E-08	1.1574E-08

#### 9.4. Modelo físico

El modelo físico se realizó con base a la estratigrafía que rodea al pozo 4 de la Posta UAA, para realizar el modelo se determinó el escalamiento efectuado, debido a que el tema de investigación es novedoso, no existen referencias similares para basarse, por lo que después de analizar detenidamente la situación, se concluyó que las medidas representadas en la tabla 6 representarían y recrearían a detalle el experimento que se realizó en el pozo.

Tabla 6. Medidas para el molde del modelo físico.

Medidas para el molde	
Largo	50 cm
Ancho	10 cm
Alto	85 cm

En la tabla 7 se representan las alturas escaladas de cada capa estratigráfica, considerando la altura del molde que es de 85 cm, se colocó un fondo de ignimbrita con 5 cm de espesor, además de un dren para vaciar el agua del molde. En la parte superior del molde se dejó un espacio de 5 cm para maniobrar con facilidad al momento del vaciado de agua, por tanto, quedaron 75 cm para rellenar el molde con materiales representativos de cada estrato, escalando los 400 metros de profundidad del pozo en los 75 cm de altura del molde, resulta que cada metro equivale a 0.188 cm.

Tabla 7. Escalamiento de la estratigrafía de la zona de estudio para el modelo físico.

Modelo físico				
Estratos	Profundidad real	Espesor real	Espesor escaldo	Medida molde
Arena y gravilla compacta	0 m	12.00 m	2.25 cm	75.00 cm
Arena y grava de composición riolítica	12.00 m	28.00 m	5.25 cm	72.75 cm
Arena fina con gravilla intercalaciones de tobas	40.00 m	58.00 m	10.88 cm	67.50 cm
Clásticos de rocas ígneas con arcilla	98.00 m	48.00 m	9.00 cm	56.63 cm
Fragmentos de roca con arcillas	146.00 m	64.00 m	12.00 cm	47.63 cm
Conglomerado y bloques de riolita	210.00 m	150.00 m	28.13 cm	35.63 cm
Riolita sana	360.00 m	40.00 m	7.50 cm	7.50 cm
Fondo	400.00 m	-	0 cm	0 cm

El material que se utilizó para simular el ademe del pozo fue una manguera a de nivel de ¼”, con diámetro interno de 0.4 mm, para comenzar, se extrajo suelo cercano a la ubicación del pozo para representar algunos estratos del modelo, el suelo se cribó por los tamices número 10, 20, 40, 60, 100 y 200. Cada material retenido en las distintas mallas fue guardado y almacenado para recrear el modelo físico. El proceso y materiales utilizados para representar cada estrato, se describe a continuación.

*Riolita sana con intercalaciones de riolita fracturada*, se utilizaron rocas de riolita cortadas en 2 bloques, la manguera de nivel se colocó entre los bloques, el espacio libre se rellenó con riolita fracturada.

*Conglomerado y bloques de riolita*, se realizó una mezcla de cal y riolita triturada, al colocar la mezcla, el molde se ensancho un poco debido al peso y presión del material, por lo que un poco de material se filtró, sobre las paredes laterales de los bloques de riolita.

*Fragmentos de roca con arcilla*, se utilizaron diversos tipos de rocas y arcilla que pasaron a través de la malla número 200.

*Clásticos de roca con arcilla*, se realizó una mezcla de yeso con arcilla y material retenido en la malla número 60, para esta capa se utilizó poca agua tratando de crear una mezcla endurecida fácil de fracturar.

*Arena fina con gravilla*, se mezcló una pequeña cantidad de arcilla y arena retenida en la malla número 200 para representar la arena fina y la gravilla respectivamente.

*Arena y grava de composición riolítica*, se realizó una mezcla de arenas retenidas en la malla número 100 y 200 para representar la grava y la arena respectivamente.

*Arena y gravilla compacta*, se realizó una mezcla de arenas retenidas en las mallas número 100 y 200 para representar la gravilla y la arena respectivamente, comprimiendo de manera intermitente el material para representar de manera más fidedigna el estrato.



Ilustración 17. Modelo físico.

Una vez creado el modelo físico, se escaló la profundidad del nivel freático de 161.33 metros correspondiente a 30.25 cm de profundidad en el molde. Posteriormente, se recreó el experimento efectuado en campo, pero a la escala correspondiente, por lo que se le vació la cantidad de 1 ml de

agua con ayuda de una jeringa milimétrica, después se midieron los niveles cada 60 y 120 segundos para determinar el proceso de infiltración.

Para poder medir los niveles de agua dentro del pozo, se creó un circuito eléctrico, el cual, consiste en que, por medio de una batería de 12 V y un cable delgado, se mandó energía a través del circuito para que una vez que el cable entrara en contacto con el agua el circuito se cierre y un foco de luz led se encienda. El equipo se presenta en las ilustraciones 18 y 19.

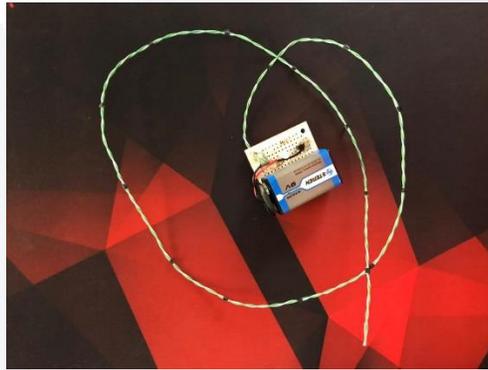


Ilustración 18. Circuito eléctrico creado para medir el nivel de agua dentro del modelo físico.



Ilustración 19. Demostración del funcionamiento del circuito eléctrico al entrar en contacto con el agua.

El cable del circuito eléctrico tiene marcas con cinta de aislar a cada 5 cm y otras pequeñas marcas realizadas con pluma para poder medir la profundidad a la que se encuentra el agua dentro del tubo del modelo físico.

Las mediciones se realizaron tres veces con tiempos de medición de 1 y 2 minutos debido a que el agua ejercía demasiada presión sobre las paredes laterales del molde, ocasionando pequeñas aperturas en las uniones de las paredes laterales y base del molde, por tal motivo se empezó a filtrar agua hacia el exterior. Cabe destacar que se sellaron las aperturas de las paredes laterales con silicón, lo que ayudó para realizar el experimento, sin embargo, las aperturas generadas en la unión de las paredes laterales con la base no se pudieron sellar correctamente debido a la obstrucción de la estructura de madera colocada en la base del molde (que solidifica el modelo) para que no colapse por la presión interior que ejercen el agua y los materiales.

En la ilustración 20 se observa el momento de medir la profundidad del nivel de agua dentro del molde con ayuda del circuito electrónico creado anteriormente.



Ilustración 20. Medición de los niveles de agua dentro del modelo físico con ayuda del circuito eléctrico.

En la ilustración 21 se observa como el modelo físico se ensanchó de las paredes laterales debido a la presión ejercida por el agua y los materiales contenidos, generando que se filtrara agua hacia el exterior por pequeñas aperturas en las uniones del molde, para solucionar este problema se sellaron con silicón las paredes del molde.



Ilustración 21. Apertura del molde debido a la presión del agua y del material.

En la ilustración 22 se observa que a pesar de haber sellado las paredes del modelo el agua se filtró hacia el exterior desde la parte inferior del modelo donde se une la base con las paredes.



Ilustración 22. Ruptura del molde del modelo físico por la parte inferior.

## 10. Resultados

Los resultados obtenidos dentro de la investigación surgen a partir de tres metodologías distintas, experimento en pozo, modelación numérica y modelación física. Cada metodología concluye en la obtención de una conductividad hidráulica, al final, se comparan los distintos resultados para determinar si existe o no infiltración dentro del pozo inactivo.

### 10.1. Experimento en campo

El experimento en el pozo consiste en vaciar una pipa de agua de 10000 litros de agua ( $10 m^3$ ) a un pozo inactivo, en un total de siete periodos de vaciado con duración de 2 minutos cada uno, a excepción del último que tuvo un tiempo de vaciado de 84.6 segundos, cabe señalar que la carga de vaciado fue constante, además, se realizaron mediciones en los minutos 1, 2 y 3 entre cada tiempo de vaciado de agua, con la finalidad de determinar si se generó la infiltración después de vaciar agua al pozo.

El volumen de vaciado no fue de  $10 m^3$  sino de  $5.39 m^3$ , esto indica que la pipa de agua no estaba llena, ya que la carga de vaciado fue la misma en todas las pruebas (ver tabla 8). Para la prueba 1 el periodo de medición de nivel de agua se realizó al minuto 1 y 2, esto porque se tenían contemplados dos tiempos. Para la prueba 2 el periodo de medición se realizó a los minutos 1, 2 y 3 debido a que, para tener una mejor medición del proceso de infiltración, es necesario dejar pasar más tiempo. En la prueba 5 y 6 los periodos de medición se realizaron en el minuto 2 y 3 esto se decidió debido a que, al minuto después de vaciar el agua todavía se generaba mucho ruido dentro del pozo, por lo que podría generar mucho ruido en la producción del eco y la grabación del mismo, por tanto, el método sónico pudiera fallar en su precisión. Por último, para la prueba 7, una vez que se terminó toda el agua por vaciar, se decidió esperar más tiempo para analizar el proceso de infiltración, es por eso que las mediciones se realizaron a los minutos 2, 4, 9 y 14.



En las mediciones de la profundidad del nivel de agua por parte de los dispositivos, en algunas celdas aparece la leyenda N/A, esto significa que “no acredita”, por tanto, no se puede generar una medición, esto ocasiona que no se pueda apreciar el eco en el software Wavepad a pesar de incrementar la longitud y la anchura de la onda.

Para obtener la infiltración en cada prueba se resta la profundidad promedio con mayor periodo de medición a la profundidad promedio con menor tiempo de medición y se divide el resultado entre la diferencia de tiempo en segundos, que existe en el primer periodo de medición y en el último. Para obtener la infiltración se realizó la ecuación 8.

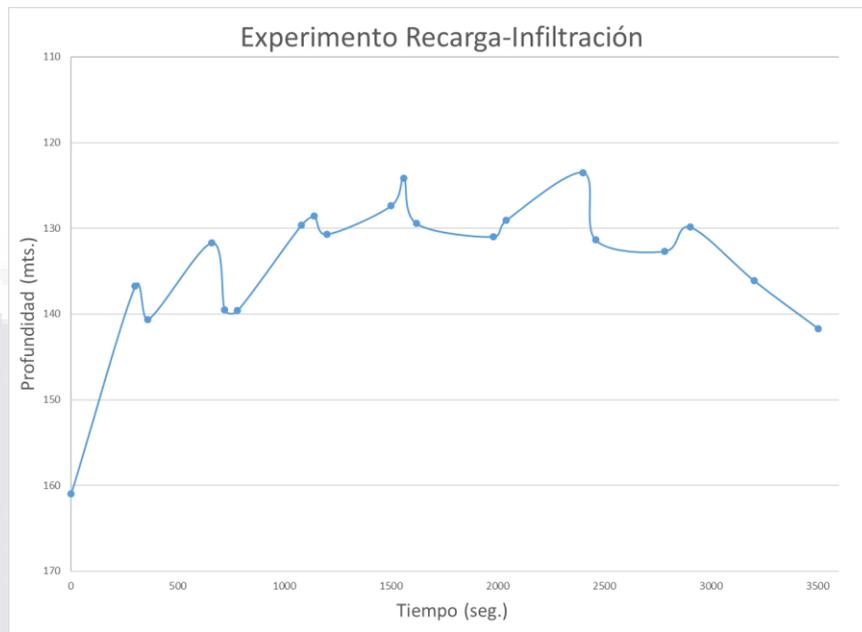
$$\begin{aligned}
 \text{infiltración}_{prueba\ 2} &= \frac{PPM - Ppm}{(Um - Pm) * 60} && \text{Ecuación 8} \\
 \text{infiltración}_{prueba\ 2} &= \frac{139.60\ mts - 131.67\ mts}{(3\ min - 1\ min) * 60\ seg} \\
 \text{infiltración}_{prueba\ 2} &= 0.066\ m/s
 \end{aligned}$$

En donde:

- PPM= Profundidad promedio mayor
- Ppm= Profundidad promedio menor
- Um= Último periodo de medición
- Pm= Primer periodo de medición

De acuerdo con lo anterior, se graficaron los datos, en donde, en la gráfica 1 se observa que el tiempo 0 es igual al nivel de agua inicial dentro del pozo que es de 162 metros, después de vaciarle el agua por dos minutos y esperar otro minuto para medir el nivel, se observa un incremento de 25.26 metros, con respecto al nivel inicial. Después, al esperar otro minuto para volver a medir, el nivel bajó, este patrón de comportamiento se repite en todas las pruebas realizadas y se puede observar en los incrementos y decrementos los cuales indican que se está generando infiltración en el interior del pozo. Cabe destacar que en la prueba 5 el nivel no descendió incluso aumento, esto se debe a que el suelo se saturó o a que el ruido producido dentro del pozo todavía era demasiado, por tanto, afecto a la grabación al momento de producir el eco. Este comportamiento

se repite en la prueba 7, dado que las mediciones se realizaron en lapsos mayores bajando el nivel del agua hasta tener un comportamiento casi lineal.



Gráfica 1. Experimento Recarga-Infiltración.

Como resultado final se obtiene que la infiltración promedio dentro del pozo inactivo es de 0.048 m/s, este resultado se obtuvo al calcular la infiltración promedio de cada prueba de vaciado, posteriormente realizar un promedio de infiltraciones promedio.

## 10.2. Modelo numérico

El modelo numérico se divide en dos partes, en la primera se realizaron varios modelos numéricos únicamente con las conductividades teóricas según la estratigrafía que presenta la zona de estudio, en la segunda parte se realizaron varios modelos numéricos basados en los resultados del experimento que se realizó en el pozo, concluyendo en un modelo que se asemeja en resultados al experimento.

### 10.2.1. Primera parte

Se reunió la información correspondiente a estratigrafía por parte de la encargada de la Posta UAA, la topografía se obtuvo mediante los softwares QGIS y SURFER, por último, para la conductividad hidráulica se utilizaron las conductividades teóricas de la tabla 5. Cabe resaltar que, en un primer intento, se consideró que el gasto de inyección para el pozo 4, debería ser similar al gasto de extracción por lo que se obtuvieron los gastos de bombeo de 4 pozos cercanos a la zona y se obtuvo un gasto de bombeo promedio, que en este caso se utilizó como gasto de inyección (ver tabla 9).

Tabla 9. Gasto de bombeo promedio (lps.).

Clave	Ext. Final (Mm3/año)	Ext. Final (lps.)	Gasto de Bombeo promedio (lps.)
CNA-1070	0.156363	4.958	4.368
CNA-1061	0.083643	2.652	
CNA-1057	0.110393	3.501	
CNA-1058	0.200603	6.361	

### Caso 1

Para el caso 1 se utilizó la conductividad promedio de la tabla 5, las cuales, corresponden a:

- *Arena y gravilla compacta:* 0.00304 m/s.
- *Arena y grava de composición riolítica:* 0.00418 m/s.
- *Arena fina con gravilla intercalaciones de tobas:* 0.0015 m/s.
- *Clásticos de rocas ígneas con arcilla:* 3.438E-05 m/s.
- *Fragmentos de rocas con arcillas:* 4.108E-07 m/s.
- *Conglomerado y bloques de riolita:* 2.011E-06 m/s.
- *Riolita Sana:* 1.157E-08 m/s.

El polígono tiene dimensiones de 2600 por 2700 metros, la malla consta de 100 metros de longitud, y el pozo se colocó desde la superficie hasta 115 metros de profundidad. En las ilustraciones 23 y 24 se observa el resultado del modelo numérico con diferentes vistas, analizando el modelo se puede inferir los resultados de la siguiente manera, el punto con mayor nivel es el de arena fina con gravilla teniendo ese resultado porque indicó que el agua caería directamente a ese nivel, mientras que los niveles más bajos son los de capa de riolita sana debido a su baja conductividad.

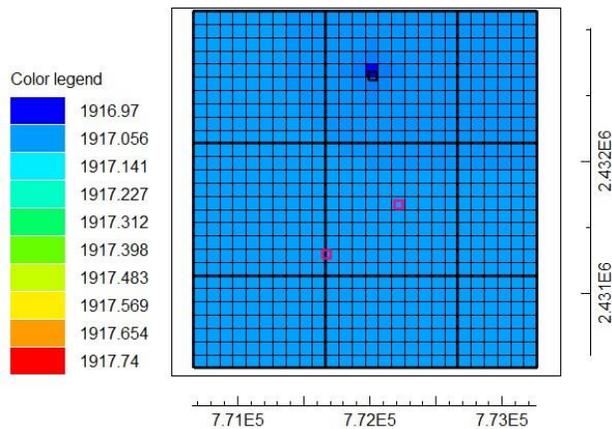


Ilustración 24. Modelo numérico, conductividad promedio (vista superior).

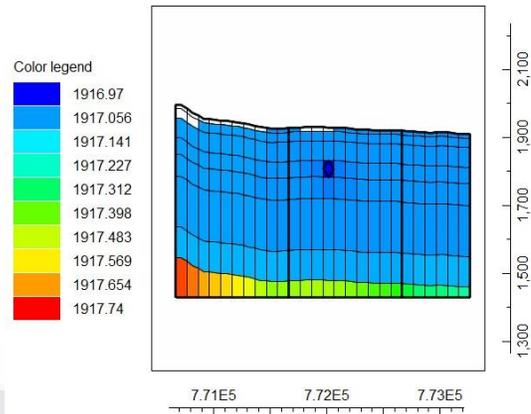


Ilustración 23. Modelo numérico, conductividad promedio (corte frontal).

Para comparar los resultados de los modelos numéricos se tomaron en cuenta los valores históricos de los niveles estáticos de los pozos cercanos 172 y 143 correspondientes al año 2002. En la tabla 10 se muestra el nivel topográfico al que se encuentran los pozos, los datos históricos del pozo que muestran la profundidad a la que se encuentra el nivel estático dentro del pozo, el nivel estático en metros sobre el nivel del mar, el nivel del modelo (resultado del modelo numérico), el error que es la diferencia entre el nivel estático y el nivel del modelo y el error porcentual, que es el error entre el nivel estático, todo esto multiplicado por cien.

Tabla 10. Error porcentual, conductividad promedio.

Valores de discrepancia en niveles (Conductividad promedio)		
	Año	2002
Nivel topográfico	Pozo No. 172	1903.73
	Pozo No. 143	1912.13
Datos históricos (profundidad)	Pozo No. 172	93.7
	Pozo No. 143	127.7
Nivel estático	Pozo No. 172	1810.03
	Pozo No. 143	1784.43
Nivel modelo	Pozo No. 172	1917.06
	Pozo No. 143	1917.06
Error	Pozo No. 172	107.03
	Pozo No. 143	132.63
Error porcentual	Pozo No. 172	5.9130
	Pozo No. 143	7.4328

**Caso 2**

Para el caso 2 se utilizaron las conductividades mínimas de la tabla 5, las cuales, corresponden a:

- *Arena y gravilla compacta:* 5.219E-06 m/s.
- *Arena y grava de composición riolítica:* 5.231E-05 m/s.
- *Arena fina con gravilla intercalaciones de tobas:* 1.736E-06 m/s.
- *Clásicos de rocas ígneas con arcilla:* 1.551E-08 m/s.
- *Fragmentos de rocas con arcillas:* 1.91E-08 m/s.
- *Conglomerado y bloques de riolita:* 5.787-09 m/s.
- *Riolita Sana:* 1.157E-8 m/s.

Las dimensiones del polígono son de 2700 por 2600 metros, el pozo se colocó desde la superficie hasta 115 metros de profundidad. En las ilustraciones 25 y 26 se muestran los resultados del modelo con diferente vista, en donde se aprecia que los niveles de todo el modelo salieron muy bajos debido a que las conductividades hidráulicas tenían valores demasiados pequeños.

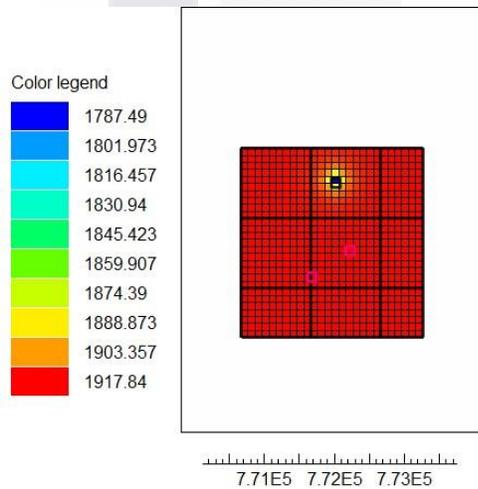


Ilustración 25. Modelación numérica, conductividad mínima (vista superior).

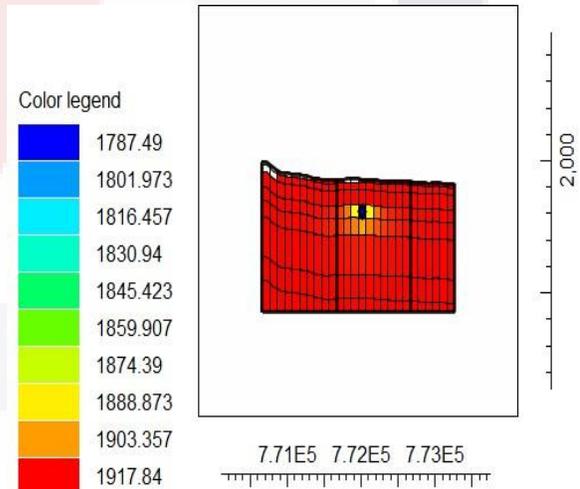


Ilustración 26. Modelación numérica, conductividad mínima (corte frontal).

En la tabla 11 se muestra que el error porcentual incrementó con respecto al primer caso.

Tabla 11. Error porcentual, conductividad mínima.

Valores de discrepancia en niveles (Conductividad mínima)		
	Año	2002
Nivel topográfico	Pozo No. 172	1903.73
	Pozo No. 143	1912.13
Datos históricos (profundidad)	Pozo No. 172	93.7
	Pozo No. 143	127.7
Nivel estático	Pozo No. 172	1810.03
	Pozo No. 143	1784.43
Nivel modelo	Pozo No. 172	1917.82
	Pozo No. 143	1917.82
Error	Pozo No. 172	107.79
	Pozo No. 143	133.39
Error porcentual	Pozo No. 172	5.9550
	Pozo No. 143	7.4754

### Caso 3

Para el caso 3 se utilizaron las conductividades máximas de la tabla 5, las cuales, corresponden a:

- *Arena y gravilla compacta:* 0.00609 m/s.
- *Arena y grava de composición riolítica:* 0.00832 m/s.
- *Arena fina con gravilla intercalaciones de tobas:* 0.003 m/s.
- *Clásticos de rocas ígneas con arcilla:* 6.875-05 m/s.
- *Fragmentos de rocas con arcillas:* 7.640E-0 m/s.
- *Conglomerado y bloques de riolita:* 4.016-0 m/s.
- *Riolita Sana:* 1.157E-8 m/s.

Las dimensiones del polígono son de 2700 por 2600 metros, el pozo se colocó desde la superficie hasta 115 metros de profundidad y el tamaño de la malla es de 100 metros. En las ilustraciones 27 y 28 se observa que se generó buen nivel de agua en la zona debido a la alta conductividad de las capas.

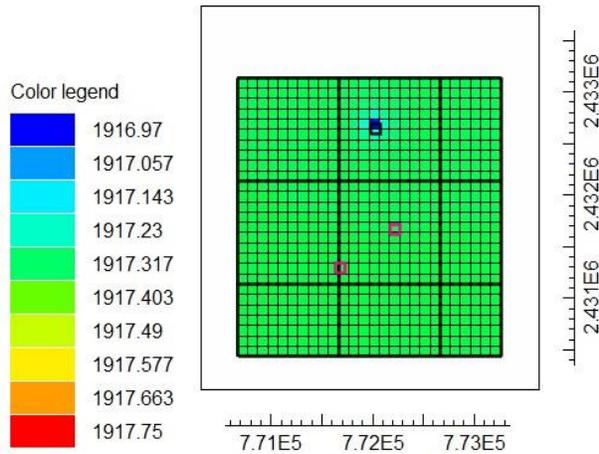


Ilustración 27. Modelo numérico, conductividad máxima (vista superior).

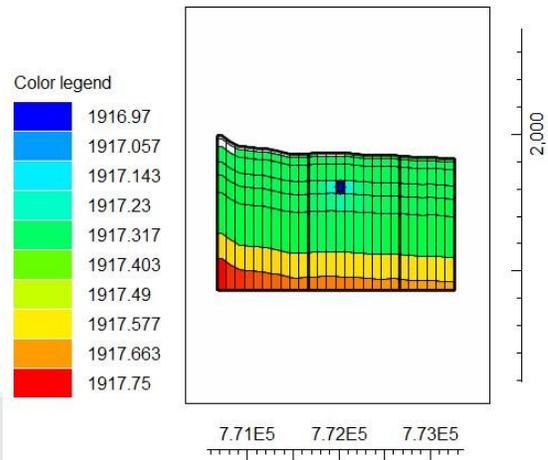


Ilustración 28. Modelo numérico, conductividad máxima (corte frontal).

En la Tabla 12 se observa que el error porcentual incrementó a comparación del primer caso.

Tabla 12. Error porcentual, conductividad máxima.

Valores de discrepancia en niveles (Conductividad máxima)		
	Año	2002
Nivel topográfico	Pozo No. 172	1903.73
	Pozo No. 143	1912.13
Datos históricos (profundidad)	Pozo No. 172	93.7
	Pozo No. 143	127.7
Nivel estático	Pozo No. 172	1810.03
	Pozo No. 143	1784.43
Nivel modelo	Pozo No. 172	1917.34
	Pozo No. 143	1917.33
Error	Pozo No. 172	107.31
	Pozo No. 143	132.90
Error porcentual	Pozo No. 172	5.9285
	Pozo No. 143	7.4480

#### Caso 4

Para el caso 4 se utilizaron las conductividades promedio de la tabla 5 multiplicadas por 6, con la finalidad de ver el comportamiento del error porcentual, las dimensiones del polígono son de 2700

por 2600 metros, el pozo se colocó desde la superficie hasta 115 metros de profundidad y el tamaño de la malla es de 100 metros.

En las ilustraciones 29 y 30 se aprecia cómo se generó un bajo nivel a excepción de la zona aledaña al pozo, debido a que, en esa parte es donde está ingresando el agua.

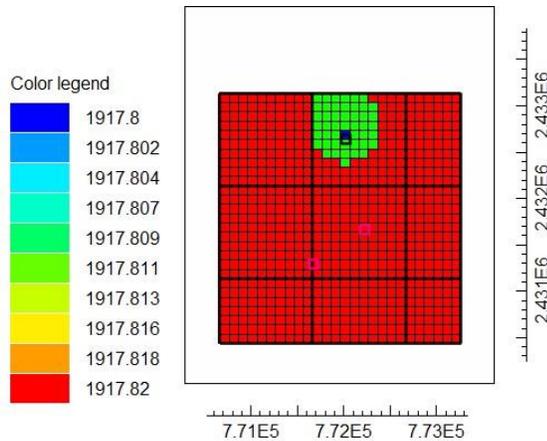


Ilustración 29. Modelo numérico, conductividad promedio multiplicada por 6 (vista superior).

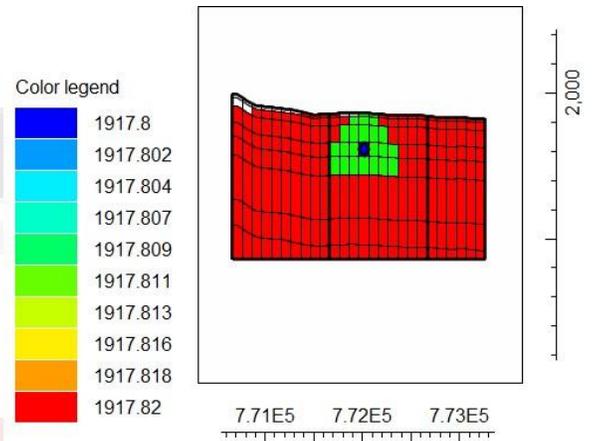


Ilustración 30. Modelo numérico, conductividad promedio multiplicada por 6 (corte frontal).

En la Tabla 13 se observa que el error porcentual incrementó a comparación del primer caso.

Tabla 13. Error porcentual, conductividad hidráulica promedio multiplicada por 6.

Valores de discrepancia en niveles (Conductividad promedio multiplicada por 6)		
	Año	2002
Nivel topográfico	Pozo No. 172	1903.73
	Pozo No. 143	1912.13
Datos históricos (profundidad)	Pozo No. 172	93.7
	Pozo No. 143	127.7
Nivel estático	Pozo No. 172	1810.03
	Pozo No. 143	1784.43
Nivel modelo	Pozo No. 172	1917.82
	Pozo No. 143	1917.82
Error	Pozo No. 172	107.79
	Pozo No. 143	133.39
Error porcentual	Pozo No. 172	5.9550
	Pozo No. 143	7.4754

**Caso 5**

Para el caso 5 se utilizaron las conductividades promedio de la tabla 5 divididas entre 6, con la finalidad de ver el comportamiento del error porcentual, las dimensiones del polígono son de 2700 por 2600 metros, el pozo se colocó desde la superficie hasta 115 metros de profundidad y el tamaño de la malla es de 100 metros.

En las ilustraciones 31 y 32 se observa el comportamiento en el modelo, ya que, existe mayor nivel en la zona aledaña al pozo, posteriormente el nivel comienza a decrecer hasta llegar a la última capa que es la zona con menor conductividad hidráulica, por esto, el nivel decrece en esa zona.

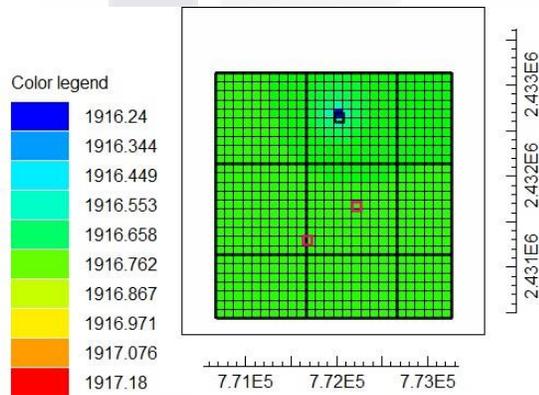


Ilustración 32. Modelo numérico, conductividad promedio dividida entre 6 (vista superior).

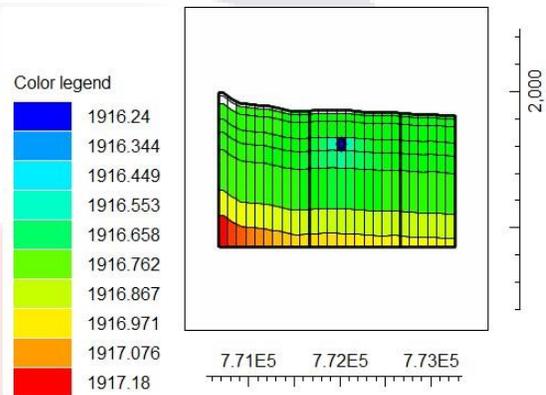


Ilustración 31. Modelo numérico, conductividad promedio dividida entre 6 (corte frontal).

En la Tabla 14 se observa que el error porcentual disminuyo.

Tabla 14. Error porcentual, conductividad hidráulica promedio dividida entre 6.

Valores de discrepancia en niveles (Conductividad promedio dividida entre 6)		
	Año	2002
Topografía	Pozo No. 172	1903.73
	Pozo No. 143	1912.13
Datos históricos	Pozo No. 172	93.7
	Pozo No. 143	127.7
Nivel real	Pozo No. 172	1810.03
	Pozo No. 143	1784.43
Niveles calculados	Pozo No. 172	1916.71
	Pozo No. 143	1916.71
Error Real	Pozo No. 172	106.68
	Pozo No. 143	132.28

Error porcentual	Pozo No. 172	5.8937
	Pozo No. 143	7.4132

Como se mencionó anteriormente estas modelaciones mostraron un parámetro de comparación de los resultados de diferentes conductividades teóricas.

### 10.2.2. Segunda parte

La información que se implementó en el modelo se describe a continuación.

- **Ubicación del pozo.** Pozo número 4 ubicado en la sección agrícola de la Posta UAA, con coordenadas (21°58'24"N, 102°21'36"W), el archivo se generó en el programa QGIS.
- **Topografía de la zona.** Se obtuvo del Instituto Nacional de Estadística y Geografía, (INEGI). y se trabajó a través de los softwares QGIS y SURFER.
- **Estratigrafía de la zona.** La estratigrafía fue proporcionada por la encargada de la sección agrícola de la Posta UAA, el documento a su vez contiene la profundidad del pozo.
- **Medidas del polígono.** Las medidas del polígono que se utilizaron fueron de 800 por 680 metros.
- **Conductividad hidráulica.** Para este apartado se utilizó la conductividad hidráulica resultante del experimento en campo como una conductividad promedio.
- **Gasto y tiempos de vaciado.** Para el gasto y tiempos de vaciado se utilizaron los mismo que en el experimento en campo, los tiempos se dividen entre tiempos de vaciado y de medición, hasta alcanzar el periodo total que duro el experimento.

Los resultados del modelo son los siguientes. En las ilustraciones 33 y 34 se observa que el modelo cuenta con el nivel estático que se midió dentro del pozo, sin embargo, en todos los tiempos tanto de vaciado como de medición que se introdujeron al programa, se arroja como resultado solamente el nivel estático (1750 m.s.n.m), con base a este resultado se deduce que la conductividad obtenida en el experimento en campo es demasiado grande, lo que genera que el agua se infiltre a gran velocidad, el motivo de este resultado puede ser debido a que el tamaño de la malla es grande, por esto, el agua se infiltra con gran velocidad. Cabe destacar que se redujo el tamaño de la malla en varias ocasiones para generar un modelo con mejor resultado, utilizando la misma conductividad hidráulica, pero al reducirla y correr el programa, este soportaba el proceso y cancelaba la operación.

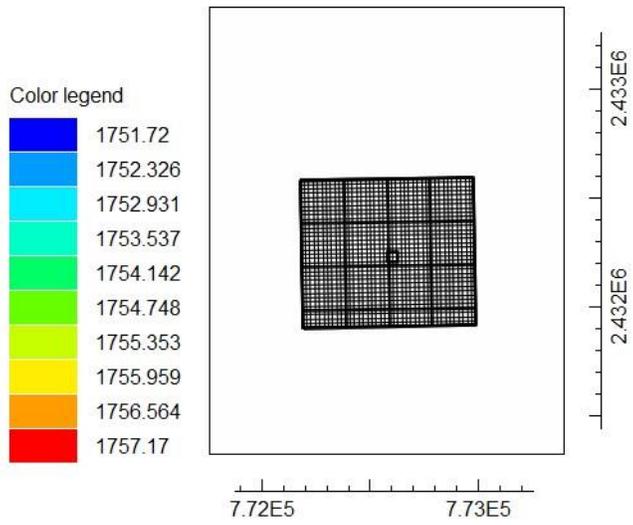


Ilustración 33. Modelo numérico del experimento (vista superior).

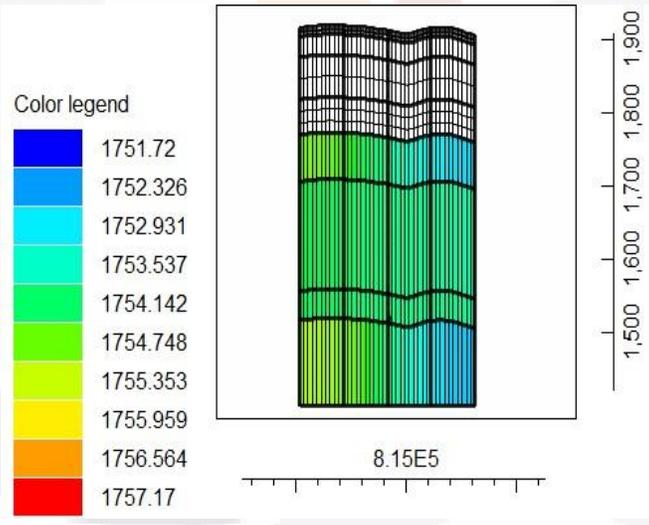


Ilustración 34. Modelo numérico del experimento (corte frontal).

Entonces, para solucionar el problema se optó por ajustar la conductividad hidráulica en el modelo numérico, por lo cual, se decidió reducir el valor de la conductividad al realizar varias pruebas hasta llegar a un valor de conductividad que se asemeje más a lo realizado en campo, por lo cual el valor de la conductividad hidráulica dentro del modelo resultó ser de **0.0075 m/s**.

En las ilustraciones 35 y 36 se observa el periodo de vaciado y medición de la primera prueba, mostrando que el periodo de vaciado incrementa el nivel y en el de medición disminuye.

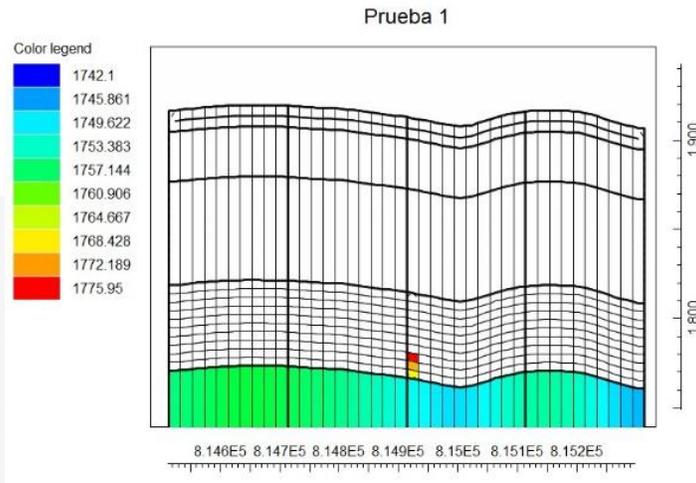


Ilustración 35. Modelo numérico, prueba de vaciado 1 (conductividad hidráulica 0.0075 m/s).

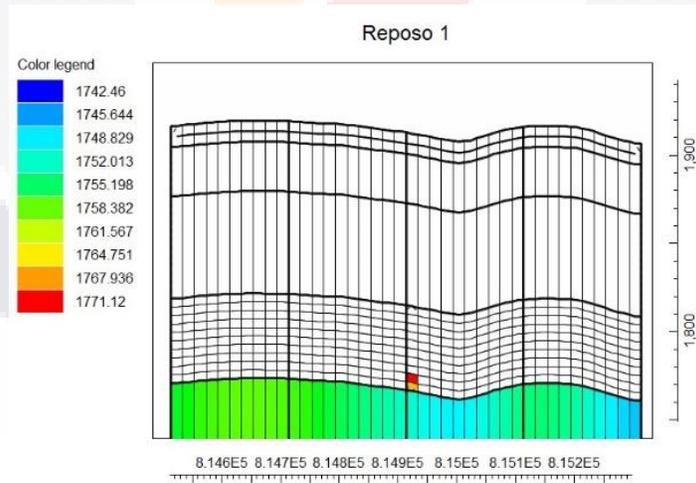


Ilustración 36. Modelo numérico, prueba de reposo 1 (conductividad hidráulica 0.0075 m/s).

En las ilustraciones 37 y 38 se representa el periodo de vaciado y de medición de la segunda prueba, donde de igual manera se observa cómo en el periodo de vaciado incrementa el nivel y en el de medición disminuye.

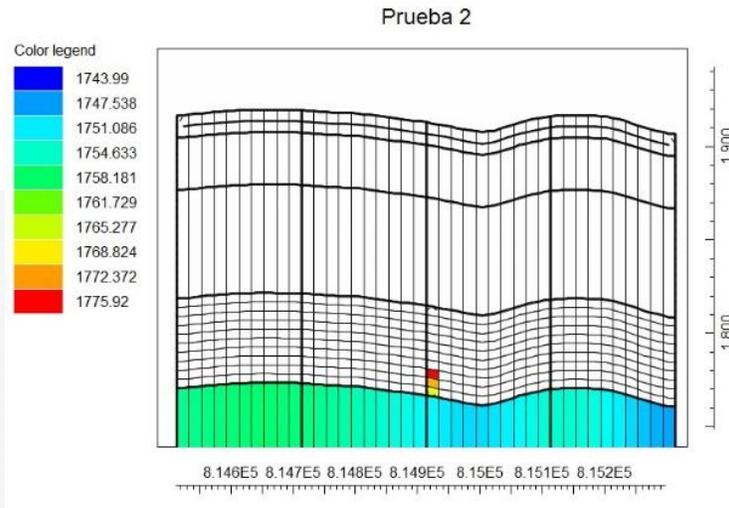


Ilustración 37. Modelo numérico, prueba de vaciado 2 (conductividad hidráulica 0.0075 m/s).

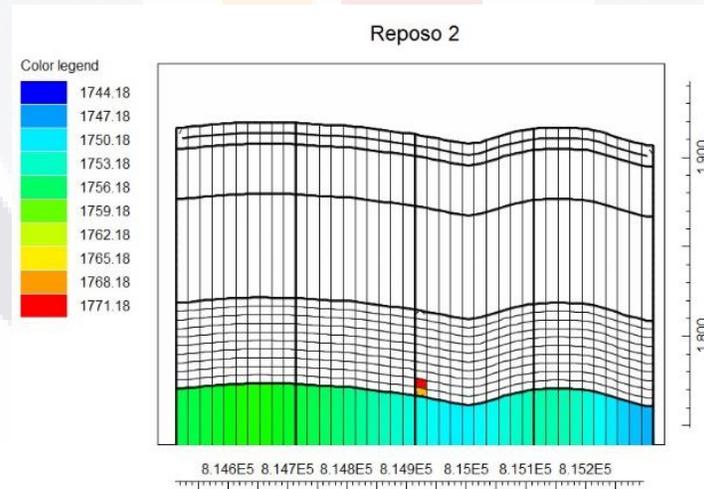


Ilustración 38. Modelo numérico, prueba de reposo 2 (conductividad hidráulica 0.0075 m/s).

En las ilustraciones 39 y 40 se representa el periodo de vaciado y de medición de la tercera prueba, en donde, el periodo de vaciado incrementa el nivel y el de medición disminuye.

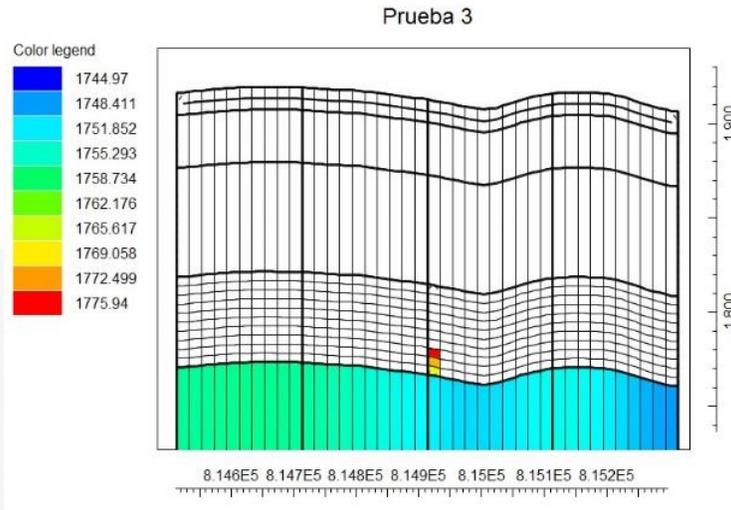


Ilustración 39. Modelo numérico, prueba de vaciado 3 (conductividad hidráulica 0.0075 m/s).

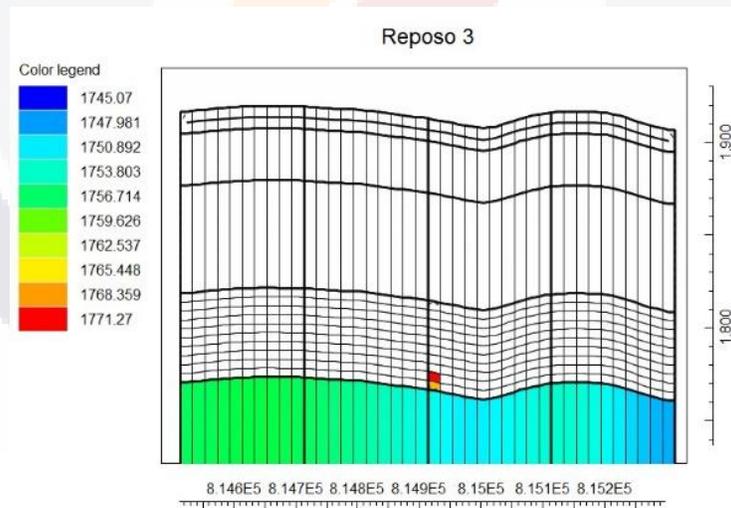


Ilustración 40. Modelo numérico, prueba de reposo 3 (conductividad hidráulica 0.0075 m/s).

En las ilustraciones 41 y 42 se representa el periodo de vaciado y de medición de la cuarta prueba, en donde, se observa cómo en el periodo de vaciado incrementa el nivel y el de medición disminuye.

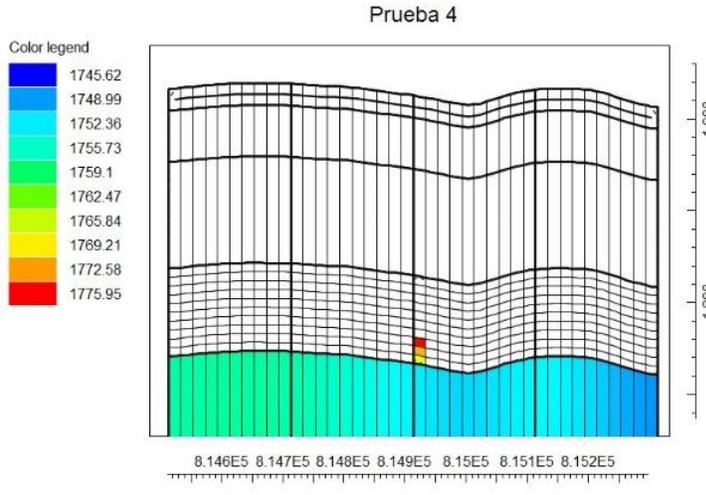


Ilustración 41. Modelo numérico, prueba de vaciado 4 (conductividad hidráulica 0.0075 m/s).

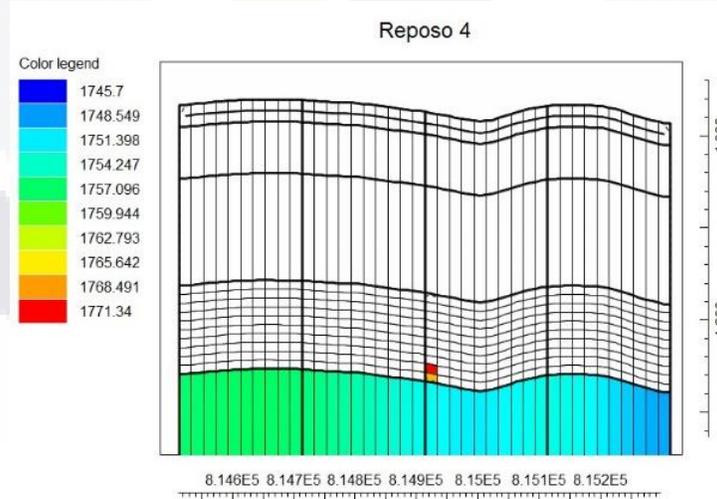


Ilustración 42. Modelo numérico, prueba de reposo 4 (conductividad hidráulica 0.0075 m/s).

En las ilustraciones 43 y 44 se representa el periodo de vaciado y de medición de la quinta prueba, en esta prueba cabe destacar que se observa la generación o estancamiento de nivel a un lado del pozo, esto debido a que se saturó la zona, por eso, se tardó más en irse el agua, al igual que la prueba en campo.

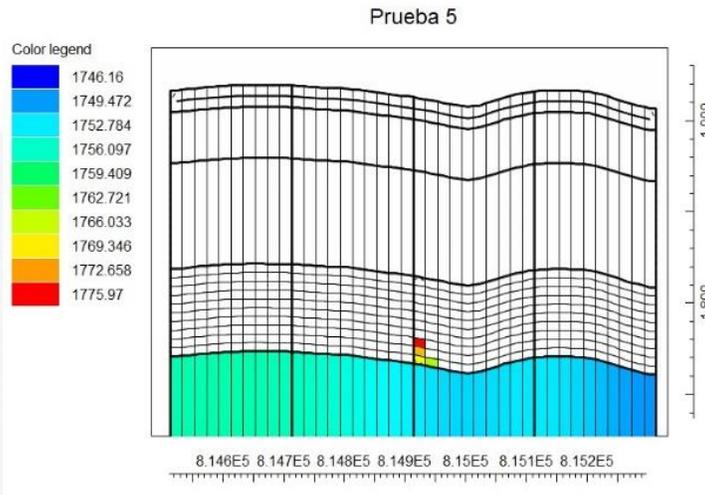


Ilustración 43. Modelo numérico, prueba de vaciado 5 (conductividad hidráulica 0.0075 m/s).

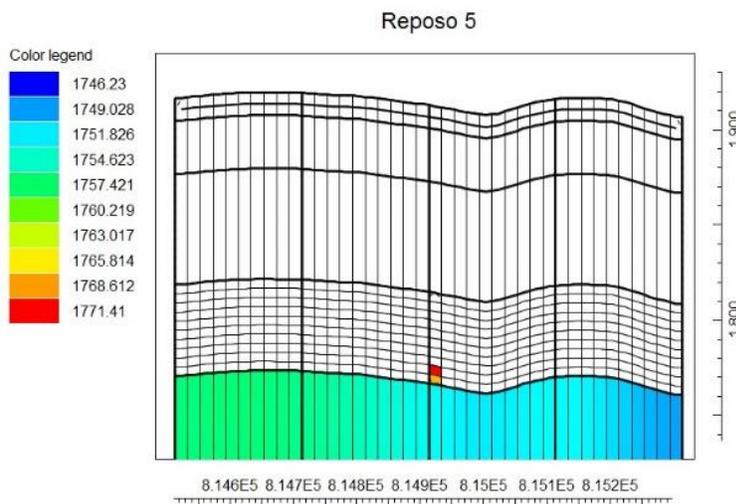


Ilustración 44. Modelo numérico, prueba de reposo 5 (conductividad hidráulica 0.0075 m/s).

En las ilustraciones 45 y 46 se representa el periodo de vaciado y de medición de la sexta prueba, de igual manera se observa cómo el agua tarda más en irse debido a que la zona se encuentra saturada.

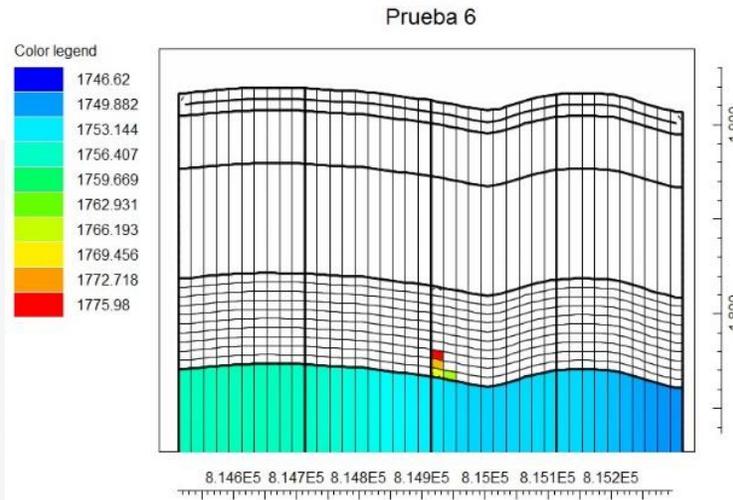


Ilustración 45. Modelo numérico, prueba de vaciado 6 (conductividad hidráulica 0.0075 m/s).

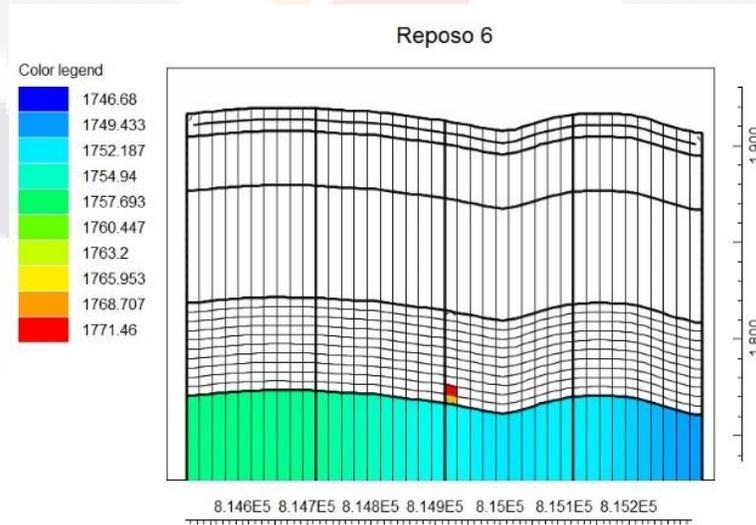


Ilustración 46. Modelo numérico, prueba de reposo 6 (conductividad hidráulica 0.0075 m/s).

En las ilustraciones 47 y 48 se representa el periodo de vaciado y de medición de la séptima y última prueba, donde se aprecia cómo al final de la medición queda el nivel estático, debido a que se tuvo un mayor tiempo de medición por ser la última prueba, por tanto, el agua terminó por infiltrarse y formar parte del nivel estático.

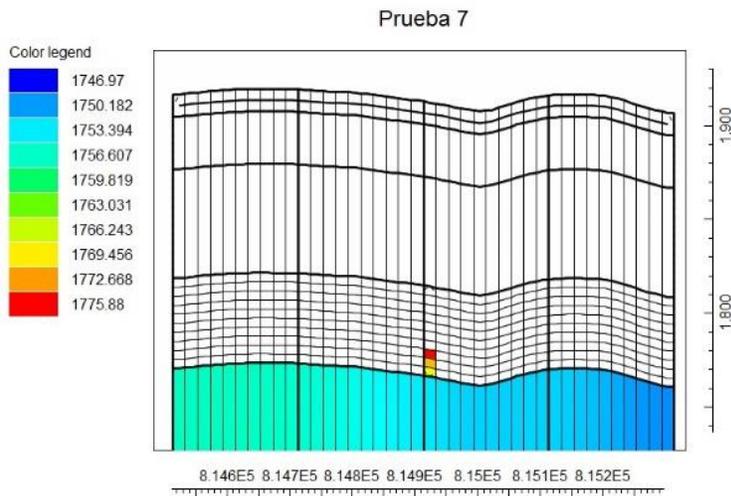


Ilustración 47. Modelo numérico, prueba de vaciado 7 (conductividad hidráulica 0.0075 m/s).

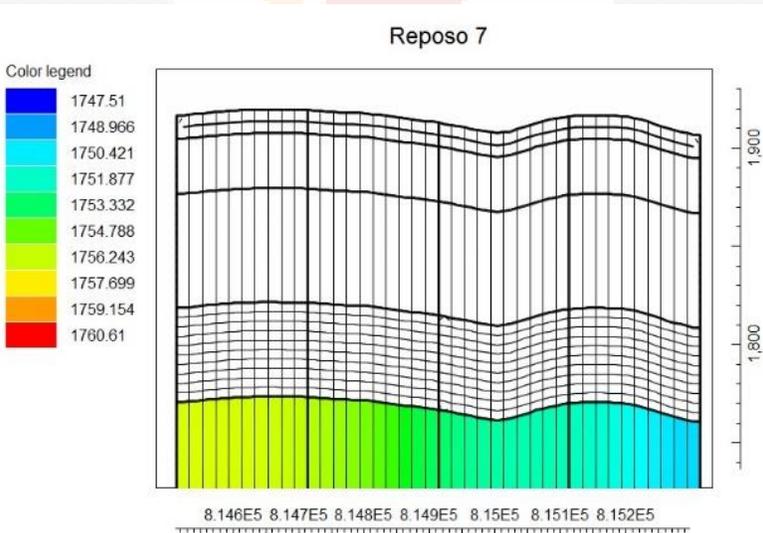


Ilustración 48. Modelo numérico, prueba de reposo 7 (conductividad hidráulica 0.0075 m/s).

### 10.3. Modelo Físico

Para realizar el modelo físico, se llenó el molde con agua hasta los 30.25 cm de profundidad con la finalidad de recrear la profundidad a la que se encuentra el nivel estático en el pozo inactivo (161.33 metros). Posteriormente se intentó recrear las pruebas tal y como se hicieron en el experimento en campo, sin embargo, la cantidad de agua a introducir en el modelo era muy pequeña 0.005 ml, por tanto, se optó por vaciar 1 ml de agua con un tiempo de vaciado de 15 segundos y periodos de medición de 1 y 2 minutos posteriores al vaciado.

Cabe destacar que sólo se hicieron 3 pruebas debido a que el molde del modelo comenzó a ensancharse de las paredes laterales debido a la presión que ejercían el agua y de los materiales contenidos, lo que ocasionó la generación de diversas aperturas en el molde, por donde se filtraba el agua contenida hacia el exterior, por lo que, se optó por sellar con silicón las aperturas generadas. Sin embargo, existían unas abiertas en la base que no se podían sellar debido a la existencia de una estructura de madera en la base del molde, la cual, tiene la función de darle mayor estabilidad al molde para que no colapse por presión.

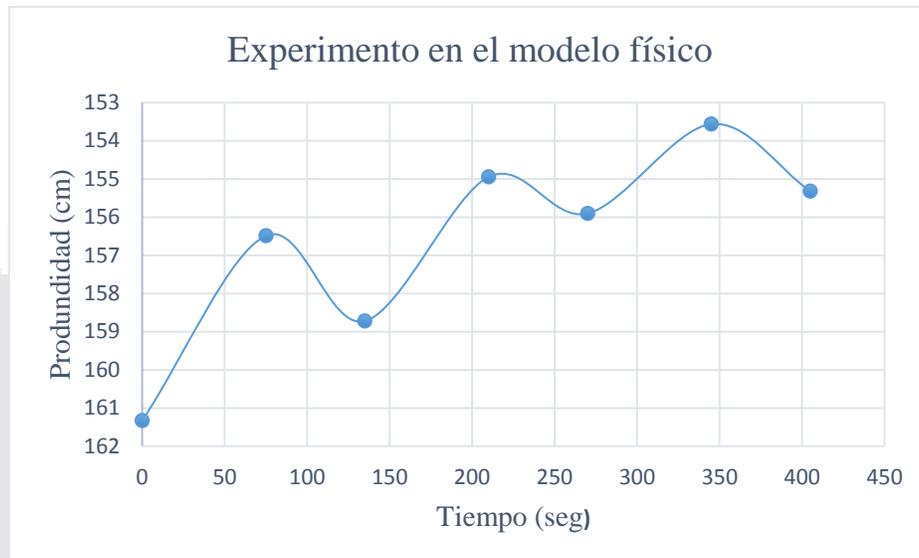
El resultado del experimento en el modelo físico se presenta en la tabla 15, en la cual, se observan las tres pruebas realizadas, el tiempo de vaciado, el volumen de vaciado, los periodos de medición de cada prueba, la profundidad dentro del molde, la profundidad escalada y la infiltración promedio de cada prueba

Tabla 15. Experimento en modelo físico.

Pruebas	T. Vaciado	Volumen de vaciado	Periodos de medición	Profundidad (cm)	profundidad escalada (m)	infiltración
1	15 seg	1 ml	1 min	29.42 cm	156.489362 m	0.0372 m/s
			2 min	29.84 cm	158.723404 m	
2	15 seg	1 ml	1 min	29.13 cm	154.946809 m	0.0159 m/s
			2 min	29.31 cm	155.904255 m	
3	15 seg	1 ml	1 min	28.87 cm	153.56383 m	0.0292 m/s
			2 min	29.2 cm	155.319149 m	

Σ 0.0292 m/s

La gráfica 2 muestra el comportamiento de los niveles de agua y el proceso de infiltración del experimento en el modelo físico.



Gráfica 2. Experimento en el modelo físico.

## 11. Conclusión

El objetivo de esta investigación es determinar si se considera viable utilizar los pozos inactivos como canales de infiltración al acuífero, para esto, se realizó un experimento en un pozo inactivo, el cual, se considera representativo del Valle de Aguascalientes, también se realizaron modelaciones numéricas y un modelo físico. Por cada método utilizado se obtuvieron resultados de conductividad hidráulica, los cuales, pueden determinar la velocidad de infiltración del agua hacia el acuífero.

El primero fue el experimento en el pozo que da como resultado un valor de conductividad hidráulica de 0.048 m/s, esto indica que se tiene una alta velocidad de infiltración. En cambio, el resultado de las modelaciones numéricas da una conductividad con un valor de 0.0075 m/s que, si bien, es un valor más pequeño en comparación con el resultado del experimento, aun así, la diferencia no es mucha y se sigue considerando como una velocidad de infiltración alta, esta diferencia de resultados por parte del modelo numérico, es muy probable que se deba a un tamaño grande de la malla al momento de realizar el modelo numérico, sin embargo, no se podía reducir más debido a que el sistema operativo se saturaba y cancelaba la operación.

El resultado de realizar el experimento en el modelo físico arroja como resultado, una conductividad con un valor de 0.0292 m/s, este valor se acerca mucho al del experimento en el pozo inactivo, por tanto, también se deduce una alta velocidad de infiltración.

Según (CONAGUA, 2018b) el rango de valores de conductividad hidráulica dentro del valle de Aguascalientes esta entre  $2.4 \times 10^{-6}$  y  $2.3 \times 10^{-4}$  m/s, los cuales, representan materiales de granulometría fina y en general se define como una conductividad media-baja. Existe gran diferencia con los resultados de conductividades hidráulicas en comparación con CONAGUA y los resultados que se obtuvieron de las tres metodologías planteadas en este estudio. Pueden existir diversos motivos por la diferencia de conductividades como: la zona de estudio, la profundidad a la que realizaron las pruebas, el tipo de material donde se realizó la prueba, entre otros.

Los resultados obtenidos de las tres metodologías, son similares (conductividad hidráulica alta) y la discrepancia que existe entre los tres resultados es mínima.

- *Experimento en campo:* 0.048 m/s.
- *Modelo numérico:* 0.0075 m/s.
- *Modelo físico:* 0.0292 m/s.

Por tanto, los pozos inactivos en el Valle de Aguascalientes pueden servir como canales de infiltración hacia el acuífero.

## **12. Recomendaciones**

Esta investigación es de tipo innovadora, debido a que no hay antecedentes de una investigación similar, por tanto, aún quedan varios puntos de vista por tratar que sobrepasan la investigación, entonces, para investigaciones futuras sería importante implementar, lo siguiente:

- Sistemas de captación y filtración de agua pluvial para poder utilizar en pozos inactivos.
- Como evitar la filtración de agua sucia y contaminantes hacia el acuífero por medio de pozos inactivos debido a la falta de rellenado y sellado.
- Experimentación en más pozos inactivos dentro del Valle de Aguascalientes.
- Al momento de experimentar en los pozos inactivos, considerar más tiempo en los periodos de medición con la finalidad de tener un mejor análisis del proceso de infiltración.
- Utilización de sistemas operativos con mayor procesamiento al momento de realizar modelaciones numéricas.
- Cautela y precisión al momento de recrear los materiales a escala para el modelo físico.
- Reforzar el molde del modelo físico para evitar la creación de aperturas en las uniones de las paredes debido a la presión del agua y materiales.

## Fuentes de consulta

- Antoniou A. *et. al.* (2017). Quality assessment of deep-well recharge applications in the Netherlands. *Water Science and Technology: Water Supply*, 17(5).
- Barbecho J. y Calle J. (2012). Caracterización de la conductividad hidráulica de los suelos de la subcuenca del Rio Tarqui. Universidad de Cuenca.
- Betancur T. y Palacio C. (2009). La modelación numérica como herramienta para la exploración hidrogeológica y construcción de modelos conceptuales. *Dyna*, (160), 39-49.
- Bouwer H. (1994). Role of groundwater and artificial recharge in future water resources management. *Future Groundwater Resources at Risk (Proceedings of the Helsin)*. East Broadway Road, Phoenix, Arizona: *IAHS Publ.* 491 – 497.
- Chenini I. y Mammou B. (2010). Groundwater recharge study in arid region: An approach using GIS techniques and numerical modeling. *Computers & Geosciences*, 36, 801-817.
- Comisión Nacional del Agua <<CONAGUA>>. (2007). Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento (2007.<sup>a</sup> ed.). Tlalpan, México, D.F.: *Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales*.
- Comisión Nacional del Agua <<CONAGUA>>. (2018a). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Valle de Aguascalientes (0101), Estado de Aguascalientes. *Diario Oficial de la Federación*.
- Comisión Nacional del Agua <<CONAGUA>>. (2018b). Estadísticas del agua en México.
- Cruz A., Vázquez R., Ramírez J., Nava E., Troyo E, Rivera J, y J Vega J. (2011). Precipitación y recarga en la cuenca de la paz, BCS, México. 27, 251-263.
- Custodio E. y Llamas M. (1983). Hidrología subterránea. *Ediciones Omega*. Barcelona
- De Vries J. y Simmers I. (2002). Groundwater recharge: an overview of processes and challenges. *Hydrogeology Journal*, 10(1), pp. 5-17.
- Esparza M. (2014). La sequía y la escasez de agua en México. Situación actual y perspectivas futuras. 193-219.
- Faustino J. (2006). Identificación, evaluación y manejo de zonas de recarga hídrica. San Salvador, SV, *CATIE*. 113 p.
- Gailey R. (2017). Inactive supply wells as conduits for flow and contaminant migration: conditions of occurrence and suggestions for management. *Hidrology journal* 25, pp. 2163 -2183.

- Gobierno del Estado de Aguascalientes. (2019). Clima. Departamento administrativo del gobierno de Aguascalientes. Encontrado en: <https://www.aguascalientes.gob.mx/estado/clima.html>
- Guerrero L. (2016). Evaluación de la recarga natural del acuífero del Valle de Aguascalientes mediante el análisis de variación de niveles de agua subterránea y datos de precipitación. Universidad Autónoma de Aguascalientes. Aguascalientes, México.
- Guerrero S. y Eliana P. (2018). Proyecto de recarga artificial en la cuenca Río Choapa; propuesta de zonas óptimas para su implementación y evaluación económica. Universidad Andrés Bello.
- Hermosillo H. (2018). Sobreexplotación de acuífero amenaza abasto de agua en Aguascalientes. (*La Jornada Aguascalientes*).
- Holdridge L. (1967). Life zone ecology. United State of America: San Jose, *Costa Rica: Tropical Science Center*.
- Juncosa R. (2005). Hidrología I: Ciclo hidrológico. La Coruña, España, *Escuela técnica superior de ingenieros de caminos, canales y puertos*.
- Loli M. (1993). Simulación Numérica de un Proyecto de Inyección de Agua Aplicado a un Yacimiento del Noroeste del Perú. Universidad nacional de ingeniería, Lima, Perú.
- Martínez A. (2017). El agua y los retos del siglo XXI. *Aquae papers*, 7 (7), 92 págs.
- Matus O., Faustino J. y Jiménez F. (2009). Guía para la identificación participativa de zonas con potencial de recarga hídrica Aplicación práctica en la subcuenca del río Jucuapa. Nicaragua. Costa Rica.
- Monforte G. y Cantú P. (2009). *Escenario del agua en México*. Culcyt//Recursos Hídricos año 6 (No 30), pp. 31-40.
- Normas Oficiales Mexicanas CNA. (1997). Norma Oficial Mexicana NOM-004-CNA-1996, "Requisitos para la protección de acuíferos durante el mantenimiento y rehabilitación de pozos de extracción de agua y para el cierre de pozos en general". *Diario oficial de la federación*.
- Peñuela L. y Carrillo J. (2012). Definición de zonas de recarga y descarga de agua subterránea a partir de indicadores superficiales: Centro-sur de la Mesa Central, México. 15 páginas.
- Pérez J. y Briceño C., (2013). Estado del arte de la modelación física en ingeniería civil. Universidad de la Salle, Bogotá, Colombia.

- TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS
- Rodríguez L. (2016). Revisión y análisis de los factores que influyen en la recarga natural del acuífero del Valle de Aguascalientes mediante sistemas de información geográfica (SIG). Universidad Autónoma de Aguascalientes. Aguascalientes, México.
- Scanlon B., Keese K., Flint A., Flint L, Gaye C., Edmunds M., y Simmers I. (2006). Global synthesis of groundwater recharge in semiarid and arid regions. *Hydrological Processes*, 20(15), 3335-3370.
- Vanegas L. (2018). Pozos de inyección profunda: Recarga artificial de acuíferos con aguas pluviales en el AMG. *Presentado en Foro del agua. El agua nos mueve a todos.*
- Varga A. y Arellano F. (2002). Comparación de tres métodos para el cálculo de eficiencia de pozos. 27, 97-110.
- Vázquez M. (2018). Análisis urbanístico de la ciudad de Aguascalientes para el aprovechamiento del agua pluvial y la aportación en la recarga de acuíferos. Universidad Autónoma de Aguascalientes. Aguascalientes, México.
- Vélez M. y Vázquez L. (2004). Métodos para determinar la recarga en acuíferos. *Primer Congreso Colombiano de Hidrogeología*. Medellín, Colombia. 20 p.
- Wu J. y Zhang R. (1994). Analysis of rainfall-infiltration recharge to groundwater. *Proceedings of fourteenth anual american geophysical union: Hidrology days*, Colorado State University Fort Collins, Colorado. 420-430.