



**CENTRO DE CIENCIAS DEL DISEÑO Y DE LA  
CONSTRUCCIÓN**

**DEPARTAMENTO DE GEOTECNÍA E HIDRÁULICA**

**TESIS**

**ANÁLISIS URBANÍSTICO DE LA CIUDAD DE AGUASCALIENTES  
PARA EL APROVECHAMIENTO DEL AGUA PLUVIAL Y LA  
APORTACIÓN EN LA RECARGA DE ACUÍFEROS**

**PRESENTA**

**Arq. María de Jesús Vázquez Dávila**

**PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL  
OPCIÓN AMBIENTAL**

**TUTOR**

**Dr. En C. Martín Hernández Marín**

**COMITÉ TUTORIAL**

**Dr. en U. Arturo Gleason Espíndola**

**M. en I. Lilia Guerrero Martínez**

**Aguascalientes, Ags., 14 noviembre de 2018**



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE AGUASCALIENTES  
FORMATO DE CARTA DE VOTO APROBATORIO

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

Por medio del presente como Tutor designado del estudiante **MARÍA DE JESÚS VÁZQUEZ DÁVILA** con ID **119588** quien realizó la tesis titulada: **ANÁLISIS URBANÍSTICO DE LA CIUDAD DE AGUASCALIENTES PARA EL APROVECHAMIENTO DEL AGUA PLUVIAL Y LA APORTACIÓN EN LA RECARGA DE ACUÍFEROS**, y con fundamento en el Artículo 175, Apartado II del Reglamento General de Docencia, me permito emitir el **VOTO APROBATORIO**, para que ella pueda proceder a imprimirla, y así como continuar con el procedimiento administrativo para la obtención del grado.

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

ATE NTAMENTE  
"Se Lumen Proferre"

Aguascalientes, Ags., a 07 de noviembre de 2018.

Dr. En C. Martín Hernández Marín  
Tutor de tesis

Dr. En U. Arturo Gleason Espindola  
Co-Tutor de tesis

Lilia Guerrero Mtz

M. En I. Lilia Guerrero Martínez  
Asesor de tesis

- ✓ c.c.p.- Maria de Jesús Vázquez Dávila
- c.c.p.- Dr. Ricardo Arturo López León - Secretaria de Investigación y Posgrado
- c.c.p.- M. en Ing. Ma. Guadalupe Lira Peralta - Jefatura del Depto. de Geotecnia e Hidráulica
- c.c.p.- Dr. En C. Martín Hernández Marín - Consejero Académico
- c.c.p.- Archivo

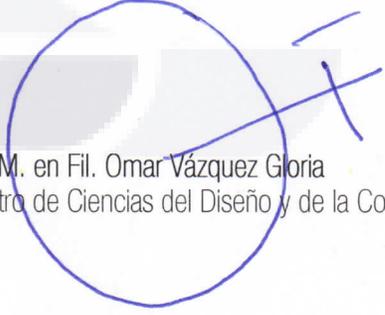
Dra. María del Carmen Martínez Serna  
Dirección General de Investigación y Posgrado  
PRESENTE

Por medio de este conducto informo que el documento final de tesis titulado: "ANÁLISIS URBANÍSTICO DE LA CIUDAD DE AGUASCALIENTES PARA EL APROVECHAMIENTO DEL AGUA PLUVIAL Y LA APORTACIÓN EN LA RECARGA DE ACUÍFEROS". Presentado por la sustentante: **María de Jesús Vázquez Dávila** con ID: 119588, egresada de la Maestría en Ingeniería Civil, cumple las normas y lineamientos establecidos institucionalmente. Cabe mencionar que la autora cuenta con el **voto aprobatorio** correspondiente.

Para efecto de los trámites que a la interesada convengan, se extiende el presente, reiterándole las consideraciones que el caso amerite.

ATENTAMENTE

Aguascalientes, Ags., 13 de noviembre de 2018  
"SE LUMEN PROFERRE"

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

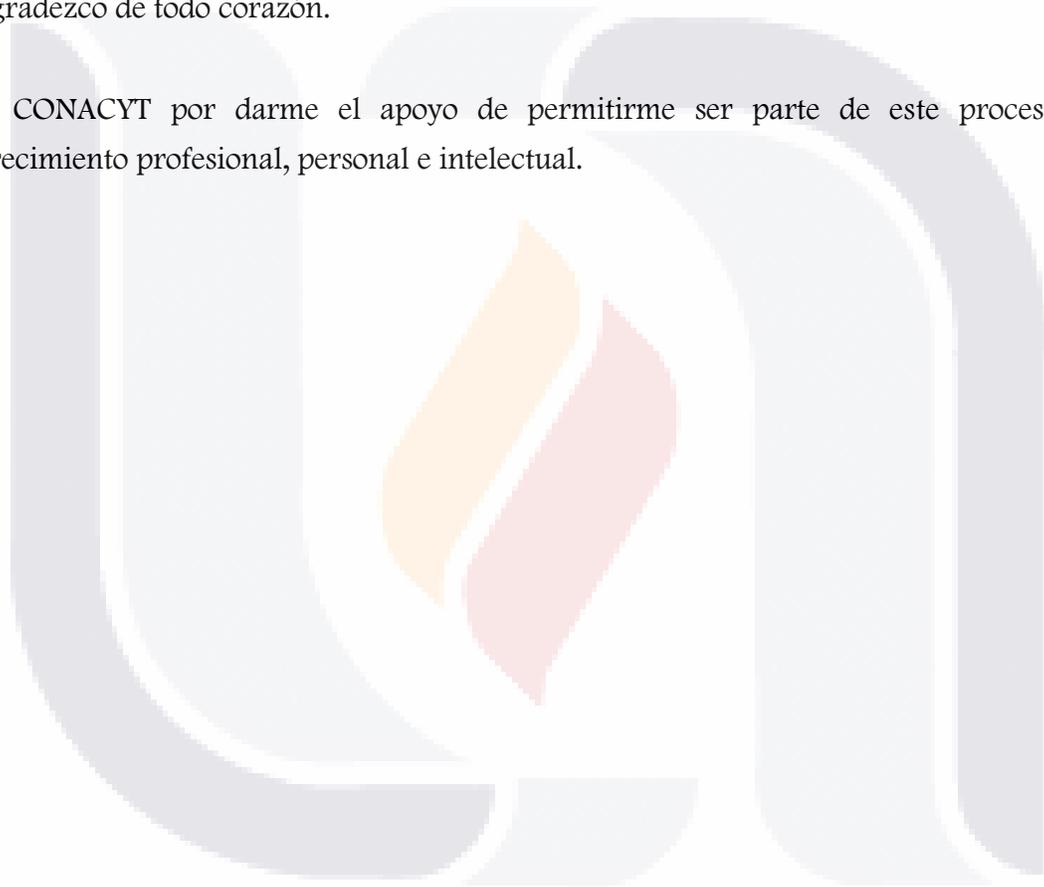
c.c.p.- Dr. Ricardo Arturo López León – Secretario de Investigación y Posgrado del CCDC.  
c.c.p.- Dr. Miguel Ángel Soto Zamora – Secretario Técnico de la Maestría en Ingeniería Civil.  
c.c.p.- Dr. Martín Hernández Marín – Tutor de tesis.  
c.c.p.- Ing. María de Jesús Vázquez Dávila – Egresada de la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

## AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma de Aguascalientes por otorgarme la oportunidad de ser parte de este programa de posgrado.

A mi tutor, el Dr. Martín Hernández Marín por aceptarme como su alumna, tutelar mi trabajo, confiar en mí, apoyarme de manera incondicional, por todos los momentos de paciencia que me brindo, ayudarme a tener confianza en mí misma y en mi trabajo, le agradezco de todo corazón.

A CONACYT por darme el apoyo de permitirme ser parte de este proceso de crecimiento profesional, personal e intelectual.



## DEDICATORIAS

Agradezco infinitamente a las siguientes personas:

A mis padres Aurora y Jesús, que siempre se han preocupado por cada mínimo detalle, con su paciencia y sabiduría han hecho que estos momentos sean menos difíciles. Gracias a ustedes soy lo que soy.

A mi esposo Héctor, que a pesar de todo mi remolino de emociones, entre los cuales estaban las frustraciones, enojo, risas, jamás perdiste la fe en mí, me apoyaste y me impulsaste para seguir con mis metas.

A mi hermano Jorge Luis, que desde el cielo siempre cuidas cada uno de mis pasos, eres y serás siempre mi ángel de la guardia.

A mis hermanos Alejandro, Tere y José, que entre risas y bromas hicieron que mis momentos fueran más amenos.

A mis amigos, que me apoyaron en cada momento académico como personal, siempre tuvieron un tiempo para mis problemas o dudas, esta etapa siempre será especial por ustedes.

Gracias a todos ustedes, el día de hoy soy mejor persona.

ÍNDICE GENERAL

índice General ..... 1

Índice de Tablas..... 4

Índice de Figuras ..... 5

Resumen..... 7

Abstract ..... 8

**CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN ..... 9**

    1.1 Prólogo..... 9

    1.2 Justificación..... 12

    1.3 Objetivo General..... 14

    1.4 Objetivos Particulares..... 14

    1.5 Alcances..... 15

    1.6 Hipótesis ..... 15

**CAPITULO II: ESTADO ACTUAL DEL CONOCIMIENTO ..... 17**

    2.1 Situación Actual de la recarga de acuíferos en el mundo..... 17

    2.2 Situación Actual de la recarga de acuíferos en México ..... 24

        2.2.1 Sistemas de captación de agua pluvial ..... 28

        2.2.2 Ejemplo práctico de técnicas de infiltración ..... 34

**CAPITULO III: MARCO TEÓRICO ..... 36**

    3.1 Análisis Multicriterio ..... 36

    3.2 Simulación en el programa COMSOL Multiphysics ..... 39

    3.3 Algebra de mapas ..... 40

    3.4 Marco conceptual..... 40

        3.4.1 Formaciones hidrogeológicas ..... 40

        3.4.2 Tipos de acuíferos..... 41

        3.4.3 Proceso de infiltración y recarga ..... 42

        3.4.4 Tipos de recarga ..... 44

        3.4.5 Factores que afectan la recarga del acuífero ..... 45

    3.5 Características de la Zona de Estudio ..... 47

        3.5.1 Generalidades ..... 47

3.5.2 Ubicación de la zona de estudio.....47

3.5.3 Clima .....48

3.5.4 Hidrología .....48

3.5.5 Reglamentación Existente en el tema de la Recarga de Acuíferos..... 50

CAPITULO IV: METODOLOGÍA ..... 51

4.1 Compilación de la información..... 51

4.1.1 Normatividad en Aguascalientes para la recarga..... 51

4.1.2 Variables Involucradas ..... 51

4.2 Análisis Urbanístico de la Ciudad de Aguascalientes por Uso de Suelo en SIG ... 52

4.3 Análisis numérico de infiltración en el suelo..... 53

4.4 Asignación de valores a los factores que influyen en la recarga en SIG ..... 54

4.5 Análisis multicriterio de los factores para la recarga del acuífero de Aguascalientes ..... 54

4.6 Aplicación de álgebra de mapas en SIG ..... 55

CAPITULO V: RESULTADOS..... 56

5.1 Análisis Urbanístico de la Ciudad de Aguascalientes ..... 56

5.2 Análisis Numérico del Pozo de Absorción ..... 59

5.2.1 Definición del modelo..... 59

5.2.2 Parámetros hidráulicos ..... 60

5.2.3 Tiempos de infiltración ..... 62

5.3 Análisis de las capas geoespaciales ..... 69

5.3.1 Precipitación media anual en mm ..... 69

5.3.2 Evaporación ..... 70

5.3.3 Uso de suelo ..... 71

5.3.4 Pendiente ..... 71

5.3.5 Vegetación..... 72

5.3.6 Pozo de infiltración ..... 73

5.4 Evaluación multicriterio de las capas por medio del Proceso Analítico Jerárquico (AHP) ..... 73

5.4.1 Precipitación ..... 73

5.4.2 Evaporación ..... 75

5.4.3 Uso de suelo ..... 77

5.4.4 Pendiente ..... 79

5.4.5 Vegetación..... 80

5.4.6 Pozo de infiltración ..... 82

5.4.7 Relación de las capas Temáticas..... 83

5.5 Mapa final de la recarga natural de los acuíferos en el área de estudio ..... 84

CAPITULO VI: DISCUSIÓN DE RESULTADOS ..... 86

CAPITULO VII: CONCLUSIONES ..... 87

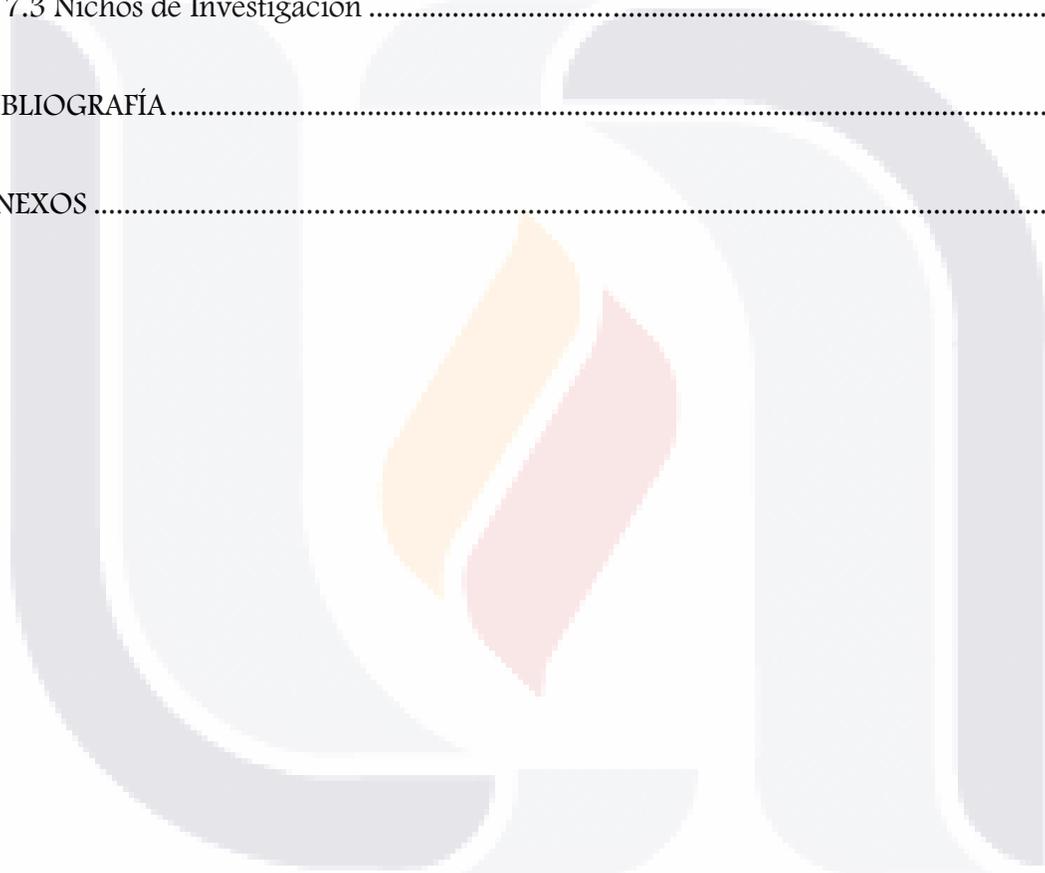
7.1 Conclusión General..... 87

7.2 Reflexiones para mejorar la captación de agua pluvial..... 88

7.3 Nichos de Investigación ..... 89

BIBLIOGRAFÍA..... 90

ANEXOS ..... 94



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Límites máximos permisibles. Fuente: Martínez-Martínez, (1996) ..... 10

Tabla 2. Concentraciones máximas permitidas de elementos químicos. Fuente: Normatividad Europea (2006) ..... 22

Tabla 3. Uso del agua de lluvia y tratamiento (García-Velázquez 2012). ..... 31

Tabla 4. Unidades del sistema (García-Velázquez 2012). ..... 32

Tabla 5. Coeficientes de captación de superficies comunes en techos (Gould y Nissen-Ptersen 2012) ..... 33

Tabla 6. Fundamentos de escala de los números absolutos (Saaty, 2008) ..... 37

Tabla 7. Características hidráulicas de las principales formaciones hidrogeológicas...41

Tabla 8. Clasificación de los acuíferos. Fuente: González-de-Vallejo et al. (2002).....42

Tabla 9. Estaciones Meteorológicas que afectan a la zona de estudio. CONAGUA (2018). ..... 52

Tabla 10. Área por clasificación de la zona de Estudio. Fuente: Autoría propia (2018). ..... 57

Tabla 11. Clasificación extensa por Uso de Suelo con su área. Fuente: Autoría Propia (2018) ..... 58

Tabla 12. Parámetros para el pozo de infiltración..... 61

Tabla 13. Parámetros para el suelo que constituye la zona vadosa. .... 61

Tabla 14. Datos de la precipitación media anual. PMA = Precipitación media anual. .69

Tabla 15. Datos de la evaporación de la zona de estudio..... 70

Tabla 16. Rangos de las Isoyetas de precipitación. .... 73

Tabla 17. Ponderación de clasificación de precipitación, calculada a través del Proceso Analítico Jerárquico (AHP)..... 74

Tabla 18. Rangos de las Isoyetas de evaporación..... 75

Tabla 19. Ponderación de los niveles de evaporación en la zona de estudio, calculada a través del Proceso Analítico Jerárquico (AHP). .... 76

Tabla 20. Ponderación por tipo de suelo y sus pesos, calculada a través del Proceso Analítico Jerárquico (AHP)..... 78

Tabla 21. Ponderación de los valores de la pendiente. Fuente: Autoría Propia (2018). 79

Tabla 22. Ponderación de la variable de vegetación. Fuente: Autoría Propia (2018). ..80

Tabla 23. Ponderación de la variable de pozos de absorción. .... 82

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Distribución de agua dulce en el planeta. Fuente: Gutiérrez-Bracho, (2015). 9

Figura 2. Mapa de susceptibilidad a la recarga natural del acuífero en Aguascalientes.  
..... 12

Figura 3. Clima de Aguascalientes. Torres-López, T. N. Fuente: INEGI, 2015 ..... 13

Figura 4. Metodología a utilizar. .... 15

Figura 5. Sistema de distribución. Fuente:(UNESCO, 2013). ..... 18

Figura 6. Construcción de un sistema de carbono, cercano a un pozo de inyección en Windlook, Namibia. Fuente: UNESCO, (2013). ..... 19

Figura 7. Bioretención.Fuente: Sukia-Irastortza, (2009). ..... 21

Figura 8. Dispositivo micro-simulador de lluvia. Fuente: Aoki y Sereno,( 2006) ..... 23

Figura 9. Tabla de extracción de agua. Fuente: (Escobar-Villagrán y Palacios-Vélez, 2012) ..... 24

Figura 10. Comparación de extracción y recarga. .... 25

Figura 11. Corte de terreno con pozo de infiltración. Fuente: Cisneros et. al (2014) ... 26

Figura 12. Pozo de Absorción. Fuente: Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (2003). ..... 27

Figura 13. Zanjas de Absorción. Fuente: Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (2003). ..... 28

Figura 14. Sistema de captación de lluvia del proyecto Isla urbana según lo propuesto por García-Velázquez (2012). ..... 29

Figura 15. Arreglo para evaluación de separador de sólidos grandes según lo propuesto por García-Velázquez (2012). ..... 29

Figura 16. Sistema de captación de agua pluvial. Fuente: García-Velázquez, J. H. (2012) ..... 30

Figura 17. Modelo del desarenador. Fuente: García-Velázquez, J. H. (2012) ..... 31

Figura 18. Método de cosecha de agua. Fuente: Gutiérrez-Bracho (2015) ..... 34

Figura 19. Bioparque Urbano San Antonio ubicado en Delegación Álvaro Obregón de la Ciudad de México. Tomado de Cabeza-Pérez y González-Mejía (2011)..... 35

Figura 20. Ejemplo de resultados en COMSOL Multiphysics. Tomado de (Mendoza-Gutiérrez, 2013). ..... 39

Figura 21. Esquema representativo de los mecanismos de generación de infiltración. Modificado de UDEP, (2013)..... 43

Figura 22. Zonas del suelo para el proceso de infiltración. Fuente: UDEP, (2013)..... 44

Figura 23. Zona de estudio, la ciudad de Aguascalientes en el contexto geográfico del estado del mismo nombre. .... 48

Figura 24. Hidrología del estado de Aguascalientes. .... 49

Figura 25. Clasificación de ZUFO's. Fuente: IMPLAN (2018)..... 53

Figura 26. Usos de suelo de los ZUFO's..... 56

Figura 27. Clasificación extensa por Uso de Suelo. Fuente: Autoría Propia (2018)..... 58

Figura 28. Corte de pozo de absorción. .... 60

Figura 29. Lapso inicial de infiltración. .... 62

Figura 30. Reacción de pozo de absorción en un tiempo de 20 minutos. .... 63

Figura 31. Pozo de absorción en un tiempo de 40 minutos..... 64

Figura 32. Saturación completa del pozo de absorción en un tiempo de 90 minutos. .. 65

Figura 33. Pozo de absorción en el tiempo 180 minutos. .... 66

Figura 34. Pozo de absorción transcurrido un día. .... 67

Figura 35. Modelación del pozo de absorción después de 3 días..... 68

Figura 36. Mapa de valores interpolados de la precipitación del área de estudio..... 70

Figura 37. Mapa de valores interpolados de la evaporación del área de estudio. .... 71

Figura 38. Variación de la pendiente en el área de estudio. .... 72

Figura 39. Reclasificación de la zona de estudio por la variable de precipitación. .... 75

Figura 40. Reclasificación de la zona de estudio por la variable de evaporación..... 77

Figura 41. Reclasificación de la zona de estudio por la variable de Uso de Suelo. .... 78

Figura 42. Reclasificación de la zona de estudio por la variable de Pendiente. Fuente: Autoría Propia (2018) ..... 80

Figura 43. Reclasificación de la zona de estudio por la variable de Pendiente. Fuente: Autoría Propia (2018) ..... 81

Figura 44. Reclasificación de la zona de estudio por la variable de Pozos de Absorción. .... 83

Figura 45. Mapa de factibilidad de la recarga de acuífero de Aguascalientes, calculada a través del Proceso Analítico Jerárquico (AHP). .... 85

## RESUMEN

La escasez del agua en Aguascalientes ha aumentado debido a la sobreexplotación de los acuíferos, esto como consecuencia de que la cantidad de agua que se recarga es mucho menor que la que es extraída. Observando la problemática de la zona, se plantea un nuevo método de análisis para evaluar la recarga en zonas urbanas mediante dos vertientes, primero realizando un análisis geoespacial en el que se evalúan y clasifican los factores involucrados para la recarga al acuífero del Valle de Aguascalientes, considerando como los principales actores a los pozos de infiltración y área verde determinada para cada construcción, y segundo mediante modelación numérica de columnas estratigráficas con los geomateriales locales en el programa de elemento finito COMSOL. Dentro del análisis geoespacial, se emplea un software libre QGIS para el manejo de la información Geográfica y el método del Proceso Analítico de Jerarquías (AHP). En base al análisis geoespacial, los coeficientes o pesos a utilizar en el proceso de recarga son: precipitación anual 17.14%, evaporación anual 5.92%, uso de suelo 33.70%, pendiente 5.90%, vegetación 15.13% y pozo de absorción 22.21%. El resultado final incluirá un mapa conformado por todas las variables involucradas en el proceso, entre ellas el modelado en el programa COMSOL de los pozos de infiltración, obteniendo zonas más propensas para su utilización, mostrando el excelente escenario para la recarga más rápida.

**PALABRAS CLAVE:** Recarga, columnas estratigráficas, acuífero

## ABSTRACT

The shortage of water in Aguascalientes has increased due to the overexploitation of the aquifers, as a consequence that the amount of water that is recharged is much smaller than that extracted. Observe the problems of the area, is seen as a new method of analysis to assess the recovery in urban areas through two approaches, first perform a geospatial analysis to evaluate and classify the factors involved in the aquifer recharge of the Aguascalientes Valley, having as the main actors, the infiltration points and the green area for each construction, and the second way by numbering strategic columns with the local geomaterials in the COMSOL finite element program. Within the geospatial analysis, the open source QGIS software is used for the management of Geographic information and the method of the Analytical Hierarchical Process (AHP). Based on the geospatial analysis, the coefficients or weights to be used in the recharge process are: annual precipitation 17.14%, annual evaporation 5.92%, land use 33.70%, slope 5.90%, vegetation 15.13% and infiltration well 22.21%. The final result will include a map made up of all the variables involved in the process, between them the modeling in the COMSOL program of the infiltration well, showing the excellent scenario for the fastest recharge.

**KEY WORDS:** Recharges, Stratigraphic columns, aquifer

## CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

### 1.1 Prólogo

El agua es el líquido con mayor volumen en el planeta, siendo equivalente al 70.00% del volumen total de la tierra; sin embargo, el agua dulce es la más cotizada porque es crucial para los seres humanos como para plantas y animales; ya que se utiliza para el consumo, vestimenta, producción de alimentos, aseo, etc.

Gutiérrez-Bracho, (2015) enfatizó que el agua potable que tiene el planeta es solo 2.4%, de la cual solo 30.80% es subterránea. En la Figura 1 se muestra la distribución del agua de donde se puede localizar.

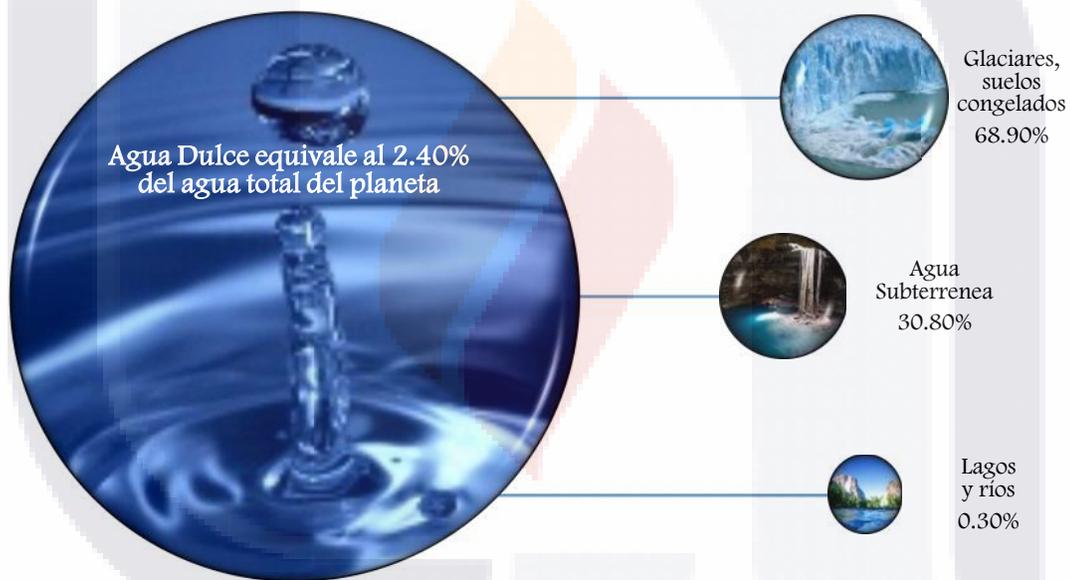


Figura 1. Distribución de agua dulce en el planeta. Fuente: Gutiérrez-Bracho, (2015).

Actualmente el ser humano necesita el agua potable para todas sus necesidades básicas, sin embargo, desde hace algunos años el exceso de este consumo ha generado la escasez del mismo; ya que, en promedio una habitante debería gastar menos de 150 lts/día, pero en algunas ciudades, los pobladores están consumiendo un volumen mayor a los 400 lts/día (CONAGUA, 2007).

La escasez de agua potable es uno de los principales problemas que hay en el mundo, debido a que se consume más agua de la recaudada, es decir que se extrae más agua que la que se infiltra a los acuíferos (INEGI, 2015).

Esta problemática ha comenzado a afectar a diferentes ciudades entre ellas la ciudad de Aguascalientes, donde el efecto es cada vez mayor, debido a varios causales como: el clima semiseco, evapotranspiración mayor a la precipitación, el re-direccionamiento de las aguas superficiales por drenajes y los sedimentos que no permiten la infiltración directa.

En 2015 según el Periódico “El Heraldo” de Aguascalientes hay pozos de los cuales se extrae agua a más de 600 metros de profundidad, esto habla de la insuficiencia del agua potable debido al uso desmedido del consumo de agua, por lo que se provee agua de 20 a 30 años.

Rico-Martínez (2015), quien estudia la calidad de agua, ha encontrado cantidades tóxicas de arsénico, cromo, flúor, hierro y mercurio; lo cual indica que las extracciones de agua a las profundidades mayores de 500 metros pueden llegar a ser muy peligrosas. Por su parte, Martínez-Martínez, (1996), muestra los límites de calidad permisibles, mismos que se explican en la siguiente tabla:

| Parámetro                               | Límites máximos permisibles | Efluentes tratados |
|---|-----------------------------|--------------------|
| pH                                      | 6.5-8.5                     | 7.8                |
| Conductividad eléctrica (micromhs cm-1) | 2,000                       | 1320               |
| Demanda bioquímica de O2 (mg/L)         | 120                         | 120                |
| Sólidos suspendidos totales (mg/L)      | 120                         | 0.052              |

Tabla 1. Límites máximos permisibles. Fuente: Martínez-Martínez, (1996)

Otro factor que detonó la sobre explotación de los acuíferos fue el aumento de habitantes, como lo muestra en (INEGI, 2015), la población de Aguascalientes fue en aumento aproximadamente en los años ochenta, uno de los causantes de este aumento fue el terremoto del 1985, el cual causo la inmigración de habitantes de otros estados a

la ciudad de Aguascalientes, acelerando el crecimiento poblacional. Sin embargo, se puede analizar en la literatura que desde la época de los egipcios se almacenaba agua para reutilizarla y aportar a la supervivencia de la población, (García-Velázquez, 2012).

Si se piensa en la recarga natural de los mantos que se han sobreexplotado, podríamos tratar de equilibrar los consumos, esto con el estudio a nivel de barrios o colonias en la ciudad, plantear como se podría hacer este aporte, en qué medida y como podría ser aplicado a la vivienda convencional. Analizando, desarrollando y utilizando un sistema para el aprovechamiento de agua pluvial, con la implementación del mejor acomodo de los sedimentos de la zona y así poder infiltrar al acuífero.

Como se menciona anteriormente, del trabajo a tratar, la escasez del agua es el principal problema, no solo en Aguascalientes, sino, que en la gran mayoría del territorio de la República.

El agua subterránea en el estado cada vez se extrae de pozos más profundos, esto como ya se mencionó debido al aumento de la población a partir de los años ochenta, y a los factores añadidos a ella como el aumento de la producción agrícola así como la creciente industria, sin dejar de lado la poca cultura del cuidado del agua.

Uno de los principales factores de la sobreexplotación es la falta de infiltración en los acuíferos, en este aspecto Hernández-Marín et al., (2018), realizó un estudio detallado donde muestra cuales son las áreas para susceptibilidad a la recarga del acuífero en Aguascalientes, esto se muestra en la Figura 2, en la cual la zona marcada con el color verde representa la zona de menor infiltración, ubicada en el norte y este de la ciudad de Aguascalientes, mientras que al centro del valle se presenta la zona de mayor infiltración coloreada en rojo.

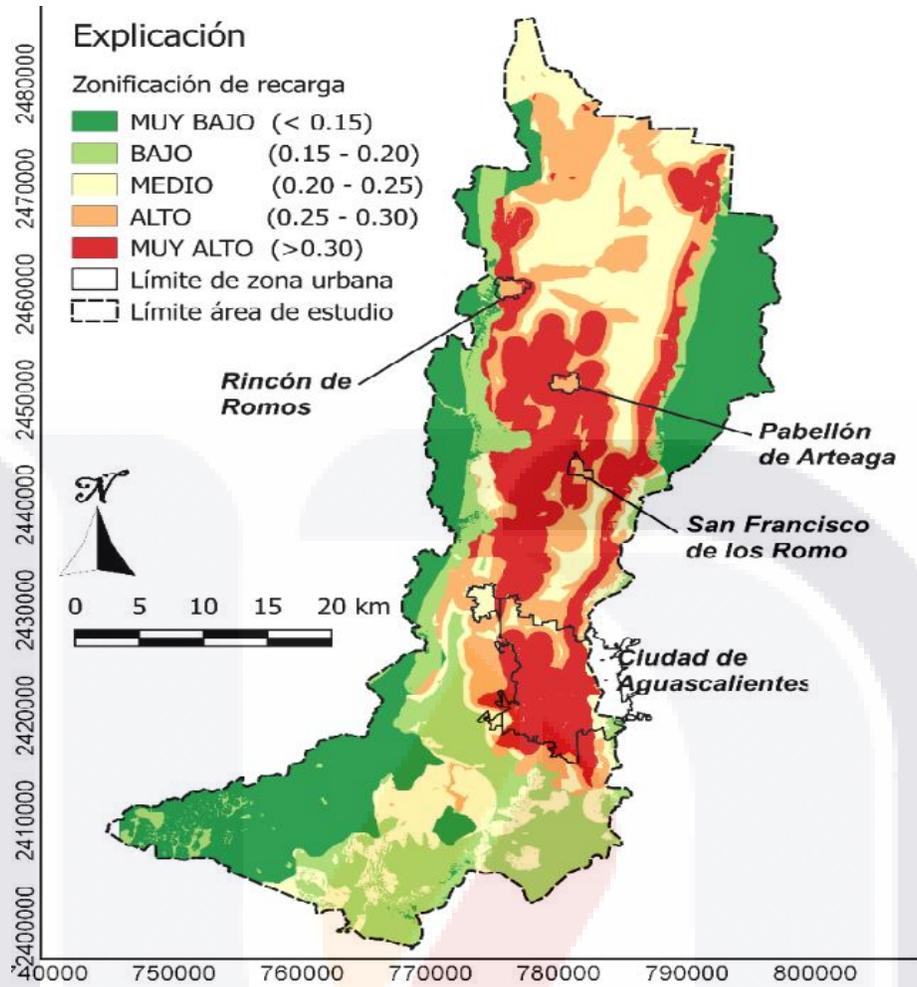


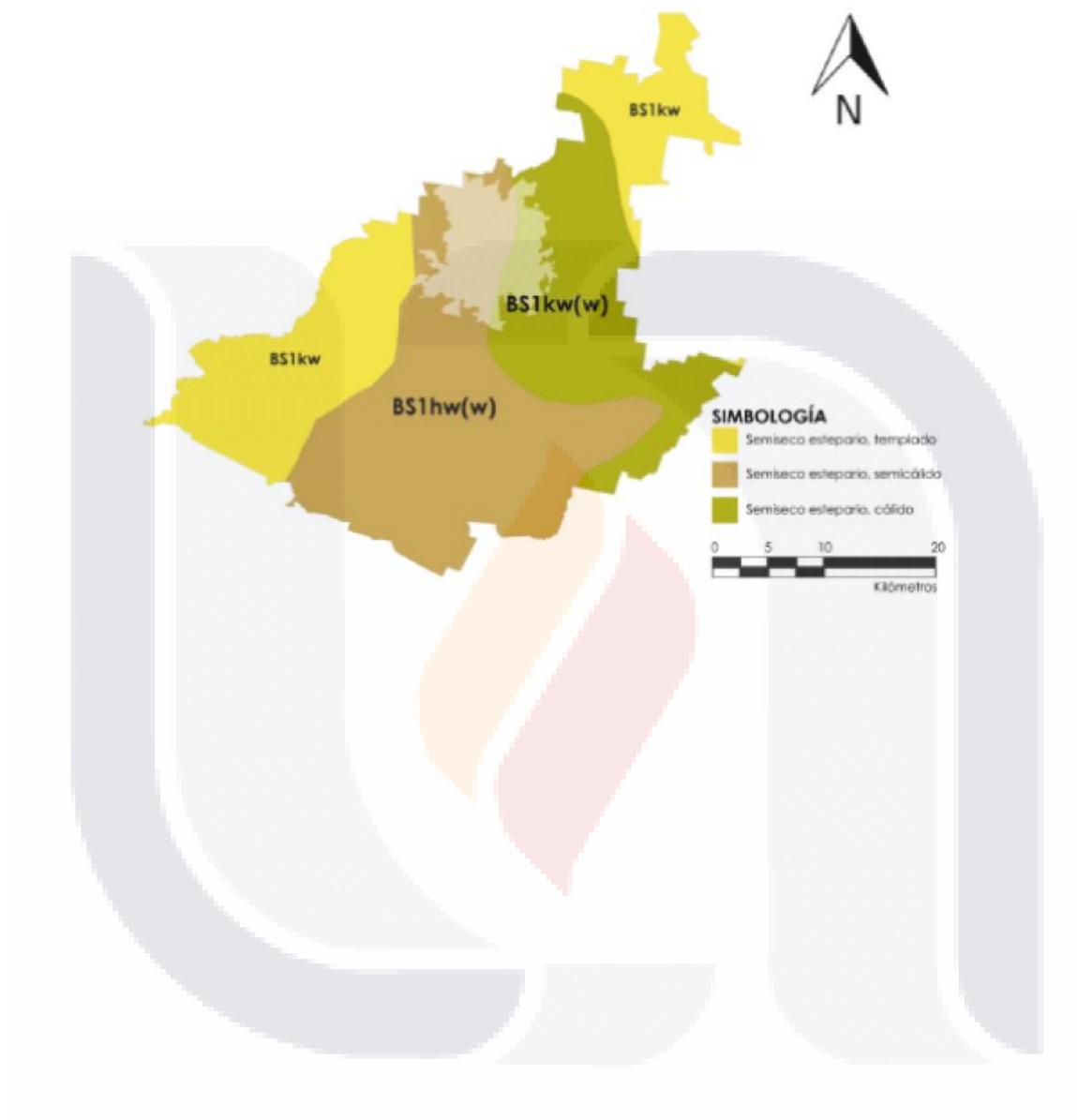
Figura 2. Mapa de susceptibilidad a la recarga natural del acuífero en Aguascalientes.

Fuente: Hernández-Marín et al., (2018).

## 1.2 Justificación

La investigación se realiza en la ciudad de Aguascalientes, perteneciente al municipio del mismo nombre. Se eligió esta zona ya que la escasez de agua este cada vez mayor y podría utilizarse como base para otras regiones con características similares.

Como ya se mencionó anteriormente, Aguascalientes ya ha sido alcanzado por la problemática de la escasez de agua, por lo que se ha tenido que extraer agua a profundidades de 600 metros, las causas principales son:



sustentado en el porcentaje de infiltración; al proponer tipos y cantidades de suelo, así como un acomodo que permita hacer esta función.

### 1.3 Objetivo General

Realizar un análisis geoespacial que permita evaluar la aportación al acuífero en el área de la ciudad de Aguascalientes a partir de agua pluvial. Se incluirán para este análisis los diferentes tipos de construcciones, basándose principalmente en el ramo de la vivienda, clasificándose por uso de suelo. Contendiéndose factores externos como precipitación, características de suelo, entre otros. Incluyéndose en el análisis un estudio numérico del aporte potencial de agua al subsuelo por medio de un pozo de infiltración.

### 1.4 Objetivos Particulares

- a) Analizar la Normatividad de construcción actual que rige en el Estado de Aguascalientes para ubicar lo concerniente al tema del aprovechamiento del agua pluvial y recarga natural, con la finalidad de proponer mejoras a las normas que la contemplen.
- b) Examinar las características de la vivienda en sus diferentes tipologías, para establecer la cantidad de agua que se podría utilizar en la recarga, a partir del área verde que contengan.
- c) Identificar las características de las colonias, barrios, fraccionamientos o zonas urbanas con áreas verdes, que potencialmente permitirían la infiltración natural de agua al subsuelo con base en la normatividad revisada.
- d) Desarrollar modelos para simulaciones numéricas sobre la mejor geometría y espesores de la columna de suelo utilizando el programa COMSOL.
- e) Obtener el análisis geoespacial para clasificación de las zonas de recarga en la ciudad de Aguascalientes.
- f) Realizar un mapa de la zona donde se muestre el porcentaje adecuado del nivel de agua portado por barrios, a los mantos acuíferos utilizando el método de multicriterio.

- g) Realizar un análisis numérico (geoespacial) de los diferentes escenarios probables de acomodo urbano, de volumen precipitado, etc.

### 1.5 Alcances

Por medio de este trabajo se pretende determinar las zonas que contribuirán al aporte del acuífero de Aguascalientes, esto a partir de las precipitaciones pluviales; en caso de que la normatividad vigente no sea adecuada se marcará una pauta con el desarrollo de áreas y porcentajes aplicados en las construcciones. Una vez que se ha analizado los tipos de vivienda que existen en Aguascalientes, se estimará cuánta agua pueden aportar de manera natural al acuífero y como es que esta influirá.

Además se espera determinar cuáles son las características en el aspecto de área verde de las colonias, barrios, fraccionamientos o zonas urbanas, es decir, cuanta área se está asignando a nivel zona, en base a la normatividad vigente aplicada a la Ciudad de Aguascalientes (zonas de donación). La figura 4 muestra cómo se analiza este punto:

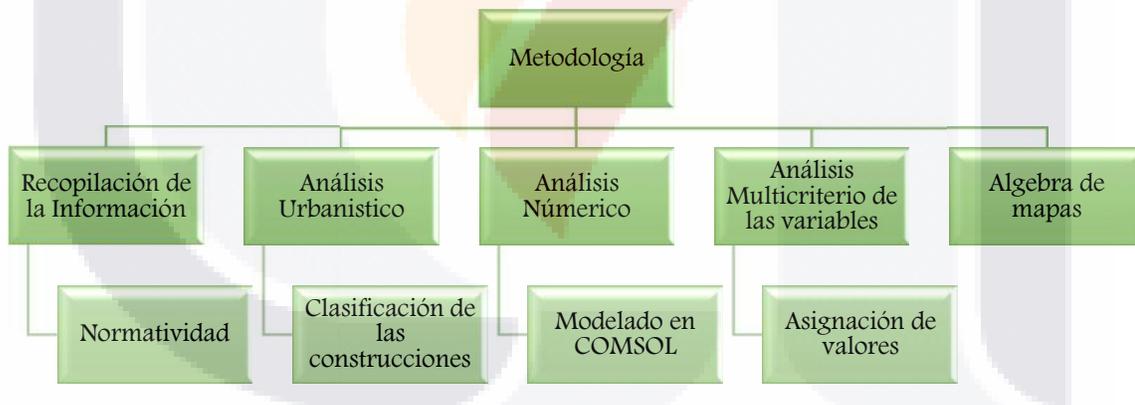


Figura 4. Metodología a utilizar.

Finalmente se realizará un mapa donde se determine el área de infiltración y el acomodo ideal de los estratos en el área de infiltración, utilizando el mejor escenario posible que propicie la infiltración del agua pluvial de la manera más adecuada.

### 1.6 Hipótesis

El porcentaje propuesto de área verde para la infiltración en las viviendas y también a nivel barrio, fraccionamiento o colonia puede aportar una importante cantidad de agua para una recarga del acuífero de la ciudad de Aguascalientes a partir de precipitaciones pluviales. Un estudio numérico sobre un pozo de infiltración muestra cómo se infiltra el agua y como contribuye a la recarga a nivel vivienda.



## CAPITULO II: ESTADO ACTUAL DEL CONOCIMIENTO

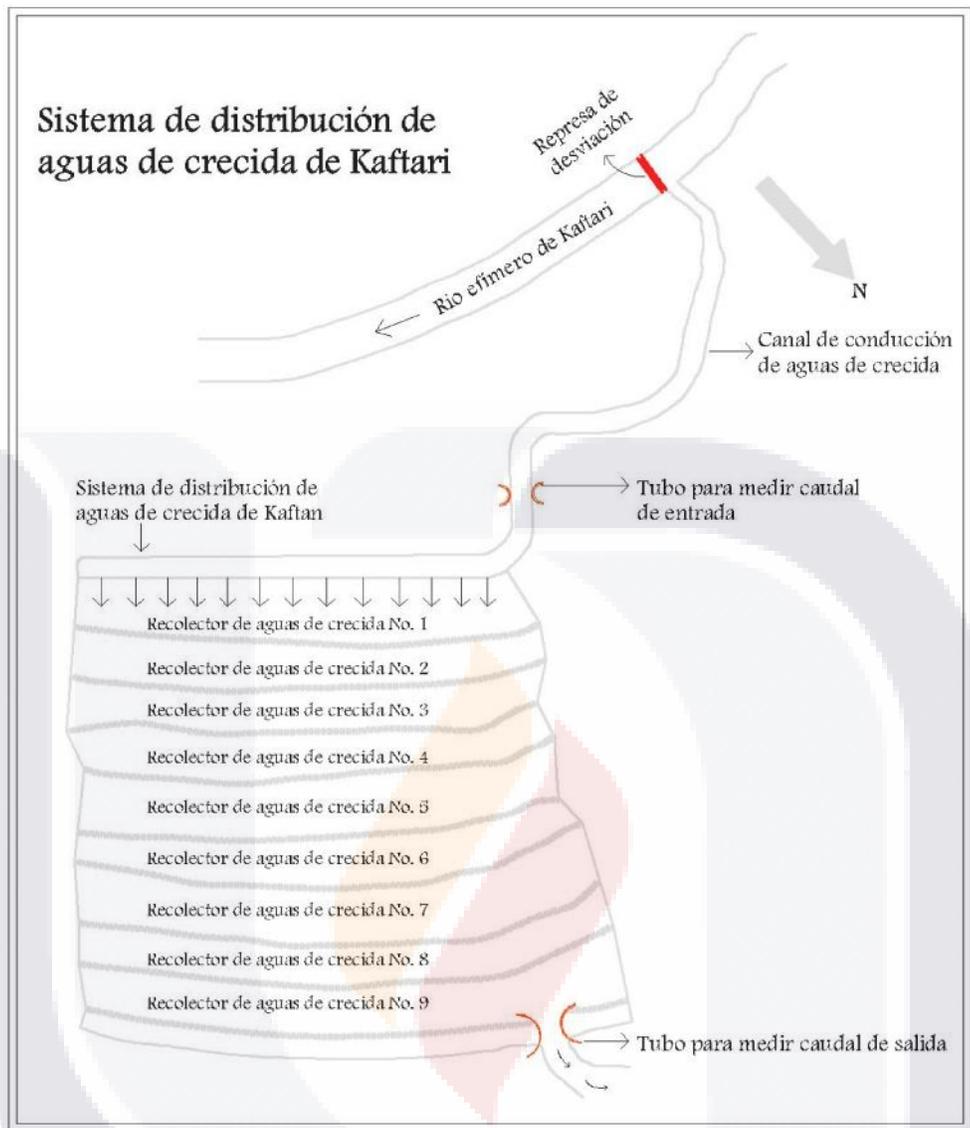
### 2.1 Situación Actual de la recarga de acuíferos en el mundo

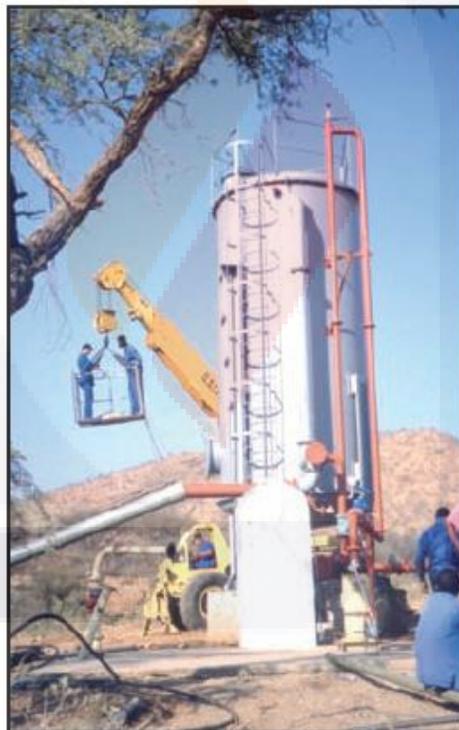
El agua de lluvia es el principal factor para el desarrollo del estudio de la recarga del acuífero mediante los pozos de infiltración, sin embargo, surge la duda de cómo podremos verificar que el agua de lluvia realmente sea buena para esta técnica.

El término recarga de acuíferos es cada día más importante, el desabasto del agua potable es cada día mayor, existiendo lugares en el mundo donde esto se ha vuelto un privilegio en lugar de una necesidad. Así, se han desarrollado diferentes tipos de recarga artificial, utilizando la re-direccionalidad de cauces de río, arroyos, inyección al acuífero con agua tratada, entre otros, a continuación, se explican los procesos.

En un estudio de la UNESCO, (2013), se analizaron diferentes tipos de recarga para los acuíferos, pero en todas las opciones se trata recarga artificial, desarrollado lo siguiente:

En la primera alternativa se construyeron recolectores, para la entrada y salida del agua, esto para re-direccionar el agua a la zona de infiltración, ejemplificándolo en la Figura 5.





en España (Fernández, 2010), se comenzaron a utilizar cinco nuevos sistemas para aumentar la recarga artificial, los cuales se describen a continuación:

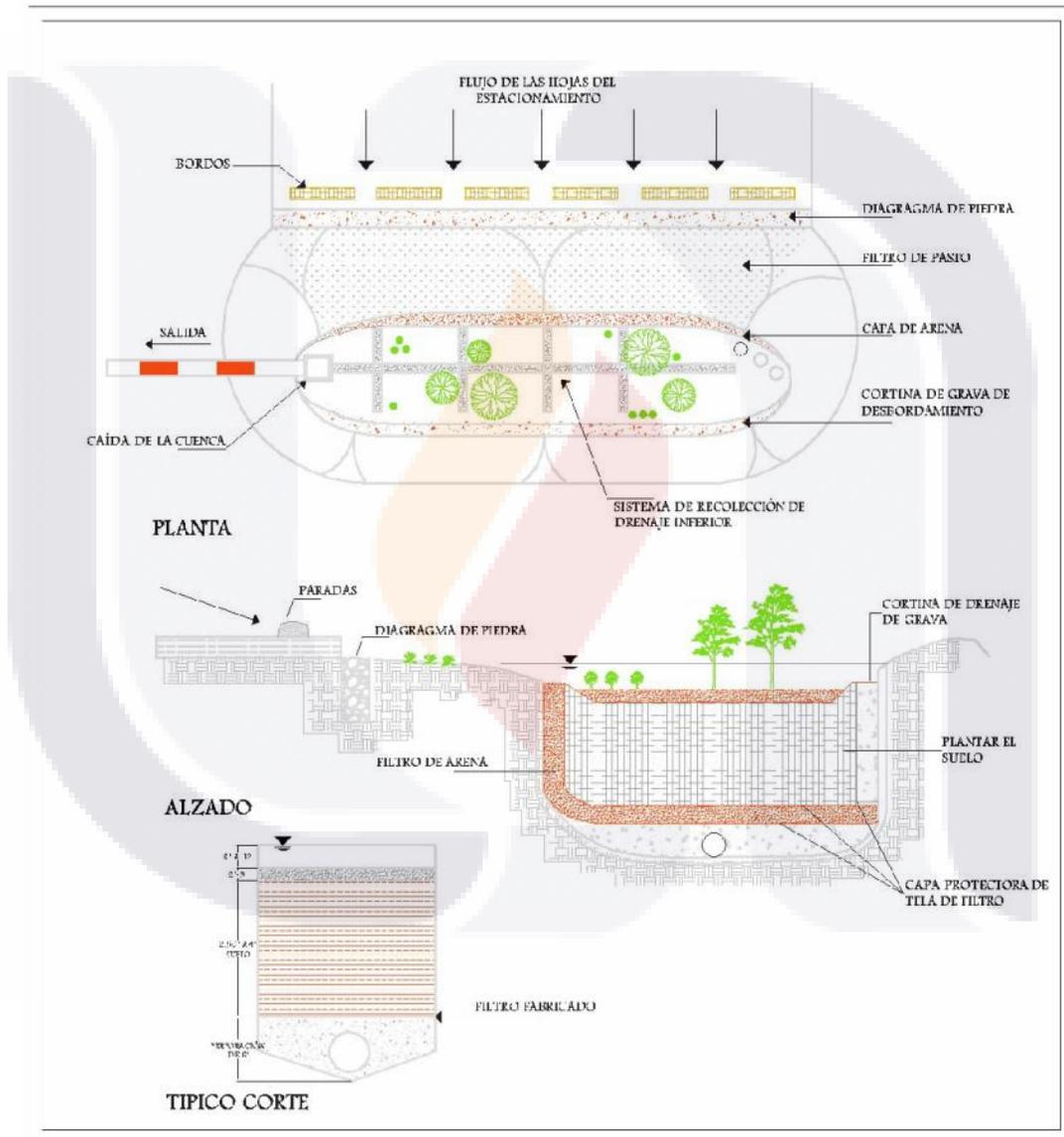
- J Láminas filtrantes purificadoras: Láminas geotextiles en las zonas impermeabilizadas que retienen parte de los sólidos arrastrados por el agua de lluvia y conservan la humedad más tiempo.
- J Filtros de arena extensivos: Lechos de arena ubicados en zonas de nueva urbanización por los que se filtra el agua y se recoge depurada de sólidos.
- J Pavimentos porosos de grava confinada: Celdas retenedoras de árido con total permeabilidad y estabilidad frente al tránsito de peatones y vehículos.
- J Depuración de aguas grises en fachada. Sistemas tipo Babylon diseñados para la reutilización y reciclaje de aguas grises o pluviales en fachadas vegetales.
- J Distintos sistemas de cubiertas vegetales.

Los anteriores sistemas se emplean en diferentes lugares, dependiendo de sus características, mencionados a continuación:

- J Presa de Mularroya, España. Derivación y conducción de trasvase, tratándose de un túnel hidráulico que va a funcionar en lámina libre para un caudal nominal de 8 m<sup>3</sup>/s y una velocidad de 1,579 m/s en régimen lento.
- J Cataluña. Inyección profunda, realizándolo por medio de 12 pozos, a base de balsas de decantación y de infiltración de 10 hm<sup>3</sup> de agua anual.

López-Geta et al. (2009), describe los dispositivos de recarga, estos no son únicos y están compuestos de otros, pueden ser por medio de:

- J Diques de disminución de agua. Estando en diferentes niveles, provocando que el agua baje su velocidad y se controle.
- J Dique de retención. Siendo bases rectangulares donde se puede acumular agua.
- J Represas de infiltración. Después de los anteriores para que el agua recaudada se infiltre.
- J Canal de entrada del agua. Entrada a los diques.
- J Bolsa de decantación. Sirviendo para que los sólidos por peso propio bajen de nivel.
- J Bolsa de infiltración. Estas están antes de las represas de infiltración, donde el agua ya paso por el primer proceso.

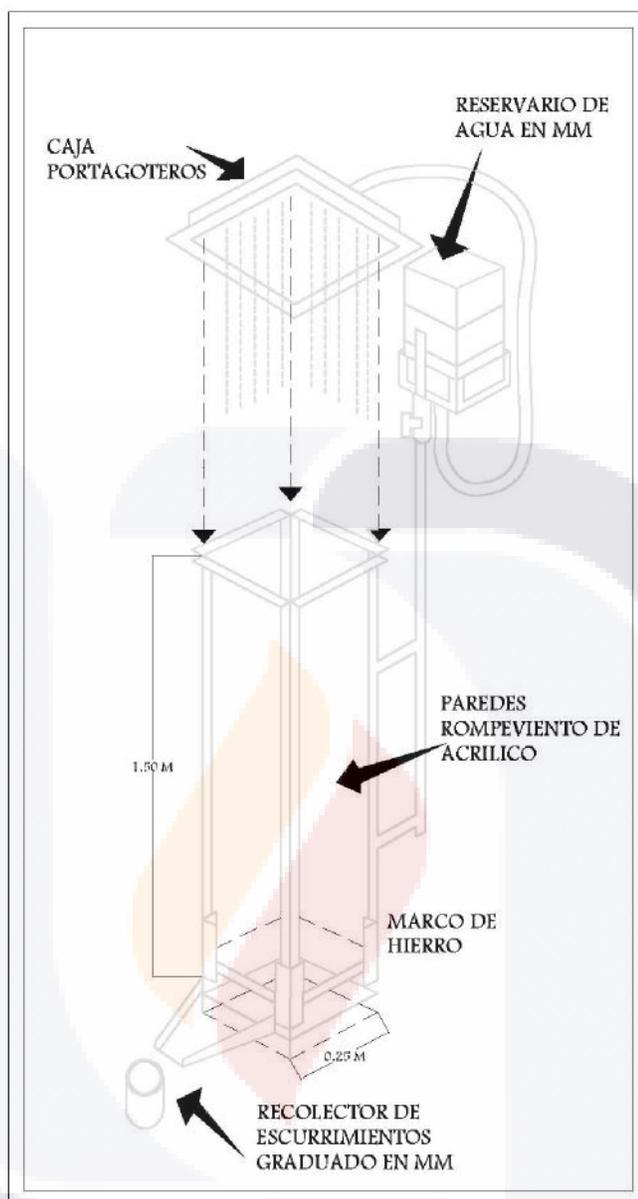


Este sistema estudia que no sobrepase los niveles máximos de contaminantes permitidos para el agua potable, como este estudio se realiza en Europa se utiliza la Normativa 98/83/EU. Todo tomándolo de la siguiente tabla:

| Químico   | Valor (mg/litro) | Observaciones  |
|-----------|------------------|--|
| Arsénico  | 0.01 (P)         |  |
| Bario     | 0.70             |  |
| Boro      | 0.50 (T)         |  |
| Cromo     | 0.05 (P)         | Para el cromo total  |
| Fluoruro  | 1.50             | El volumen de agua consumida y la ingesta de otras fuentes deben considerarse al establecer los estándares nacionales. |
| Magnesio  | 0.40 (C)         |  |
| Molibdeno | 0.07             |  |
| Selenio   | 0.01             |  |
| Uranio    | 0.015 (P,T)      | Sólo se abordan los aspectos químicos del uranio.  |

Tabla 2. Concentraciones máximas permitidas de elementos químicos. Fuente: Normatividad Europea (2006)

Aoki y Sereno (2006), desarrollaron un dispositivo llamado micro-simulado de lluvia el cual se compone de una cada de 1.50m de con paneles y una base 0.25m (Figura 8), en la parte superior contiene una caja de porta-goteros. Este dispositivo lo emplean para verificar las propiedades del suelo como: la densidad, la composición y capacidad de almacenamiento.

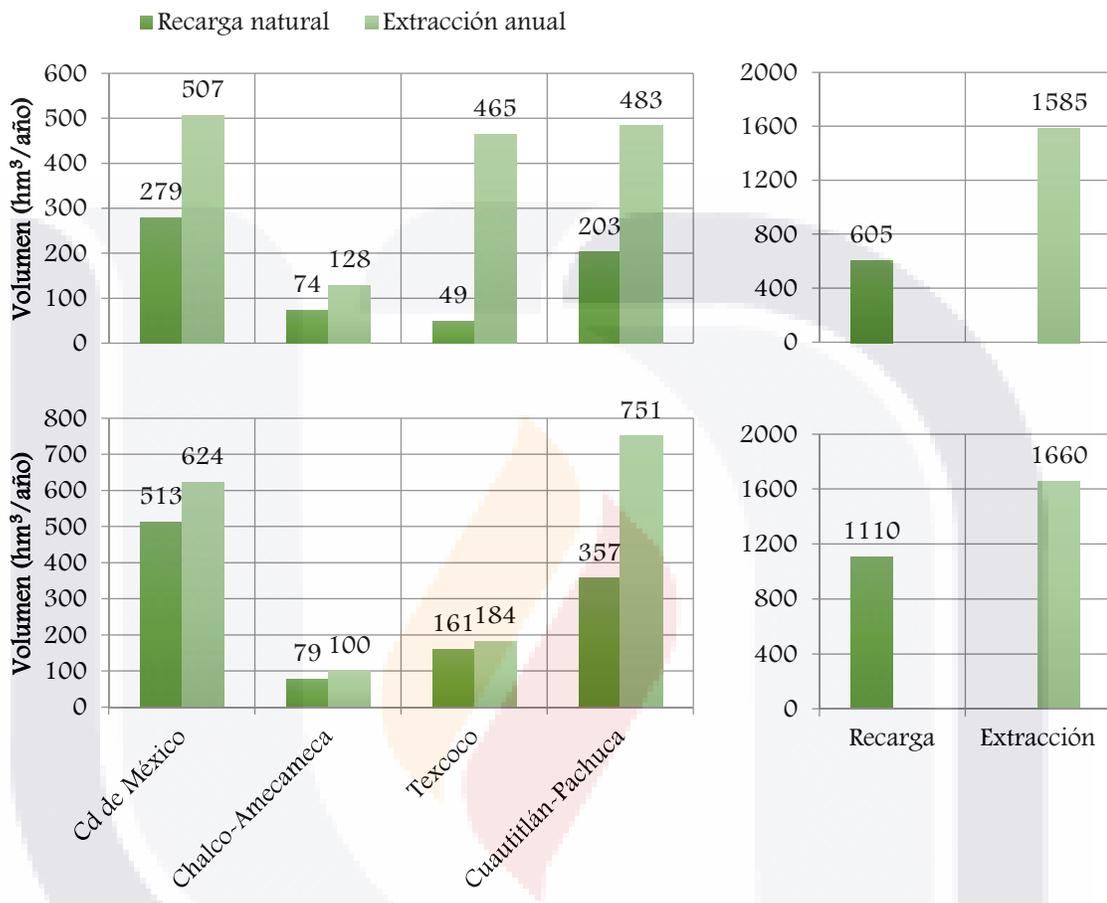


## 2.2 Situación Actual de la recarga de acuíferos en México

La sobre explotación de acuíferos es un tema que alcanzó a México, ya que, el volumen de agua extraída es mayor a la que infiltra al suelo para la recarga de los acuíferos. Como ejemplo de ello Escobar-Villagrán y Palacios-Vélez (2012) mencionan que los catorce acuíferos cercanos a la zona de Texcoco en el estado de México están siendo sobreexplotados debido a que el agua extraída es insuficiente en comparativa con el volumen de agua de infiltración, mostrado en la Figura 9.

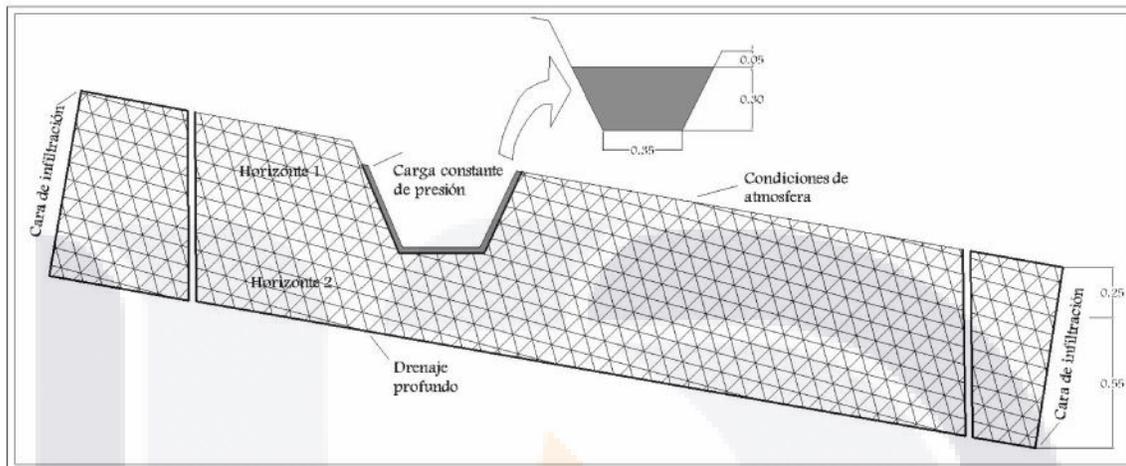
| Fuente y año de información             | DOF (2003)                                  | DOF (2009)                                  | Presente estudio                            |
|---|---|---|---|
| Municipio                               | Volumen de extracción (m <sup>3</sup> /año) | Volumen de extracción (m <sup>3</sup> /año) | Volumen de extracción (m <sup>3</sup> /año) |
| Delegación Iztapalapa                   | 81 129 429.00                               |   |   |
| Tezoyuca                                |   | 485 520.00                                  | 485 520.00                                  |
| Atenco                                  | 8 609 184.00                                | 6 199 964.00                                | 6 199 964.00                                |
| Chiautla                                | 3 839 311.00                                | 4 973 076.00                                | 4 973 076.00                                |
| Chicolearán                             | 5 252 493.00                                | 19 078 944.00                               | 19 078 944.00                               |
| Chiconcuac                              | 2 381 255.00                                | 3 471 933.00                                | 3 471 933.00                                |
| Chimalhuacán                            | 19 100 763.00                               | 34 596 527.00                               | 34 596 527.00                               |
| Ecatepec                                | 230 497 838.00                              |   |   |
| ½ Ixtapaluca                            |   | 1 090 594.00                                | 1 090 594.00                                |
| La paz                                  | 34 812 598.00                               | 28 449 756.00                               | 28 449 756.00                               |
| Netzahualcóyotl                         | 26 638 775.00                               | 2 207 520.00                                | 2 207 520.00                                |
| Papalotla                               | 912 396.00                                  | 1 123 571.00                                | 1 123 571.00                                |
| Tepetlaoxtoc                            | 2 704 667.00                                | 4 723 170.00                                | 4 723 170.00                                |
| Texcoco                                 | 49 479 002.00                               | 76 626 867.00                               | 76 626 867.00                               |
| Área del acuífero (km <sup>2</sup> )    | 921.31                                      | 938.00                                      | 939.04                                      |
| Área de balance (km <sup>2</sup> )      | ND**  | 483.00                                      | 939.04                                      |
| Recarga (hm <sup>3</sup> /año)          | 48.60                                       | 161.00                                      | 124.80                                      |
| Extracción (hm <sup>3</sup> /año)       | 465.40                                      | 184.20**                                    | 186.80***                                   |
| Sobreexplotación (hm <sup>3</sup> /año) | -416.80                                     | -23.20                                      | 62.00                                       |
| Relación extracción/recarga             | 9.58  | 1.14  | 1.50  |

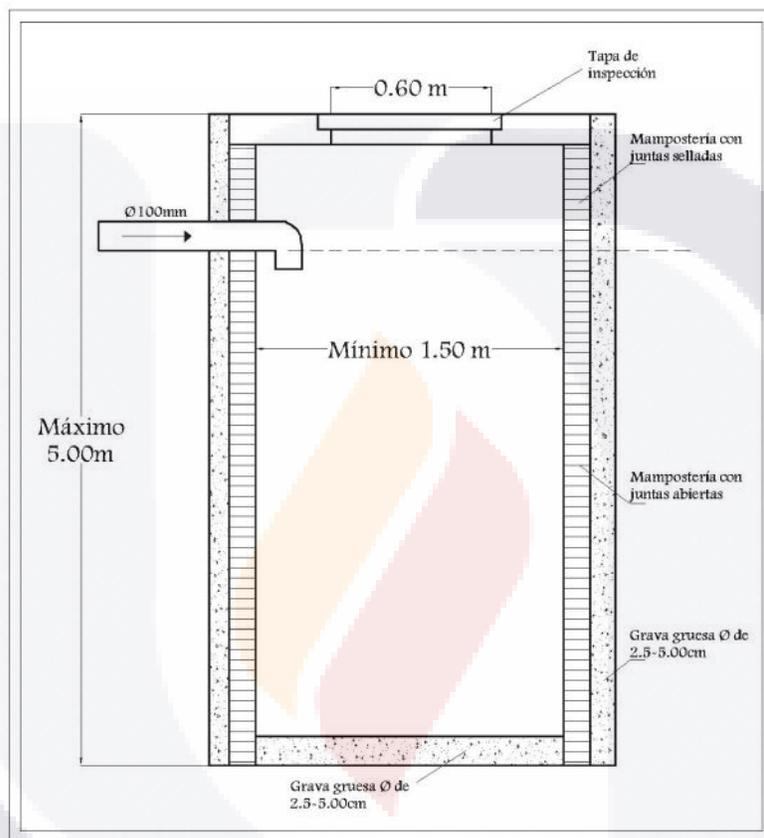
Figura 9. Tabla de extracción de agua. Fuente: (Escobar-Villagrán y Palacios-Vélez, 2012)

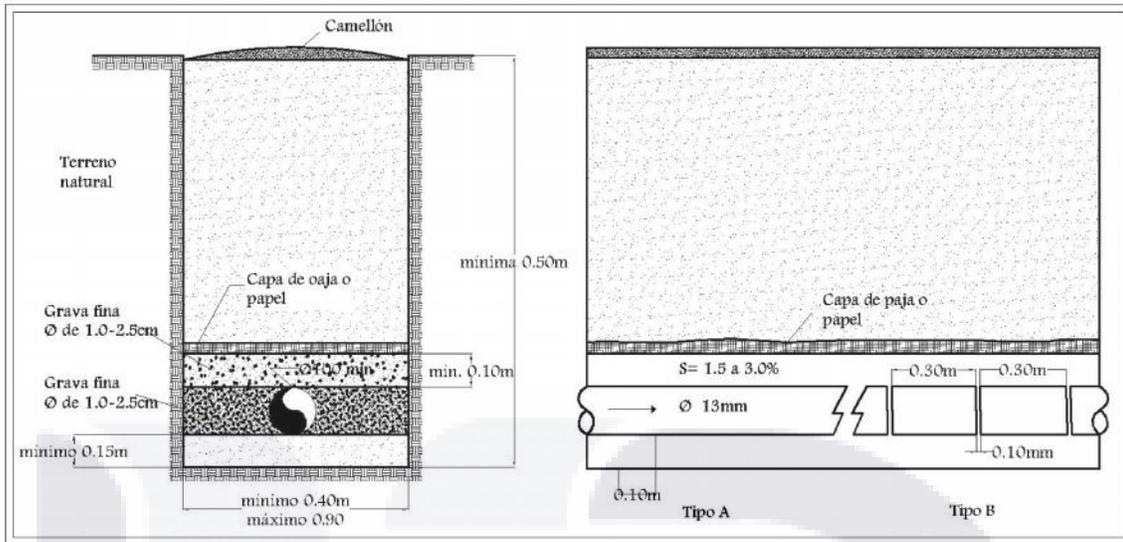


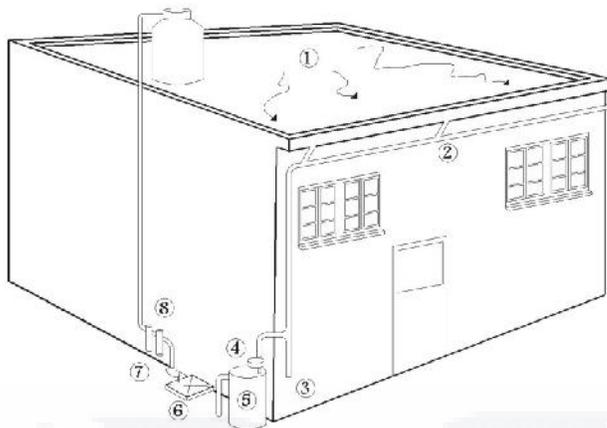
Cuatro principales acuíferos de la Región XIII

Suma de recarga y extracción anual de los cuatro acuíferos

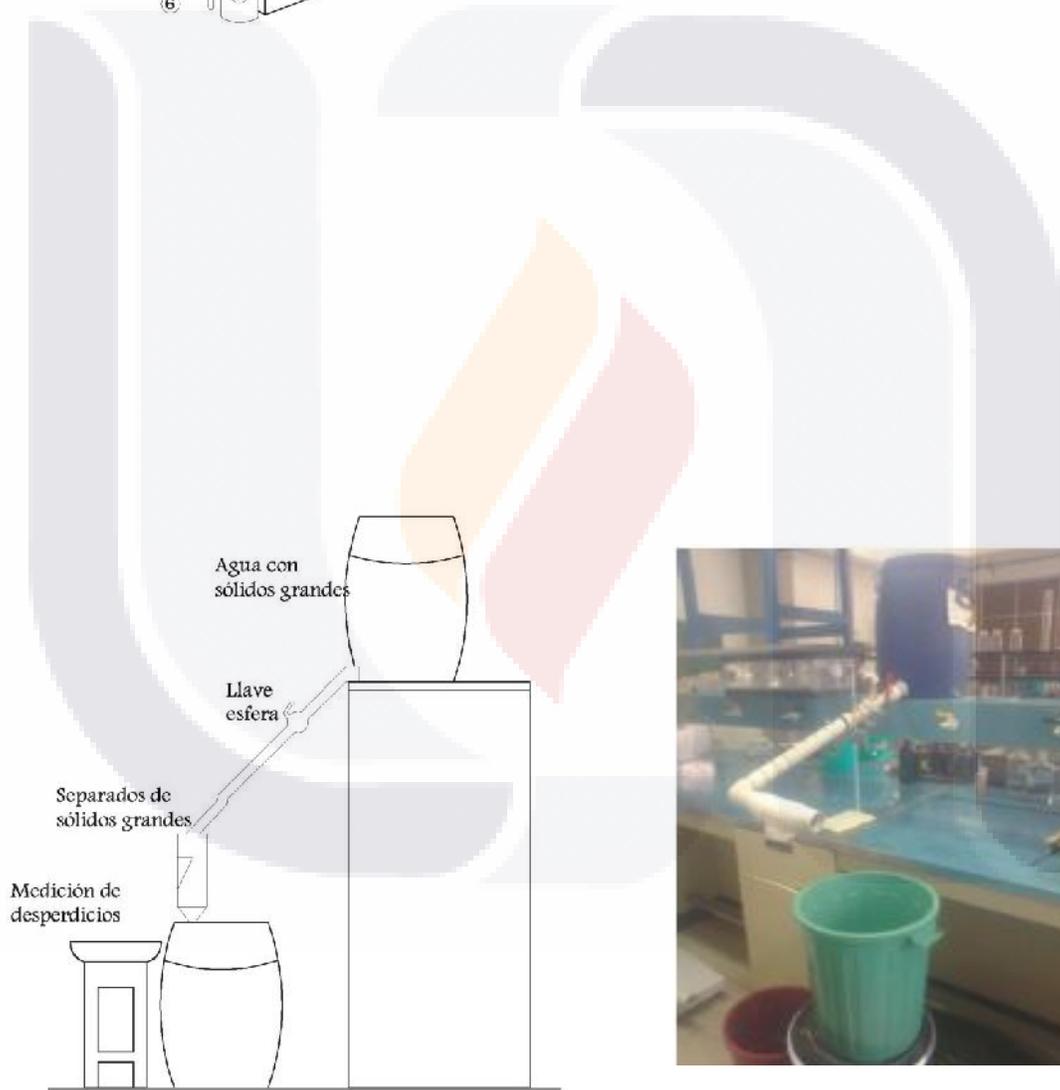








- 1) Techo
- 2) Bajantes o canaletas
- 3) Desvío al drenaje
- 4) Filtro de hojas
- 5) Interceptor de primera lluvia
- 6) Cisterna
- 7) Bomba
- 8) Filtros

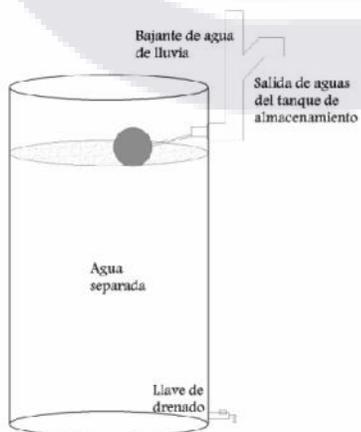




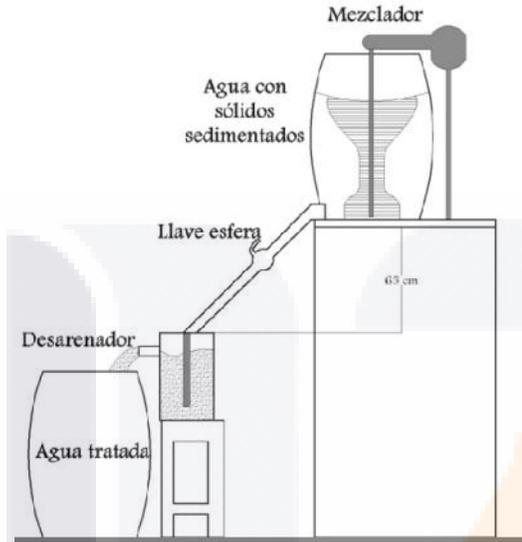
A) Tubería que lleva al tanque de la primera lluvia y tanque de almacenamiento



B) Modelo de tanque de la primera lluvia



C) Tanque de almacenamiento



| Clasificación | Usos  | Calidad que se requiere<br>Valor máximo según<br>NOM-127-SSA1-1993   | Tratamiento  |
|---------------|---|--|--|
| Primario      | <ul style="list-style-type: none"> <li>Lavado de ropa</li> <li>Sanitario</li> <li>Limpieza del hogar</li> <li>Limpieza del auto</li> <li>Automóvil</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>Turbiedad: 5 UTM</li> <li>Color verdadero: 20UCV</li> <li>Características organolépticas adecuadas</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>Tirar primeras lluvias</li> <li>Cribado</li> <li>Separación de primera lluvia</li> <li>Sedimentación</li> <li>Conservación</li> </ul> |
| Secundario    | <ul style="list-style-type: none"> <li>Ducha</li> <li>Higiene personal</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>Además de las anteriores</li> <li>pH: Entre 6.5 y 8.5</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>Además de los anteriores.</li> <li>Eliminación de coliformes</li> </ul>   |

| Clasificación | Usos                      | Calidad que se requiere<br>Valor máximo según<br>NOM-127-SSA1-1993 | Tratamiento   |
|---------------|---------------------------|--|---|
| Terciario     | (lavado de manos y boca)  | Coliformes totales: No detectado                                   | Filtración >50 µm   |
|               | Lavado de trastes         | Coliformes Fecales: No detectados                                  | Remoción de contaminantes orgánicos   |
|               | Agua para beber y cocinar | No debe superar ningún parámetro máximo señalado en la norma       | Además de los anteriores<br>Filtración >10 µm<br>Remoción de metales pesados<br>Remoción de contaminantes orgánicos<br>Purificación |

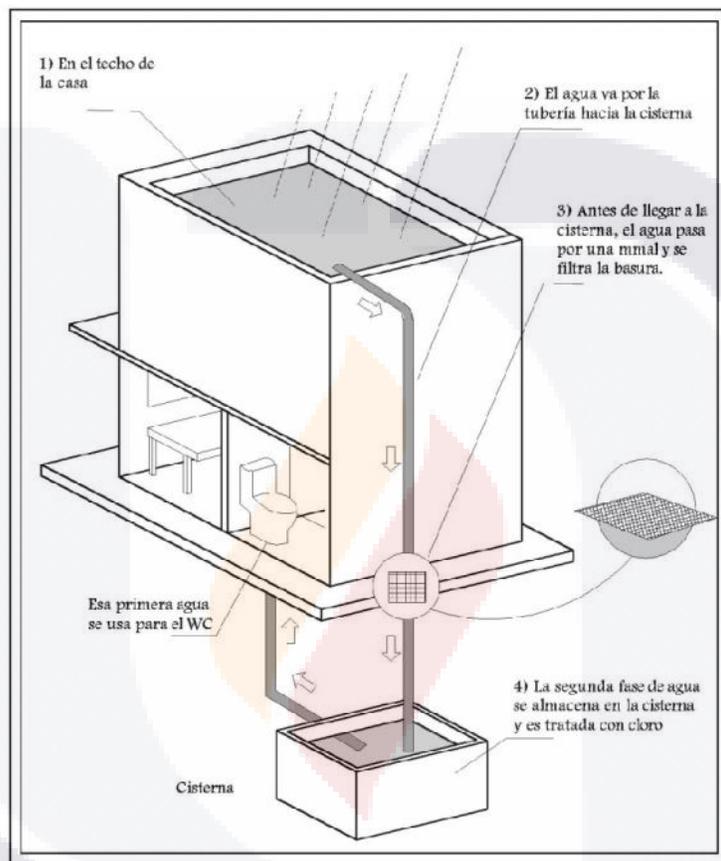
Tabla 4. Unidades del sistema (García-Velázquez 2012).

| Unidad básica        | Categoría                          | Elementos   | Función  |
|----------------------|------------------------------------|---|--|
| Área de captación    | Plásticas y metálicas              | Techos de policarbonato o algún plástico no fotodegradable<br>Techos de lámina metálica | Colectar el agua de lluvia   |
|                      | Cemento, impermeabilizadas y tejas | Azotea de cemento con o sin impermeabilizante<br>Tejados de arcilla, madera o similares |  |
| Tuberías y conductos | Plásticos                          | Tubería de PVC hidráulica o sanitaria<br>Tubería de PP                                  | Conducción del agua de lluvia  |
|                      | Metálicos                          | Canaletas y tubos metálicos<br>Tubería de cobre   |  |
| Tratamiento          | Primario                           | Separador de hojas<br>Separador de primera lluvia<br>Clarificador o desarenador         | Retirar sólidos grandes<br>Apartar el agua con mayor concentración de contaminantes<br>Retener sólidos rápidamente sedimentables |
|                      |                                    | Secundario  | Dosificador de sustancia de conservación<br>Filtros a presión de sólidos   |

| Unidad básica              | Categoría                       | Elementos   | Función   |
|----------------------------|---------------------------------|---|---|
| Depósito de almacenamiento |                                 | Filtro de carbón activado   | 50 micras<br>Retener materia orgánica, olor sabor y color.  |
|                            | Terciario                       | Filtro a presión<br>Filtro de carbón activado con KDF 85 y 65<br>Ultravioleta, Ozonador   | Retener sólidos de hasta 10 micras.<br>Retener materia orgánica, olor, sabor, color<br>Eliminar microorganismos y virus |
|                            | Cemento                         | Cisterna de cemento o ferrocemento subterránea o a nivel de piso  | Almacenar el agua de lluvia y conservar su alta calidad.  |
| Complementos               | Plástico y metálico             | Cisterna de plástico<br>Tinaco de plástico<br>Cisterna de geomembrana subterránea o a nivel de piso<br>Tinaco de acero inoxidable<br>Cisterna de acero inoxidable | Almacenar el agua de lluvia y conservar su calidad  |
|                            | Automatización, control y otros | Bomba hidráulica<br>Medidores de nivel<br>Dispositivos de control   | Mover el agua al lugar que se requiera y hacerla pasar por el tren de tratamiento.                                      |

Tabla 5. Coeficientes de captación de superficies comunes en techos (Gould y Nissen-Ptersen 2012)

| Tipo de superficie                       | Coeficiente de captación A' | Coeficiente de captación B'' |
|--|-----------------------------|------------------------------|
| Lámina metálica y plástica               | 0.80 – 0.85                 | 0.75 – 0.95                  |
| Teja de cemento                          | 0.62 – 0.69                 | 0.75 – 0.95                  |
| Teja de barro (hecha a máquina)          | 0.30 – 0.39                 | ---                          |
| Teja de barro (hecha a mano)             | 0.24 – 0.31                 | ---                          |
| Loza de concreto                         | 0.73 – 0.76                 | 0.75 – 0.95                  |
| Loza con terminado en grava              | ---                         | 0.25 – 0.70                  |
| Loza con terminado de tabique o ladrillo | ---                         | 0.70 – 0.85                  |





## CAPITULO III: MARCO TEÓRICO

A través de los años se han utilizados las herramientas del análisis multicriterio para diversas investigaciones en los diferentes campos, de igual manera, se ha hecho en conjunto el algebra de mapas, principalmente para la vulnerabilidad de riesgos, como lo son: los derrumbes de laderas, la contaminación del ambiente, el vulcanismo, entre otro.

En el presente trabajo se utiliza el análisis multicriterio denominado Proceso Analítico Jerárquico (AHP, por sus siglas en inglés) el cual tiene como base matemática el algebra de mapas. En adición a este método geoespacial, se incluye la modelación numérica en el programa COMSOL como herramienta de simulación del proceso de infiltración a través de un pozo de infiltración en viviendas.

A continuación se presentan los aspectos teóricos más importantes sobre estas dos metodologías.

### 3.1 Análisis Multicriterio

El análisis multicriterio es una herramienta analítica que permite al autor tomar diferentes variables y designarles importancia según su razonamiento, generando varias percepciones del tema de investigación.

Esta metodología permite combinar información de las variables a tratar, estas tienen que tener una relación de naturaleza directa para el tema, para generar un valor. Este resultado, deberá ser representativo de una situación real (Zonensein et al., 2008).

Este método se basa principalmente en un proceso de ponderación, el cual es la asignación de pesos a los indicadores (variables), esto por su importancia en su relación, cumpliendo las condiciones establecidas en el método, las cuales se basan en la relación entre las variables, asignando un valor numérico, refiriéndose a cual tiene el mayor valor.

3.1.2 Proceso Analítico Jerárquico (AHP)

Llamado en inglés *Analytical Hierarchy Process* (AHP), este método estadístico está relacionado directamente al análisis multicriterio, diseñado por Thomas L. Saaty en la década de los setenta (Anderson et. al., 1993), es utilizado principalmente para la toma de decisiones o selección de alternativas, sin embargo, para resultados confiables se deben cuidar aspectos como: la evaluación de las alternativas, patrones y modelos mentales, así como toda la información adecuada para el estudio (relaciones).

El AHP se plantea como una metodología para estructurar, medir y sintetizar información (Osorio-Gómez y Orejuela-Cabrera, 2008), en base a la jerarquización de las prioridades y muestreando la presencial, transformándola de un análisis cualitativo a uno cuantitativo. El modelo jerárquico, permite organizar la información para visualizarla, para su síntesis y procesamiento (Rodríguez-González, 2016). Por su parte (Saaty, 2008) determina que esta información se debe relacionar por medio de matrices para la comparación de elementos, con dos conceptos principales las notaciones (variables) y los pesos (valores). En la ecuación 1, la notación se representa con una  $i$ , mientras que, los pesos con una  $w$ , haciendo una comparativa con las relaciones entre otras variables nombrándolas  $j$ . Los pesos finales se obtienen con la siguiente ecuación.

$$W_j = W_1 W_1 + W_2 W_2 + \dots + W_m W_m \tag{1}$$

Las funciones básicas son la descomposición jerárquica en factores más simples para estructurar la información, medir su escala, sintetizando la información para una superior asimilación de los datos, como se muestra en la ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..

Tabla 6. Fundamentos de escala de los números absolutos (Saaty, 2008)

| Escala Verbal     | Definición  | Intensidad de importancia |
|-------------------|---|---------------------------|
| Igual importancia | Los dos elementos contribuyen igualmente a la propiedad | 1                         |
| Débil o leve      |   | 2                         |

| Escala Verbal                                      | Definición  | Intensidad de importancia |
|--|---|---------------------------|
| Moderadamente más importante uno que otro          | El juicio y la experiencia previa favorecen a un elemento frente al otro. | 3                         |
| Moderadamente plus                                 |   | 4                         |
| Fuertemente más importante un elemento             | El juicio y la experiencia previa favorecen fuertemente a un elemento.    | 5                         |
| Fuertemente Plus                                   |   | 6                         |
| Mucho más fuerte la importancia de un elemento     | Un elemento domina fuertemente. Su dominio está probado en la práctica.   | 7                         |
| Muy fuerte   |   | 8                         |
| Importancia extrema de un elemento frente al otro. | Un elemento domina al otro con el mayor orden de magnitud posible         | 9                         |

) La ecuación 2, muestra la matriz de comparaciones. Se organiza:

$$A = \begin{pmatrix} \frac{P_1}{P_1} & \dots & \frac{P_1}{P_j} & \dots & \frac{P_1}{P_n} \\ \frac{P_1}{P_1} & \dots & \frac{P_j}{P_j} & \dots & \frac{P_n}{P_n} \\ \dots & \mathbf{1} & \dots & \dots & \dots \\ \frac{P_i}{P_1} & \dots & \mathbf{1} & \dots & \frac{P_i}{P_n} \\ \frac{P_1}{P_1} & \dots & \dots & \mathbf{1} & \frac{P_n}{P_n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{P_1}{P_1} & \dots & \frac{P_1}{P_1} & \dots & \frac{P_1}{P_1} \\ \frac{P_1}{P_1} & \dots & \frac{P_1}{P_1} & \dots & \frac{P_1}{P_1} \end{pmatrix} \quad (2)$$

Donde:

$\frac{P_i}{P_j}$ , donde  $P_i$  es la prioridad de la alternativa  $i$

Se suman los elementos de la columna  $j$  de la matriz A y así sucesivamente, como se muestra en la ecuación 3.

$$\frac{P_1}{P_j} + \dots + \frac{P_i}{P_j} + \dots + \frac{P_n}{P_n} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i}{P_j} \quad (3)$$

Para normalizar el valor de la columna, indicado en la ecuaciones 4 y 5, se divide la comparación  $a_{ij} = p_i/P_j$  por la ecuación (1).

$$\frac{\frac{P_1}{P_j}}{\frac{\sum_{i=1}^n P_i}{P_i}} = \frac{P_i}{P_j} \times \frac{P_j}{\sum_{i=1}^n P_i} = \frac{P_i}{\sum_{i=1}^n P_i} \quad (4)$$

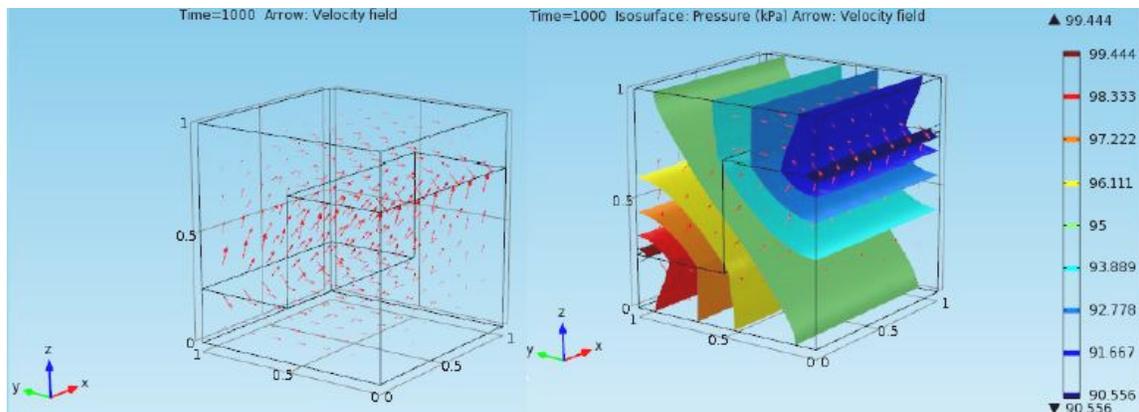
$$W_i = \left( \frac{P_i}{\sum_{i=1}^n P_i} + \dots + \frac{P_i}{\sum_{i=1}^n P_i} \right) \times \frac{1}{n} \quad (5)$$

La relación Tasa/peso de la fila  $i$  ( $W_i$ ) es el promedio de los elementos de la fila  $i$ .

### 3.2 Simulación en el programa COMSOL Multiphysics

Mendoza-Gutiérrez (2013), define al modelo digital como la representación o esquema teórico de un sistema en una forma matemática, utilizado principalmente para facilitar su comprensión. Bajo este contexto el programa COMSOL Multiphysics es una herramienta computacional que se utiliza para el modelado digital, análisis numérico y simulaciones de fenómenos en los que están involucrados condiciones naturales y artificiales y materiales variados, entre los cuales destacan los fenómenos estructurales, térmicos, electromecánicos, de fluidos, entre otros. Este permite detallar y manipular la geometría de los elementos modelados y se puede visualizar cada cambio temporal que se simule, entre otras cosas. En este estudio utilizan diferentes módulos para generar el modelado de los suelos saturados y comportamiento del flujo, siguiendo los pasos de diseño de la geometría 2D, especificaciones físicas, selección y generación de un mallado adecuado, selección del tipo de estudio y obtención de resultados.

La etapa de modelado depende directamente de las propiedades del material, al mismo tiempo de las condiciones de frontera físicas y el tipo de malla. El finalizar los procesos se pretende visualizar los resultados de la simulación, apareciendo una imagen que representa la solución del modelo, en este proceso se muestran las subcarpetas para auxiliar a la interpretación, como lo muestra la Figura 20.



- J Acuitardos: Formaciones geológicas con la capacidad de almacenar el agua, pero con se contiene dificultad de trasmitirla. Es semipermeable, sin embargo, estas en conjunto pueden ser buenas para la transmisión del agua a otras formaciones.
- J Acuicludos: Al igual que los acuitardos tiene capacidad de almacenar el agua, pero se dificulta muchísimo el poder transmitirla; ya que los poros están más cerrados. Conocido principalmente como la formación impermeable.
- J Acuífugos: Formaciones que son incapaces de la transmisibilidad y almacenamiento del agua.

Tabla 7. Características hidráulicas de las principales formaciones hidrogeológicas.

Modificado de González-de-Vallejo et al, (2002).

| Formación Geológica | Capacidad de almacenamiento | Capacidad de drenaje | Capacidad de transmisión | Características                  |
|---------------------|-----------------------------|----------------------|--------------------------|----------------------------------|
| Acuífero            | Alta                        | Alta                 | Alta                     | Gravas, arenas, calizas          |
| Acuitardo           | Alta                        | Media/Baja           | Baja                     | Limos, arenas limosas y arcillas |
| Acuicludo           | Alta                        | Muy baja             | Nula                     | Arcillas                         |
| Acuífugo            | Nula                        | Nula                 | Nula                     | Granitos, génesis, mármoles      |

### 3.4.2 Tipos de acuíferos

Los acuíferos como se definió anteriormente como las formaciones geológicas con mayor capacidad de almacenamiento y transmisibilidad del agua, estos tienen dos diferentes tipos de clasificaciones, las cuales son por su textura o por sus circunstancias hidráulicas y estructurales. Tomado de (González-de-Vallejo et al., 2002).

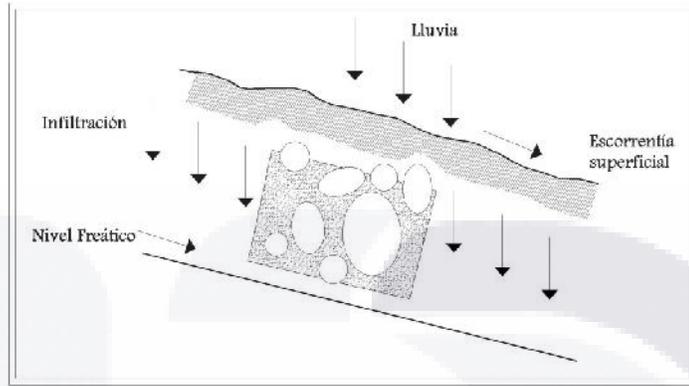
| Clasificación | Tipo de acuífero                | Características  |
|---------------|---------------------------------|--|
| Textura       | Acuíferos porosos               | Permeabilidad por porosidad intergranular<br>Medios granulares |
|               | Acuíferos cársticos y fisurados | Disueltos por la acción del agua                               |

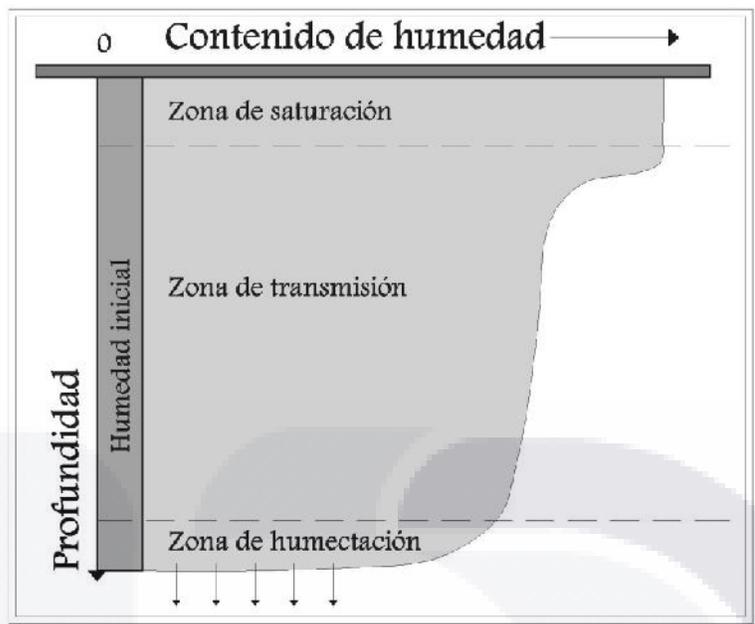
| Clasificación                              | Tipo de acuífero                | Características   |
|--|---------------------------------|---|
| Circunstancias hidráulicas y estructurales |                                 | Grietas o fisuras.<br>Poco Homogéneos<br>Calizas, dolinas, granitos basaltos  |
|  | Acuíferos cársticos y porosos   | Disueltos por la acción del agua<br>Más homogéneos<br>Almacenar gran cantidad de agua<br>Calcarenitas   |
|  | Acuíferos libres                | Nivel de agua está por debajo de la formación permeable<br>Alto nivel volumen de agua<br>Liberación de agua por de saturación                       |
|  | Acuíferos cautivos o confinados | Aislados en el subsuelo<br>Rodeados por materiales impermeables<br>Poca inercia por la baja capacidad de almacenar<br>Liberación elásticas del agua |
|  | Acuíferos semiconfinados        | Entre materiales semiconfinantes<br>Permiten la transmisibilidad del agua<br>Recarga, drenaje o goteo vertical                                      |

Tabla 8. Clasificación de los acuíferos. Fuente: González-de-Vallejo et al. (2002).

### 3.4.3 Proceso de infiltración y recarga

En la hidrología se conoce a la infiltración como la velocidad máxima con la que el agua o cualquier líquido traspasa hacia el inferior del suelo. Esta depende de diversos factores como lo son la permeabilidad, el grado de saturación del suelo y el tipo de suelo (Vélez y Vélez, 2002). Horton (1933) menciona que la infiltración está constituida por diversas etapas, la primera es cuando la lluvia ocurre y el proceso de infiltración disminuye, para después aumentar y hacer constante en las siguientes horas. La infiltración ocurre en diferentes fenómenos, los cuales consisten:





Balek (1988) por su parte, clasifica la recarga por su temporalidad en:

- J Recarga a corto plazo. Después de una fuerte lluvia, en regiones secas.
- J Recarga estacional. Solo en el período húmedo, en regiones húmedas y secas.
- J Recarga perenne. En lugares del trópico húmedo, donde el flujo es casi permanente; ocurriendo una recarga continua.
- J Recarga Histórica. Se presentó hace tiempo y formó los recursos existentes.

En este estudio se aplica en concepto de recarga artificial, la cual se puede definir como el conjunto de técnicas que permiten, mediante intervención programada, la introducción directa o inducida de agua en un acuífero, incrementar el grado de garantía y disponibilidad de los recursos hídricos, así como actuar sobre su calidad, (López-Geta et al, 2009).

#### *3.4.5 Factores que afectan la recarga del acuífero*

La infiltración depende de varios factores para que el agua pueda traspasar el subsuelo y generar el proceso de recarga de los acuíferos.

Rodríguez-González (2016), explica que los factores que influyen en la recarga natural son:

- J Precipitación. Es toda aquella agua que cae del cielo en forma de: lluvia, granizo y cristales de hielo.
- J Temperatura. Ya que si es elevada puede provocar la evaporación o evotranspiración altos.
- J Red de drenaje. Arreglo de los cauces naturales para cambiar de dirección un flujo, puede ser uno 'principal que conlleve a varias ramificaciones.
- J Relieve. Es la altura de la superficie en diferentes puntos de la geografía de un lugar.
- J Cobertura vegetal. Se define como el agregado vegetal que esta sobre un área en un tiempo de terminado.

Por otro lado, González-de-Vallejo et al, (2002), menciona que los parámetros que intervienen en la infiltración y por lo tanto en la recarga dependen de las propiedades del suelo, siendo los parámetros que influyen:

- ) Entrada superficial. Siendo la superficie del suelo en la que el agua se puede infiltrar.
- ) Transmisibilidad. Capacidad de transmitir el agua el subsuelo.
- ) Porosidad. Relación entre el volumen ocupado por los huecos y el volumen total, calculando la porosidad eficaz con la ecuación 6.

$$n_e = (W_s - W_s) (\gamma_w V) \tag{6}$$

Donde:

$W_s$  Peso del suelo saturado

$W_s$  Peso del suelo seco

$\gamma_w$  Peso específico del agua

$V$  Volumen

- ) Permeabilidad hidráulica o conductividad hidráulica. Parámetro que permite evaluar la capacidad de transmitir agua de una formación en función a su estructura y esta es representada con una k, calculada con la ecuación 7

$$k = K \frac{\gamma_w}{\mu} \quad \text{ó} \quad k = K \frac{g}{\eta} \tag{7}$$

Donde:

$k$  Permeabilidad efectiva

$K$  Permeabilidad intrínseca

$\gamma_w$  Peso específico del agua

$\mu$  Viscosidad dinámica

$\eta$  Viscosidad cinemática

$g$  Gravedad

### 3.5 Características de la Zona de Estudio

#### *3.5.1 Generalidades*

El estudio se realizó en el estado de Aguascalientes, su centro geográfico se ubica al norte  $22^{\circ}27'$ , al sur  $21^{\circ}38'$  de latitud norte; al este  $101^{\circ}53'$ , al oeste  $102^{\circ}52'$  de longitud oeste. Este estado representa el 0.30 % de la superficie de la República Mexicana, teniendo un área de 5, 680,330 km<sup>2</sup>(INEGI, 2017). Colinda al norte con Zacatecas y al sur y este con Jalisco. Consta de once municipios: Aguascalientes, Asientos, Calvillo, Cosío, Jesús María, Pabellón de Arteaga, Rincón de Romos, San José de Gracia, Tepezalá, San Francisco de los Romo y El Llano.

Sus principales elevaciones que se cuentan en la entidad son: Sierra Fría (3,050 msnm), Sierra del Laurel (2,760 msnm), cerro del Mirador (2,700 msnm), cerro de La Calavera (2,660 msnm), Sierra de Asientos (2,650 msnm), cerro de San Juan (2,530 msnm), cerro de Juan el Grande (2,500 msnm), cerro del Picacho (2,420 msnm) y cerro de los Gallos (2,340 msnm).

#### *3.5.2 Ubicación de la zona de estudio*

La zona de estudio se ubica en el municipio de Aguascalientes, el cual tiene un área de 1,168.72 km<sup>2</sup>, con una elevación media de 1870 msnm, y colindando con los municipios de El Llano, Jesús María, Calvillo, Asientos y San Francisco de los Romo, además con el estado de Jalisco al sur. La delimitación exacta del área estudio es la ciudad de Aguascalientes, ubicada en el centro del municipio del mismo nombre, cuenta con un área de 205.64 km<sup>2</sup>, mostrada en la Figura 23.

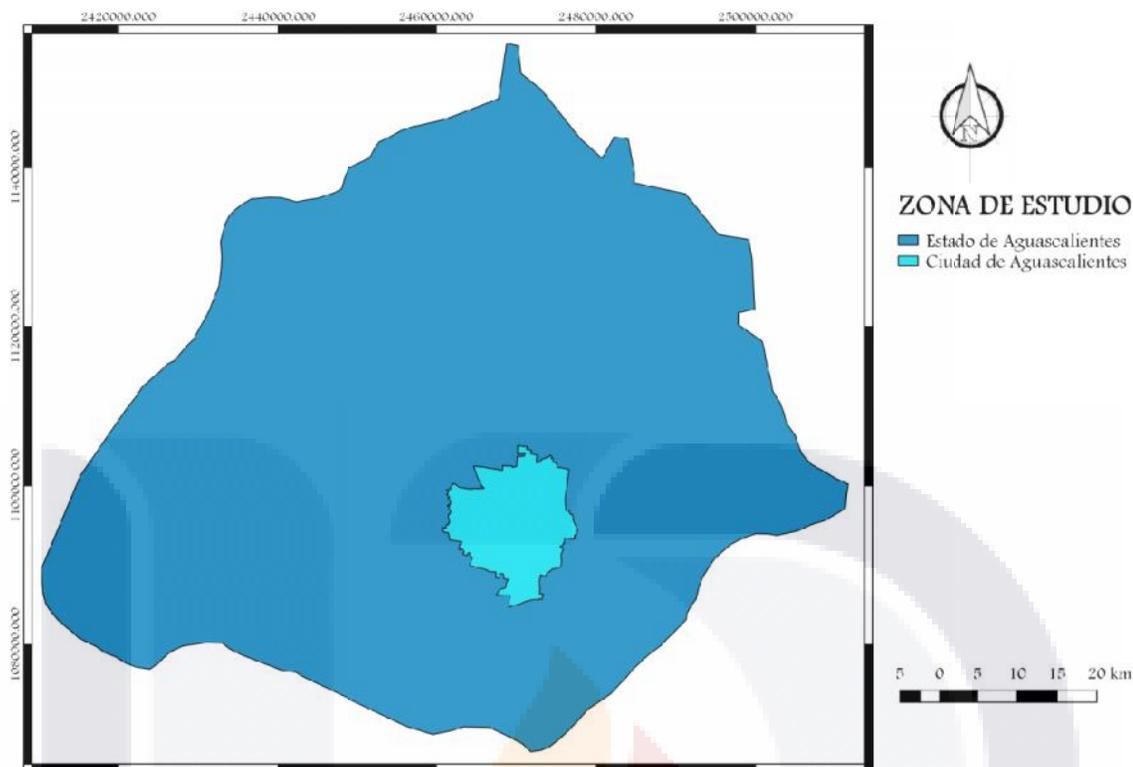


Figura 23. Zona de estudio, la ciudad de Aguascalientes en el contexto geográfico del estado del mismo nombre.

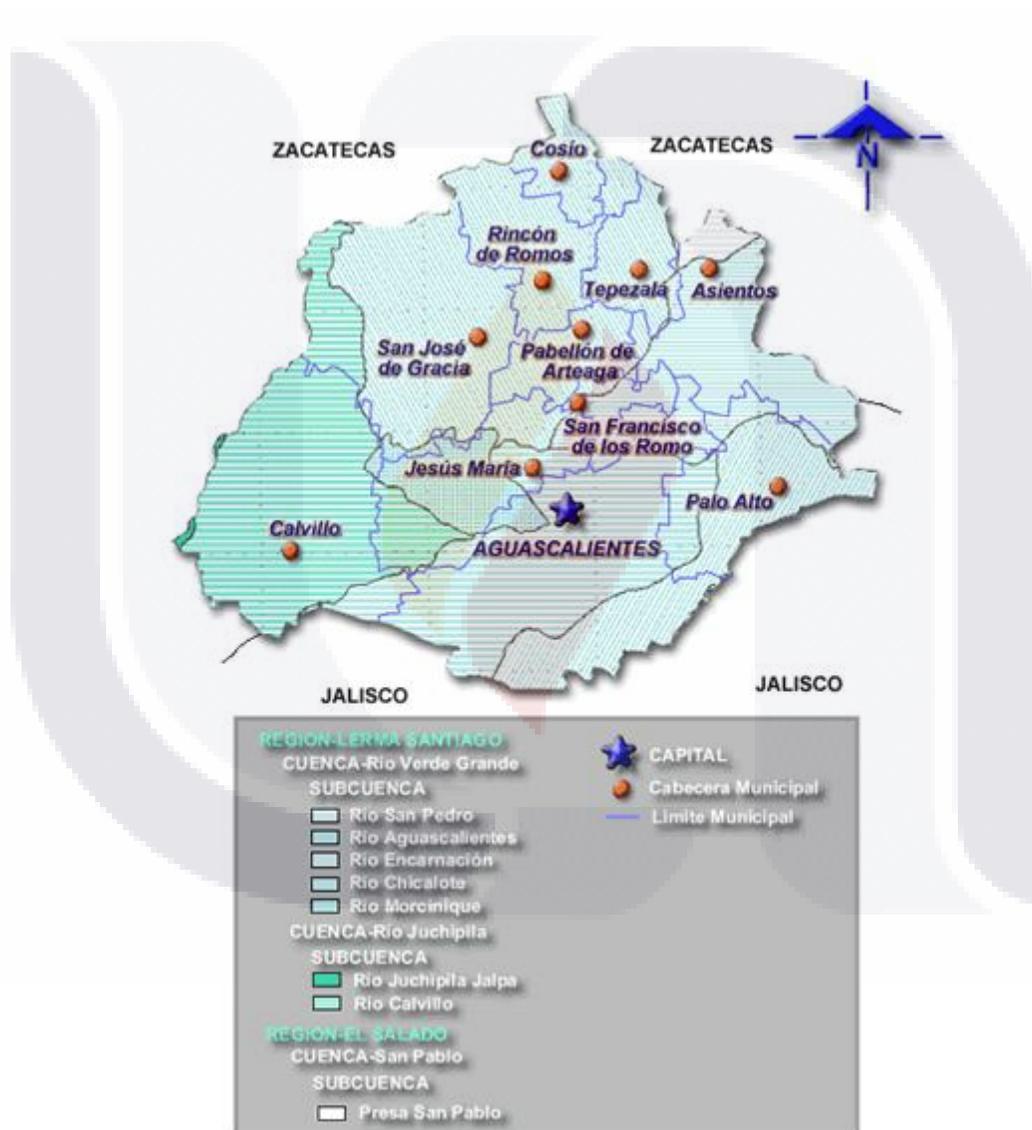
### 3.5.3 Clima

De acuerdo a la información encontrada en el gobierno del estado de Aguascalientes (2018) el clima que predomina en la región es seco estepario en más del 60% de la superficie, caracterizándose porque la evaporación excede la precipitación, con una temperatura promedio que oscila de los 16 a los 18°C, alcanzando en verano temperaturas máximas de 36°C y en invierno en casos extremos de 2°C. La vegetación que predomina es de tipo matorral desértico y vegetación xerófila.

### 3.5.4 Hidrología

Las características del clima provocan que escasos recursos hidráulicos superficiales, los cuales son denominados como lechos de río con poco caudal, siendo la más importante el Río San Pedro, el cual se aprovecha para el riego agrícola.

El escurrimiento anual del Río San Pedro se aproxima en 130 millones de m<sup>3</sup> en un área de 4,330 km<sup>2</sup>. El segundo es el Río Calvillo el cual se alimenta de los ríos La Labor



### *3.5.5 Reglamentación Existente en el tema de la Recarga de Acuíferos*

En la Ciudad de Aguascalientes para realizar, modificar o ampliar cualquier edificación se deben tomar en cuenta Código Urbano del Estado, el Código Urbano del Municipio de Aguascalientes, el Código de las construcciones en el Municipio de Aguascalientes y el Código de Ordenamiento Territorial del Desarrollo Urbano y vivienda. Sin embargo, analizando cada ninguno de ellos se maneja información que involucre la recarga de acuíferos, solo se prevé la iluminación y ventilación de las zonas a construir, generando un porcentaje del terreno como áreas sin construcción, pero referente al suelo no hay mención alguna.

El Instituto de Planeación del Municipio de Aguascalientes es la primera instancia que está considerando el tema de la recarga de aguas subterráneas, ya que está estableciendo zonas de recarga y las cuales estarán protegidas en su totalidad o con limitaciones para la construcción, según sea el caso; de igual manera, está desarrollando el término Coeficiente de Infiltración, también llamado CI, el cual consistirá en el porcentaje del terreno que los propietarios o constructores tendrán que designar para la infiltración a los mantos acuíferos, tomando ciertas precauciones para evitar el ingreso de contaminantes al acuífero.

## CAPITULO IV: METODOLOGÍA

### 4.1 Compilación de la información

El presente estudio se realizó en la ciudad de Aguascalientes, perteneciente al estado del mismo nombre. Competente a una búsqueda de información referente a la normatividad en el municipio de Aguascalientes basándose en el tema de la recarga y/o zonas verdes protegidas, de igual manera en las variables de precipitación, uso de suelo, evaporación, pendiente y vegetación.

#### *4.1.1 Normatividad en Aguascalientes para la recarga*

La investigación referente a la normatividad se basó en el Código Urbano para el Estado de Aguascalientes, el Código Urbano del Municipio de Aguascalientes, el Código de las construcciones en el Municipio de Aguascalientes y el Código de Ordenamiento Territorial del Desarrollo Urbano y vivienda, ya que éstas son los reglamentos vigentes en el municipio de Aguascalientes.

#### *4.1.2 Variables Involucradas*

En la variable del Uso de Suelo se obtuvieron los parámetros referentes al tipo de construcción y extensión territorial del Instituto de Planeación del Municipio de Aguascalientes (IMPLAN), en el cual se tienen los registros por habitacional, comercio, industria, educación, servicios, recreación, agricultura, vialidades, entre otros. Estos mismos registros a su vez se clasifican por nivel socioeconómico, en popular, medios, residenciales y mixtos.

Referente a las variables de precipitación y evaporación, se tomó en cuenta, información recopilada del Sistema de CONAGUA, en sus bases de datos principales registrados en las siguientes estaciones meteorológicas:

Tabla 9. Estaciones Meteorológicas que afectan a la zona de estudio. CONAGUA (2018).

| No. de la Estación | Nombre de la Estación | No. de la Estación | Nombre de la Estación |
|--------------------|-----------------------|--------------------|-----------------------|
| 1001               | Aguascalientes        | 1075               | Montoro               |
| 1004               | Cañada Honda          | 1076               | Los Negritos          |
| 1005               | Presa El Niagara      | 1090               | Jesús María           |
| 1022               | San Bartolo           | 1096               | Calvillito            |
| 1027               | Venedero              | 1097               | Aguascalientes III    |
| 1030               | Aguascalientes II     | 1101               | Las Presas            |
| 1034               | Sandoval              | 1104               | Abelardo L. Rodríguez |
| 1062               | Arellano              |                    |                       |

Para la pendiente se obtuvo un modelo de elevación de la zona de estudio, en el cual se determinaron cuales son los porcentajes con mayor impacto para el estudio, esta información se generó a partir del mapa continuo de elevaciones en formato ráster del INEGI.

#### 4.2 Análisis Urbanístico de la Ciudad de Aguascalientes por Uso de Suelo en SIG

Se empleó el software libre Qgis para el manejo de Sistemas de Información Geografía para determinar la clasificación de los fraccionamientos, colonias o condominios en la ciudad de Aguascalientes, así como para determinar del grupo que prevalece, permitiendo estimar el área verde potencialmente utilizada para infiltración basándose en el agua pluvial que se potencialmente aprovechable. Se tomó como base la información obtenida del IMPLAN (2018), referente a la ciudad de Aguascalientes, en la cual se menciona que se divide en quince Zonas Urbanas de Focalización, también llamadas ZUFO's, como se observa en la figura 25

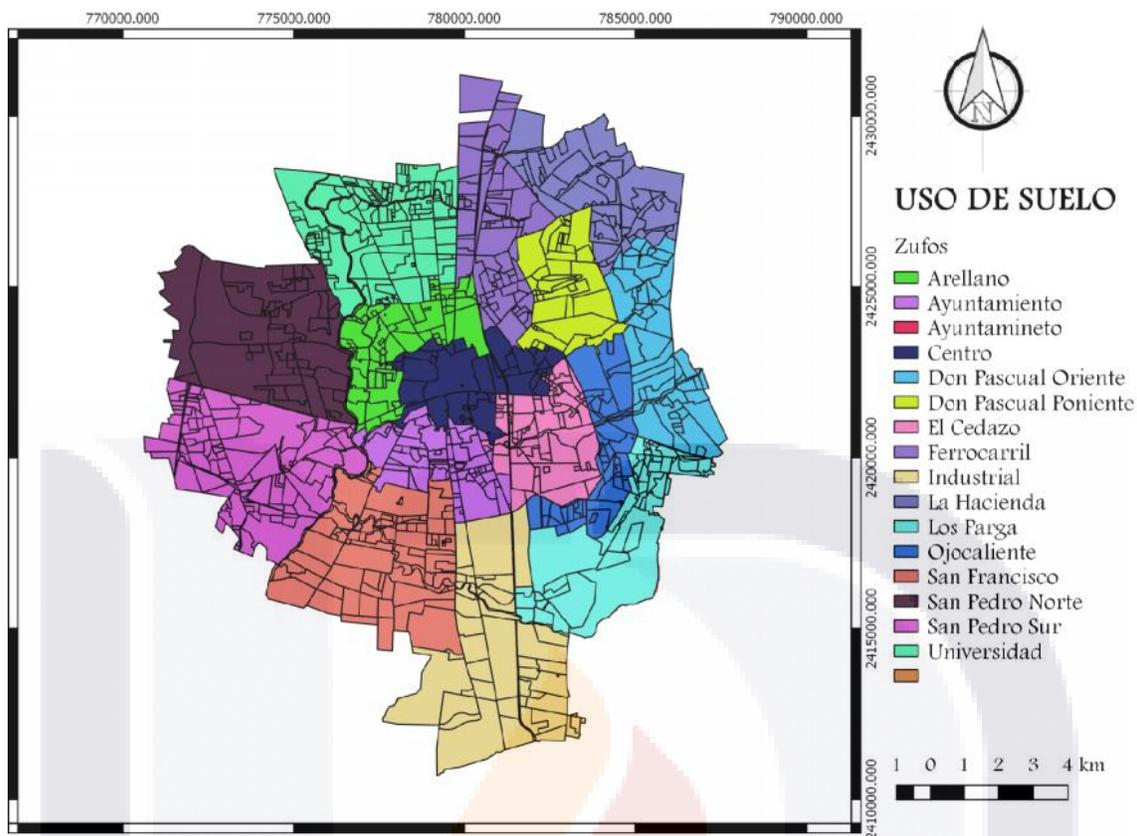


Figura 25. Clasificación de ZUFO's. Fuente: IMPLAN (2018).

### 4.3 Análisis numérico de infiltración en el suelo

Por medio del programa COMSOL, se analizó el suelo existente en la Ciudad de Aguascalientes, tomando los datos del trabajo en proceso de Rubio-Alfaro (2018), en el cual se estudiaron los estratos de existen en la zona vadosa, esto para simular el pozo de infiltración.

En el presente trabajo se analizaron las mejores opciones para una rápida y eficaz infiltración a través del pozo, independientemente de la permeabilidad de suelo natural sobre el que se perfora, ya que con la inserción del relleno permeable en el pozo de infiltración se incrementa la capacidad de recarga a través del suelo natural que lo rodea al pozo dado que la infiltración ocurre tanto vertical como horizontalmente.

#### 4.4 Asignación de valores a los factores que influyen en la recarga en SIG

La información obtenida de CONAGUA (2018) referente a las estaciones meteorológicas que afectan a la zona de estudios, se utilizó para las variables de Precipitación y Evaporación, con los datos iniciales se realizó el proceso de interpolación para la obtención de un mapa general; mientras que para la pendiente se obtuvo la información directamente del modelo de elevación de la página oficial del INEGI.

Las variables de Uso de suelo, se consiguió la información del Instituto de Planeación del Municipio de Aguascalientes, basándose también para la variable de la vegetación. La modelación numérica realizada en el programa COMSOL, se utilizó para la definición de las zonas más propensas para utilizar esta alternativa.

#### 4.5 Análisis multicriterio de los factores para la recarga del acuífero de Aguascalientes

Como se mencionó anteriormente, se aplicó el Análisis Multicriterio (AHP), en el estudio de los factores que influyen directamente en las diferentes capas, las cuales se mencionan a continuación:

- ) Precipitación pluvial en mm por año
- ) Evaporación en mm por año
- ) Uso de Suelos
- ) Pozo de absorción
- ) Pendiente de la superficie
- ) Tipo de vegetación

Por medio del manejo del programa Qgis, se asignaron pesos a todas los factores involucrados en el análisis jerárquico, así para la precipitación, la evaporación y la pendiente, estos se obtuvieron a partir de ciertos rangos de las curvas de isovalores generadas a partir de la interpolación de datos, los cuales a su vez se obtuvieron de las estaciones climatológicas del Servicio Meteorológico Nacional, para precipitación y

evaporación, y de los mapas de elevación digital del INEGI, para el caso de la pendiente. En cuanto al factor de vegetación, se retomó la información de las áreas verdes y se asignaron valores a los diferentes usos de suelo que componen el mosaico de la Ciudad de Aguascalientes, tales como lo son la recreación, camellones de avenidas, habitacional, comercio y servicio. Con respecto a la pendiente, la obtención de los pesos se realizó en base al modelo de elevación y a rangos seleccionados de valores de este factor, proceso análogo a los de precipitación y evaporación. El Uso de suelo, tiene una clasificación encontrada en el gobierno del estado de Aguascalientes (2018) ya especificada, la cual consiste en diversos tipos, como lo son habitacional, área verde, comercial, servicios, educación, industrial y agricultura; las cuales se relacionan entre sí, y asignando un valor a cada tipo.

El pozo de infiltración se clasificó de acuerdo a la magnitud del área de infiltración, dependiendo que tan grande o pequeña sea esta, teniendo a su vez una clasificación final tomando en cuenta cada una de las variables que afectan el modelo numérico realizado en el programa COMSOL.

#### 4.6 Aplicación de álgebra de mapas en SIG

Se aplicó el álgebra de mapas con los resultados del análisis multicriterio en relación con el aporte de agua pluvial al subsuelo, según cada factor analizado.

La fase inicial se realizó en un lapso de seis a ocho meses, con un proceso de experimentación de un año para analizar desde la primera lluvia hasta la última y ver sus diferencias, así como, seis meses para determinar las conclusiones y aportaciones. Los materiales que se emplearon contenedores de agua para la recolección de agua pluvial, sedimentos propios de la región para determinar su permeabilidad, etc.

La variable de pozo de infiltración, se obtuvo de los datos obtenidos del modelo numérico realizado en el programa COMSOL, en el cual muestra la trayectoria y el tiempo que tarda el agua en infiltrarse al suelo de la zona de estudio, por lo cual, se analizó las zonas con mayor factibilidad a esta alternativa.

## CAPITULO V: RESULTADOS

### 5.1 Análisis Urbanístico de la Ciudad de Aguascalientes

La Ciudad de Aguascalientes se clasifica de 9 delegaciones, pero dado a que no cuentan con las mismas características, el Instituto de Planeación del Municipio de Aguascalientes lo agrupa en quince Zonas de Focalización (ZUFO), las cuales se describen en la Figura 25.

Analizando cada uno de los ZUFO's, estos clasifican en diferentes usos de suelo, dependiendo de la tipología de su uso (habitacional, comercial, servicio, recreación, etc.), entre los que destacan los mostrados en la Figura 26.

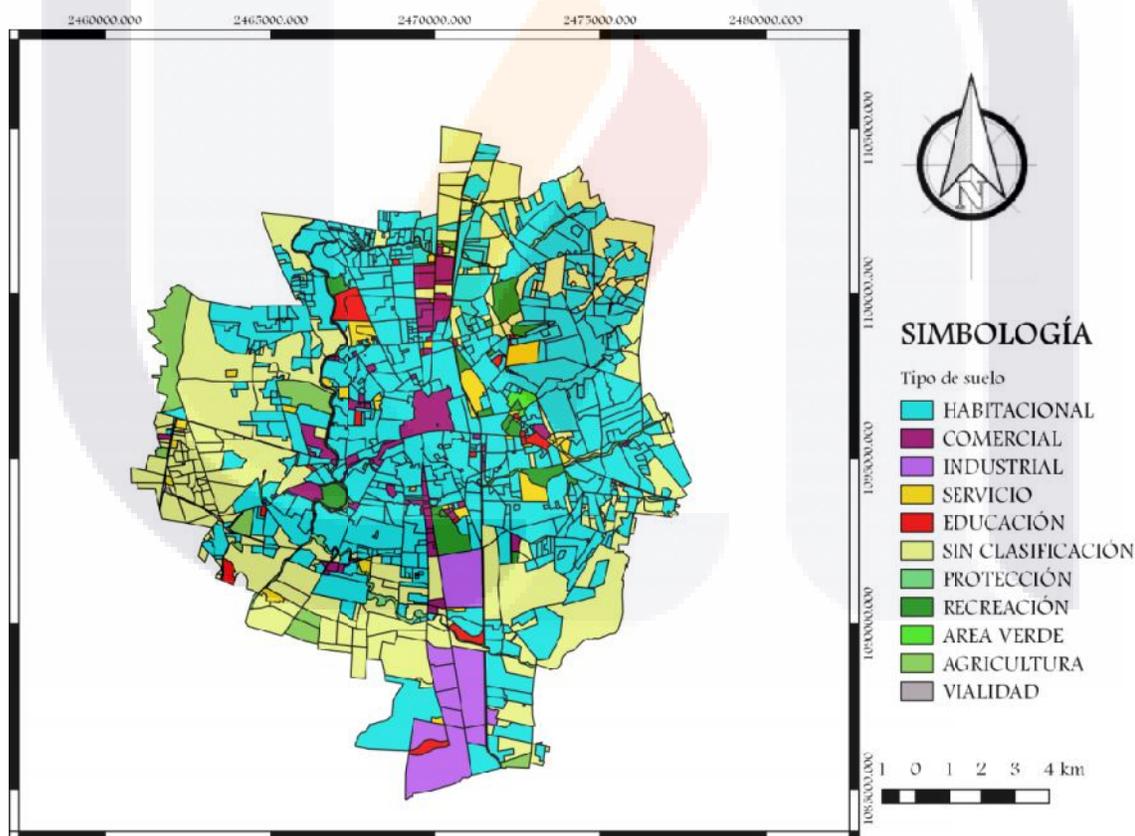


Figura 26. Usos de suelo de los ZUFO's

La zona de estudio cuenta con 20,394.06 km<sup>2</sup>, de los cuales están distribuidos como lo muestra la

Tabla 10. Área por clasificación de la zona de Estudio. Fuente: Autoría propia (2018).

| Uso Suelo         | Área (km <sup>2</sup> ) |
|-------------------|-------------------------|
| Agricultura       | 522.62                  |
| AREA verde        | 63.12                   |
| Comercial         | 726.96                  |
| Educación         | 243.35                  |
| Habitacional      | 10357.38                |
| Industrial        | 947.22                  |
| Protección        | 250.06                  |
| Recreación        | 459.08                  |
| Servicio          | 410.58                  |
| Sin clasificación | 6326.13                 |
| Vialidad          | 87.56                   |

Siendo el uso de suelo habitacional con la mayor extensión territorial, después de sin clasificación, ya es este apartado está en trámites o se va adaptando como lo vaya requiriendo la Ciudad, siendo clasificado por el Instituto de Planeación del Municipio de Aguascalientes y Desarrollo Urbano del Municipio de Aguascalientes. Entonces, de acuerdo a esta clasificación se aplicó el peso al análisis AHP, lo cual se observa en la Figura 27, con esto se enfatiza que entre el área verde, área de restricción, sin clasificación y la zona habitacional popular hace la mayor parte territorial; indicado en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

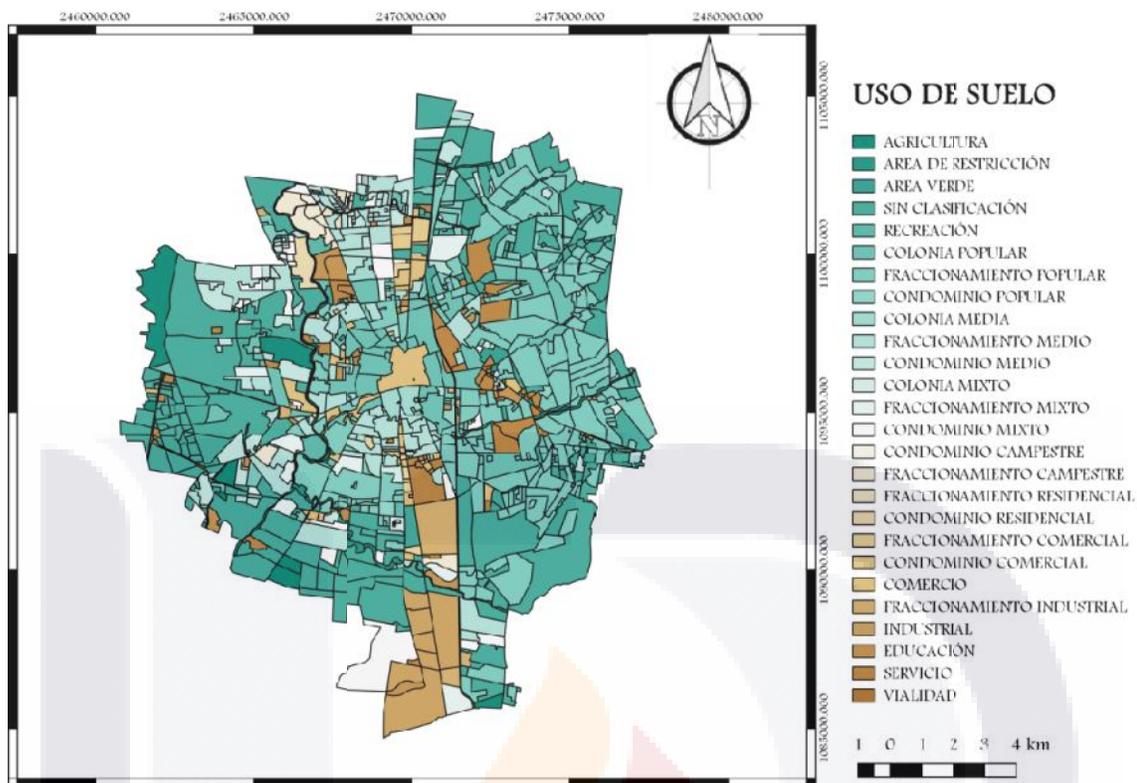


Figura 27. Clasificación extensa por Uso de Suelo. Fuente: Autoría Propia (2018).

Tabla 11. Clasificación extensa por Uso de Suelo con su área. Fuente: Autoría Propia (2018)

| Uso Suelo                   | Área (km <sup>2</sup> ) | Porcentaje |
|-----------------------------|-------------------------|------------|
| Agricultura                 | 522.62                  | 2.56%      |
| Área de restricción         | 250.06                  | 1.23%      |
| Área verde                  | 63.12                   | 0.31%      |
| Recreación                  | 80.26                   | 0.39%      |
| Sin clasificación           | 6326.13                 | 31.02%     |
| Colonia popular             | 1434.36                 | 7.03%      |
| Fraccionamiento popular     | 4792.01                 | 23.50%     |
| Condominio popular          | 87.51                   | 0.43%      |
| Colonia media               | 153.65                  | 0.75%      |
| Fraccionamiento medio       | 1788.58                 | 8.77%      |
| Condominio medio            | 701.34                  | 3.44%      |
| Fraccionamiento residencial | 39.98                   | 0.20%      |
| Condominio residencial      | 86.68                   | 0.43%      |
| Fraccionamiento campestre   | 222.51                  | 1.09%      |
| Condominio campestre        | 16.89                   | 0.08%      |
| Colonia mixto               | 25.56                   | 0.13%      |

| Uso Suelo                  | Área (km <sup>2</sup> ) | Porcentaje |
|----------------------------|-------------------------|------------|
| Fraccionamiento mixto      | 394.52                  | 1.93%      |
| Condominio mixto           | 641.43                  | 3.15%      |
| Fraccionamiento comercial  | 54.76                   | 0.27%      |
| Condominio comercial       | 90.55                   | 0.44%      |
| Comercio                   | 535.04                  | 2.62%      |
| Fraccionamiento industrial | 278.53                  | 1.37%      |
| Industrial                 | 687.66                  | 3.37%      |
| Educación                  | 243.35                  | 1.19%      |
| Servicio                   | 789.4                   | 3.87%      |
| Vialidad                   | 87.56                   | 0.43%      |

Dando como resultado que la clasificación que tiene mayor extensión territorial es la zona que todavía no cuenta con un Uso de suelo determinado, es decir, sin clasificación fija; el segundo es el área popular con 6,326.13 km<sup>2</sup>, siendo la zona en donde se aprovecharía la mayor la infiltración.

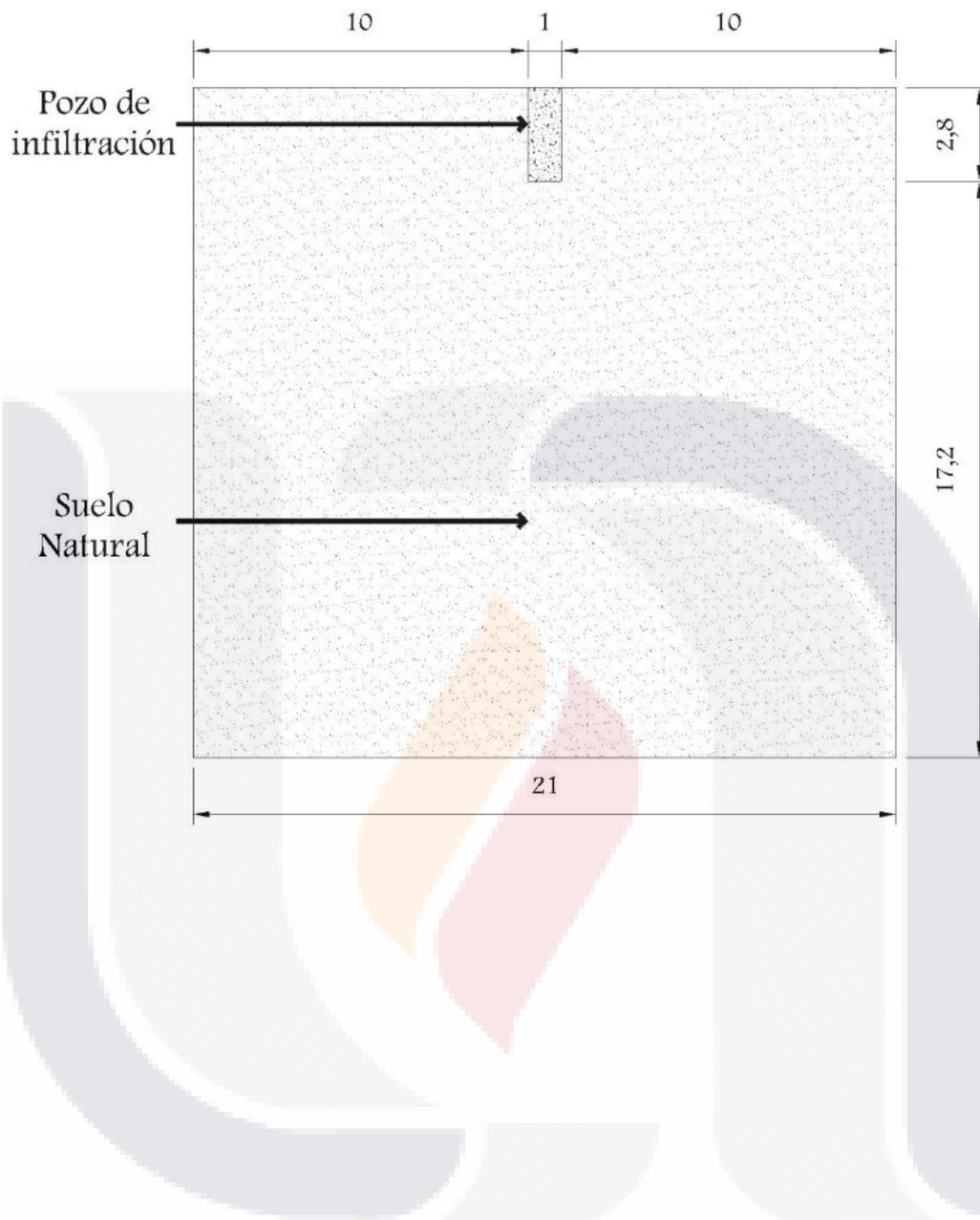
Tomando en cuenta toda la clasificación habitacional, área verde, recreación, área de restricción, se obtuvo 107,778.46 km<sup>2</sup>, es decir, el 52.85% de la zona de estudio, por lo tanto, es la principal área para enfocarse para la recarga de los acuíferos.

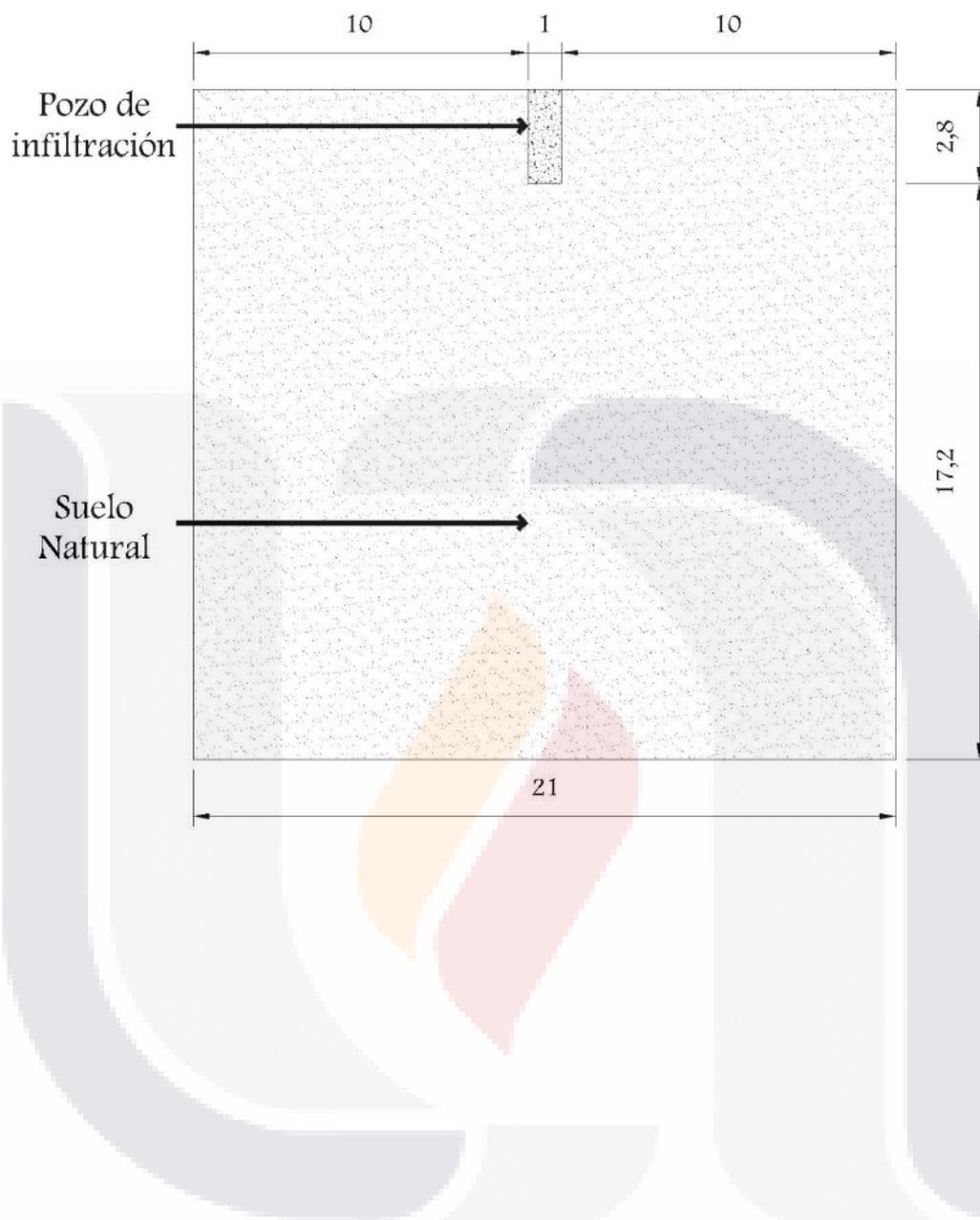
## 5.2 Análisis Numérico del Pozo de Absorción

Para la determinación del modelo numérico, se utilizó el programa COMSOL, tomando en cuenta los parámetros hidráulicos del estrato del pozo de absorción como del suelo existente en la zona menos permeable, esto para la generación de escenario más crítico, distribuido en los siguientes apartados.

### 5.2.1 Definición del modelo

Dado que el uso de suelo principal es el habitacional, se consideró que el pozo de absorción del estudio tenga un tamaño de fácil acceso y que no tenga gran peso económico, dado esto se tomo como ejemplo el propuesto por Rubio-Alfaro (2018), como se muestra en la





tipo más crítico para la simulación del pozo de infiltración, mientras que el material empleado como relleno antropogénico en el pozo correspondió al de una arena mediana.

Se utilizó la ecuación de Richards, para simular la interacción del pozo de infiltración y la zona vadosa, empleándose la ecuación de van Genuchten, de la cual se utilizaron los datos obtenidos por Hernández-Marín et al., (2018) para la porosidad, saturación inicial y saturación final, con ayuda del programa ROSETTA, el cual solo necesita de insumos los valores granulométricos; mientras que para la densidad del suelo se manejaron los datos de Martín Hernández-Marín y Burbey, (2009). Los parámetros de físicos se muestran en las **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia. y¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

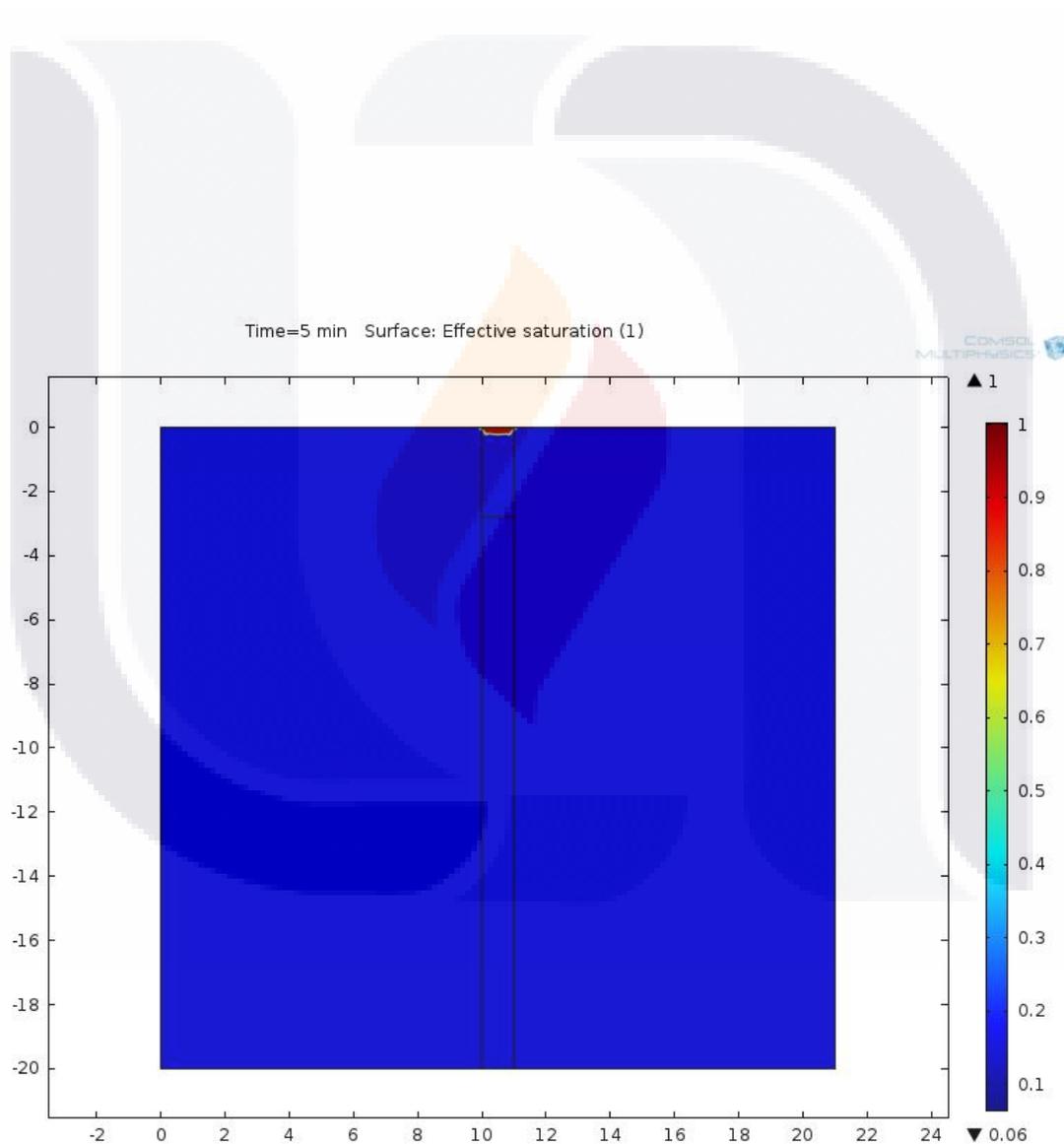
Tabla 12. Parámetros para el pozo de infiltración.

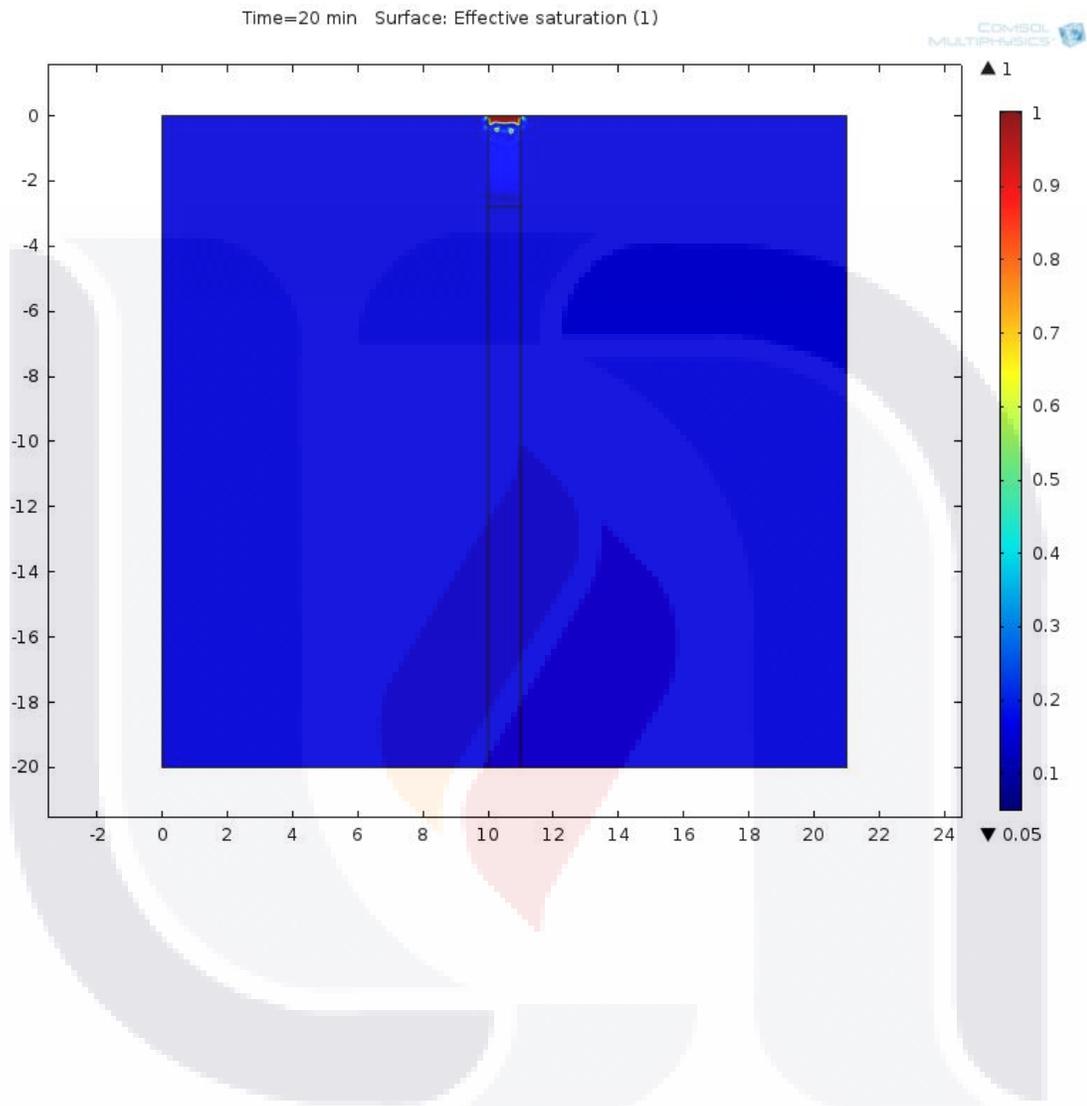
| Parámetro                                   | Valor               | Unidades     |
|---|---------------------|--------------|
| Conductividad Hidráulica vertical ( $K_v$ ) | 1e-01               | m/s          |
| s   | 0.4029              | $m^3 m^{-3}$ |
| r   | 0.0276              | $m^3 m^{-3}$ |
|   | 0.0494              | -            |
| n   | 1.6220              | -            |
| Carga hidráulica                            | 0.20                | M            |
| Condición inicial                           | -(y-Nivel Estático) | M            |
| Nivel Estático                              | 500                 | M            |
| Densidad del material                       | 1500                | $Kg/m^3$     |
| Densidad del agua                           | 1000                | $Kg/m^3$     |

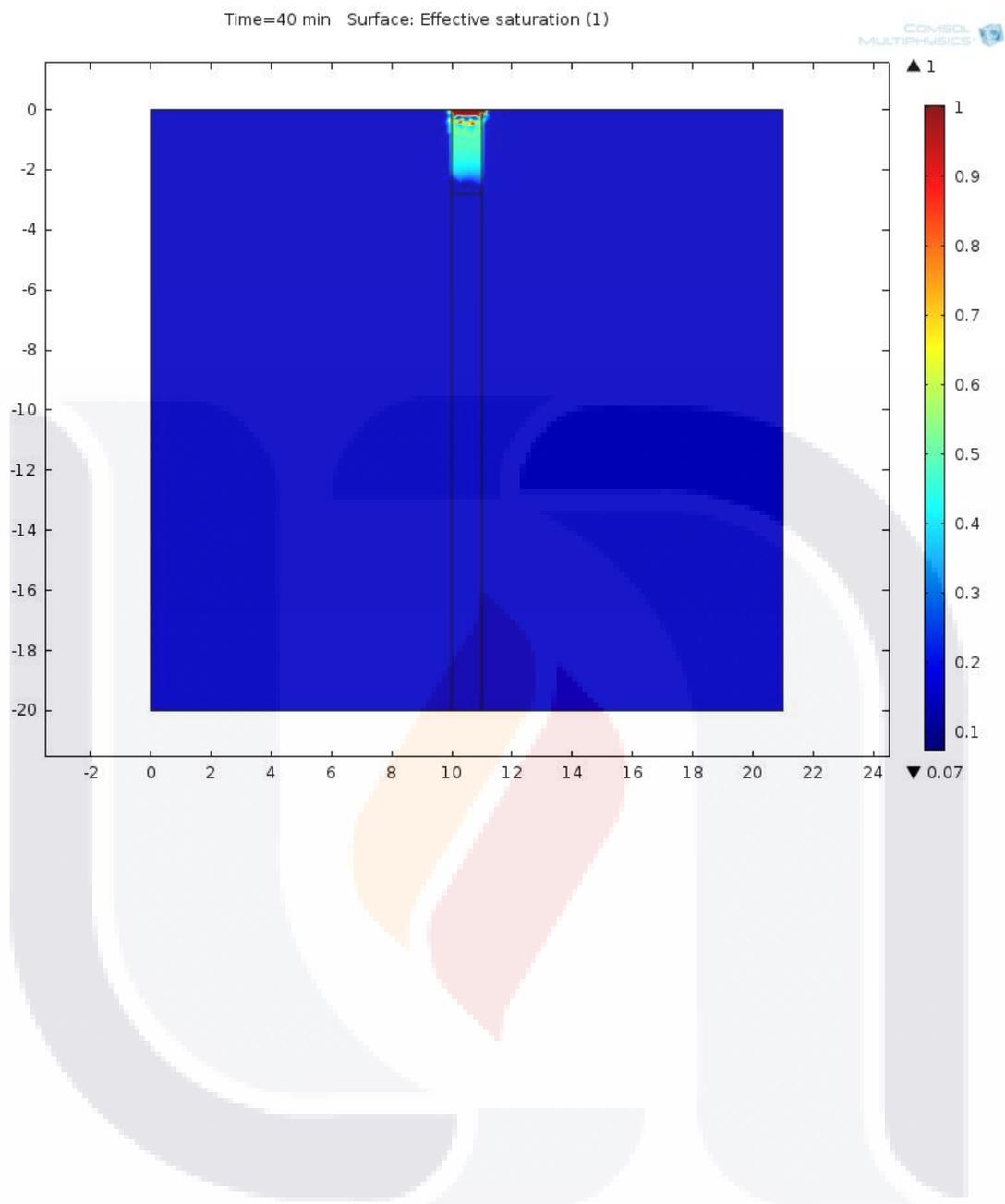
Tabla 13. Parámetros para el suelo que constituye la zona vadosa.

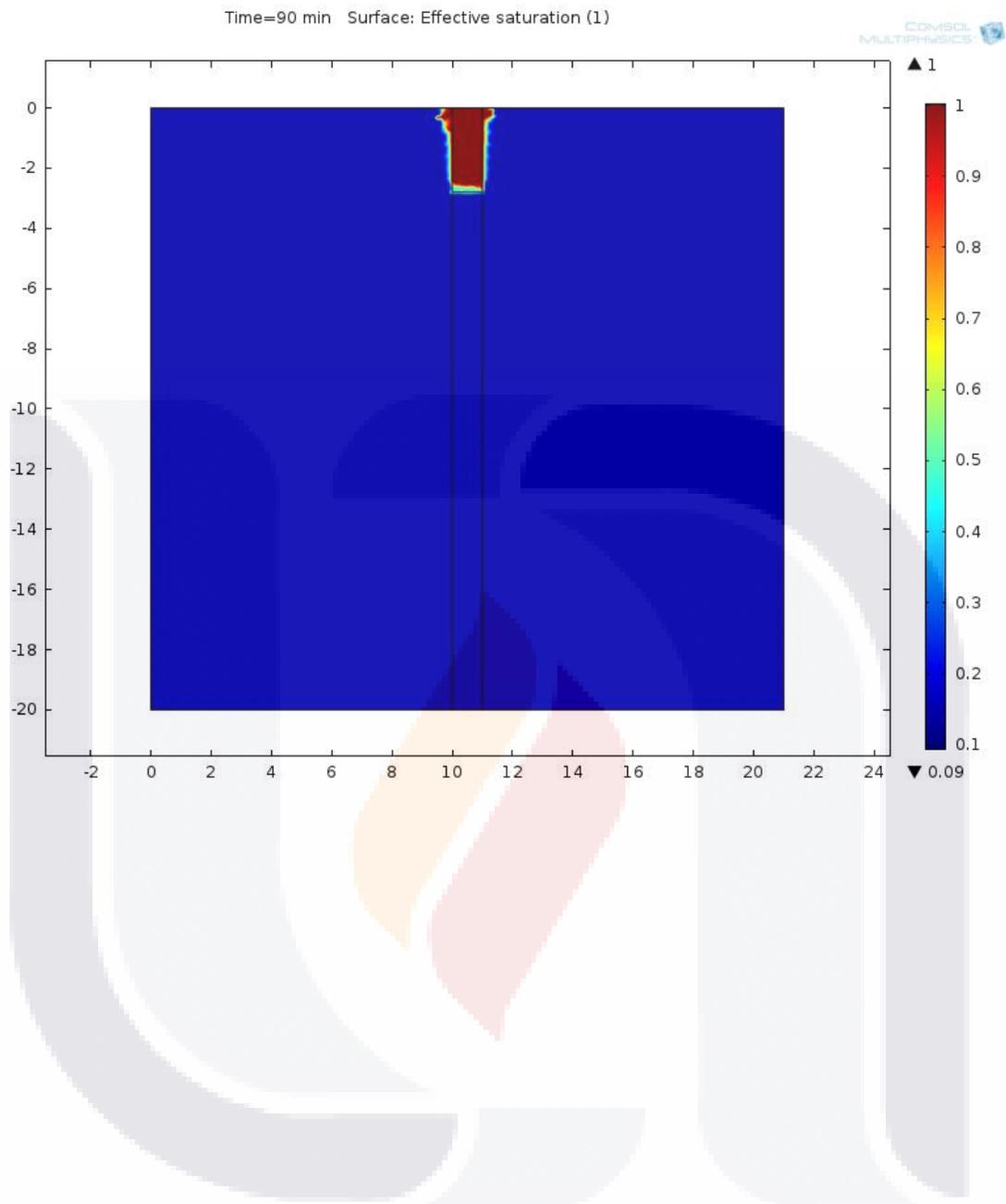
| Parámetro  | Valor  | Unidades     |
|--|--------|--------------|
| Conductividad Hidráulica vertical ( $K_{sv}$ )   | 5e-03  | m/s          |
| Conductividad Hidráulica horizontal ( $K_{sh}$ ) | 1e-03  | m/s          |
| s  | 0.3771 | $m^3 m^{-3}$ |
| r  | 0.0512 | $m^3 m^{-3}$ |

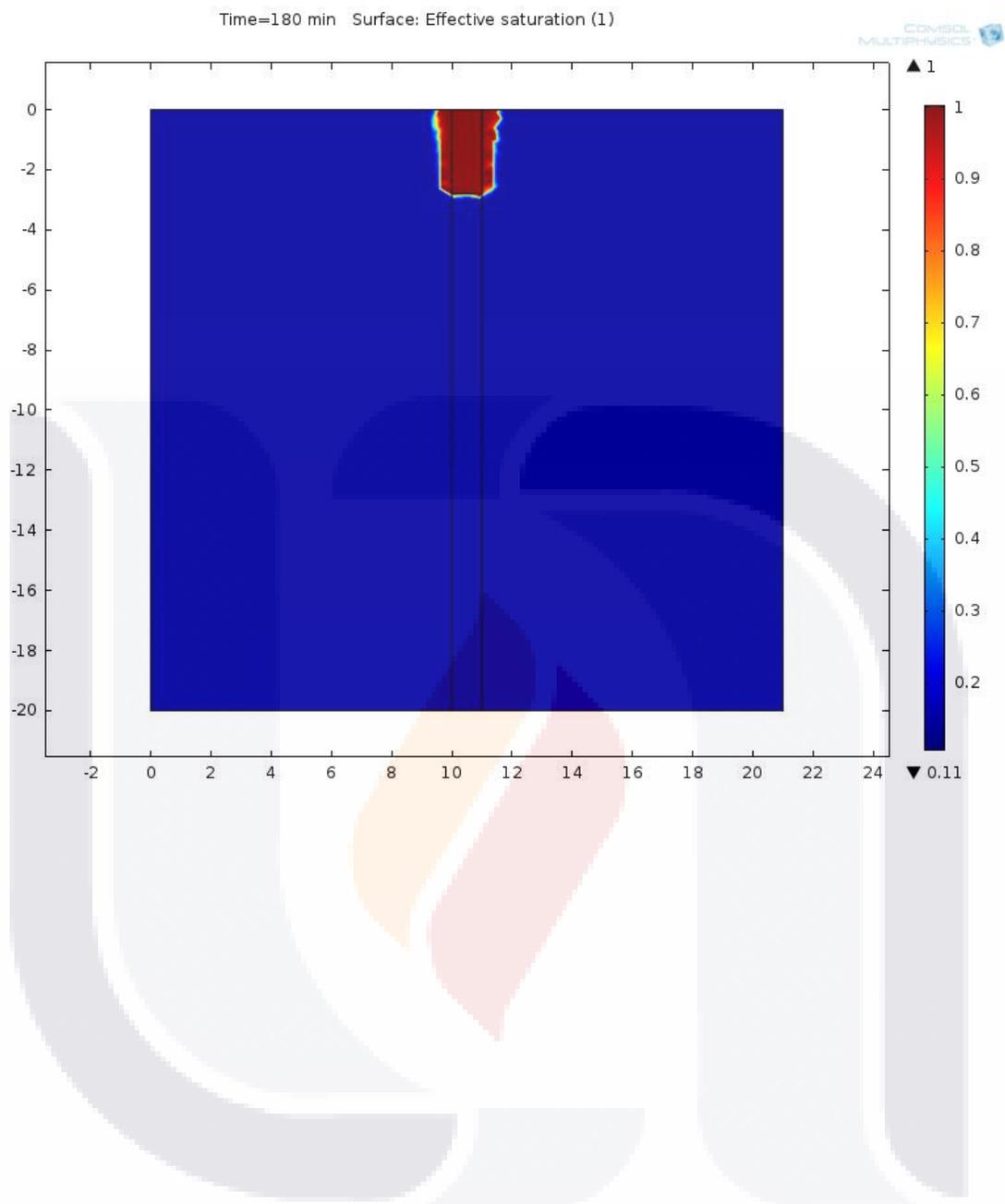
| Parámetro             | Valor  | Unidades          |
|-----------------------|--------|-------------------|
|                       | 0.0338 | -                 |
| n                     | 3.2291 | -                 |
| Densidad del material | 1600   | Kg/m <sup>3</sup> |
| Densidad del agua     | 1000   | Kg/m <sup>3</sup> |

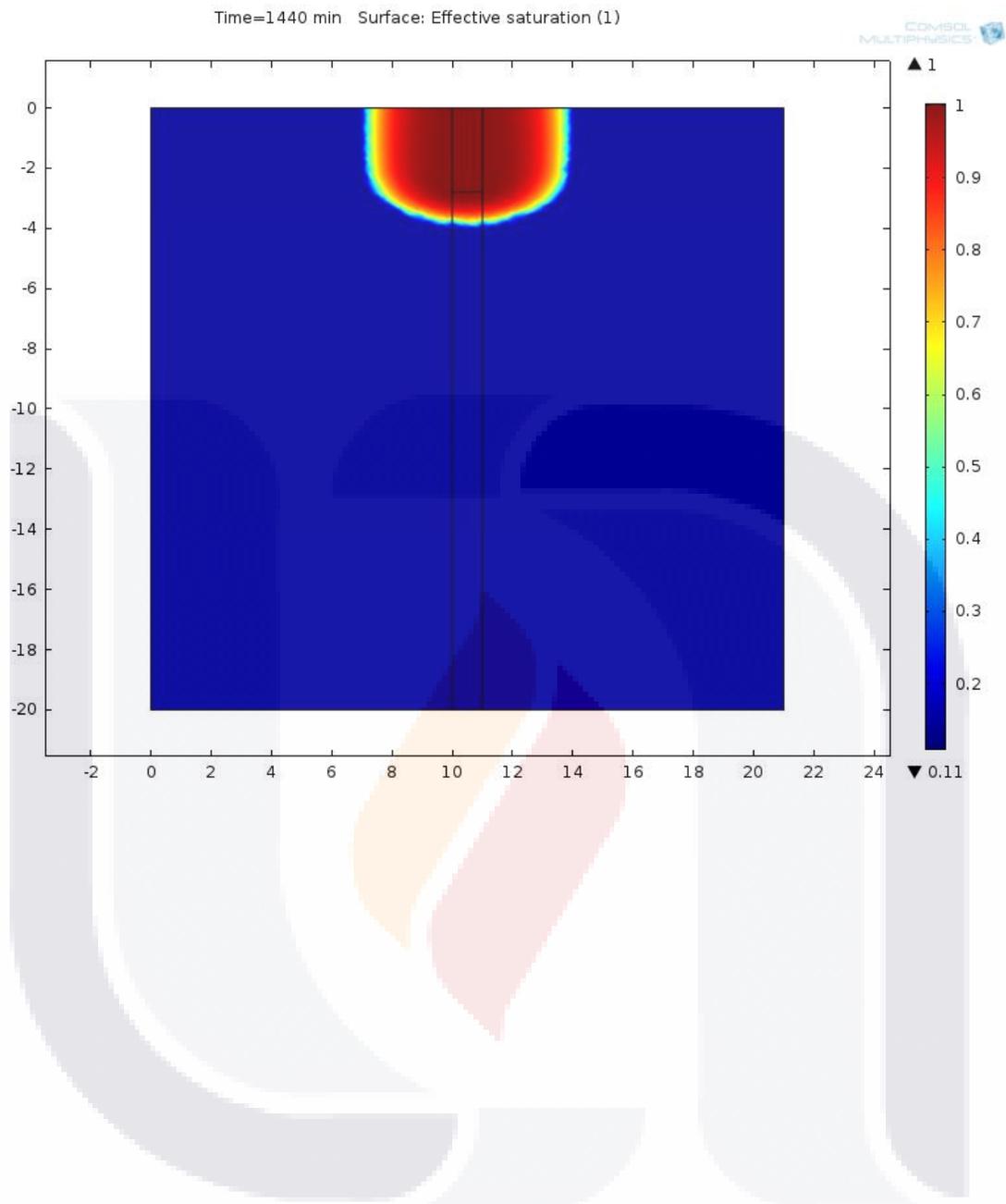


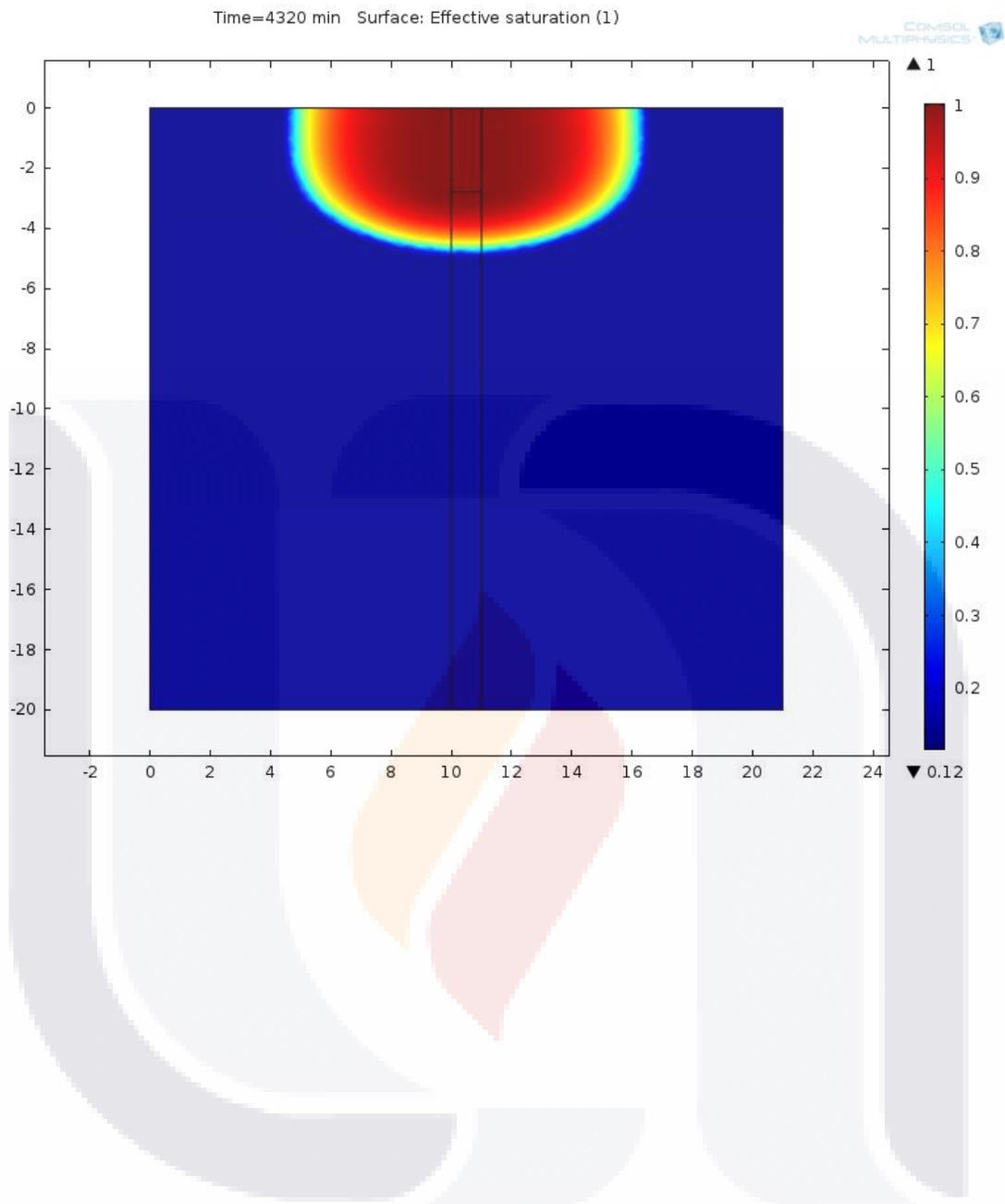












### 5.3 Análisis de las capas geoespaciales

Cada uno de los factores involucrados en el análisis geoespacial de la recarga de agua subterránea se analizó en el programa de Sistemas de Información Geográfica Qgis, obteniendo una capa para cada uno de estos factores en forma archivo de tipo shapefile. La información utilizada se obtuvo de varias fuentes dependiendo de cada factor: las capas de precipitación y evaporación se obtuvieron de los datos de las estaciones meteorológicas ubicadas en el área de estudio; la capa de la pendiente se consiguió del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI); mientras que los datos para la clasificación del uso de suelo del Instituto de Planeación Municipal de Aguascalientes. A continuación se detalla el manejo de datos y se muestra el resultado obtenido para cada capa.

#### 5.3.1 Precipitación media anual en mm

La capa referente a la precipitación, se utilizaron los datos pluviométricos de 15 estaciones, y por medio del programa Qgis se ejecutó el geoproceso de interpolación, tomando en cuenta los valores promedio de lluvia en el área de estudio (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**), los cuales, a su vez se obtuvieron por medio del cálculo de isoyetas. El mapa resultante se ilustra en la Figura 36. Los valores de precipitación para la ciudad varían entre 408.4 y 511.7 milímetros, valores muy reducidos en términos generales.

Tabla 14. Datos de la precipitación media anual. PMA = Precipitación media anual.

| Estación | PMA (mm) | Estación | PMA (mm) | Estación | PMA (mm) |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 1001     | 456.30   | 1030     | 517.00   | 1090     | 501.50   |
| 1004     | 512.90   | 1034     | 421.40   | 1096     | 510.50   |
| 1005     | 560.30   | 1062     | 518.10   | 1097     | 511.70   |
| 1022     | 548.80   | 1075     | 483.70   | 1101     | 460.70   |
| 1027     | 515.90   | 1076     | 491.60   | 1104     | 408.40   |

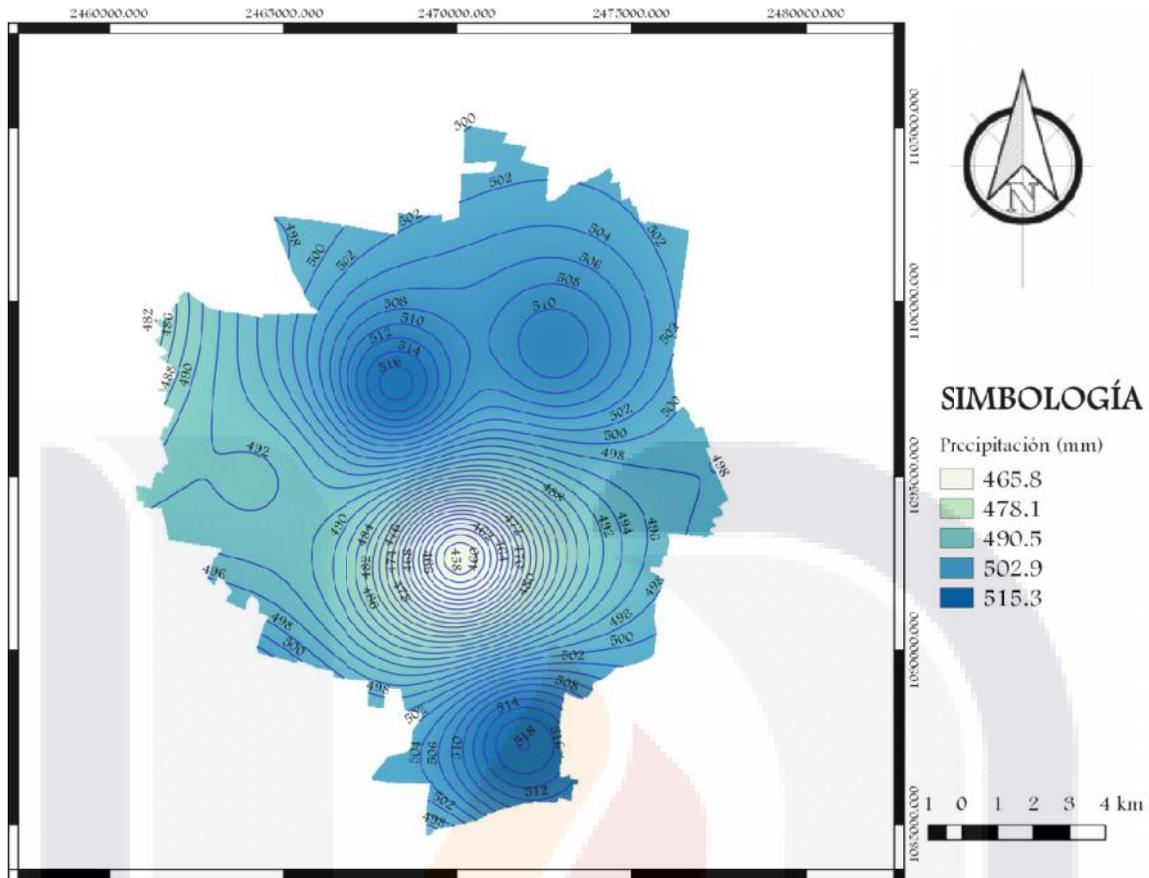


Figura 36. Mapa de valores interpolados de la precipitación del área de estudio.

### 5.3.2 Evaporación

Al igual que para la precipitación, la capa de evaporación se obtuvo del proceso de interpolación y la generación de isoyetas, en el programa Qgis, con los datos derivados de estaciones climatológicas, mostrados en la *¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.*, ilustrándolo de manera gráfica en la Figura 37. Como se muestra, la evaporación en términos generales es muy alta, típica para zonas áridas o semiáridas. El rango de valores de evaporación de acuerdo a la tabla 15 es de 1997.8 a 1085.3 milímetros.

Tabla 15. Datos de la evaporación de la zona de estudio.

| Estación | Evaporación (mm) | Estación | Evaporación (mm) | Estación | Evaporación (mm) |
|----------|------------------|----------|------------------|----------|------------------|
| 1001     | 1630.50          | 1030     | 2337.70          | 1090     | 1895.0           |
| 1004     | 1740.20          | 1034     | 1833.50          | 1096     | 1660.10          |
| 1005     | 1960.30          | 1062     | 1974.30          | 1097     | 1921.20          |

|      |         |      |         |      |         |
|------|---------|------|---------|------|---------|
| 1022 | 1909.60 | 1075 | 1646.40 | 1101 | 1997.80 |
| 1027 | 2198.10 | 1076 | 1814.80 | 1104 | 1085.30 |

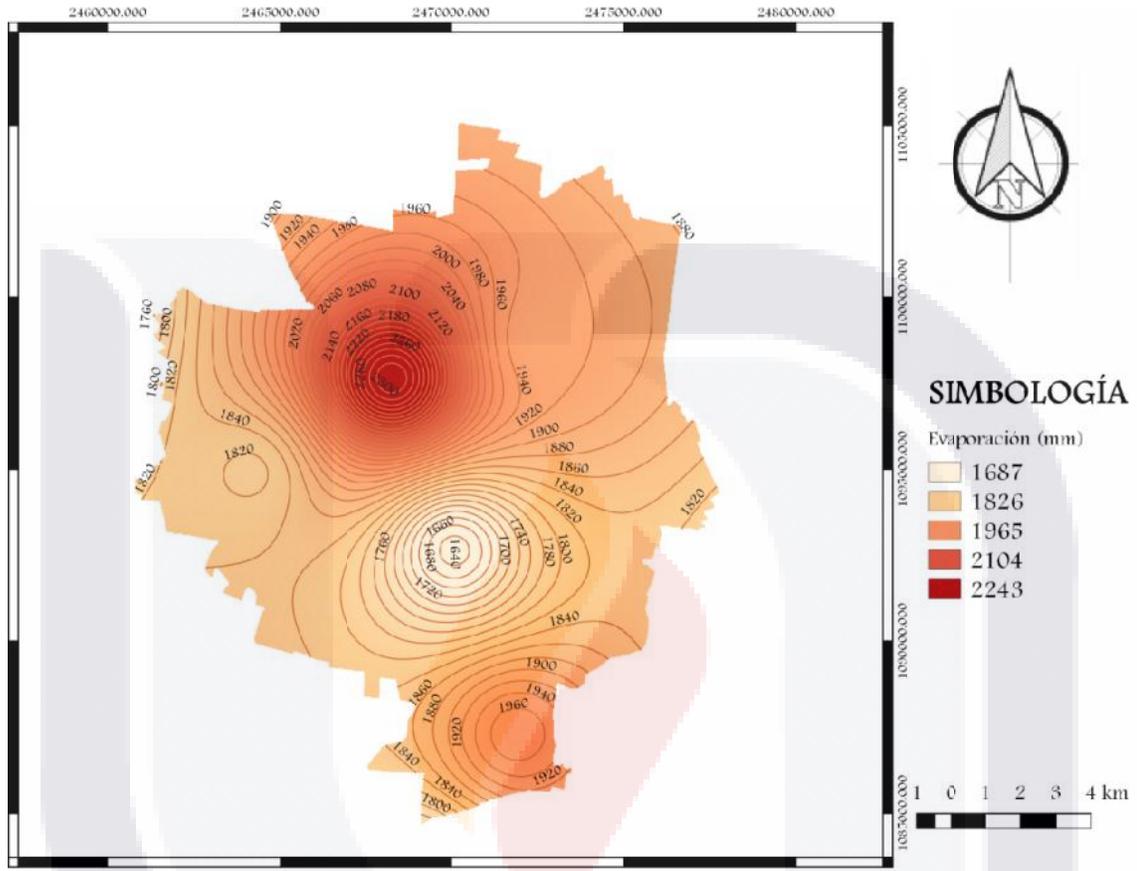


Figura 37. Mapa de valores interpolados de la evaporación del área de estudio.

*5.3.3 Uso de suelo*

La capa del uso de suelo se tomaron los datos del IMPLAN, para las construcciones referentes al habitacional, comercial, servicios, educación, industrial, área verde, recreación y agricultura.

*5.3.4 Pendiente*

Los datos de esta capa se analizaron y estimaron a partir del Modelo Digital de Elevación de Aguascalientes, siguiendo con el proceso de análisis del

terreno>Pendiente, dando como resultado la Figura 38. En donde como puede observarse, la pendiente no es muy pronunciada, en general la zona es muy plana, con un cambio muy pronunciado en la zona que limita al valle al oeste, obteniéndose valores máximos cercanos al 13.11 %.

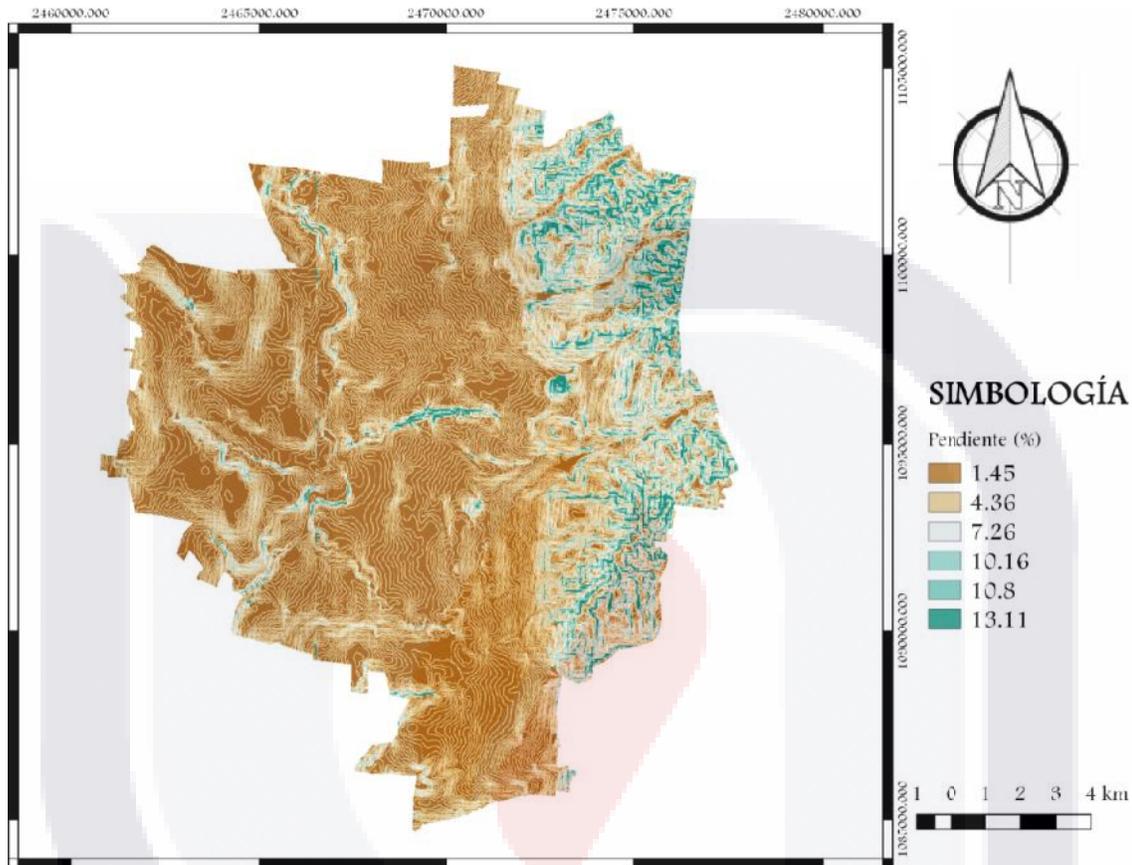


Figura 38. Variación de la pendiente en el área de estudio.

### 5.3.5 Vegetación

Los datos obtenidos se relacionaron directamente con el uso de suelo, es decir, que tan propensos son para la colocación o existencia de vegetación; ya sea, arboles, pasto, arbustos, flores, etc.

### 5.3.6 Pozo de infiltración

Se tomaran los datos del programa COMSOL para relacionarlos directamente con el uso de suelo, para desarrollar las áreas más idóneas para la colocación de los pozos de infiltración.

## 5.4 Evaluación multicriterio de las capas por medio del Proceso Analítico Jerárquico (AHP)

Se analizaron las variables de precipitación, evaporación, uso de suelo, pendiente, vegetación y pozo de absorción, estas son las que se estudiaron para determinar las áreas con mayor influencia para la recarga. Cada una de estas se analizó por el Proceso Analítico Jerárquico, para adjudicar a cada factor, el peso numérico en el proceso de recarga.

### 5.4.1 Precipitación

La variable referente a la precipitación, ésta cuenta con los datos de las 15 estaciones climatológicas cercanas a la zona de estudio, como se comentó anteriormente. A partir de la diferencia entre valor máximo y mínimo de ese factor, se obtuvo el valor de x con la ecuación 5, en la que, como puede observarse, está involucrado el número de rangos en los que se dividió ese factor dentro del método AHP.

$$x = \frac{V \cdot \frac{máx - mín}{N \cdot r}}{5} = \frac{5 \cdot 2 - 4 \cdot 7}{5} = 9.9 \tag{6}$$

De acuerdo a lo obtenido de la ecuación 6, cada peso del factor de precipitación tendrá un valor que variará de su antecesor y sucesor de 20.9 unidades, representado en la   
 ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..

Tabla 16. Rangos de las Isoyetas de precipitación.

| Valor Inferior | Valor Superior | Valor de Rango | Valor redondeado |
|----------------|----------------|----------------|------------------|
| 465.76         | 475.67         | 470.72         | 470.70           |
| 475.67         | 485.58         | 480.62         | 480.60           |
| 485.58         | 495.48         | 490.53         | 490.50           |
| 495.48         | 505.39         | 500.44         | 500.40           |
| 505.39         | 515.30         | 510.34         | 510.30           |

La matriz de comparación de la capa temática del apartado de la precipitación se analizó en el rango de los 470.70 a 510.30 mm. En la **Tabla 17**, se muestran los datos y sus pesos correspondientes, siendo el mayor porcentaje el del rango de 510.30 mm, con un peso de 33.74%, el de 500.40 mm con 25.60%, el de 490.50 mm con 18.14%, el de 480.60 mm con 13.81% y el de 470.70 mm con 8.71%.

Tabla 17. Ponderación de clasificación de precipitación, calculada a través del Proceso Analítico Jerárquico (AHP).

| Precipitación (mm por año) | 510.30 | 500.40 | 490.50 | 480.60 | 470.70 | Peso    |
|----------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|
| 510.30                     | 1      | 2      | 2      | 2      | 3      | 33.74%  |
| 500.40                     | 1/2    | 1      | 2      | 2      | 3      | 25.60%  |
| 490.50                     | 1/2    | 1/2    | 1      | 2      | 2      | 18.14%  |
| 480.60                     | 1/2    | 1/2    | 1/2    | 1      | 2      | 13.81%  |
| 470.70                     | 1/3    | 1/3    | 1/2    | 1/2    | 1      | 8.71%   |
| Total                      | 2.83   | 4.33   | 6.00   | 7.50   | 11     | 100.00% |

En referencia a los datos anteriores, se realizó el procedimiento de asignar los pesos correspondientes dependiendo de los valores del mapa, como se observa en la Figura 39, la principal zona están el rango de los 510.70 mm anuales, beneficiando a la recarga.

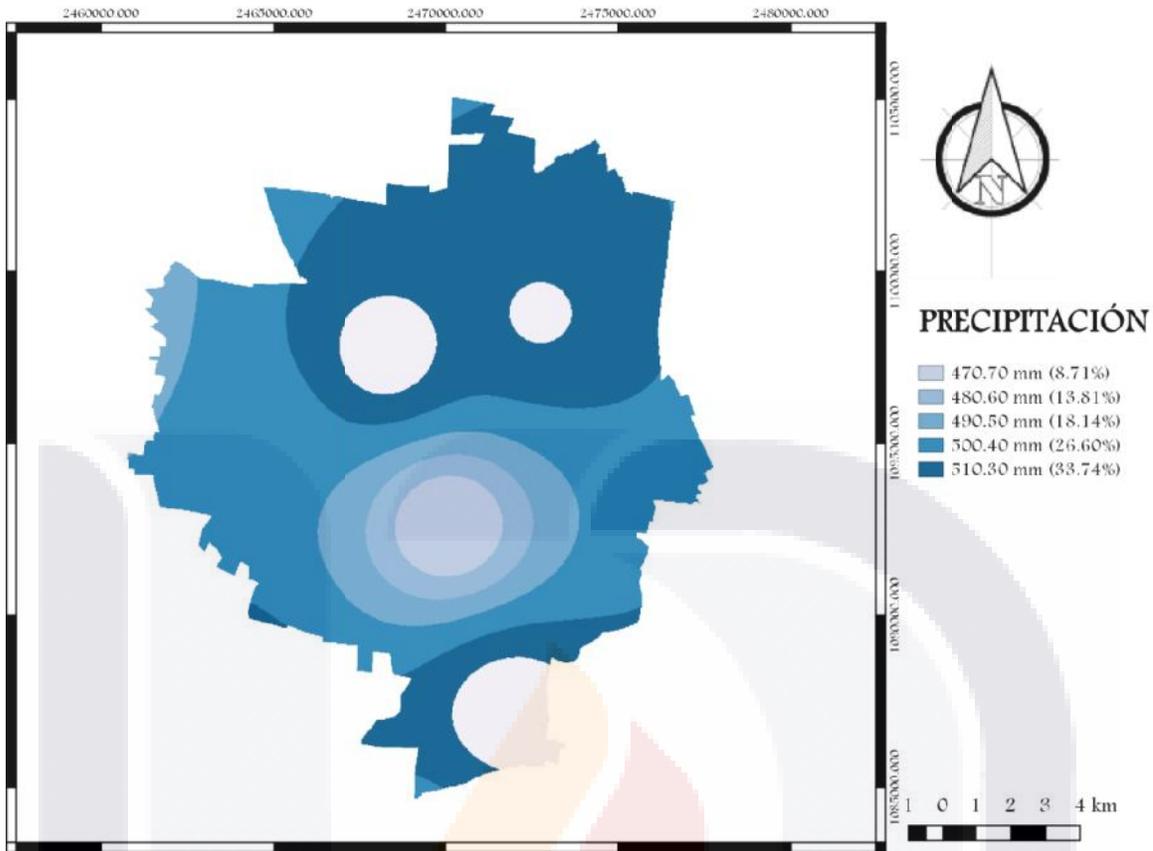


Figura 39. Reclasificación de la zona de estudio por la variable de precipitación.

5.4.2 Evaporación

De la misma manera que para la precipitación, se obtuvieron los datos de las estaciones climatológicas, para después realizar una interpolación, obteniendo un mínimo de 1687.45 mm al año y como máximo de 2243.07. Analizando estos datos se procedió a estimar los 5 rangos para su estudio, con la siguiente ecuación:

$$x = \frac{V \cdot \frac{máxi - V}{N \cdot d r} - V \cdot \frac{míni}{5}}{5} = \frac{2 \cdot \frac{0 - 1}{5} - 4}{5} = 1 \cdot 1 \tag{7}$$

De la cual, como puede observarse, existe un valor en aumento de 126.50 unidades, representado en la Tabla 18.

Tabla 18. Rangos de las Isoyetas de evaporación.

| Valor Inferior | Valor Superior | Valor de Rango | Valor redondeado |
|----------------|----------------|----------------|------------------|
| 1687.45        | 1798.55        | 1743           | 1743.00          |
| 1798.55        | 1909.65        | 1854.1         | 1854.10          |
| 1909.65        | 2020.75        | 1965.2         | 1965.20          |
| 2020.75        | 2131.85        | 2076.3         | 2076.30          |
| 2131.85        | 2243.07        | 2187.46        | 2187.50          |

En la Tabla 19 describe la capa de referente a la evaporación determinado que los rangos de las isoyetas anteriormente obtenidas son 1743.00, 1854.10, 1965.20, 2076.30 y 2187.50.

Tabla 19. Ponderación de los niveles de evaporación en la zona de estudio, calculada a través del Proceso Analítico Jerárquico (AHP).

| Evaporación | 1743.00 | 1854.10 | 1965.20 | 2076.30 | 2187.50 | Peso    |
|-------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 1743.00     | 1       | 4       | 5       | 6       | 7       | 45.11%  |
| 1854.10     | 1/4     | 1       | 6       | 7       | 8       | 28.88%  |
| 1965.20     | 1/5     | 1/6     | 1       | 5       | 6       | 13.73%  |
| 2076.30     | 1/6     | 1/7     | 1/5     | 1       | 8       | 9.12%   |
| 2187.50     | 1/7     | 1/8     | 1/6     | 1/8     | 1       | 3.15%   |
| Total       | 1.76    | 5.43    | 12.37   | 19.13   | 30      | 100.00% |

La Figura 40 muestra que la mayoría de la zona de estudio tiene un porcentaje alto de evaporación ya que esta en el rango de 1854.10 al 1965.20 mm al año, dejando como resultado que esta variable afectara al porcentaje final.

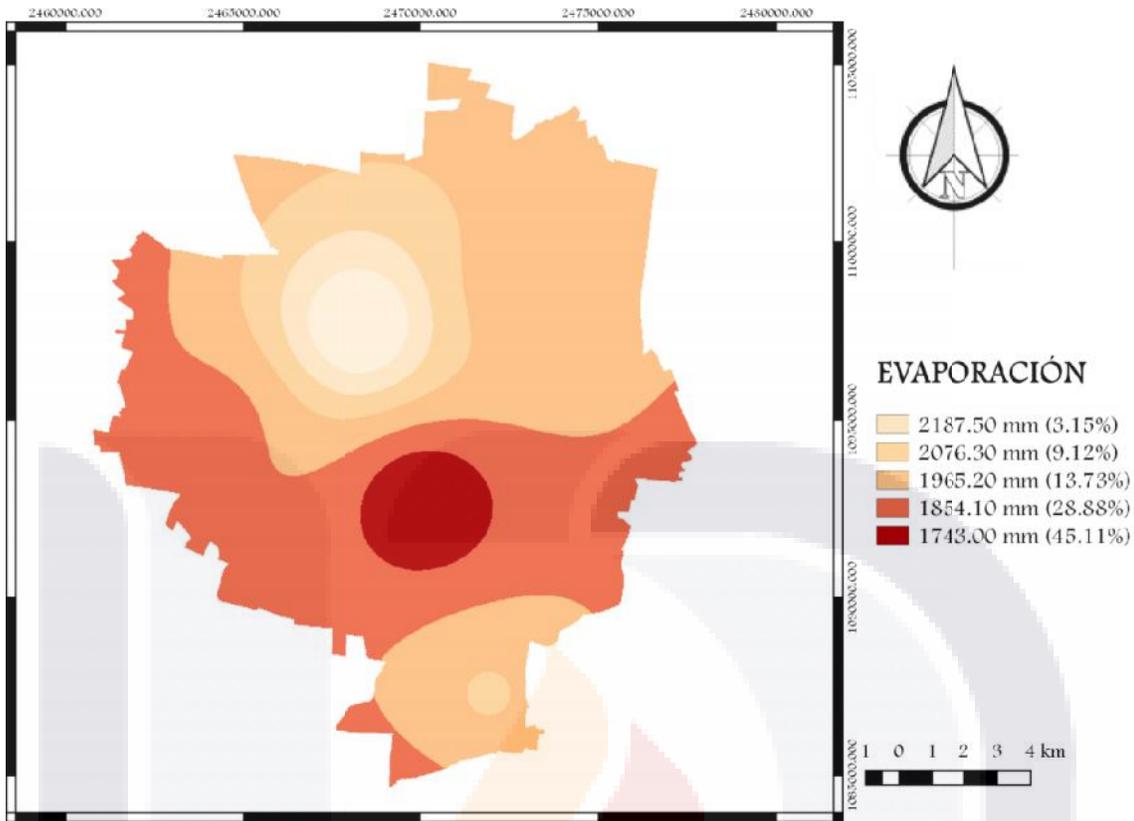


Figura 40. Reclasificación de la zona de estudio por la variable de evaporación.

#### 5.4.3 Uso de suelo

En el caso del de Uso de Suelo se tomaran en cuenta los usos de suelo habitacional, área verde, servicios, comercio, industria, educación y recreación, siendo el habitacional con el mayor porcentaje.

El área verde, recreación y agrícola, son importantes para la cuantificación de la recarga, dado su actividad estos se englobaran en una clasificación llamada Área verde, debido a que son superficies completamente descubiertas, generando un mayor porcentaje de recarga. Por su parte para las áreas de servicio, comercio e industrial, se propone adaptar un espacio para destinado al pozo de absorción con componentes que permitan la purificación del agua, en la ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.¡Error! No se encuentra el origen de la referencia., se muestra como que clasificación quedo con mayor peso.

Tabla 20. Ponderación por tipo de suelo y sus pesos, calculada a través del Proceso Analítico Jerárquico (AHP).

| Usos de Suelo | Habitacional | Área Verde | Educación | Comercial | Servicios | Industrial | Peso    |
|---------------|--------------|------------|-----------|-----------|-----------|------------|---------|
| Habitacional  | 1            | 3          | 4         | 5         | 6         | 7          | 40.06%  |
| Área Verde    | 0.33         | 1          | 4         | 5         | 5         | 7          | 26.98%  |
| Educación     | 0.25         | 0.25       | 1         | 3         | 4         | 5          | 14.28%  |
| Comercial     | 0.20         | 0.20       | 0.33      | 1         | 4         | 5          | 10.26%  |
| Servicios     | 0.17         | 0.20       | 0.25      | 0.25      | 1         | 3          | 5.34%   |
| Industrial    | 0.14         | 0.14       | 0.20      | 0.20      | 0.33      | 1          | 3.07%   |
| Total         | 2.09         | 4.79       | 9.78      | 14.45     | 20.33     | 28.00      | 100.00% |

Trasladando los datos de Proceso Analítico Jerárquico, se muestra en la Figura 41 que el uso de suelo con mayor extensión territorial es el habitacional que a su vez cuenta el mayor porcentaje de infiltración, seguido por el área verde con 26.98%, a lo que esta capa tendrá mucho impacto en el resultado final.

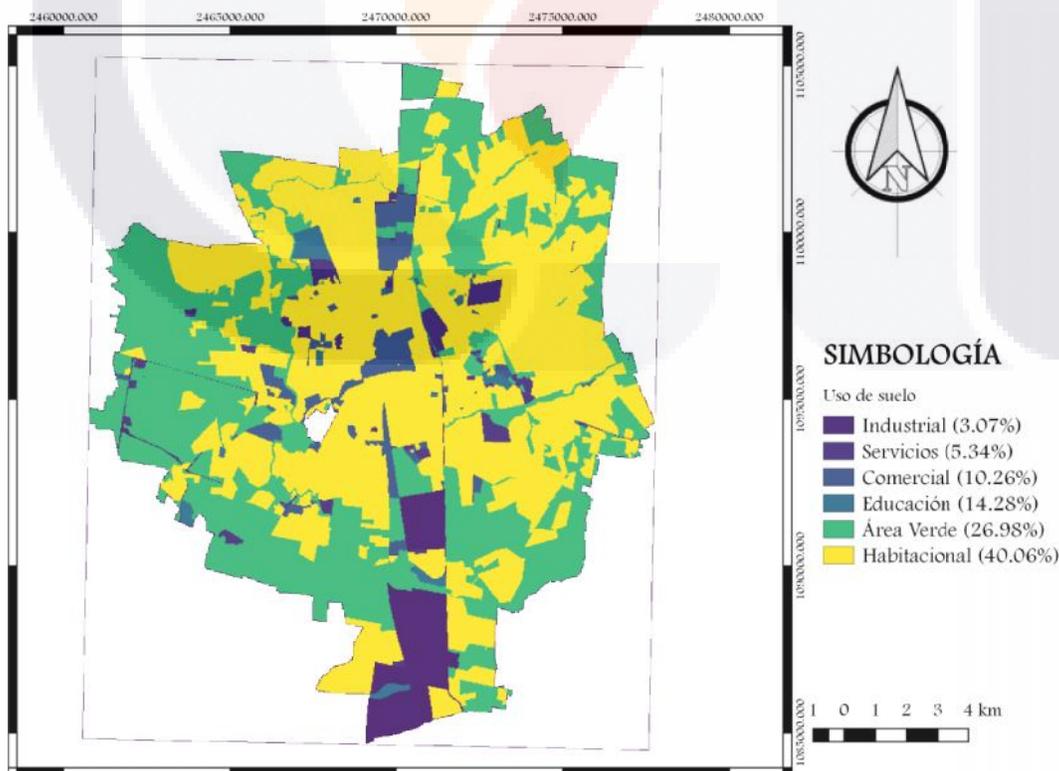


Figura 41. Reclasificación de la zona de estudio por la variable de Uso de Suelo.

5.4.4 Pendiente

Los valores de la pendiente que influyen en la Ciudad de Aguascalientes, tomando son del 0 a 14%, a lo cual se realizó una clasificación de 5 rangos, esto para poder asignarle su respectivo peso en la Tabla 21, donde la mayor ponderación es en la pendiente menos pronunciada con un peso del 50.28%.

| Crterios | 4.78 | 7.24 | 9.7  | 12.16 | 14.62 | Porcentaje |
|----------|------|------|------|-------|-------|------------|
| 4.78     | 1    | 3    | 5    | 7     | 9     | 50.28%     |
| 7.24     | 1/3  | 1    | 3    | 5     | 7     | 26.02%     |
| 9.7      | 1/5  | 1/2  | 1    | 3     | 5     | 13.44%     |
| 12.16    | 1/7  | 1/5  | 1/3  | 1     | 3     | 6.78%      |
| 14.62    | 1/9  | 1/7  | 1/5  | 1/3   | 1     | 3.48%      |
| Total    | 1.79 | 4.68 | 9.53 | 16.33 | 25.00 | 100.00%    |

Tabla 21. Ponderación de los valores de la pendiente. Fuente: Autoría Propia (2018).

En base a los resultados de la tabla anterior se realizó el proceso de reclasificación en la capa temática de pendiente, obteniendo como resultado que la pendiente predominante es de 0 a 1.45%, lo cual nos muestra que permite una infiltración, ilustrando en la Figura 42.

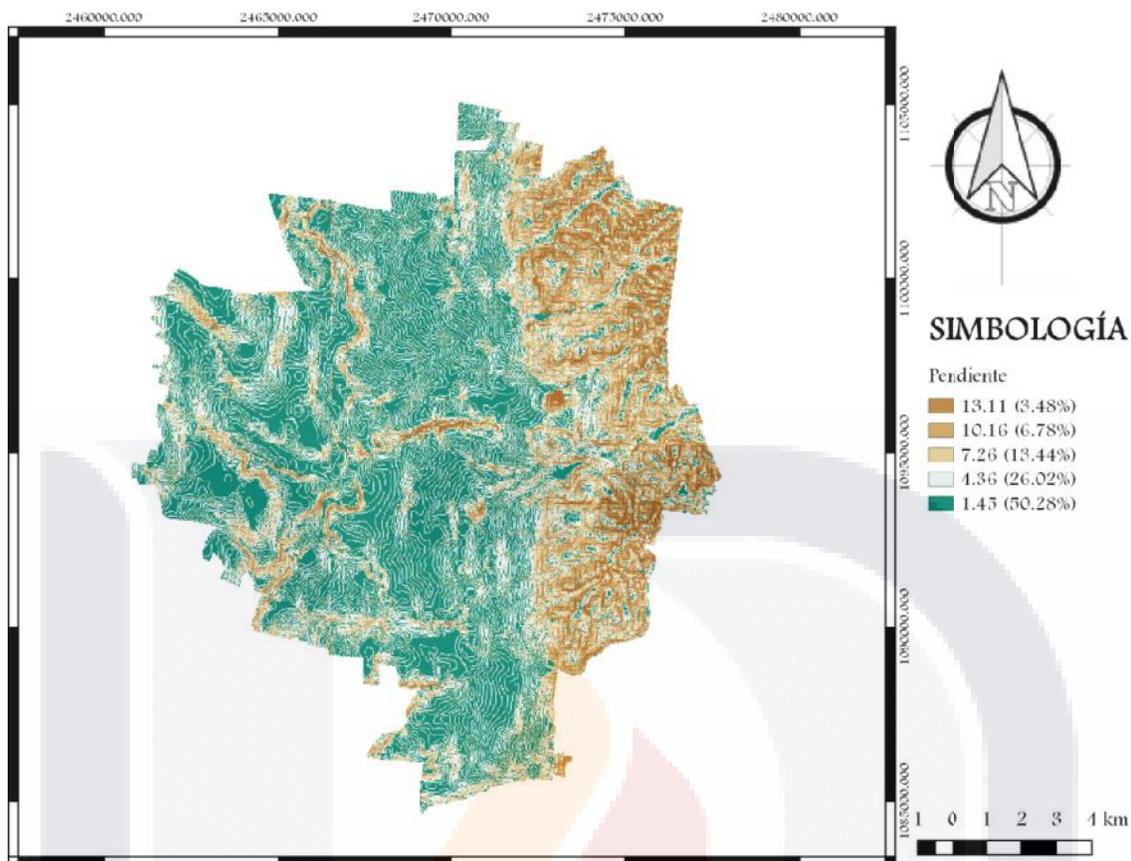


Figura 42. Reclasificación de la zona de estudio por la variable de Pendiente. Fuente: Autoría Propia (2018)

### 5.4.5 Vegetación

La vegetación es un factor que influye mucho en la infiltración, dado que las raíces de los árboles y arbustos generar grietas, por las cuales el agua fluye de manera más directa hacia el subsuelo. Dado esto se realizó la clasificación por el área de vegetación que tuvieron en las zonas, el resultado del Proceso Analítico Jerárquico se observa en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

Tabla 22. Ponderación de la variable de vegetación. Fuente: Autoría Propia (2018).

| Criterios   | Área Verde | Agricoltura | Educación | Comercio | Servicio | Hab. Residencial | Hab. Medio | Hab. Poblador | Industrial | Porcentaje |
|-------------|------------|-------------|-----------|----------|----------|------------------|------------|---------------|------------|------------|
| Área Verde  | 1          | 2           | 3         | 4        | 5        | 3                | 4          | 6             | 7          | 26.68 %    |
| Agricoltura | 1/2        | 1           | 2         | 3        | 5        | 4                | 4          | 5             | 6          | 20.97 %    |

| Criterios                | Área Verde | Agricultura | Educación | Comercio | Servicio | Hab. Residencial | Hab. Medio | Hab. Popular | Industrial | Porcentaje |
|--------------------------|------------|-------------|-----------|----------|----------|------------------|------------|--------------|------------|------------|
| Educación                | 1/3        | 1/2         | 1         | 4        | 5        | 2                | 3          | 4            | 6          | 15.19 %    |
| Comercio                 | 1/4        | 1/3         | 1/4       | 1        | 2        | 1/4              | 1/3        | 1/2          | 3          | 4.77%      |
| Servicio                 | 1/5        | 1/5         | 1/5       | 1/2      | 1        | 1/3              | 1/3        | 1/3          | 4          | 3.81%      |
| Habitacional Residencial | 1/3        | 1/4         | 1/4       | 4        | 3        | 1                | 3          | 4            | 7          | 11.98 %    |
| Habitacional Medio       | 1/4        | 1/4         | 1/3       | 3        | 3        | 11/3             | 1          | 3            | 6          | 8.56%      |

La clasificación que más destacan son Área verde con 26.68%, Habitacional Popular con 5.81%, Habitacional medio con 8.56% y Habitacional Residencial con 11.98%, lo cual se obtiene como resultado que en su mayoría la infiltración en la ciudad de Aguascalientes será alta, ilustrado en la Figura 43.

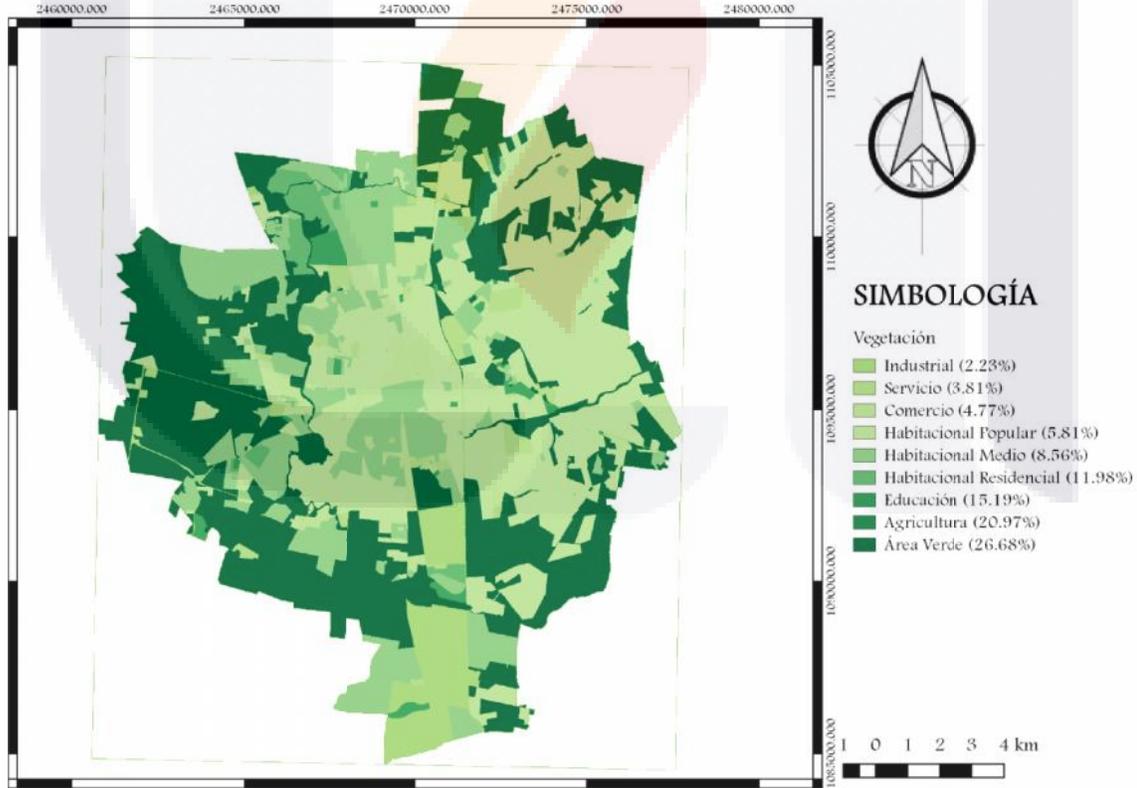


Figura 43. Reclasificación de la zona de estudio por la variable de Pendiente. Fuente: Autoría Propia (2018)

### 5.4.6 Pozo de infiltración

En referencia a los modelos numéricos realizados en el programa COMSOL, se determinó que la capa de pozos de absorción se analizaría por el área que pudiera ofrecer y de igual manera la extensión territorial con la que contara, por lo cual se obtuvo el resultado en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

Tabla 23. Ponderación de la variable de pozos de absorción.

| Usos de Suelo | Habitacional | Área Verde | Educación | Comercial | Servicios | Industrial | Peso    |
|---------------|--------------|------------|-----------|-----------|-----------|------------|---------|
| Habitacional  | 1            | 2          | 3         | 3         | 2         | 2          | 29.08%  |
| Área Verde    | 1/2          | 1          | 3         | 3         | 3         | 2          | 23.99%  |
| Educación     | 1/3          | 1/3        | 1         | 2         | 3         | 2          | 14.94%  |
| Comercial     | 1/3          | 1/3        | 1/2       | 1         | 4         | 2          | 13.48%  |
| Servicios     | 1/2          | 1/3        | 1/3       | 1/4       | 1         | 3          | 10.38%  |
| Industrial    | 1/2          | 1/2        | 1/2       | 1/2       | 1/3       | 1          | 8.14%   |
| Total         | 3.17         | 4.50       | 8.33      | 9.75      | 13.33     | 12.00      | 100.00% |

En referencia a los datos anteriores se procedió a realizar el mapa de la variable de los pozos de absorción, por lo que se puede observar en la *Figura 40*, que la mayor parte del territorio de la Ciudad de Aguascalientes cuenta con el porcentaje más alto para la infiltración hacia el acuífero.



Figura 44. Reclasificación de la zona de estudio por la variable de Pozos de Absorción.

#### 5.4.7 Relación de las capas Temáticas

Una vez obtenidas todas las capas temáticas, se procedió a realizar la relación entre las misma para la generación del mapa final.

Tabla 24. Relación de las capas temáticas.

| Crterios                         | Precipitación<br>(mm por<br>año) | Evaporación<br>(mm por<br>año) | Uso<br>de<br>Suelo | Pendiente | Vegetación | Pozo de<br>Absorción | Peso   |
|----------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|--------------------|-----------|------------|----------------------|--------|
| Precipitación<br>(mm por<br>año) | 1.00                             | 5.00                           | 0.25               | 4.00      | 3.00       | 0.50                 | 17.14% |
| Evaporación<br>(mm por<br>año)   | 0.20                             | 1.00                           | 0.17               | 3.00      | 0.20       | 0.11                 | 5.92%  |
| Uso de Suelo                     | 4.00                             | 6.00                           | 1.00               | 3.00      | 4.00       | 2.00                 | 33.70% |
| Pendiente                        | 0.25                             | 0.33                           | 0.33               | 1.00      | 0.50       | 0.33                 | 5.90%  |

| Crterios             | Precipitaci3n<br>(mm por<br>a3o) | Evaporaci3n<br>(mm por<br>a3o) | Uso<br>de<br>Suelo | Pendiente | Vegetaci3n | Pozo de<br>Absorci3n | Peso   |
|----------------------|----------------------------------|--------------------------------|--------------------|-----------|------------|----------------------|--------|
| Vegetaci3n           | 3.00                             | 5.00                           | 0.25               | 2.00      | 1.00       | 0.50                 | 15.13% |
| Pozo de<br>Absorci3n | 2.00                             | 9.00                           | 0.50               | 3.00      | 2.00       | 1.00                 | 22.21% |
| Total                | 10.45                            | 26.33                          | 2.50               | 16.00     | 10.70      | 4.44                 | 100%   |

### 5.5 Mapa final de la recarga natural de los acuíferos en el 3rea de estudio

En la Figura 45 *Figura 45* se muestra el mapa final para la factibilidad de la recarga natural del acuífero de Aguascalientes, el cual se gener3 a partir del an3lisis de las capas: precipitaci3n, evaporaci3n, uso de suelo, pendiente, vegetaci3n y pozo de absorci3n de la zona de estudio.

Las zonas con mayor influencia se ubican en la parte sur y en el centro de la zona de estudio, lo cual coincide con las zonas de mayor precipitaci3n, esto debido a que esta capa es la de mayor importancia en el proceso de an3lisis de jerarquías.

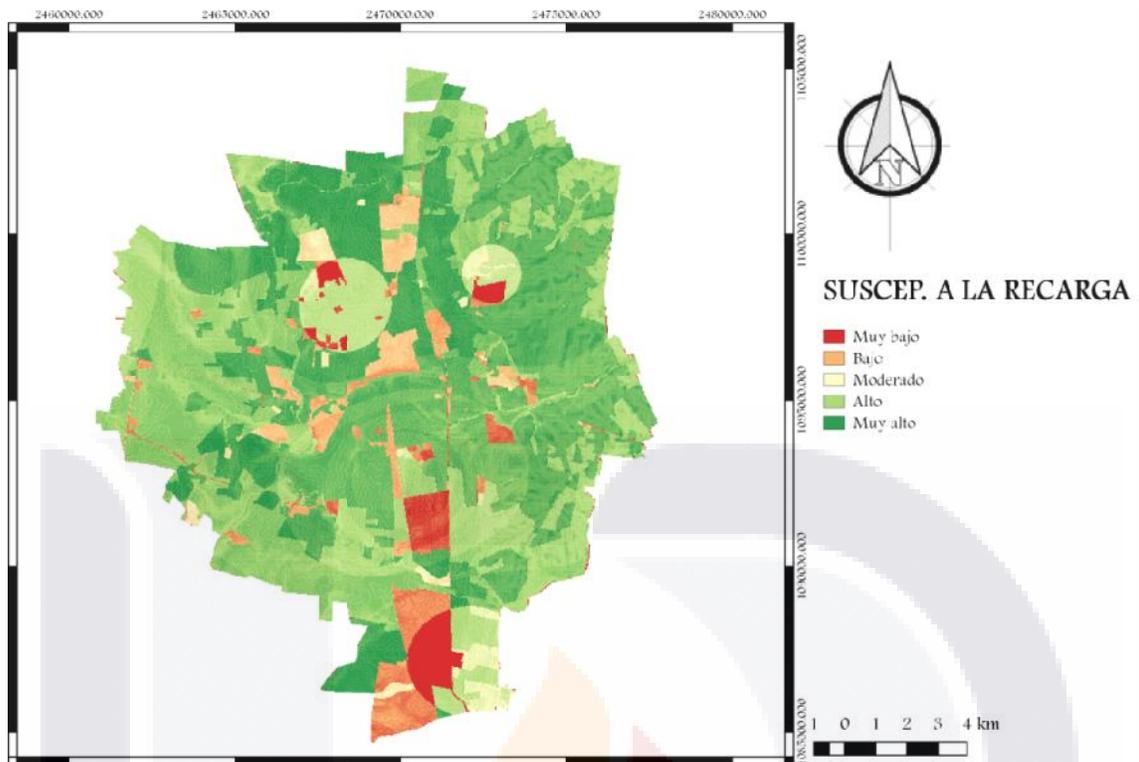


Figura 45. Mapa de factibilidad de la recarga de acuífero de Aguascalientes, calculada a través del Proceso Analítico Jerárquico (AHP).

## CAPITULO VI: DISCUCIÓN DE RESULTADOS

A continuación, se enumeran las siguientes discusiones en base al análisis ejecutado:

- J Se realizaron las diferentes capas de investigación en el programa Qgis, de las seis variables, las cuales consideran los factores de precipitación, evaporación, uso de suelo, pendiente, vegetación y pozo de infiltración.
- J La precipitación aunque se considera de alguna manera pobre de volumen, es útil para el proceso de la recarga, siempre y cuando se combine con los procesos de infiltración.
- J El uso de suelo habitacional de manera particular no consiste en un área muy grande, sobre todo cuando se trata de la vivienda unifamiliar, pero en las áreas generales tiene la mayor extensión territorial, lo que genera que este factor sea muy importante, favoreciendo la recarga natural del acuífero.
- J El diseño de los pozos de infiltración, se pueden mejorar dependiendo el uso de suelo de la zona en que se implante.
- J Como se ha visto durante todo el trabajo, la precipitación y la evaporación están directamente relacionados, ya que cuando la precipitación es escasa como es el caso de Aguascalientes, las aguas superficiales se pierden por evapotranspiración y solo se depende del agua subterránea para el uso de este recurso, por lo cual, se tienen que buscar alternativas para recuperar estos volúmenes.
- J De igual manera, con respecto a la pendiente, cuando es menos pronunciada se tendrá mayor posibilidad de infiltrar.
- J En base a los valores que se obtuvieron como resultado en el mapa final, se puede concluir que el agua de lluvia es una opción viable para la recarga del acuífero, esto generando una nueva solución alternativa que ayude a mitigar la escasez del agua en la zona, resaltando que la recarga que se analiza en este trabajo es de manera más natural.
- J El Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente, analiza los pozos y zanjas de infiltración para la recarga de los acuíferos, lo que lleva a pensar que este tema no es nuevo.

## CAPITULO VII: CONCLUSIONES

### 7.1 Conclusión General

A partir del cálculo de las variables de Precipitación, Evaporación, Uso de Suelo, Pendiente, Vegetación y Pozo de absorción, se obtuvieron las áreas más propensas para la recarga natural.

En el mapa final (Figura 45) se pueden observar cinco clasificaciones, de las cuales prevalecen los tonos en verde que indican las áreas de mayor recarga en la Ciudad de Aguascalientes, esto se vio influenciado entre otros por el proceso de precipitación, dado que en las capas anteriores pertenecen a la combinación de las zonas de mayor precipitación contando en su mayoría con zonas que oscilan de los 480.60mm a los 510.30 mm al año. Por su parte la capa de evaporación tiene una influencia menor dado que el mayor índice de evaporación está en la parte sur de la zona. Las capas de uso de suelos, el uso habitacional y área verde son las de mayor influencia. En ese aspecto, la capa de vegetación los usos de suelo que son más propensos a tenerla y facilitar la recarga son el habitacional en sus diferentes tipos, agricultura y área verde, por lo que tiene una influencia mayor al 50% en la extensión territorial, de igual manera los pozos de infiltración son más aptos para casi todos los usos de suelo, siendo mayor influencia el área verde y habitacional. Por otra parte, la capa perteneciente a la pendiente indica la zona con menor inclinación ya que va desde 1.45 hasta 4.36%.

En cambio las zonas coloreadas de rojo muestran las zonas con menos influencia para la recarga del acuífero, dado que es la combinación de la franja con menor precipitación y dado que solo hay 470.70 mm al año. En la capa de evaporación se presentan los dos mayores índices con un promedio que oscila de los 1743 a 1854 mm al año, mientras que en el mapa de uso de suelo indica que es el industrial, dada su naturaleza, es el que menos se aporta al subsuelo. La pendiente no tiene demasiada influencia, y en el mapa general solo influye un 5.90 %, por lo que no tiene gran repercusión para el proceso, aunado a lo anterior, la vegetación tampoco es muy propensa en la zona industrial, ya que se busca la pavimentación para la utilización del mayor área posible, dejando de lado la cuestión ambiental, por lo que

esta zona no influye positivamente. Por último en la capa de los pozos de infiltración las zonas comerciales e industriales se basa en los procesos que llevaran a cabo en la zona industrial, dejando hasta cierto punto a un lado el tema ambiental, por lo que las áreas destinadas a infiltración en esta zona o capa quedan desprotegidas e inútiles.

Dado que ya se obtuvieron las zonas más propicias para la recarga, se debe resaltar que no solo estas zonas deben estar protegidas, sino que cada construcción debe tener un espacio destinado a este uso, dejando en claro que se debe contar con un mantenimiento y renovación del mismo.

## 7.2 Reflexiones para mejorar la captación de agua pluvial

Visualizando la capa de la precipitación, no hay mucho que se pueda hacer para que llueva más, sin embargo, se podrían utilizar métodos para que la potencial contaminación implícita en el escurrimiento pluvial baje sus afectación y que esa agua sea de mejor calidad. En cuanto a la capa de la evaporación, en las zonas de mayor índice se podrían aplicar procedimientos para que la temperatura baje, como lo son reduciendo el área pavimentada,

En cuanto la capa de suelo, se muestra que la zona habitacional tiene la mayor influencia, por lo que se pueden hacer programas de desarrollo ambiental, en los cuales se podrían implementar técnicas para cuidado de las áreas verdes y construcción de pozos de infiltración, haciendo que este sector tome mayor influencia en la sociedad. Unido a esto, la capa de la vegetación es muy importante, ya que mientras se tenga mayor índice de vegetación, ya sean árboles, arbustos y pastos, se puede generar un suelo permeable que desarrolle una infiltración más rápida al acuífero.

Tomando como ejemplo los pozos de infiltración simulados en este trabajo, se podrían hacer mejoras en las capas en los capas del suelo y en los diferentes ambientes donde se implementarían para generar el mejor escenario posible para la recarga, de igual manera se podrían hacer mejoras en las nuevas construcciones,

como podrían ser movimiento de terracerías, para así destinar mayor superficie de área verde, o de utilización de pavimentos permeables, entre otras muchas acciones.

### 7.3 Nichos de Investigación

Esta investigación queda abierta para el desarrollo de pavimentos permeables en las zonas comerciales e industriales, generando que las áreas de infiltración sean cada vez más grandes en extensión territorial. De igual manera, se implementen zanjas de infiltración en la calles y avenidas, ya que en estas zonas es donde más se podría recolectar el agua dado que son los principales recaudadores, pensado que la mezcla de agua pluvial con las aguas negras no es la mejor alternativa, ya que como se ha visto actualmente genera problemas de inundaciones.

El desarrollo de parques ecológicos en las zonas protegidas sería una investigación de cómo se podrían implementar y utilizar las zonas destinadas a la infiltración, dado que se podrían hacer programas investigación, los cuales pretendan forjar un vínculo entre la sociedad y el medio ambiente, creando un pensamiento más ambiental para el cuidado del suelo y la vegetación, lo que implicarían menos problemas en un futuro para la obtención de un agua.

## BIBLIOGRAFÍA

- Aoki, A. M., & Sereno, R. (2006). Evaluación de la infiltración como indicador de calidad de suelo mediante un microsimulador de lluvias. *Agriscientia*, XXIII(1), 23–31.
- Balek, J. (1988). Groundwater recharge concepts. Estimation of Natural Groundwater Recharge, 3–9.
- Cabeza-Pérez, A., & González-Mejía, O. (2011). Nuevas Tecnologías Sustentables en la Arquitectura de Paisaje. Universidad Autónoma Metropolitana.
- Carretero, S., & Kruse, E. (2014). Impacto de la urbanización en la infiltración en un área costera, Argentina. *Tecnología y Ciencias del Agua*, V(6), 5–24.
- Centro Oanamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente, División de Salud y Ambiente, Organizació Panamericana de la Salud, & Organización Mundial de la Salud. (2003). Especificaciones Técnicas. Diseño de Pruebas de infiltración. UNATSABAR.
- Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente, División de Salud y Ambiente, Organización Panamericana de la Salud, & Organización Mundial de la Salud. (2003). Especificaciones Técnicas. Diseño de Pruebas de infiltración. Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación.
- Cisneros, F., Timbe, E., De Bievre, B., & Feyen, J. (2014). Utilización de la Infiltración lateral (subsuperficial) en terrenos de altas pendientes (>12%) como un método de riego alternativo. *ResearchGate*, 9.
- Escobar-Villagrán, B. S., & Palacios-Vélez, O. (2012). Análisis de la sobrexplotación del acuífero Texcoco, México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, III(2), 67–84.
- García-Velázquez, J. H. (2012). Sistema de captación y aprovechamiento pluvial para ecobarrio de la Cd. de México (Maestría en Ingeniería). Universidad Nacional Autónoma de México, Cd. de México.

- Gobierno Federal. (2008, julio). Proyecto de Norma Oficial Mexicana PROY-NOM-015-CONAGUA-2007.- Infiltración artificial de agua a los acuíferos.- Características y especificaciones de las obras y del agua. Diario Oficial de la Federación.
- González-de-Vallejo, L. I., Ferrer, M., Ortuño, L., & Oteo, C. (2002). Ingeniería Geológica (Primera, Vol. I). Madrid, España: Pearson Educación.
- Gutierrez-Bracho. (2015). Agua ¿Cuánta nos queda? Tec de Monterrey, 02, 34–43.
- Hernández-Marín, M., Guerrero-Martínez, L., Zermeño-Villalobos, A., Rodríguez-González, L., Burbey, T. J., Pacheco-Martínez, J., ... González-Cervantes, N. (2018). Spatial and temporal variation of natural recharge in the semi-arid valley of Aguascalientes, Mexico. *Hydrogeology Journal*, Springer.
- Hernández-Marín, Martín, & Burbey, T. J. (2009). The role of faulting on surface deformation patterns from pumping-induced groundwater flow (Las Vegas Valley, USA). *Springer-Verlag*, (17), 1859–1875.
- INEGI. (2015). Conociendo Aguascalientes. Recuperado de [http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/productos//prod\\_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/estudios/conociendo/702825212919.pdf](http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/productos//prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/estudios/conociendo/702825212919.pdf)
- INEGI. (2016). Conociendo Aguascalientes. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Recuperado de [http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/productos//prod\\_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/estudios/conociendo/702825212919.pdf](http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/productos//prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/estudios/conociendo/702825212919.pdf)
- Lerner, D. N. (1990). Groundwater recharge. A guide to understanding the natural recharge. *Techniques*, 99–229.
- López-Geta, J. A., Fornés-Azcoiti, J. M., Ramos-González, G., & Villarroja-Gil, F. (2009). Las Aguas subterráneas. Un Recurso natural del subsuelo (Vol. 1ra). Fundación Marcelino Botín.
- Martínez-Martínez, J. (1996). Estudio de la calidad de las aguas superficiales del Río San Pedro. *Investigación y Ciencia*, pp. 27–39.

- Mojica-Zárate, H. T., Martínez-Martínez, C. C., & Perdomo-López, M. E. (2016). Gestión Estratégica del agua a través de la praxis ecotecnológica en territorio árido de México. *Universidad y Sociedad*, 9(2), 116–122.
- Mendoza, M., Bocco, G., López-Granados, E., & Bravo, M. (2002). Implicaciones hidrológicas del cambio de la cobertura vegetal y uso del suelo: una propuesta de análisis espacial a nivel regional en la cuenca cerrada del lago de Cuitzeo, Michoacán. *Investigaciones Geográficas*, 49, 92–117.
- Mendoza-Gutiérrez, A. (2013). Introducción al uso del Software COMSOL Multiphysics (Ing. Mecánico Electricista). Universidad Veracruzana, Xalapa, Veracruz.
- Osorio-Gómez, J. C., & Orejuela-Cabrera, J. P. (2008). El proceso de análisis jerárquico (AHP) y la toma de decisiones multicriterio. Ejemplo de aplicación. *Scientia Et Technica*, XIV (39), 247–252.
- Pérez, G. (s/f). Infiltración [Investigación]. Recuperado de [http://www.ciclohidrologico.com/infiltracin\\_del\\_agua](http://www.ciclohidrologico.com/infiltracin_del_agua)
- Rodríguez-González, L. (2016). Revisión y Análisis de los factores que influyen en la recarga natural del acuífero del Valla de Aguascalientes mediante sistemas de información Geográfica (SIG) (Maestro en Ing. Civil). Universidad Autónoma de Aguascalientes, Aguascalientes, Ags.
- Rodríguez-González, 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) (Maestro en Ingeniería Civil). Universidad Autónoma de Aguascalientes, Aguascalientes.
- Saaty, T. L. (2008). Decision making with the analytic hierarchy process. *Services Sciencies*, 1(1), 83–98.
- UDEP. (s/f). Capítulo 6. Infiltración. Flujo en la zona no saturada. En *Hidrología I. Ciclo Hidrológico*.
- UNESCO. (2013a). Estrategias para Gestión de Recarga de Acuíferos en zonas semiáridas. UNESCO.

UNESCO. (2013b). Estrategias para la Gestión de Recarga de Acuíferos en las zonas semiáridas. UNESCO Division of Water Sciences.

Vélez, M., & Vélez, J. (2002). Capítulo VII. Infiltración. En Unidad Hidráulica (Vol. 1). Colombia: Universidad Nacional de Colombia.

Vélez-Otálvaro, M. V. (2004). Métodos para determinar la recarga en acuíferos, 20.

Zapata-Sierra, A., & Manzano-Agugliaro, F. (2008). Influence of six tree species on water infiltration in soil. *Agrociencia*, 42(7).





ANEXOS A

Determinación de la prioridad de las capas de estudio

Valores de clasificación de la precipitación

| Criterios | 510.3 | 500.4 | 490.5 | 480.6 | 470.7 | Total de criterios | Porcentaje |
|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|--------------------|------------|
| 510.3     | 0.353 | 0.462 | 0.333 | 0.267 | 0.273 | 1.687              | 33.74%     |
| 500.4     | 0.176 | 0.231 | 0.333 | 0.267 | 0.273 | 1.280              | 25.60%     |
| 490.5     | 0.176 | 0.115 | 0.167 | 0.267 | 0.182 | 0.907              | 18.14%     |
| 480.6     | 0.176 | 0.115 | 0.083 | 0.133 | 0.182 | 0.690              | 13.81%     |
| 470.7     | 0.118 | 0.077 | 0.083 | 0.067 | 0.091 | 0.435              | 8.71%      |
| Total     | 1     | 1     | 1     | 1     | 1     | 5                  | 100.00%    |

Valores de clasificación de la evaporación

| Criterios | 1743  | 1854.1 | 1965.2 | 2076.3 | 2187.5 | Total de criterios | Porcentaje |
|-----------|-------|--------|--------|--------|--------|--------------------|------------|
| 1743      | 0.568 | 0.736  | 0.404  | 0.314  | 0.233  | 2.256              | 45.11%     |
| 1854.1    | 0.142 | 0.184  | 0.485  | 0.366  | 0.267  | 1.444              | 28.88%     |
| 1965.2    | 0.114 | 0.031  | 0.081  | 0.261  | 0.200  | 0.687              | 13.73%     |

|        |       |       |       |       |       |       |         |
|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---------|
| 2076.3 | 0.095 | 0.026 | 0.016 | 0.052 | 0.267 | 0.456 | 9.12%   |
| 2187.5 | 0.081 | 0.023 | 0.013 | 0.007 | 0.033 | 0.158 | 3.15%   |
| Total  | 1     | 1     | 1     | 1     | 1     | 5     | 100.00% |

Valores de clasificación de la uso de suelo

| Criterios    | Habitacional | Área Verde | Educación | Comercial | Servicios | Industrial | Total de criterios | Porcentaje |
|--------------|--------------|------------|-----------|-----------|-----------|------------|--------------------|------------|
| Habitacional | 0.48         | 0.63       | 0.41      | 0.35      | 0.30      | 0.25       | 2.40               | 40.06%     |
| Área Verde   | 0.16         | 0.21       | 0.41      | 0.35      | 0.25      | 0.25       | 1.62               | 26.98%     |
| Educación    | 0.12         | 0.05       | 0.10      | 0.21      | 0.20      | 0.18       | 0.86               | 14.28%     |
| Comercial    | 0.10         | 0.04       | 0.03      | 0.07      | 0.20      | 0.18       | 0.62               | 10.26%     |
| Servicios    | 0.08         | 0.04       | 0.03      | 0.02      | 0.05      | 0.11       | 0.32               | 5.34%      |
| Industrial   | 0.07         | 0.03       | 0.02      | 0.01      | 0.02      | 0.04       | 0.18               | 3.07%      |
| Total        | 1            | 1          | 1         | 1         | 1         | 1          | 6                  | 100.00%    |

Valores de clasificación de la pendiente

| Criterios | 4.78  | 7.24  | 9.7   | 12.16 | 14.62 | Total de criterios | Porcentaje |
|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|--------------------|------------|
| 4.78      | 0.560 | 0.642 | 0.524 | 0.429 | 0.360 | 2.514              | 50.28%     |

| Criterios | 4.78  | 7.24  | 9.7   | 12.16 | 14.62 | Total de criterios | Porcentaje |
|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|--------------------|------------|
| 7.24      | 0.187 | 0.214 | 0.315 | 0.306 | 0.280 | 1.301              | 26.02%     |
| 9.7       | 0.112 | 0.071 | 0.105 | 0.184 | 0.200 | 0.672              | 13.44%     |
| 12.16     | 0.080 | 0.043 | 0.035 | 0.061 | 0.120 | 0.339              | 6.78%      |
| 14.62     | 0.062 | 0.031 | 0.021 | 0.020 | 0.040 | 0.174              | 3.48%      |
| Total     | 1     | 1     | 1     | 1     | 1     | 5                  | 100.00%    |

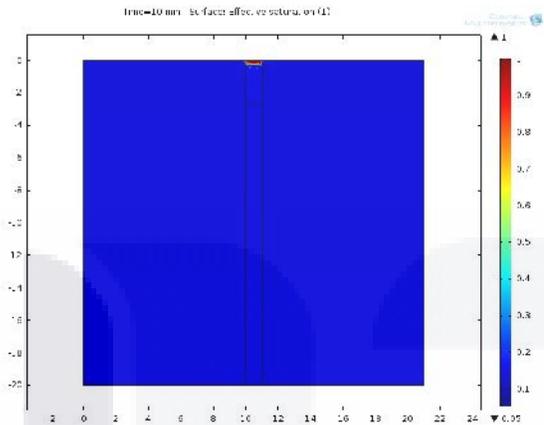
Valores de clasificación de la vegetación

| Criterios                | Área Verde | Agricultura | Educación | Comercio | Servicio | Habitacional Residencial | Habitacional Medio | Habitacional Popular | Industrial | Total de criterios | Porcentaje |
|--------------------------|------------|-------------|-----------|----------|----------|--------------------------|--------------------|----------------------|------------|--------------------|------------|
| Área Verde               | 0.31       | 0.41        | 0.39      | 0.18     | 0.18     | 0.27                     | 0.25               | 0.25                 | 0.16       | 2.40               | 26.68%     |
| Agricultura              | 0.16       | 0.20        | 0.26      | 0.14     | 0.18     | 0.35                     | 0.25               | 0.21                 | 0.13       | 1.89               | 20.97%     |
| Educación                | 0.10       | 0.10        | 0.13      | 0.18     | 0.18     | 0.18                     | 0.19               | 0.17                 | 0.13       | 1.37               | 15.19%     |
| Comercio                 | 0.08       | 0.07        | 0.03      | 0.05     | 0.07     | 0.02                     | 0.02               | 0.02                 | 0.07       | 0.43               | 4.77%      |
| Servicio                 | 0.06       | 0.04        | 0.03      | 0.02     | 0.04     | 0.03                     | 0.02               | 0.01                 | 0.09       | 0.34               | 3.81%      |
| Habitacional Residencial | 0.10       | 0.05        | 0.03      | 0.18     | 0.11     | 0.09                     | 0.19               | 0.17                 | 0.16       | 1.08               | 11.98%     |
| Habitacional Medio       | 0.08       | 0.05        | 0.04      | 0.14     | 0.11     | 0.03                     | 0.06               | 0.12                 | 0.13       | 0.77               | 8.56%      |

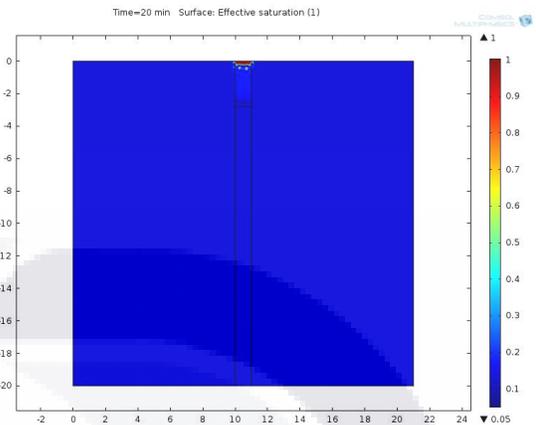
| Criterios            | Área Verde | Agricultura | Educación | Comercio | Servicio | Habitacional Residencial | Habitacional Medio | Habitacional Popular | Industrial | Total de criterios | Porcentaje |
|----------------------|------------|-------------|-----------|----------|----------|--------------------------|--------------------|----------------------|------------|--------------------|------------|
| Habitacional Popular | 0.05       | 0.04        | 0.03      | 0.09     | 0.11     | 0.02                     | 0.02               | 0.04                 | 0.11       | 0.52               | 5.81%      |
| Industrial           | 0.04       | 0.03        | 0.04      | 0.02     | 0.01     | 0.01                     | 0.01               | 0.01                 | 0.02       | 0.20               | 2.23%      |
| Total                | 1.00       | 1           | 1         | 1        | 1        | 1                        | 1                  | 1                    | 1          | 9.00               | 100.00%    |

Valores de clasificación de la pozo de absorción

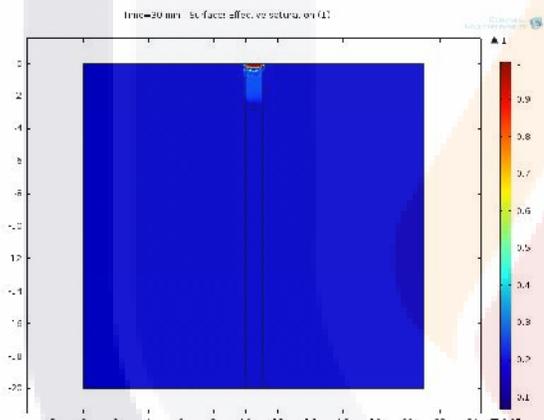
| Criterios    | Habitacional | Área Verde | Educación | Comercial | Servicios | Industrial | Total de criterios | Porcentaje |
|--------------|--------------|------------|-----------|-----------|-----------|------------|--------------------|------------|
| Habitacional | 0.32         | 0.44       | 0.36      | 0.31      | 0.15      | 0.17       | 1.74               | 29.08%     |
| Área Verde   | 0.16         | 0.22       | 0.36      | 0.31      | 0.23      | 0.17       | 1.44               | 23.99%     |
| Educación    | 0.11         | 0.07       | 0.12      | 0.21      | 0.23      | 0.17       | 0.90               | 14.94%     |
| Comercial    | 0.11         | 0.07       | 0.06      | 0.10      | 0.30      | 0.17       | 0.81               | 13.48%     |
| Servicios    | 0.16         | 0.07       | 0.04      | 0.03      | 0.08      | 0.25       | 0.62               | 10.38%     |
| Industrial   | 0.16         | 0.11       | 0.06      | 0.05      | 0.03      | 0.08       | 0.49               | 8.14%      |
| Total        | 1            | 1          | 1         | 1         | 1         | 1          | 6                  | 100.00%    |



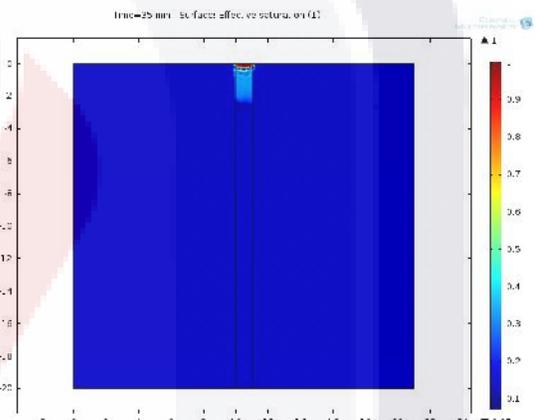
Minuto 10



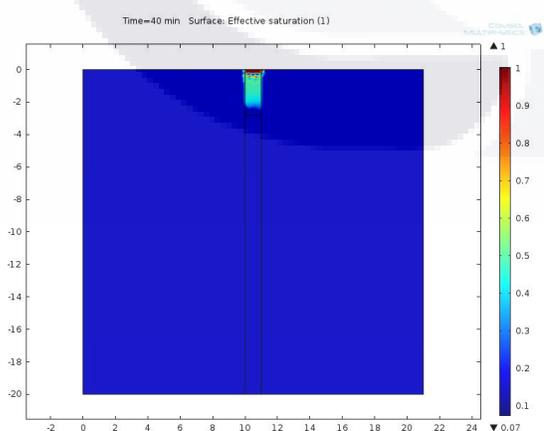
Minuto 20



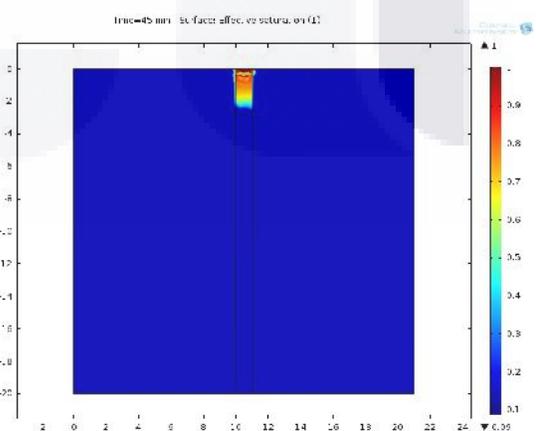
Minuto 30



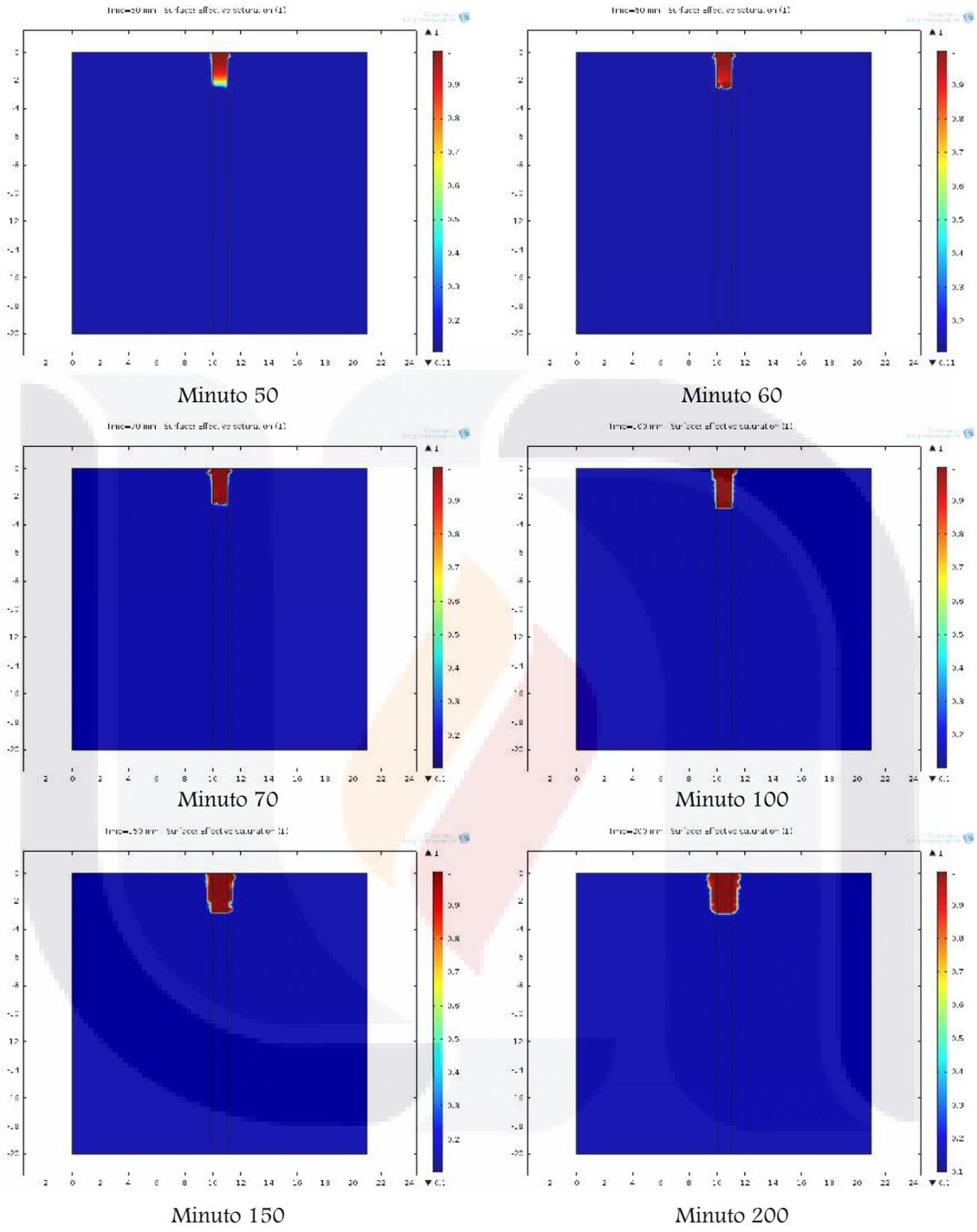
Minuto 35

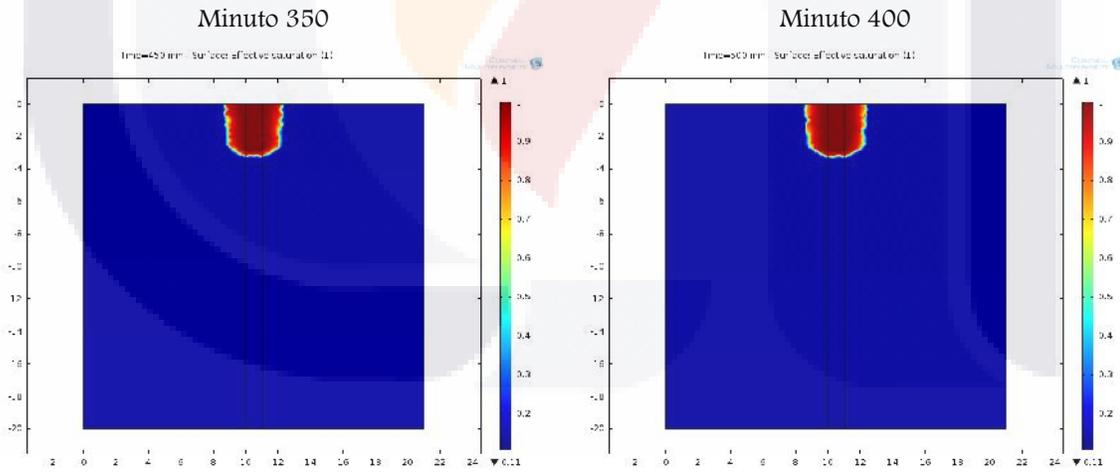
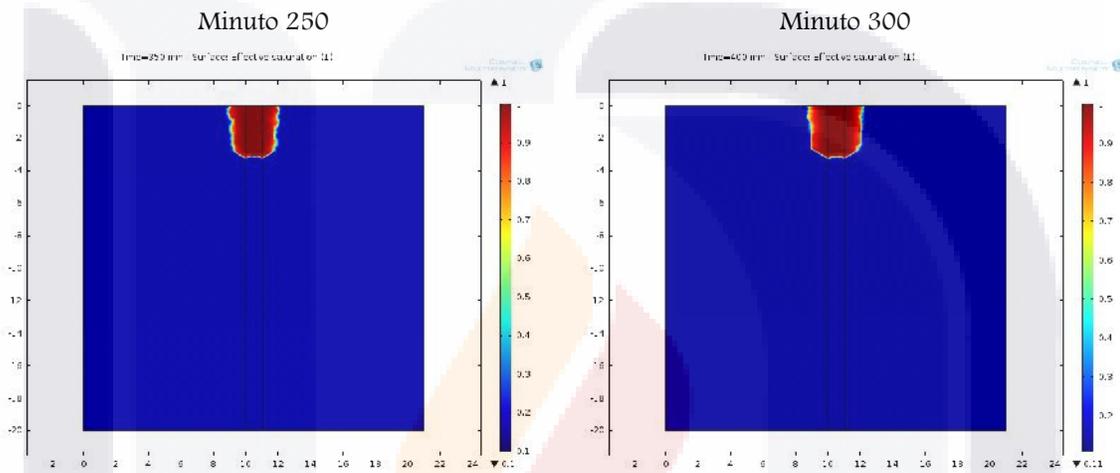
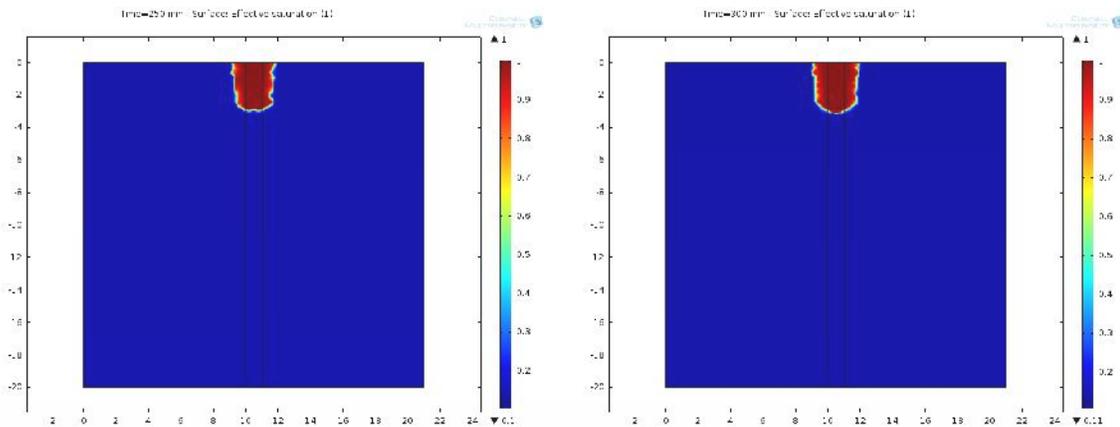


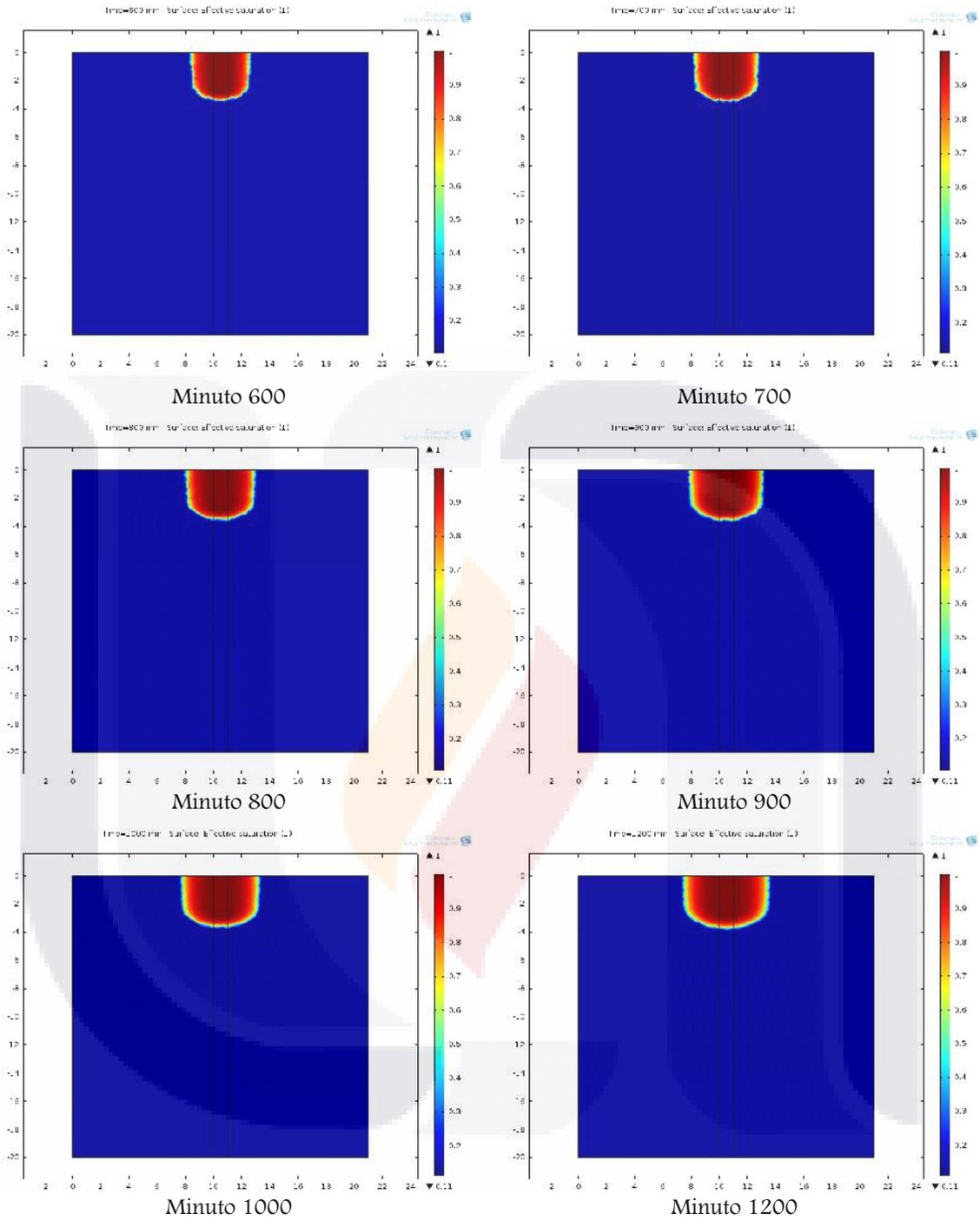
Minuto 40

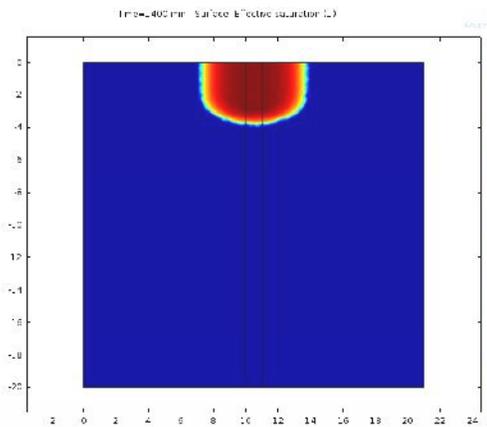


Minuto 45

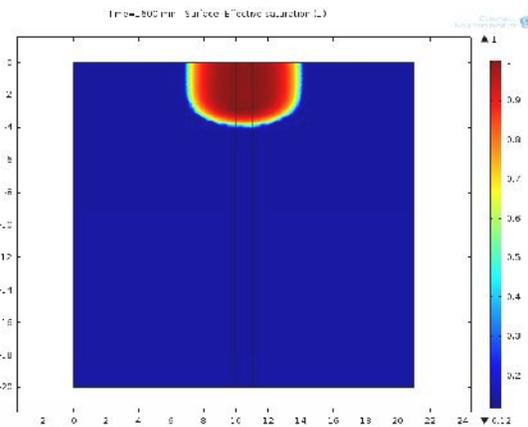




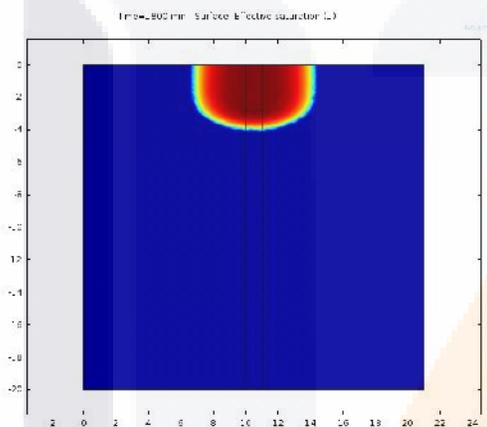




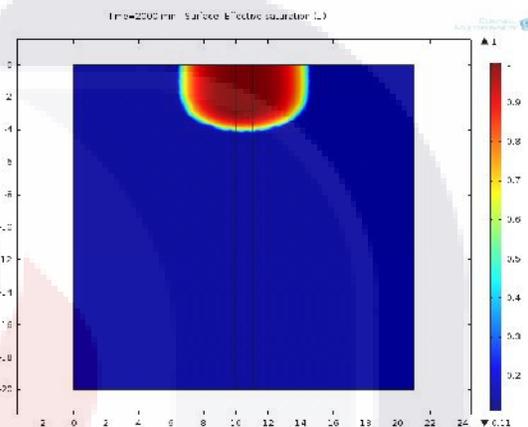
Minuto 1400



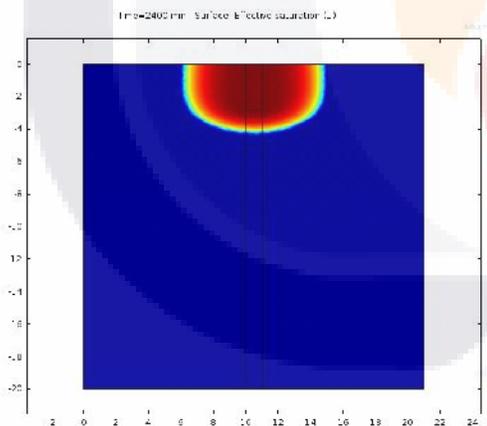
Minuto 1600



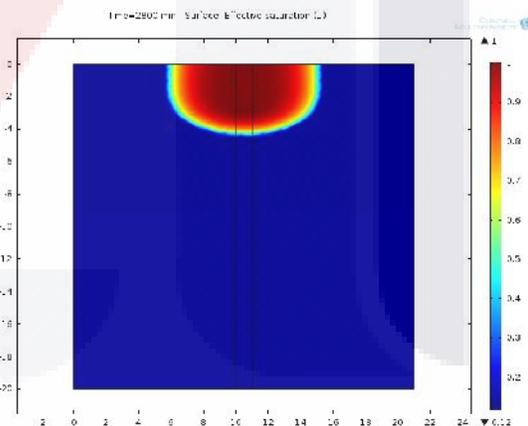
Minuto 1800



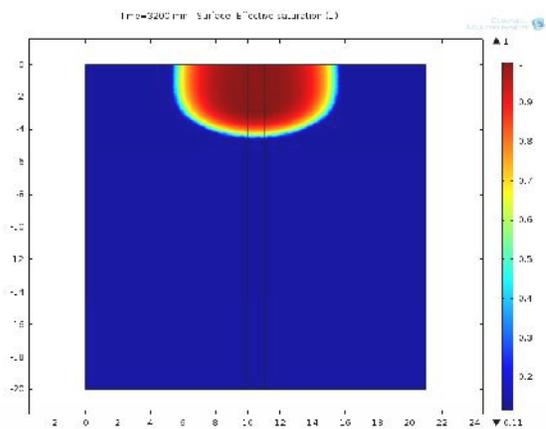
Minuto 2000



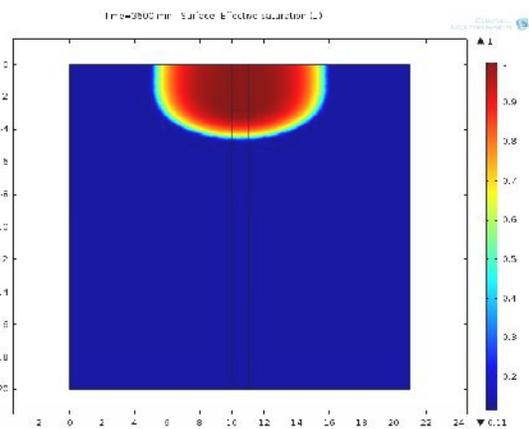
Minuto 2400



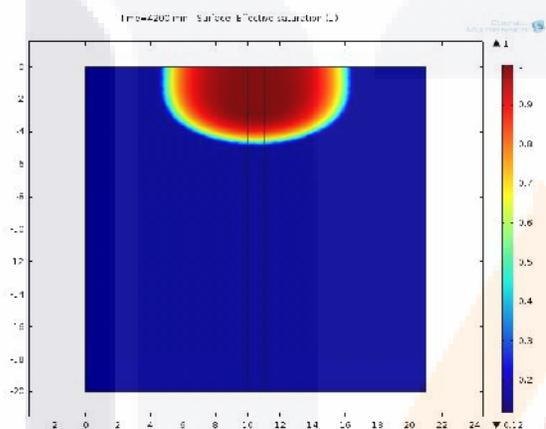
Minuto 2800



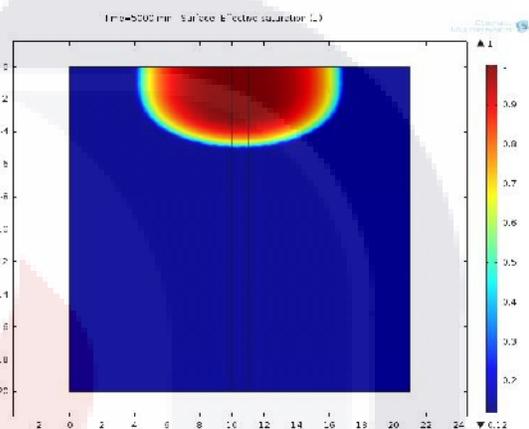
Minuto 3200



Minuto 3600



Minuto 4400



Minuto 5000