



Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
Facultad de Ingeniería
Colegio de Ingeniería Geofísica

**Mapa de vulnerabilidad del Acuífero Superior del Valle de
Puebla por invasión de aguas sulfurosas profundas**

T E S I S

PARA OBTENER EL GRADO DE
LICENCIADA EN INGENIERÍA GEOFÍSICA

PRESENTA

Tania Karen Espinoza Juárez

DIRECTORES DE TESIS:

M.C. José Castillo Román

M.C. Ignacio Muñoz Máximo

Agosto 2022



Oficio No. SAC/0361/2022

**C. Tania Karen Espinoza Juárez -201647663-
Pasante de la Licenciatura en Ingeniería
Geofísica
Presente.**

En atención al Tema de Tesis que puso Usted a consideración de la Coordinación de Área y de esta Secretaría Académica en coordinación con la Dirección de ésta Facultad de Ingeniería, dentro del marco de Titulación por Examen Profesional en línea, como medio de Titulación se dio revisión y se ha autorizado el tema denominado:

"MAPA DE VULNERABILIDAD DEL ACUÍFERO SUPERIOR DEL VALLE DE PUEBLA POR INVASIÓN DE AGUAS SULFUROSAS PROFUNDAS"

Por lo anterior hago de su conocimiento que se asigna como Asesor Interno de tema al Mtro. José Castillo Román.

Sin más por el momento, le envío la seguridad de mi consideración más distinguida.

Atentamente

"Pensar bien para vivir mejor"
H. Puebla de Z. a 26 de febrero de 2022

M. I. Angel Cecilio Guerrero Zamora
Director



M'ACGZ/M'VGL/barv
C.c.p. Archivo

Facultad
de Ingeniería

Bvd. Valsequillo y Av. San Claudio
s/n, edif. ING 4, Col. San Manuel,
Ciudad Universitaria,
Puebla, Pue. C.P. 72570
01 (222) 229 55 00 Ext. 7610

M. I. Angel Cecilio Guerrero Zamora
Director de la Facultad de Ingeniería
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
Presente.

El que suscribe: Mtro. José Castillo Román, asesor del tema de tesis:

“MAPA DE VULNERABILIDAD DEL ACUÍFERO SUPERIOR DEL VALLE DE PUEBLA POR INVASIÓN DE AGUAS SULFUROSAS PROFUNDAS”

Presentada por la C. Tania Karen Espinoza Juárez -201647663-, pasante del Colegio de Ingeniería Geofísica, y en atención al oficio No. SAC/0361/2022 con fecha de emisión 28 de febrero de 2022, me permito informar a Usted que después de haber revisado cuidadosamente el contenido temático, metodología, redacción y ortografía de la tesis correspondiente, no tengo inconveniente en autorizar la impresión de este.

Sin otro particular, le reitero la seguridad de mi más atenta y distinguida consideración.

Atentamente
“Pensar bien, para vivir mejor”
H. Puebla de Z. a 01 de marzo de 2022



Mtro. José Castillo Román
Asesor de Tema

M' JCR/BARV
C.c.p. Interesado
C.c.p. Archivo

RESUMEN

El siguiente trabajo consiste en el desarrollo de una propuesta de un mapa de vulnerabilidad, que permita identificar zonas potencialmente vulnerables a contaminación por la invasión aguas sulfurosas profundas al Acuífero Superior del Valle de Puebla (ASVP, en adelante) dentro de los límites de la subcuenca Alto Atoyac.

Debido a que en el último siglo las tasas de bombeo de agua han ido en incremento para satisfacer las demandas de una creciente población y sus distintas actividades, se ha generado un desbalance hídrico que ha conllevado el creciente abatimiento del ASVP. Esto a la vez ha generado la migración de múltiples compuestos químicos que se hallan disueltos en el agua de unidades hídricas más profundas a la superficie y que difieren de su composición química.

El mapa muestra una clasificación de zonas con alta, media y baja vulnerabilidad a contaminación por sulfuros, debido a la fuerte relación que tiene este compuesto con los conos de abatimiento y la geomorfología del sistema acuífero.

Para la construcción del mapa de vulnerabilidad se acoplaron distintas capas temáticas que incluyen variables geológicas e hidrogeológicas en una lógica de método multicriterio regido por dos matrices de pesos ponderados empleando software GIS para la integración de resultados y MODFLOW 5 para el modelamiento del flujo regional subterráneo del sistema acuífero. Así mismo cabe mencionar que el modelo matemático del flujo regional integra las 3 unidades hidrogeológicas productivas del ASVP, que se clasifican como: Acuífero Superior (Libre), Acuífero Medio (Semiconfinado) y Acuífero Inferior (confinado).

Dicho esto, el trabajo presente se realizó con la intención de que las autoridades correspondientes tengan una herramienta más en la cual basarse para generar un nuevo plan administrativo que revierta el daño de forma progresiva, el cual regule la extracción del recurso hídrico.

Palabras clave: *Acuífero, modelo, nivel estático, sulfuros, MODFLOW.*

ABSTRACT

The following work consists of the development of a proposal for a vulnerability map, which allows identifying areas potentially vulnerable to contamination by the invasion of deep sulphurous waters to the Superior Aquifer of the Puebla Valley (ASVP, hereinafter) within the limits of the sub-basin Alto Atoyac.

Due to the fact that in the last century the water pumping rates have been increasing to satisfy the demands of a growing population and its different activities, a water imbalance has been generated that has led to the growing decline of the ASVP. This in turn has generated the migration of multiple chemical compounds that have dissolved in the water from deeper water units to the surface and that differ in their chemical composition.

The map shows a classification of areas with high, medium and low vulnerability to sulfide contamination, due to the strong relationship that this compound has with the abatement cones and the geomorphology of the aquifer system.

For the construction of the vulnerability map, different thematic layers were coupled that include geological and hydrogeological variables in a logic of multicriteria method governed by two weighted weight matrices using GIS software for the integration of results and MODFLOW 5 for the modeling of the regional underground flow of the aquifer system. Likewise, it is worth mentioning that the mathematical model of the regional flow integrates the 3 productive hydrogeological units of the ASVP, which are classified as: Upper Aquifer (Free), Middle Aquifer (Semi-confined) and Lower Aquifer (confined).

That said, the present work was carried out with the intention that the corresponding authorities have one more tool on which to base themselves to generate a new administrative plan that progressively reverses the damage, which regulates the extraction of water resources.

Keywords: *Aquifer, model, static level, sulfides, MODFLOW.*

AGRADECIMIENTOS

A mis directores de tesis, el M.C. Ignacio Muñoz Máximo y el M.C. José Castillo Román, por compartirme sus conocimientos, experiencia y consejos, a lo largo de este trabajo y de mi vida universitaria.

A los miembros del cuerpo sinodal, M.C. José Luis González Guevara y M.C. Isaac Raúl Soriano Garibo, por la revisión de este trabajo, además de sus sugerencias y valiosos puntos de vista para mejorarlo.

A mi familia, en especial a mis padres por su paciencia, apoyo, motivación y por enseñarme a defender mis sueños a pesar de las adversidades, los amo infinitamente.

A mi hermana, por escucharme y por estar presente en todo momento, sobre todo cuando más lo necesito.

A Luis, gracias por confiar en mí y por motivarme a buscar siempre mi felicidad.

Índice general

| | |
|--|-----------|
| 1. INTRODUCCIÓN | 1 |
| 1.1. Planteamiento del problema | 1 |
| 1.2. Objetivo general | 1 |
| 1.3. Objetivos específicos | 2 |
| 1.4. Hipótesis | 2 |
| 2. ANTECEDENTES | 3 |
| 2.1. Antecedentes de modelos matemáticos del ASVP | 3 |
| 2.2. Antecedentes de estudios geoquímicos | 3 |
| 2.2.1. Clasificación geoquímica del agua del ASVP | 4 |
| 3. CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO | 5 |
| 3.1. Delimitación y ubicación geográfica | 5 |
| 3.2. Características fisiográficas | 6 |
| 3.3. Características hidrográficas e hidrogeológicas | 6 |
| 3.4. Condiciones climáticas | 7 |
| 3.5. Uso del suelo | 8 |
| 3.6. Modelo geológico | 8 |
| 3.6.1. Estratigrafía | 8 |
| 3.6.2. Modelo Estructural | 12 |
| 3.6.3. Modelo conceptual del ASVP | 13 |
| 4. MARCO TEÓRICO | 14 |
| 4.1. Vulnerabilidad | 14 |
| 4.2. Método multicriterio | 16 |
| 4.3. Hidrogeología de aguas subterráneas | 17 |
| 4.4. Parámetros hidrogeológicos | 17 |
| 4.4.1. Permeabilidad Intrínseca | 18 |
| 4.4.2. Conductividad hidráulica | 18 |
| 4.4.3. Almacenamiento específico | 18 |
| 4.4.4. Rendimiento específico | 19 |
| 4.4.5. Conductancia | 19 |

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 4.4.6. | Cálculo de la Evapotranspiración real | 19 |
| 4.4.7. | Tasa de recarga | 20 |
| 4.5. | Ley de Darcy | 20 |
| 4.6. | Fundamentos teóricos del programa MODFLOW | 21 |
| 4.6.1. | Método de diferencias finitas | 21 |
| 4.6.2. | Discretización en MODFLOW | 22 |
| 4.6.3. | Ecuación de flujo con diferencias finitas | 22 |
| 4.7. | Percepción remota | 23 |
| 4.7.1. | Imágenes satelitales | 23 |
| 4.8. | Sistemas de Información geográfica (SIG) | 25 |
| 4.8.1. | Aeromagnetismo | 26 |
| 5. | METODOLOGÍA Y PROCESAMIENTO | 29 |
| 5.1. | Metodología general | 29 |
| 5.1.1. | Capa de concentraciones de SO ₄ | 29 |
| 5.1.2. | Capa de abatimiento | 30 |
| 5.1.3. | Capa de anomalías magnéticas: | 31 |
| 5.1.4. | Capa de geología: | 31 |
| 5.1.5. | Capa de NDVI: | 32 |
| 5.1.6. | Capa de gradiente hidráulico: | 33 |
| 5.2. | Procesamiento de datos | 36 |
| 5.2.1. | Abatimiento | 36 |
| 5.2.2. | Concentración de SO ₄ | 38 |
| 5.2.3. | Anomalías magnéticas | 39 |
| 5.2.4. | Modelo matemático de flujo regional | 42 |
| 6. | RESULTADOS Y DISCUSIÓN | 47 |
| 6.1. | Capas temáticas y reclasificación | 47 |
| 6.2. | Mapa de vulnerabilidad | 49 |
| 7. | CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | 51 |
| 8. | REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 52 |
| 9. | ANEXOS | 57 |
| 9.1. | ANEXO A. Espectro Radial de Potencia. | 57 |
| 9.2. | ANEXO B. Gráfica del espectro Radial de Potencia. | 57 |
| 9.3. | ANEXO C. Niveles estáticos y abatimiento. | 58 |
| 9.4. | ANEXO D. Caudales de pozo. | 1 |
| 9.5. | ANEXO E. Datos de precipitación acumulada anual 2002 (IMERG). | 1 |

| | |
|---|---|
| 9.6. ANEXO F.Datos de temperatura media anual 2002 (AIRIS). | 1 |
| 9.7. ANEXO G.Evidencias fotográficas. | 1 |

Índice de figuras

| | | |
|-------|---|----|
| 3.1. | Localización de la subcuenca Alto Atoyac. Datos extraídos de INEGI (2019). | 5 |
| 3.2. | Hidrografía de la subcuenca Alto Atoyac. Tomado y adaptado de INEGI (2010). | 6 |
| 3.3. | Características de las unidades hidrogeológicas que conforman el sistema acuífero Alto Atoyac - Valle de Puebla. Tomado y adaptado de Velazquez O. (2007). | 7 |
| 3.4. | Mapa geológico del Acuífero del Valle de Puebla- Alto Atoyac con secciones transversales. Tomado y adaptado de Carta geologico-minera E14-2 (2002) y datos de campo . | 9 |
| 3.5. | Columna cronoestratigráfica de la subcuenca del Alto Atoyac- Acuífero del Valle de Puebla. Muñoz Máximo I. Espinoza Juárez T. 2022, en preparación. | 10 |
| 3.6. | Sección transversal A – A', de izquierda a derecha recorre el estado de Tlaxcala y Puebla. Muñoz Máximo I. Espinoza Juárez T. 2022, en preparación. | 10 |
| 3.7. | Sección transversal B – B', abarca las localidades de Santa Ana Xalmimilulco y Santa María Xonacatepec. Muñoz Máximo I. Espinoza Juárez T. 2022, en preparación. . . | 11 |
| 3.8. | Sección transversal C – C', de izquierda a derecha abarca las localidades de San Andrés Calpan hasta llegar a Amalucan. Muñoz Máximo I. Espinoza Juárez T. 2022, en preparación. | 11 |
| 3.9. | Mapa de distribución de fallas maestras en el sistema acuífero Alto Atoyac- Valle de Puebla. Tomado y adaptado de Lermo Samaniego (2006). | 12 |
| 3.10. | a) Modelo conceptual del Acuífero del Valle de Puebla – Alto Atoyac, construido con las secciones A – A' y B – B'. b) Unidades hidrológicas propuestas para dichos cortes geológicos de la zona de estudio. Muñoz Máximo I. Espinoza Juárez T. 2022, en preparación.. | 13 |

| | |
|---|----|
| 3.11. a) Modelo conceptual del Acuífero del Valle de Puebla – Alto Atoyac, construido con las secciones A – A’ y C – C’. b) Unidades hidrológicas propuestas para dichos cortes geológicos de la zona de estudio. Muñoz Máximo I. Espinoza Juárez T. 2022, en preparación. | 13 |
| 4.1. Términos hidrogeológicos usados en la vulnerabilidad y riesgo de acuíferos. Tomado y adaptado de Aguilar Duarte et al. (2013). | 15 |
| 4.2. Clasificación de algunos métodos multicriterio por tipo de variable. Tomado y adaptado de Grajales Q. <i>et. al.</i> (2013); Romero B. <i>et. al.</i> (2018); Toscana L. <i>et.al.</i> (2013). | 16 |
| 4.3. Representación gráfica de la ley de Darcy. Tomada y adaptada de Delleur, J. W. (2006). | 20 |
| 4.4. Representación gráfica del método de discretización por diferencias finitas para un modelo tridimensional. Tomado y adaptado de Cruces de Abia (2007). | 22 |
| 4.5. Representación gráfica de la ecuación de flujo por diferencias finitas para un modelo tridimensional. Tomado y adaptado de Cruces de Abia (2007). | 23 |
| 4.6. Diagrama que ilustra el funcionamiento de un SIG. Información tomada y adaptada de Grajales Q. (2013). | 25 |
| 4.7. Valores de Susceptibilidad magnética para rocas y minerales comunes. Tomado y adaptado de P. Hunt, 1995. | 28 |
| 4.8. Rangos de valores medios de susceptibilidad magnética de algunos tipos de rocas más comunes (W.Lowrie 1997). | 28 |
| 5.1. Matriz de pesos ponderados de las unidades litológicas que conforman el sistema acuífero. Espinoza Juárez T. (2022), en preparación. Simbología: EVAP. = Evaporitas, AL= Aluvión, LAC= Lacustre, P. AND= Pórfido Andesítico, A-D-B= Andesita-Dacita-Basalto, A-B= Andesita-Basalto, AND= Andesita, A-D= Andesita-Dacita, T.A-A= Toba Andesítica-Andesita, T.D/C= Toba Dacítica del Cuaternario, T. BLS= Tobas grupo Balsas, T.A-A= Toba Andesítica-Andesita, LHR.T.AND= Lahar de Toba Andesítica, TR= Travertino, CLZ= Caliza. | 32 |
| 5.2. Características y resumen de los datos que se emplearon para la construcción del modelo matemático. | 34 |
| 5.3. Tabla de criterios en los que se basaron diversos autores para sus modelos del ASVP. | 34 |

| | |
|---|----|
| 5.4. Matriz de pesos ponderados de las capas temáticas ASVP. Espinoza Juárez T.(2022), en preparación. Simbología: SO ₄ = Concentraciones de SO ₄ , CRG_HD= Cargas hidráulicas, ABA= Abatimiento, AMG= Aeromagnetismo, GEO= Geología, NDVI= Índice de Vegetación Normal. | 35 |
| 5.5. Evolución de niveles estáticos 2002 - 2026. Espinoza Juárez T. (2022), en preparación. | 36 |
| 5.6. Simulación de evolución de abatimiento, validación de datos del ASVP. a) Datos reales de abatimiento de 100 pozos, con un rango de 0 a 47. 55 m. b) Datos interpolados de abatimiento, con un rango de 0 a 37 m. Espinoza Juárez T. (2022), en preparación. | 37 |
| 5.7. Escenario predictivo final (2002 - 2026), validación de datos de abatimiento del ASVP. a) Datos reales de abatimiento de 100 pozos, con un rango de 0 a 160.8 m. b) Datos interpolados de abatimiento, con un rango de 2 a 105 m. c) Datos de abatimiento simulados en MODFLOW a partir de caudales de 95 pozos, con un rango de 4 a 122 m. Espinoza Juárez T. (2022), en preparación. | 37 |
| 5.8. Validación de datos de concentración de SO ₄ del ASVP. a) Datos reales, con un rango de 0.19 - 794 mg/L. b) Datos interpolados, con un rango de 0 - 1311 mg/L. Datos obtenidos de INEGI (2017) y Garfias (2009. | 38 |
| 5.9. Comparación de datos de muestras de pozo de SO ₄ de INEGI (2017), Jaime Garfias (2009) y Espinosa (2020). Espinoza Juárez T. (2022), en preparación. | 38 |
| 5.10. a) Mapa de anomalía magnética de campo total. b) Mapa de anomalía magnética reducida al polo .Datos procesados de la Carta Aeromagnética E14-2 (2007), SGM. | 39 |
| 5.11. a) Mapa de anomalía regional. b) Mapa de anomalía residual. Datos procesados de la Carta Aeromagnética E14-2 (2007), SGM. | 39 |
| 5.12. a) Mapa de gradiente horizontal. b) Mapa de señal analítica. Datos procesados de la Carta Aeromagnética E14-2 (2007), SGM. | 40 |
| 5.13. a) Mapa de susceptibilidad magnética. b) Mapa primera derivada vertical. Datos procesados de la Carta Aeromagnética E14-2 (2007), SGM. | 40 |

| | |
|---|----|
| 5.14. Gráfica de Espectro radial de potencia. Eje y=lnP vs eje x=Longitud de onda. Datos extraídos de Carta Aeromagnética E14-2 (2007), SGM. | 41 |
| 5.15. Validación de datos aeromagnéticos. Datos extraídos de la Carta Aeromagnética E14-2 (2007), SGM y Lermo Samaniego (2006). | 41 |
| 5.16. Mapa de evapotranspiración real calculada en m/s. Datos extraídos de IMER y AIRIS (2002). | 44 |
| 5.17. Mapas de cargas hidráulicas simuladas a través del tiempo, resultado de modelo del flujo regional. a) Mapa de cargas hidráulicas del primer mes del 2002, b) Mapa de cargas hidráulicas que abarca el periodo de 2018 – 2016. Espinoza Juárez (2022), en preparación. | 46 |
| 5.18. Puntos de observación asignados para el mapa de Cargas hidráulicas. Espinoza Juárez (2022), en preparación. | 46 |
| 6.1. Capas temáticas correspondientes a las cinco variables seleccionadas respectivamente. Espinoza Juárez T. (2022), en preparación. | 47 |
| 6.2. Reclasificación de las escalas de las seis capas temáticas en categorías que van del 1-3. Espinoza Juárez T. (2022), en preparación. | 48 |
| 6.3. Mapa de vulnerabilidad del ASVP, construido a partir de la suma de semáforos de las seis variables involucradas acorde a la matriz de pesos ponderados. Espinoza Juárez T. (2022), en preparación. | 50 |
| 9.1. Talud de ladera con rocas meteorizadas en el cerro de Xicotécatl (Tlaxcala) . Espinoza Juárez T. (2022) | 1 |
| 9.2. Depósitos de arena con granulometría variada la cual es evidencia de presencia de un antiguo río en cerro de Xicotécatl (Tlaxcala). Espinoza Juárez T. (2022) | 1 |
| 9.3. Derrame basáltico con vista hacia el escarpe de falla en cerro de Xicotécatl (Tlaxcala). Espinoza Juárez T. (2022) | 2 |
| 9.4. Secuencia de estratos intercalados de arenas con granulometría variada y tobas basálticas en el cerro de Xicotécatl (Tlaxcala). Espinoza Juárez T. (2022) | 2 |

| | | |
|------|--|---|
| 9.5. | Carbonatos con plegamiento intenso y presencia de fracturas, y fallas de tipo rotacional (vetas sigmoidales y en echelon); rocas calizas de color grisáceo en la parte inferior y travertinos de color hueso en la parte superior. Arco Oriente Periférico (Puebla). Espinoza Juárez T. (2022) . | 3 |
| 9.6. | Pliegue tumbado de composición carbonatada; rocas calizas de color grisáceo en la parte inferior y travertinos de color hueso en la parte superior. Arco Oriente Periférico (Puebla). Espinoza Juárez T. (2022) | 3 |

1. INTRODUCCIÓN

En este trabajo se planteó llegar a la construcción de un mapa de vulnerabilidad del ASVP a escala regional, lo cual implicó considerar múltiples variables, mismas que influyen en el balance hídrico de la cuenca. Se consideraron datos de pozos, imágenes satelitales, datos geofísicos, datos químicos y datos de reconocimiento geológico de campo; esta información fue procesada por diferentes programas los cuales se mencionarán en el apartado correspondiente.

El balance hídrico refleja las entradas y salidas en un estado de equilibrio, el cual se rige por variables como el clima, la geología, el uso del suelo, la composición química de las unidades hidrológicas, etc. Por lo tanto, llevar a cabo el modelo de cuenca resulta un trabajo laborioso y que requiere de suma atención en cada uno de los parámetros que se integren en el.

Estos modelos son fundamentales para poder determinar el equilibrio de la cuenca o si por el contrario se encuentra en un estado crítico (desequilibrio), lo que permitirá tener un concepto general de como se comporta el flujo regional a través de las unidades que conforman el sistema acuifero, esto mismo servirá como impulso para llegar a una evaluación de su estado actual.

El ASVP es uno de los acuíferos en riesgo de México, ya que se encuentra sometido a condiciones de abatimiento, debido al inadecuado aprovechamiento del agua en la región ya que no existe un uso sustentable y responsable del recurso. Por lo tanto, comenzar por la planeación de una estrategia que permita la recuperación paulatina del acuífero es el primer paso para poder evitar este escenario catastrófico que no tardará en llegar a menos que se implementen acciones. Dicho lo anterior, el mapa obtenido puede aportar información que sirva como base o complemento de algún plan administrativo del agua.

1.1. Planteamiento del problema

De acuerdo con Flores Márquez *et al.* (2006) “Se sabe que el continuo y excesivo bombeo de agua ha generado un abatimiento progresivo del Acuífero superior del Valle de Puebla, dando lugar al ascenso de aguas sulfurosas y enriquecidas en boro, que se han asociado al acuífero profundo”. Esta situación hasta la fecha no ha cambiado y en consecuencia el acuífero no ha tenido un periodo de recuperación del balance hídrico, por lo que el agua de buena calidad que se extrae de los pozos de agua está siendo contaminada. De igual manera estas acciones han repercutido en la generación de hundimientos como es el caso del “socavón” en el municipio de Juan C. Bonilla, poniendo en riesgo a la población aledaña al mismo.

1.2. Objetivo general

Construir un mapa de vulnerabilidad por migración de aguas sulfurosas profundas al ASVP, a partir de la recopilación, procesamiento y consolidación de la información requerida para la simulación de un escenario que abarca del 2002 al 2026, mismo que determinará zonas con alta, media y baja vulnerabilidad a contaminación natural.

1.3. Objetivos específicos

- Procesar la información recabada con ayuda de múltiples programas (MODFLOW 5, GRASS GIS, QGIS, SAGA GIS , MagPick, Oasis Montaj, Surfer e Inkscape) para construir capas temáticas de concentraciones de sulfato(SO_4), abatimiento del acuífero, cargas hidráulicas, mapa de anomalías magnéticas, geología e Índice de Vegetación Normal(NDVI).
- Reclasificar las escalas de las capas temáticas bajo el método multicriterio regido por matrices de pesos ponderados, para facilitar la superposición de los mapas.
- Integrar los semáforos de las respectivas capas temáticas a través de álgebra de mapas y GIS para obtener el mapa de vulnerabilidad final.

1.4. Hipótesis

Se espera que el mapa de vulnerabilidad exponga la distribución del contaminante del ASVP en función del flujo regional, geología, abatimiento y estrés hídrico, para comprender el mecanismo de ascenso de aguas sulfurosas y proponer su posible origen.

2. ANTECEDENTES

Mooser *et al.* (1996) a partir del mapa de Geología y Tectónica de las cuencas de México, Toluca y Puebla realizado en colaboración con CFE, es que se comenzó a tener un concepto claro de las unidades hidrogeológicas que conforman el sistema acuífero. El trabajo de Mooser fue la base para muchos trabajos, incluyendo el de Geotecnología (1997), a partir del cual se desarrolló el primer modelo conceptual del Sistema Acuífero del Valle de Puebla.

Así mismo CONAGUA ha llevado a cabo trabajos de prospección eléctrica a través de la empresa Geotecnología S. A.(1997) y gracias a su archivo técnico constituido por los censos y conteos en la zona de estudio es como se conoce la naturaleza del incremento de la extracción de agua del ASVP.

2.1. Antecedentes de modelos matemáticos del ASVP

Flores Márquez *et al.* (2006) realizó un modelo tridimensional de flujo y transporte del agua subterránea en MODFLOW y MT3D usando datos geofísicos y químicos de sólidos totales disueltos, obteniendo como resultado que entre los años 1973 y 2002 el nivel potenciométrico ha mostrado un importante cono de abatimiento de 80 m de profundidad y 5 km de área, al suroeste de la Ciudad de Puebla.

Salcedo y Sánchez *et al.* (2013) abarca la elaboración de un modelo matemático en MODFLOW del ASVP con el objetivo de generar un modelo de administración del agua subterránea a través del análisis de niveles piezométricos de 35 pozos en el municipio de Puebla, dando como resultado 4 escenarios de los cuales se sugiere una reducción de la extracción de agua de 134.08 Mm₃/año (30 %) en el polígono de la ciudad.

Muñoz Máximo (2015) abarca la elaboración de un modelo matemático del ASVP en MODFLOW, el cual tiene como objetivo generar una propuesta de mejora del aprovechamiento del recurso hídrico del acuífero del Valle de Puebla, así como de la subcuenca del Alto Atoyac, dentro del modelo se consideró el uso del suelo para no comprometer la disposición del sector agrícola y rural. También se contempló un aumento de 30 % de la extracción en los pozos, proyectado al año 2030.

2.2. Antecedentes de estudios geoquímicos

De acuerdo con Velázquez O. (2007) “Se tomaron muestras de pozos artesianos y de manantiales ricos en azufre del acuífero confinado; su química está asociada a la familia Ca-Mg-HCO₃-SO₄. Se realizó la caracterización hidrodinámica y geoquímica del ASVP, así como del área adyacente que Atlixco – Izúcar de Matamoros. Así mismo, se determinaron tres posibles fuentes de sulfuros: compuestos magmáticos de azufre, evaporitas del Cretácico medio y sulfuro atmosférico”.

Arroyo (2005) se enfocó en poder identificar el flujo regional, zonas de recarga y descarga del acuífero de acuerdo a un análisis hidrogeoquímico y con isótopos estables. Lo anterior mencionado se hizo con el objetivo de poder identificar el origen del agua sulfurosa que invade el acuífero superior; lo que lleva a la conclusión “La fuente natural de contaminación por sulfato en las aguas subterráneas del valle de Puebla son las evaporitas del período Triásico, esto fue un gran hallazgo, ya que

se descarta el origen volcánico que predomina en los estudios anteriores, además de contribuir al conocimiento geológico de la zona, ya que demuestra la existencia de un estrato evaporítico que no aparece en ningún corte geológico”.

Por otro lado, tenemos a Rodríguez Espinoza *et al.* (2020) el cual indicó que las fuentes de B (Boro) eran más naturales que antropogénicas y que comprendían las condiciones geológicas locales, la actividad volcánica y los procesos hidrotermales. Sin embargo, también hace énfasis en las fuentes de SO_4 : “El Boro de las muestras del grupo 3 son principalmente derivados de la disolución de sulfatos geotermales y aquellos que se encuentran en el grupo 1 provienen de la lixiviación de minerales evaporíticos por arcillas que absorbieron Boro. Esos dos mecanismos básicos de la evolución del Boro se derivan del pCO_2 y pO_2 con relación respecto a SO_4 ”. De acuerdo a lo anterior mencionado deja en claro que sí es posible la contaminación de SO_4 debido a la actividad hidrotermal y no únicamente asociado a un estrato de anhidrita o yeso, como ya han hecho mención diferentes autores en el pasado.

2.2.1. Clasificación geoquímica del agua del ASVP

De acuerdo con la tesis de maestría de Velázquez O. (2007) realizada en Illinois, de un total de 139 muestras tomadas de 65 sitios diferentes dentro de la subcuenca se encontraron 9 familias de agua que abarcan las zonas del Acuífero del Valle de Puebla (AVP), Atlixco-Izúcar de Matamoros (AIM) y Ciudad de México (CDMX).

- Na-Mg- HCO_3
- Ca-Na-Mg- HCO_3 - SO_4
- Ca-Mg- HCO_3 - SO_4
- Ca-Mg- SO_4
- Ca-Na- SO_4 -Cl
- Ca-Mg-Na- HCO_3
- Ca-Na- HCO_3 -Cl- SO_4
- Na-Ca- HCO_3 -Cl
- Na-Ca- HCO_3 - SO_4

Sin embargo, para el Valle de Puebla las familias más abundantes son: Ca-Mg-Na- HCO_3 , Ca-Mg- HCO_3 - SO_4 , Ca-Mg-Na- HCO_3 - SO_4 , Ca-Na- HCO_3 - SO_4 y Ca-Na-Li-Mg- HCO_3 - SO_4 . Estas familias muestran una dominancia de bicarbonato y sulfato de calcio, asimismo la autora señala al yeso como una de las fuentes de sulfato, lo que puede radicar en la generación de sulfuros.

3. CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

3.1. Delimitación y ubicación geográfica

La subcuenca del Alto Atoyac se encuentra ubicada dentro de la cuenca hidrográfica Balsas, esta abarca los estados de Tlaxcala, Puebla y México. La zona de estudio se extiende dentro del huso 14Q y dentro de las coordenadas 2178930mN, 20856490mS, 609287mE y 529105mO. La cuenca Río Alto Atoyac contiene a los acuíferos Alto Atoyac y Valle de Puebla, y en menor proporción a Tecolutla, Emiliano Zapata, Soltepec, Texcoco, Chalco-Amecameca, Valle de Tecamachalco, Ixcaquixtla y Atlixco-Izúcar de Matamoros.

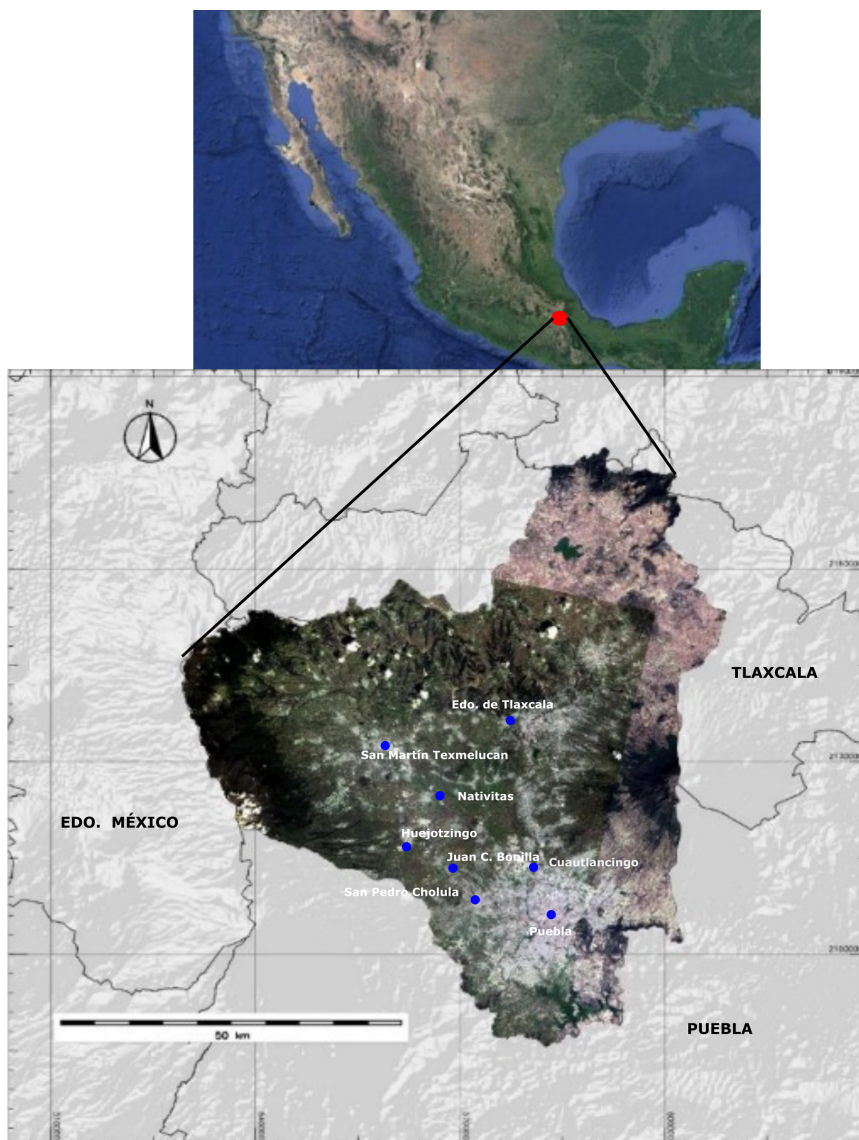


Figura 3.1: Localización de la subcuenca Alto Atoyac. Datos extraídos de INEGI (2019).

3.2. Características fisiográficas

El área que cubre el acuífero Alto Atoyac se localiza en la Provincia Fisiográfica Faja Volcánica Transmexicana, Subprovincia Fisiográfica Lagos y Volcanes de Anáhuac (INEGI, 1997). Dentro de las estructuras montañosas principales podemos ubicar el volcán Iztaccíhuatl, Popocatepetl y la Malinche los cuales alimentan al acuífero del agua meteórica proveniente de los glaciares que los coronan, esta descende de las cumbres de las mismas y filtra para recargar el acuífero. Por otro lado, en el Acuífero del Valle de Puebla encontramos otra geoforma conocida como el Gaben de Puebla, éste se extiende desde el norte en Tlaxcala hasta el sur del municipio de Puebla, Amozoc y Ocoyucan, en sus extremos encontramos los Horts o las elevaciones tectónicas de fallamiento normal donde ocurre el proceso de recarga efectiva del sistema acuífero. Hacia el centro encontramos el graben que se aprecia como una fosa estable donde se asienta la zona metropolitana.

3.3. Características hidrográficas e hidrogeológicas

La hidrología superficial de la subcuenca comprende de cuerpos de agua como tales como los ríos tributarios principales que atraviesan el Valle de Puebla son el Zahuapan y Xochiac mismos que confluyen con el río Atoyac al cual se reconoce como el río principal de esta subcuenca (Síntesis Geográfica de Tlaxcala, 1986). Los drenes principales se clasifican en cuatro regiones hidrográficas RH18-San Martín Texmelucan, RH18-Alceseca, RH18-Nexapa y RH18-Zahuapan, mismas que pertenecen a la cuenca del río Balsas (RH18) que comprende las regiones del valle de Puebla-Tlaxcala zona donde se considera que comienza la cuenca gracias a que es propia de tierras altas. Los cuerpos de agua corresponden principalmente a las presas Manuel Ávila Camacho y San José Atlanga, localizadas en el sur y noreste de la cuenca, respectivamente.

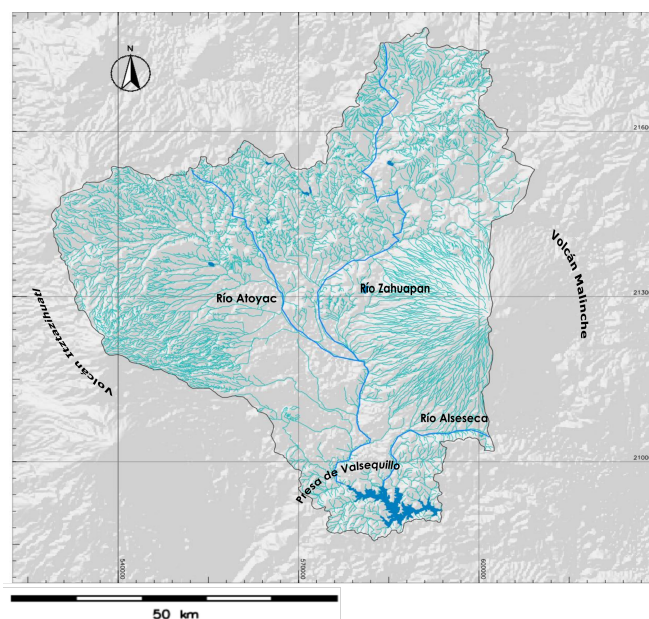


Figura 3.2: Hidrografía de la subcuenca Alto Atoyac. Tomado y adaptado de INEGI (2010).

Las montañas que bordean el valle de Puebla son una de las fuentes principales de recarga del acuífero, sin embargo, el sistema de fallas normales que comienzan en Tlaxcala y recorren el valle hacia el sur terminando en Valsequillo y Huehuetlán en Grade, también juegan un papel importante en las entradas y salidas de agua. De acuerdo con Velázquez O. (2007) el sistema acuífero Alto Atoyac – valle de Puebla está conformado por cinco unidades hidrogeológicas, de las cuales tres son los acuíferos que actualmente se encuentran abasteciendo a la población.

En la figura 3.3 se describen brevemente algunas de las características de las unidades hidrológicas, cabe mencionar que el acuífero superior del valle de Puebla es el principal abastecedor de agua de buena calidad.

| Tabla. Unidades hidrogeológicas del Sistema Acuífero Alto Atoyac – Valle de Puebla | | | |
|---|-------------|----------------------|--|
| | Tipo | Permeabilidad | Material |
| Acuífero Superior | Libre | Alta | Depósitos vulcano-clásticos |
| Acuitardo | | Media a baja | Depósitos lacustres |
| Acuífero Medio | Confinado | Media a alta | Rocas volcánicas altamente fracturadas |
| Acuitardo | | Muy Baja | Arcillas y evaporitas |
| Acuífero Profundo | Confinado | Baja | Carbonatos altamente fracturados |
| Basamento cristalino | | | |

Figura 3.3: Características de las unidades hidrogeológicas que conforman el sistema acuífero Alto Atoyac - Valle de Puebla. Tomado y adaptado de Velázquez O. (2007).

3.4. Condiciones climáticas

De acuerdo con el INEGI el estado de Puebla presenta siete diferentes climas tales como: templado subhúmedo, cálido subhúmedo, seco y cálido húmedo, templado húmedo y clima frío en la cumbre de los volcanes. La temperatura media anual del estado es de 17.5°C, la temperatura máxima promedio es de 28.5°C y se presenta en los meses de abril y mayo, la temperatura mínima promedio es de 6.5°C durante el mes de enero.

La precipitación media estatal es de 1 270 mm anuales, presentando lluvias en los meses de junio hasta octubre.

Haciendo énfasis en la subcuenca Alto Atoyac el clima templado subhúmedo, presenta porcentaje de lluvia invernal entre 5 y 10.2, localizado principalmente al centro y noreste de la cuenca, en las localidades de San Martín Texmelucan de Labastida, Zacatelco, Huejotzingo, Heroica Puebla de Zaragoza y San Pedro Ecatepec; el régimen pluvial medio anual tiene un rango de 600 - 1 000 mm y la temperatura media anual fluctúa entre 12 y 16 °C. INEGI (2019).

La subcuenca presenta temperaturas medias anuales de 12 ° C. y 18° C. principalmente hacia el centro y norte en zonas de llanuras y mesetas.

La precipitación total anual en el área de estudio oscila de 500 a 1 500 mm. Presentándose lluvias intensas que van de 1 200 a 1 500 mm aproximadamente sobre los

volcanes la Malinche y el Iztaccíhuatl.

3.5. Uso del suelo

La vegetación y uso del suelo en la cuenca se encuentra distribuida en un 64.72 % para agricultura, 26.84 % vegetación y 8.44 de otros usos, según el conjunto de datos vectoriales de Uso del Suelo y Vegetación serie V de INEGI.

El mayor uso del suelo en la cuenca se encuentra destinado a la agricultura de maíz, frijol, cebada, trigo y papa. El menor uso se destina a la agricultura de riego.

3.6. Modelo geológico

3.6.1. Estratigrafía

El subsuelo del sistema acuífero Alto Atoyac- Valle de Puebla ha sufrido diferentes eventos geológicos que han sido precursores de la formación y deposición de sedimentos que en conjunto juegan un rol fundamental en el comportamiento y composición química del agua que fluye a través de los poros de estas unidades estratigráficas. A continuación, se describirá de manera resumida y en orden geocronológico la composición de las unidades geológico-estratigráficas que de acuerdo con múltiples autores conforman el sistema acuífero.

- Paleozoico (254 - 541 Ma): Durante esta era tuvo lugar la formación del basamento cristalino siendo esta la unidad más antigua y reconocida en el gremio como Complejo Acatlán situada entre los límites de Puebla y Oaxaca. De acuerdo con Elías Herrera et.al. (2005), el Complejo Acatlán está ligado a los sistemas orogénicos Grenvilliano, Apalachiano-Alleghaniano y Cordillerano de América del Norte, así como a eventos geológicos relacionados con el rompimiento y dispersión de Pangea y con la evolución tectónica cenozoica de la cuenca del Pacífico que modificaron sustancialmente escenarios anteriores. Siendo así un complejo metamórfico conformado por esquistos y gneis altamente deformados debido a la gran falla normal que lo atraviesa con épocas diversas de actividad y rotación tectónica.

- Mesozoico (66 – 252 Ma.) Esta era se caracteriza por la llegada de los grandes océanos entre otros eventos; sin embargo, en el estado de Puebla es posible que las rocas marinas que afloran en esta localidad pudieran haberse extendido hasta conformar durante el Liásico, un brazo de mar o una pequeña cuenca aislada. Se encontraron fósiles guía que han servido para datar los eventos geológicos, algunos de ellos son los otozamites, belemnites, amonitas y helechos. Según Viniegra (1965) hubo una secuencia de deposición de rocas calizas grises y carbonatos de origen marino y continental que van de los 500 a 800 metros de espesor. La capa que sobreyace la roca caliza es una unidad de Travertinos producto de aguas termales que provienen de una falla en la zona.

- Cenozoico, Terciario (2.58 – 66 Ma.) A finales del cretácico superior y principios del Paleoceno ocurrió un evento que se caracterizó por la desaparición de los mares y aparición de los continentes, todo esto acarreado por la evaporación del agua, dejando con ello una marca de minerales evaporíticos tales como el yeso y anhidrita. A mediados del Terciario comenzó la actividad volcánica, donde emergieron las grandes montañas conocida ahora como la Faja Volcánica Transversal Mexicana, ejemplo de ello son el Itzta-Popo y la Malinche dejando rastro en macizos cristalinos caracteri-

zados principalmente por rocas andesítico – basáltico y dacitas. También hubo una deposición de sedimentos vulcano clásticos como lo son tobas con la misma composición química. Durante esta etapa se consolidaron dos formaciones importantes: Tobas grupo Balsas y Tobas grupo Caulapan. Estos grupos son característicos por tener intercalaciones de conglomerados, derrames andesítico-basálticos, areniscas y tobas. Para finales del Terciario sobreyacen depósitos fluviolacustres de tipo arcilloso.

- Cenozoico, Cuaternario (2.58 – 0.0117 Ma.) Para este periodo continuó el depósito de tobas y lahares al interior de la subcuenca. A continuación, los valles de México, Toluca y Puebla, ese relleno con el aluvión cuaternario conformado por gravas, arenas, cenizas y arcillas; cuyo espesor varía de 5 a 30 metros.

Se elaboró un modelo geológico de la subcuenca con la información recabada y tomando como base la carta geológica - minera E14-2 del Servicio Geológico Mexicano para la determinar la distribución litológica dentro del polígono de estudio, también se elaboró su respectiva columna estratigráfica. Dentro del polígono se trazaron 3 secciones que cortan en diferentes direcciones con el propósito de abarcar el mayor área posible.

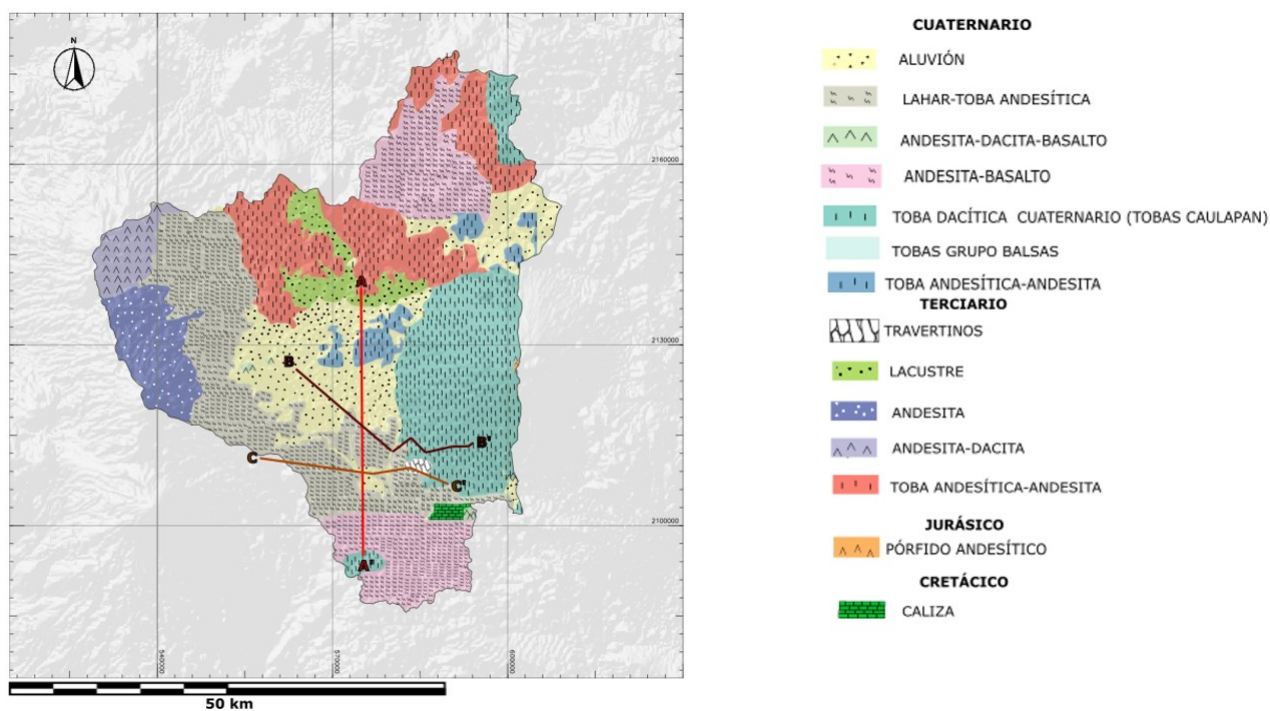


Figura 3.4: Mapa geológico del Acuífero del Valle de Puebla- Alto Atoyac con secciones transversales. Tomado y adaptado de Carta geologico-minera E14-2 (2002) y datos de campo .

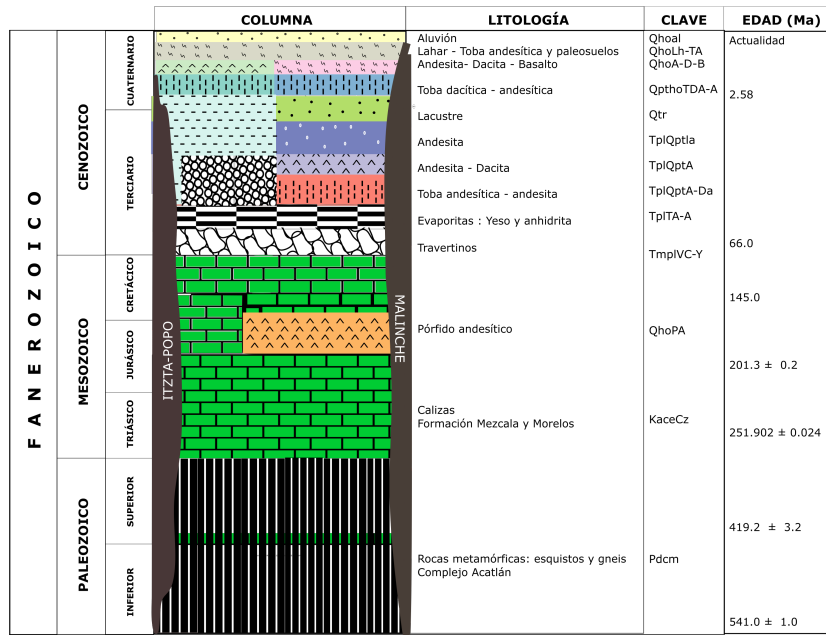


Figura 3.5: Columna cronoestratigráfica de la subcuenca del Alto Atoyac-Acuífero del Valle de Puebla. Muñoz Máximo I. Espinoza Juárez T. 2022, en preparaci3n.

Las figuras 3.6, 3.7 y 3.8 son las secciones transversales representadas en el modelo geol3gico de la figura 3.4, mismas secciones representan un corte transversal el cual refleja las unidades litol3gicas del subsuelo con una profundidad promedio de 1550. Estos cortes se construyeron con base en secciones topogr3ficas recuperadas del Google Earth y complementadas con la informaci3n geol3gica y geol3ctrica que se presentan en el trabajo de Arroyo (2006) retomado de Jim3nez (1999).

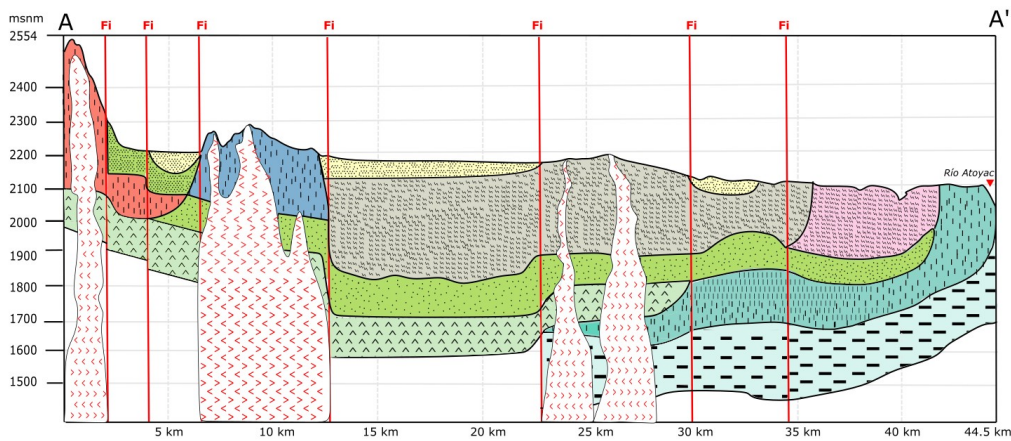


Figura 3.6: Secci3n transversal A – A', de izquierda a derecha recorre el estado de Tlaxcala y Puebla. Muñoz Máximo I. Espinoza Juárez T. 2022, en preparaci3n.

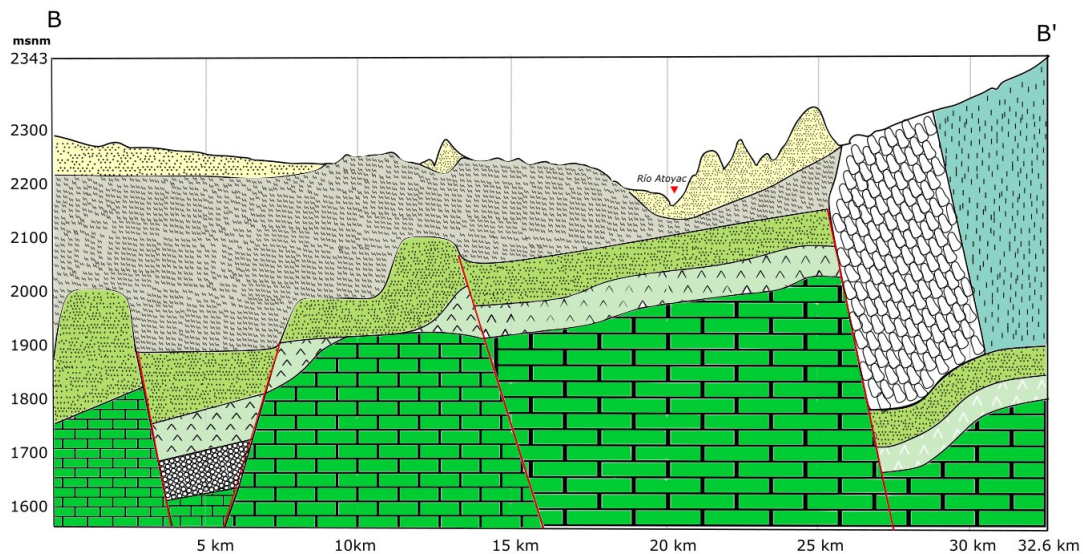


Figura 3.7: Sección transversal B – B', abarca las localidades de Santa Ana Xalmimilulco y Santa María Xonacatepec. Muñoz Máximo I. Espinoza Juárez T. 2022, en preparación.

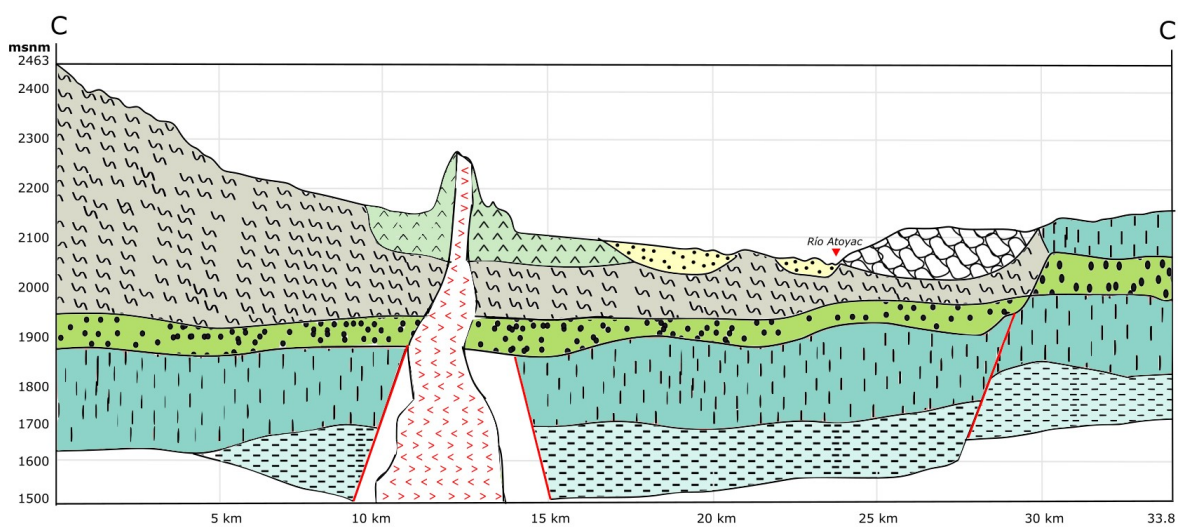


Figura 3.8: Sección transversal C – C', de izquierda a derecha abarca las localidades de San Andrés Calpan hasta llegar a Amalucan. Muñoz Máximo I. Espinoza Juárez T. 2022, en preparación.

3.6.2. Modelo Estructural

El sistema ASVP cuenta con diversas estructuras geológicas generadas por esfuerzos tensionales y compresionales originados durante el evento tectónico de la Orogenia Laramide que es reconocida en México como episodio de deformación que ocurrió en límite Cretácico – Terciario. De igual manera es posible apreciar en algunos puntos de la zona de estudio estructuras emergentes que contienen fuertes plegamientos pertenecientes al CPCM al igual que sistemas de fallas y fracturas con dirección NE-SW.

Estas estructuras se extienden en toda el área de estudio de norte a sur, formando así un relieve caracterizado por elevaciones y depresiones (horst y graben) las cuales dieron lugar al graben de Puebla.

Distintos autores han estudiado el comportamiento de dichas fallas, sin embargo, no fue hasta el 2006 que el trabajo de Javier Lermo Samaniego caracterizó y determinó la extensión de las fallas maestras que atraviesan este sistema acuífero llevando a cabo una evaluación y análisis de la sismicidad en el Estado de Tlaxcala. El reconocimiento de campo realizado para este trabajo permitió facilitar la identificación de las fallas maestras que cuentan con un alto ángulo de buzamiento (casi de 90°) lo cual permite formar estructuras de horst y graben generado esta estructura escalonada propia de las misma.

También se tiene conocimiento de que hay un gran número de fracturas y fallas secundarias debido a el resultado de trabajos que incluyen prospección eléctrica, los cuales han sido la base para muchos trabajos de la misma índole. En la figura 3.9 se aprecia la distribución y extensión de las fallas maestras que conforman el sistema acuífero.

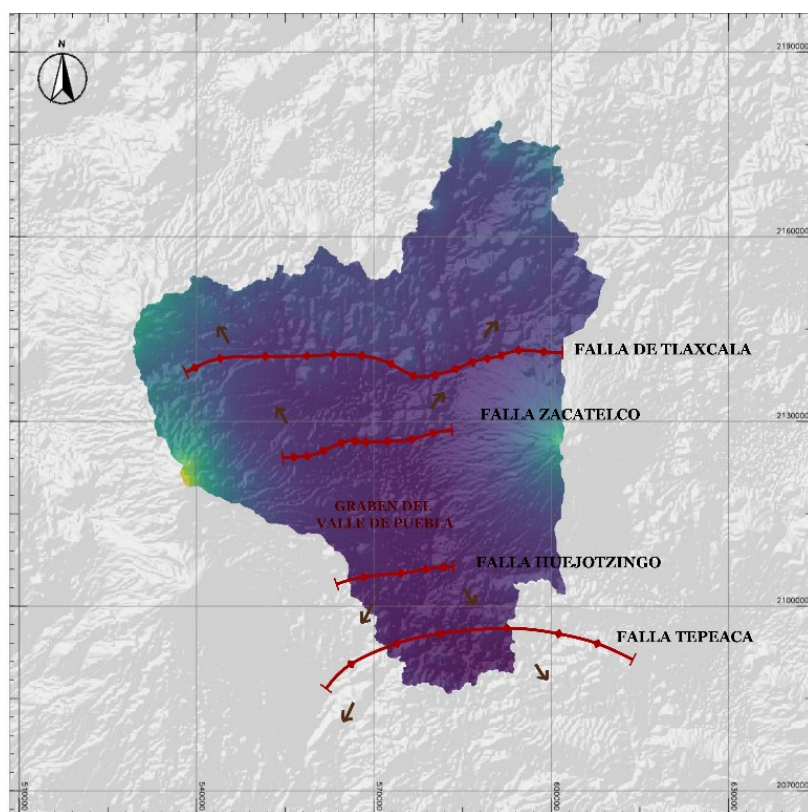
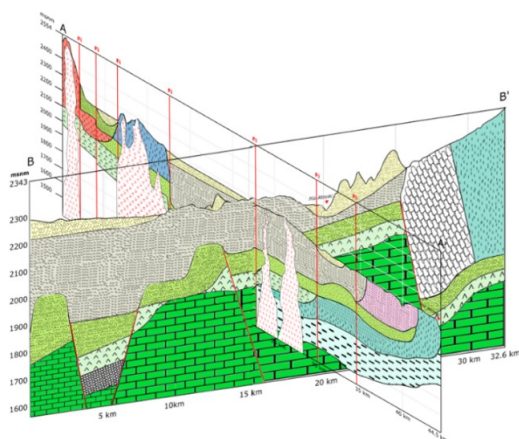


Figura 3.9: Mapa de distribución de fallas maestras en el sistema acuífero Alto Atoyac- Valle de Puebla. Tomado y adaptado de Lermo Samaniego (2006).

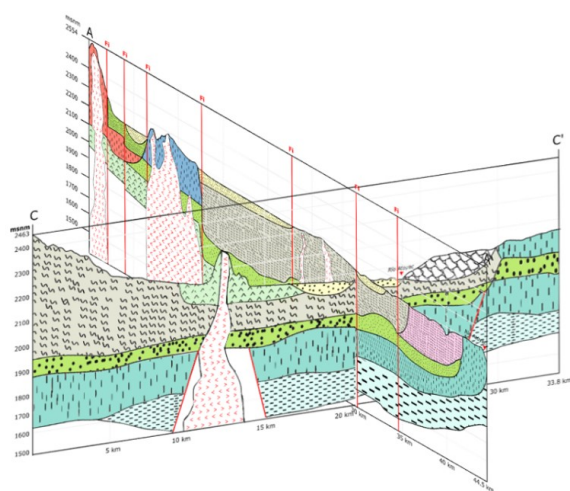
3.6.3. Modelo conceptual del ASVP

Con base en la información de las secciones transversales y de acuerdo con las propiedades físicas de los materiales estratigráficos se lograron identificar las unidades hidrogeológicas que conforman el sistema acuífero, así como el material que conforma cada capa y su espesor aproximado. Las figuras 3.10 y 3.11 muestran un modelo conceptual 3D de las secciones trazadas con su respectiva tabla descriptiva.



| UNIDADES HIDROGEOLOGICAS | DESCRIPCIÓN | MATERIALES | PROFUNDIDAD (m) | TEXTURA | PERMEABILIDAD |
|--------------------------|--------------------|--|-----------------|---------------------------------------|---------------|
| AqSp | Acuífero Libre | Aluviales | -50 | Granular | Alta |
| | | Lahares, tobas y paleosuelos (andesita – dacita – basalto) | -100 ± -250 | Areno – arcillosos con fracturamiento | Alta – media |
| AqT | Acuitardo | Lacustre y vulcanitas (andesita – dacita, tobas) | -300 ± -350 | Limo – arcillosa | Muy baja |
| AqMd | Acuífero Confinado | Vulcanitas (tobas, andesita – dacita), conglomerados | -400 ± - 450 | Fracturadas | Media a baja |
| AqT | Acuitardo | Areniscas, lutitas y evaporitas (yeso y anhidrita) | -600 ± -650 | Limo – arcillosa | Muy baja |
| AqP | Acuífero Confinado | Calizas arrecifales y materia orgánica | -650 ± -800 | Fracturadas y Kársticas | Baja |
| Bs | Basamento | Gneis y esquistos | | | |

Figura 3.10: a) Modelo conceptual del Acuífero del Valle de Puebla – Alto Atoyac, construido con las secciones A – A' y B – B'. b) Unidades hidrológicas propuestas para dichos cortes geológicos de la zona de estudio. Muñoz Máximo I. Espinoza Juárez T. 2022, en preparación.



| UNIDADES HIDROGEOLOGICAS | DESCRIPCIÓN | MATERIALES | PROFUNDIDAD (m) | TEXTURA | PERMEABILIDAD |
|--------------------------|--------------------|--|-----------------|---------------------------------------|---------------|
| AqSp | Acuífero Libre | Aluviales | -70 | Granular | Alta |
| | | Lahares, tobas y paleosuelos (andesita – dacita – basalto) | -100 ± -250 | Areno – arcillosos con fracturamiento | Alta – media |
| AqT | Acuitardo | Lacustre y vulcanitas (andesita – dacita, tobas) | -300 ± -350 | Limo – arcillosa | Muy baja |
| AqMd | Acuífero Confinado | Vulcanitas (tobas, andesita – dacita), conglomerados | -400 ± - 450 | Fracturadas | Media a baja |
| AqT | Acuitardo | Areniscas, lutitas y evaporitas (yeso y anhidrita) | -600 ± -650 | Limo – arcillosa | Muy baja |
| AqP | Acuífero Confinado | Calizas arrecifales y materia orgánica | -650 ± -800 | Fracturadas y Kársticas | Baja |
| Bs | Basamento | Gneis y esquistos | | | |

Figura 3.11: a) Modelo conceptual del Acuífero del Valle de Puebla – Alto Atoyac, construido con las secciones A – A' y C – C'. b) Unidades hidrológicas propuestas para dichos cortes geológicos de la zona de estudio. Muñoz Máximo I. Espinoza Juárez T. 2022, en preparación.

4. MARCO TEÓRICO

4.1. Vulnerabilidad

El mapeo de la vulnerabilidad de las aguas subterráneas se puede clasificar en dos categorías: mapeo de sensibilidad y mapeo de vulnerabilidad.

La sensibilidad de las aguas subterráneas a la contaminación se determina en función del entorno hidrogeológico, como la profundidad de las aguas subterráneas, la presencia de una capa de confinamiento, la recarga de aguas subterráneas y la conductividad hidráulica. Mientras que la vulnerabilidad del agua subterránea estima cómo la sensibilidad de la misma pero modificada por actividades humanas, como las prácticas de uso de la tierra, los usos de pesticidas y nutrientes, y el uso del agua. Foster *et. al.* (1997) define el concepto de vulnerabilidad como "la sensibilidad de un acuífero a ser afectado en forma adversa por una carga contaminante impuesta". Sin embargo, cuando se incluye las características del contaminante dentro de este concepto y de acuerdo con Vlaicu Munteanu (2008), se la siguiente clasificación de vulnerabilidad:

- Vulnerabilidad intrínseca (VI). Indica la susceptibilidad del agua subterránea a ser afectada por contaminantes generados por las actividades humanas en función de las características físicas, geológicas, geomorfológicas, hidrológicas, hidrogeológicas, clima, vegetación y uso de suelo de un área, independientemente del tipo de contaminante (Harter Walker, 2001; Vlaicu Munteanu, 2008).

- Vulnerabilidad específica (VE). Es la susceptibilidad del agua subterránea frente a un contaminante particular o a un grupo de contaminantes, tomando en cuenta las propiedades fisicoquímicas de estos y su relación con los diversos componentes de la vulnerabilidad intrínseca. Depende esencialmente de tres variables relacionadas con el contaminante: el tiempo de transporte, la duración y la concentración máxima (Vlaicu Munteanu, 2008; Vergara et al., 2009; Aguilar Bautista, 2013).

A pesar de esta clara definición, falta definir algunos otros conceptos en torno a la vulnerabilidad. De acuerdo con el Servicio Geológico Mexicano:

$$Riesgo = Peligro * Exposicion * vulnerabilidad \quad (4.1)$$

Donde:

- Riesgo: probabilidad de que un peligro se convierta en un desastre. Los factores que la componen son la amenaza y la vulnerabilidad.

- Peligro o amenaza: probabilidad de ocurrencia de un fenómeno potencialmente dañino en un lapso de tiempo determinado. El potencial de peligro se mide con su intensidad y periodo de retorno.

- Exposición: cantidad de personas, bienes, valores e infraestructura que son susceptibles de ser dañados.

Las definiciones pueden variar de acuerdo con el autor, como se observa en la siguiente tabla:

| Concepto | Definición | Autor |
|----------------------------------|---|---|
| Vulnerabilidad | d Características intrínsecas que determinan la sensibilidad (sensitivity) de un acuífero ante una carga contaminante. | Foster (1987) |
| Riesgo | La interacción entre la vulnerabilidad natural del acuífero y la carga contaminante. | Foster (1987) |
| Vulnerabilidad | La tendencia o probabilidad de que los contaminantes alcancen una posición específica en el sistema de las aguas subterráneas. | NRC (1993) |
| Vulnerabilidad intrínseca | Susceptibilidad natural del medio biofísico e hidrogeológico a la contaminación, sin hacer mención a un contaminante en particular. | Vrba y Zaporozec (1994); Daly et al. (2002) |
| Vulnerabilidad específica | Considera el impacto de un contaminante en particular o algún uso del territorio. | Vrba y Zaporozec (1994); Daly et al. (2002) |
| Sensibilidad | Se refiere a las propiedades intrínsecas de los acuíferos, determinadas por la accesibilidad a la zona saturada y la capacidad de atenuación de los materiales geológicos. | Davis et al. (2002) |
| Vulnerabilidad | Características naturales (hidrogeología, suelos, relieve, clima y vegetación) inherentes al sistema en conjunto que determinan la susceptibilidad a la contaminación por actividades antrópicas. Se refleja en la potencial pérdida de la calidad del agua subterránea. Esta definición se limita a las características intrínsecas de un área (mecanismos de flujo y procesos de atenuación natural). | Zwahlen (2003) |
| Amenaza | Fuente potencial de contaminación resultado de las actividades humanas como las emanaciones de sustancias dañinas a través de la producción, transporte, almacenamiento y disposición. | Zwahlen (2003) |
| Riesgo | Se determina con el efecto combinado de la evaluación de la vulnerabilidad y las amenazas, y se establecen las consecuencias probables de un evento de contaminación potencial. | Zwahlen (2003) |

Figura 4.1: Términos hidrogeológicos usados en la vulnerabilidad y riesgo de acuíferos. Tomado y adaptado de Aguilar Duarte et al. (2013).

4.2. Método multicriterio

Cuando se analizan problemas complejos que involucran más de una variable, es necesario llevar a cabo una evaluación multicriterio donde se debe recurrir a la opinión de expertos para generar discusiones e intercambio de opiniones con el fin de llegar a la solución más óptima de acuerdo con el o los objetivos y/o atributos. Una de las características principales de las metodologías multicriterio es la diversidad de factores que se logran integrar en el proceso de evaluación (Arancibia *et al.*, 2005). Los métodos multicriterio se puede clasificar por el tipo de variables que incluye su análisis, ya sean de caracter cualitativo o cuantitativo; sin embargo, también se pueden clasificar por el objeto de evaluación: atributos y objetivos.

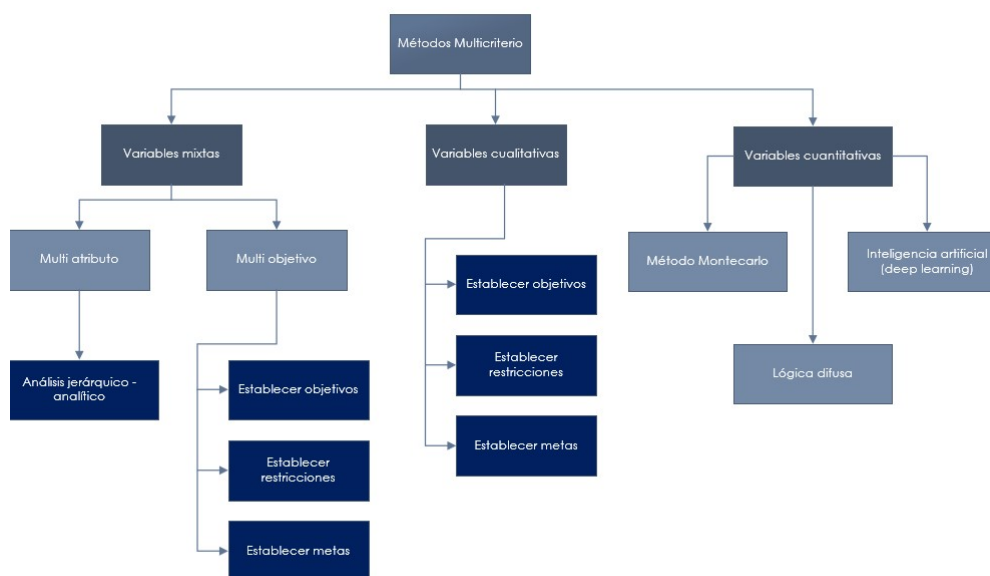


Figura 4.2: Clasificación de algunos métodos multicriterio por tipo de variable. Tomado y adaptado de Grajales Q. *et. al.* (2013); Romero B. *et. al.* (2018); Toscana L. *et.al.* (2013).

De acuerdo con la naturaleza de este trabajo, se consideró un análisis de ponderación Romero Bernal *et. al.* (2018) menciona que: “En un proceso de toma de decisiones la priorización de las distintas alternativas se realiza en función de una serie de criterios, una vez elegidos estos criterios, el siguiente paso debe ser definir la ponderación o grado de importancia de cada uno de ellos.”

Las alternativas que constituyen el conjunto de posibilidades ante las cuales un agente decisor debe escoger, es denominado conjunto de elección. Las características que conforman las alternativas se denominan atributos, cuando a estos atributos se añade un mínimo de información relativa a las preferencias del decisor, los atributos se convierten en criterios (Ramirez L., 2004).

Los modelos multiatributo en particular, pueden ser definidos como aquellos que están diseñados para obtener la utilidad de alternativas a través de los atributos valiosos, que deben ser evaluados como componentes de los criterios (Hernandez J. *et. al.*, 2002). Su principal objetivo es auxiliar a los centros decisores a describir, evaluar, ordenar, jerarquizar, seleccionar o rechazar objetos con base en una evaluación de acuerdo con varios criterios (Barredo C. , 1996).

4.3. Hidrogeología de aguas subterráneas

El agua subterránea es la mayor fuente de agua dulce para el ser humano. Estas constituyen el 30 % del agua dulce disponible en el mundo. Un 69 % está atrapada en los casquetes polares, mientras que los ríos y los lagos representan únicamente un 1 % según la IAEA.

Para que el agua pueda llegar a almacenarse en los poros de rocas permeables en el subsuelo, el proceso debe comenzar en el ciclo hidrológico donde la radiación solar es la fuente de energía que mueve el agua. El transporte del agua es a través del ciclo hidrológico a través del cambio de estado del agua (sólido, líquido y gaseoso). Cuando el agua de la superficie se evapora, sube en forma de vapor de agua hasta formar las nubes y que por procesos atmosféricos terminará cediendo en forma de precipitaciones. El agua que cae en forma de precipitación se conoce como meteórica, misma que infiltra en el subsuelo fluyendo a través de los poros de las rocas y que debido a barreras que encuentra en su camino se logra almacenar formando mantos acuíferos.

Los acuíferos se definen de acuerdo con DeWiest *et al.* (1966) como formaciones geológicas que son por sus propiedades físicas buenos almacenadores y transmisores del agua. Sin embargo, existe el otro extremo que trata de capas confinantes las cuales son unidades de muy baja permeabilidad, se clasifican en acuitardos, acuicludos y acuífugos. Ambas formaciones son fundamentales para el origen de diferentes tipos de acuíferos.

- Acuífero libre: Es aquel que no se encuentra confinado por alguna capa impermeable, por lo tanto, el límite superior se considera como el nivel freático. Se encuentran cerca de la superficie con capas continuas de elevada permeabilidad, debido a sus características la recarga del mismo se da por filtraciones de flujos laterales.

- Acuífero confinado: Es el acuífero que está cautivo por capas confinantes y por lo tanto sus poros se encuentran 100 % saturados en agua. La recarga de este tipo de acuíferos sucede en zonas más alejadas y no por infiltración de la zona vadosa.

Mediante técnicas isotópicas, se puede determinar el origen y las tasas de recarga del agua subterránea, información que se obtiene a partir de los isótopos estables y radiactivos presentes en esas aguas.

4.4. Parámetros hidrogeológicos

Para realizar el modelo conceptual de un acuífero es necesario llevar a cabo la medición de los parámetros hidrodinámicos, para ello se llevan a cabo tomas de muestras de núcleo que a continuación serán llevadas a laboratorio y serán sometidas a pruebas de aforo. Otra forma de poder conocer las propiedades hidrodinámicas es a través de pruebas de bombeo de pozos, de los cuales se obtiene un nivel estático y dinámico que servirán para poder extraer información del flujo subterráneo.

Sin embargo, no sólo es importante tener conocimiento de las propiedades hidrodinámicas, también es esencial hacer pruebas químicas para conocer el contenido mineral de la roca almacenante, así como de las condiciones en las que se encuentra sometido el acuífero.

4.4.1. Permeabilidad Intrínseca

Esta propiedad determina la facilidad con la que el medio transmitirá un fluido.

$$k = Cd^2 \quad (4.2)$$

k = permeabilidad intrínseca.

C = constante de empaquetamiento.

d = diámetro del poro promedio.

La permeabilidad intrínseca es estrictamente una función del medio, se mide comúnmente en términos de Darcy, después de que Henri Darcy desarrollara la Ley de Darcy. Los milidarcy (mD) es la unidad comúnmente utilizada, pero muchos autores también utilizan las unidades de cm^2 .

4.4.2. Conductividad hidráulica

La conductividad hidráulica también describe la facilidad de transmisibilidad de agua a través de los poros, considerando las dimensiones del medio y las propiedades del fluido.

$$K = k\rho g/\mu \quad (4.3)$$

K = Conductividad hidráulica

ρ = Densidad

μ = Viscosidad

g = Constante de gravedad.

Este parámetro tiene unidades de velocidad cm/s o $cm/día$, etc. Otra forma de entender el concepto es como el volumen del líquido perpendicular a una unidad área de medio poroso por unidad de tiempo bajo la influencia de un gradiente hidráulico de unidad.

4.4.3. Almacenamiento específico

Para entender el almacenamiento, se debe tener conocimiento del balance de masa. Una ecuación de balance de masa simple para el flujo de agua subterránea a través de una unidad de volumen de medio poroso se da como.

$$Q_{out}\Delta t = Q_{in}\Delta t \pm \Delta S\Delta t \quad (4.4)$$

Q = Tasa de flujo total.

t = Tiempo.

ΔS = Volumen por unidad de tiempo

En una unidad de volumen de una matriz porosa saturada, el volumen de agua que se almacenará bajo una unidad de aumento de altura, o el volumen que se liberará bajo una unidad de disminución de carga se denomina almacenamiento específico y se muestra como:

$$S_s = \rho g(a + n\beta) \quad (4.5)$$

a = Compresibilidad del acuífero.

β = Compresibilidad del agua.

n = Porosidad.

Finalmente, para conocer el coeficiente de almacenamiento de un acuífero se usa la siguiente fórmula:

$$S = Ssb \quad (4.6)$$

b = Espesor saturado.

El almacenamiento se define como el volumen de agua por unidad de área de superficie del acuífero liberada, siendo una cantidad adimensional.

4.4.4. Rendimiento específico

En medios porosos no confinados, es decir, donde no hay una cubierta de confinamiento superpuesta, el almacenamiento de agua en su parte superior se define como rendimiento específico, S_y . Ésta es la relación del volumen de agua que se drena de un matriz porosa saturada bajo la influencia de la gravedad al volumen total de la matriz, por unidad de caída en el nivel freático.

La relación entre el volumen de agua retenido en los poros y el volumen total de la matriz se conoce como retención específica (S_r). En las partes superiores de un poroso no confinado la suma del rendimiento específico y la retención específica es igual a la porosidad:

$$S_y + S_r = n \quad (4.7)$$

4.4.5. Conductancia

Este parámetro puede explicarse físicamente como la capacidad conductora de una capa permeable límite, presente entre el dominio del flujo de agua subterránea y el cuerpo de agua, de manera que:

$$Cb = Kb/Db \quad (4.8)$$

Kb = Conductividad hidráulica de la capa límite.

Db = Espesor.

Este cálculo se aplicaría en una situación cuando un río está en contacto con el agua subterránea, pero la interacción está restringida debido a la presencia de una capa de barro en el lecho del río.

4.4.6. Cálculo de la Evapotranspiración real

La evapotranspiración real es básicamente la cantidad de agua evaporada desde la superficie del suelo y transpirada bajo la cubierta vegetal. Cuando se calcula la evapotranspiración real lo que se está haciendo es un balance de la humedad del suelo.

Turc (Remenieras, 1974; Custodio y Llamas, 2001) a partir de observaciones realizadas en 254 cuencas, distribuidas por todos los climas del mundo (cálido, templado, frío), obtuvo la siguiente expresión:

$$ETR = P\sqrt{0.9 + (P^2/L^2)} \quad (4.9)$$

Donde

$$L = 300 + 25T + 0.05T^3 \quad (4.10)$$

T= Temperatura media anual (°C)

P= Precipitación media anual (mm)

Obteniendo una ETR real anual con unidades de mm.

4.4.7. Tasa de recarga

Para la estimación de la recarga a los acuíferos se suelen realizar balances de agua en el suelo edáfico, en la zona no saturada, en tramos de ríos, canales, etc. Entre dos estaciones de aforo, así como en lagos, humedales y embalses o en cualquier otro elemento de un sistema hídrico. De acuerdo con Sokolov *et al.*, (1981), se tiene que:

$$\Delta S/\Delta t = P + i - E - ETR - Q_s \quad (4.11)$$

P= Precipitación.

Qi= Entrada de aguas superficiales.

E = Evaporación.

ETR= Evapotranspiración.

Qs= Salida de agua subterránea.

4.5. Ley de Darcy

Un enfoque cuantitativo de la hidrología de las aguas subterráneas comenzó con el trabajo mencionado anteriormente del ingeniero francés Henry Darcy que derivó su conocida ley para la relación lineal entre el gradiente hidráulico y el flujo de agua subterránea, mismo que fue publicado como apéndice de su monumental tratado sobre el plan de abastecimiento de agua (Darcy, 1856).

Explicó su profundo conocimiento del papel que juega la topografía y la geología para las condiciones del agua subterránea y su significado para su suministro de agua (cf. Brown *et al.*, 2003).

Para la percolación a través de un cilindro con flujo de salida bajo presión atmosférica, derivó la fórmula:

$$q = -Kdh/dL \quad (4.12)$$

q = Tasa de flujo volumétrico por unidad de área.

dh/dL = Gradiente hidráulico a lo largo de la trayectoria del flujo.

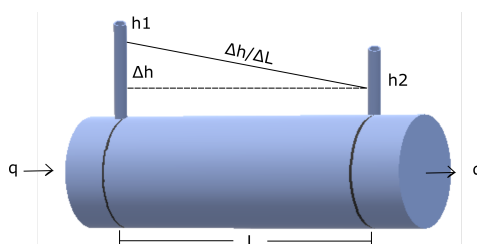


Figura 4.3: Representación gráfica de la ley de Darcy. Tomada y adaptada de Delleur, J. W. (2006).

Forchheimer (1898) posteriormente amplió la ecuación diferencial general a la 2D ilimitada problema de "superficie libre de Dupuit", para el cual llegó a la fórmula que ahora se conoce comúnmente como la "Ecuación de Dupuit-Forchheimer":

$$\delta^2(h_2)/\delta x^2 + \delta^2(h_2)/\delta y^2 = 0 \quad (4.13)$$

La versión transitoria de la ecuación de Laplace de Forchheimer apareció en el trabajo de Boussinesq (1904). El profesor de matemáticas y colaborador del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS), Charles S. Slichter (1864-1946) llegó a los mismos resultados para el flujo de estado estacionario y extendió el enfoque de Forchheimer incluyendo un componente de flujo vertical (Slichter, 1899).

El flujo está en función de tres variables independientes (x,y,z) y del tiempo. Estas se rigen por la Ley de Darcy, leyes termodinámicas y de conservación de la materia. Introduciendo en la ecuación de Laplace la ley de Darcy se llega a la condición hidrodinámica que gobierna el flujo permanente del agua en suelos (ecuación de Laplace):

$$(\partial^2 h)/(\partial x^2) + (\partial^2 h)/(\partial y^2) + (\partial^2 h)/(\partial z^2) = 0 \quad (4.14)$$

$h = Y + p/Y_w$ (carga hidráulica)

La ecuación 4.13 modeliza un flujo estacionario en medio poroso homogéneo e isótropo de un fluido incompresible, en un suelo de peso específico constante y saturado. Cuando se considera un acuífero confinado se considera el almacenamiento específico para compatibilizar el balance de masa con la ecuación de Darcy.

$$\partial/\partial x (K_x \partial h/\partial x) + \partial/\partial y (K_y \partial h/\partial y) + \partial/\partial z (K_z \partial h/\partial z) = S_0 \partial h/\partial t \quad (4.15)$$

Si el medio es homogéneo e isótropo ($K_x=K_y=K_z=K$), obtenemos una ecuación para h en la ecuación de difusión lineal:

$$\nabla^2 h = S_0/K \partial h/\partial t \quad (4.16)$$

Nótese que, si el flujo es estacionario, entonces se regresa a la ecuación 4.13.

4.6. Fundamentos teóricos del programa MODFLOW

4.6.1. Método de diferencias finitas

El método de diferencias finitas está basado en aproximaciones que permiten reemplazar ecuaciones diferenciales por ecuaciones de diferencia. Estas aproximaciones de diferencia finita son de forma algebraica; relacionan el valor de la variable dependiente, en un punto dentro de la región de solución, con sus valores en algunos puntos vecinos. Con base en esto, la solución por diferencia finita básicamente involucra 3 pasos:

- Discretización.
- Aproximación de la ecuación diferencial.
- Solución de las ecuaciones de diferencia.

Para obtener las aproximaciones de diferencia finita es necesario aplicar la serie de Taylor:

- La Serie de Taylor y el Método de Diferencias Finitas asumen que la función a ser resuelta varía de forma continua (no existen discontinuidades).
- Es posible construir fórmulas para diferencia hacia adelante, hacia atrás, y centrada a partir de la Serie de Taylor.

- Es posible incrementar el orden de la exactitud de dichas formulas, y obtener aproximaciones de derivadas de cualquier grado al combinar distintas series de Taylor desarrolladas con diferencias finitas.

4.6.2. Discretización en MODFLOW

La discretización espacial de un acuífero en una malla de puntos se denominan nudos, formando filas, columnas y capas. Para las matrices se designan direcciones i, j, k al elemento genérico. En un sistema de filas, columnas y capas, i es el índice de fila; $i=1, 2, \dots$; j el de columna, $j=1, 2, \dots$, y k el de la capa, $k=1, 2, \dots$

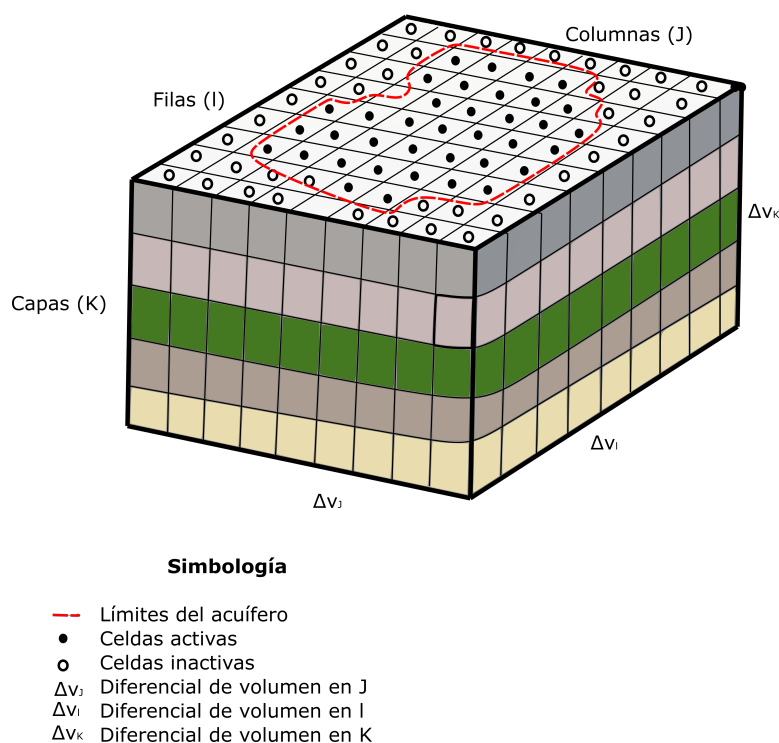


Figura 4.4: Representación gráfica del método de discretización por diferencias finitas para un modelo tridimensional. Tomado y adaptado de Cruces de Abia (2007).

Los nudos representan un prisma de medio poroso, llamados celdas, en los cuales las propiedades hidráulicas son constantes, por lo que cualquier valor asociado a un nudo se distribuye sobre toda la extensión de la celda.

4.6.3. Ecuación de flujo con diferencias finitas

El desarrollo de la ecuación de flujo en diferencias finitas resulta de aplicar la ecuación de continuidad a una celda: la suma de todos los flujos que entran y salen de la celda debe ser igual al cambio en el almacenamiento. Si la densidad del agua subterránea es constante, la ecuación de continuidad del balance de flujos en una celda es:

$$\sum Q_i = S_s(\Delta h / \Delta t) \Delta V \quad (4.17)$$

Q_i = Caudal que entra en la celda por una cara.

S_s = Coeficiente de almacenamiento específico del medio.

ΔV = Volumen de la celda.

Δh = Variación del potencial por unidad de peso en el intervalo Δt .

Aplicando las convenciones de matriz la fórmula se traduce a lo siguiente:

$$q_{i,j-1/2,k} = KR_{i,j-1/2,k} \Delta c_i \Delta v_k (h_{i,j-1,k} - h_{i,j,k}) / r_{j-1/2} \quad (4.18)$$

q = Caudal que atraviesa la cara de separación entre las celdas $i,j-1,k$ y la i,j,k .

KR = Conductividad hidráulica a lo largo de la fila entre los nudos $i,j-1, k$ y el i,j,k .

Δv = Sección de la celda i,j,k normal a la dirección del flujo.

Δr = Distancia entre los nudos $i,j-1,k$ y el i,j,k .

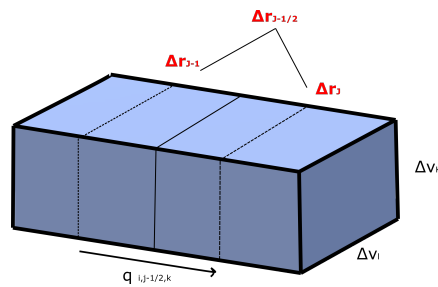


Figura 4.5: Representación gráfica de la ecuación de flujo por diferencias finitas para un modelo tridimensional. Tomado y adaptado de Cruces de Abia (2007).

4.7. Percepción remota

4.7.1. Imágenes satelitales

Una imagen satelital es un conjunto de píxeles que contienen información, la cual se obtiene del resultado de capturar la radiación reflejada o emitida de la superficie de la Tierra. Dependiendo del sensor y del instrumento empleado será la resolución de la imagen. Existen imágenes que contienen diferentes tipos de información como colores RGB, Infrarrojo, elevaciones, reflectancias, etc.

- Landsat 8 (Oli): Landsat 8 (formalmente la Misión de Continuidad de Datos Landsat, LDCM) fue lanzado en un cohete Atlas-V desde la Base de la Fuerza Aérea Vandenberg, California, el 11 de febrero de 2013. Landsat 8 adquiere alrededor de 740 escenas por día en el sistema de ruta / hilera del Sistema de referencia mundial 2 (WRS-2), con una superposición de franjas (o superposición lateral) que varía desde el 7 por ciento en el ecuador hasta un máximo de aproximadamente el 85 por ciento en latitudes extremas. El tamaño de una escena de Landsat 8 es de 185 km x 180 km (114 mi x 112 mi).

Operational Land Imager (OLI): construido por Ball Aerospace Technologies Corporation. Con nueve bandas espectrales, incluida una banda panorámica:

- Banda 1 visible (0,43 - 0,45 μ m) 30 m
- Banda 2 visible (0,450 - 0,51 μ m) 30 m
- Banda 3 Visible (0,53 - 0,59 μ m) 30 m
- Banda 4 Roja (0,64 - 0,67 μ m) 30 m
- Banda 5 Infrarrojo cercano (0,85 - 0,88 μ m) 30 m
- Banda 6 SWIR 1 (1,57 - 1,65 μ m) 30 m

- Banda 7 SWIR 2 (2,11 - 2,29 μm) 30 m
- Banda 8 Pancromática (PAN) (0,50 - 0,68 μm) 15 m
- Banda 9 Cirro (1,36 - 1,38 μm) 30 m

OLI captura datos con precisión radiométrica mejorada en un rango dinámico de 12 bits, lo que mejora la relación general señal / ruido. Esto se traduce en 4096 niveles de gris potenciales, en comparación con solo 256 niveles de gris en los instrumentos Landsat 1-7 de 8 bits. El rendimiento mejorado de señal a ruido permite una mejor caracterización del estado y la condición de la cobertura terrestre.

- GMTED2010: El Servicio Geológico de EE. UU. (USGS) y la Agencia Nacional de Inteligencia Geoespacial (NGA) han colaborado en el desarrollo de un modelo de elevación global notablemente mejorado llamado Global Multi-resolution Terrain Elevation Data 2010 (GMTED2010) que reemplaza a GTOPO30 como el conjunto de datos de elevación de elección para aplicaciones a escala global y continental. El paquete de productos GMTED2010 contiene siete nuevos productos de elevación de ráster para cada una de las resoluciones espaciales de 30, 15 y 7,5 segundos de arco e incorpora los mejores datos de elevación global disponibles actualmente.

- ARIS: La sonda infrarroja atmosférica (AIRS) es un espectrómetro de rejilla ($R = 1200$) a bordo de la segunda plataforma en órbita polar del Sistema de Observación de la Tierra (EOS), EOS Aqua. En combinación con la Unidad de Sonda Avanzada de Microondas (AMSU) y la Sonda de Humedad para Brasil (HSB), AIRS constituye un innovador grupo de sondas atmosféricas de sensores visibles, infrarrojos y de microondas. El producto de cuadrícula diaria de nivel 3 de AIRS contiene medios de recuperación estándar, desviaciones estándar y recuentos de entrada. Cada archivo cubre un período temporal de 24 horas para la órbita descendente (cruce ecuatorial de norte a sur a la 1:30 a.m. hora local) o ascendente (cruce ecuatorial de sur a norte a la 1:30 p.m. hora local). Los datos comienzan en la línea de fecha internacional y avanzan hacia el oeste (al igual que las órbitas posteriores del satélite), de modo que las celdas de datos vecinas en cuadrícula no están separadas por más de una franja de tiempo (aproximadamente 90 minutos).

Los parámetros termodinámicos son: temperatura de la piel (superficie terrestre y marina), temperatura del aire en la superficie, perfiles de temperatura del aire y vapor de agua, características de la tropopausa, agua precipitable de la columna, cantidad / frecuencia de las nubes, altura de las nubes, Presión de la cima de la nube, temperatura de la cima de la nube, reflectancia, emisividad, presión superficial, distribución vertical de la nube.

- GPM (IMERG): Las recuperaciones integradas de múltiples satélites para GPM (IMERG) es el algoritmo unificado de EE. UU. Que proporciona el producto de precipitación de múltiples satélites para el equipo de GPM de EE. UU. Este conjunto de datos es el GPM Nivel 3 IMERG derivado del GPM3IMERG HH cada media hora.

El resultado derivado representa la estimación final de la precipitación acumulada diaria. El conjunto de datos se produce en el Centro de Servicios de Datos e Información (DISC) de Goddard Earth Sciences (GES) de la NASA simplemente sumando las recuperaciones de precipitación válidas para el día en GPM3IMERGHH y dando el resultado en (mm).

- Índice de Vegetación Normal (NDVI): Se utiliza para cuantificar el verdor de la vegetación y es útil para comprender la densidad de la vegetación y evaluar los cambios en la salud de las plantas. El NDVI se calcula como una relación entre los

valores del rojo (R) y el infrarrojo cercano (NIR) de manera tradicional:

$$(NIR - R)/(NIR + R) \quad (4.19)$$

En Landsat 8-9, NDVI = (Banda 5 - Banda 4) / (Banda 5 + Banda 4).

4.8. Sistemas de Información geográfica (SIG)

En términos prácticos, los SIG comprenden un conjunto de hardware y software integrados que permiten introducir, almacenar, manipular y presentar datos geográficos (Figura 4.6). Los datos pueden tener todas las formas textuales, cartográficas o numéricas susceptibles de ser integradas en un único sistema.

Los SIG presentan diversas modalidades y ofrecen el potencial para una enorme gama de aplicaciones. Aún no ha sido posible establecer una tipología única para estos sistemas y no cabe duda de que hay varias formas de categorización posibles. Clarke (1986) y Bracken y Webster (1989).

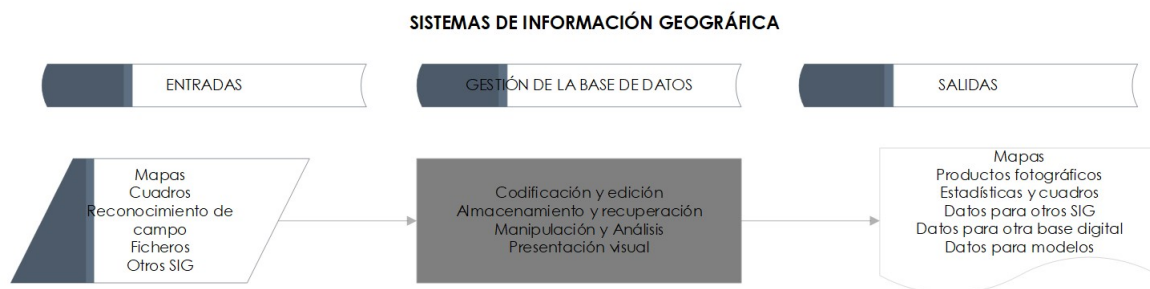


Figura 4.6: Diagrama que ilustra el funcionamiento de un SIG. Información tomada y adaptada de Grajales Q. (2013).

4.8.1. Aeromagnetismo

La aeromagnetometría es empleada en las primeras fases de exploración, lo cual es de gran utilidad para poder determinar características litológicas a nivel regional. Los magnetómetros remolcados con un aeroplano o un helicóptero pueden medir la intensidad del campo magnético de la Tierra. Las diferencias entre las mediciones reales y los valores teóricos indican la presencia de anomalías en el campo magnético, las que a su vez representan cambios en el tiempo de roca o en el espesor de las unidades litoestratigráficas.

En el caso de los estudios magnéticos realizados desde aire, un dispositivo de cables elimina el campo magnético generado por el avión. Este tipo de prospecciones tiene muchas ventajas a comparación de un estudio llevado a cabo en tierra, un ejemplo de ello es el tiempo de adquisición de datos además de tener acceso a lugares remotos. Las anomalías de profundidades someras son normalmente de longitud de onda corta, las cuales sólo son visibles sobre pequeñas distancias, a diferencia de los efectos causados por estructuras geológicas profundas que son perceptibles a grandes distancias con longitudes de onda larga (Lowrie, 1997).

La anomalía residual se puede definir como la anomalía de interés geológico en un estudio específico. La separación de la anomalía residual de una distribución de campo potencial es un problema delicado que domina la precisión del proceso de interpretación. (Peña, 2019).

La susceptibilidad magnética es una medida de la fuerza magnética como respuesta de un material a un campo magnético externo. La susceptibilidad de volumen k (medida en unidades adimensionales), es definida como la relación de la magnetización del material J (por unidad volumen) al campo magnético externo H :

$$J = kH \quad (4.20)$$

Alternativamente, la susceptibilidad específica o de masa Z , medida en unidades de m^3kg^{-1} se define como la relación del material magnetización J (por unidad de masa) al débil campo magnético externo H :

$$J = XH \quad (4.21)$$

Todos los materiales tienen susceptibilidad magnética, que puede ser ya sea positivo (paramagnético) o negativo (diamagnético). Los valores de susceptibilidad magnética son útiles en exploración geofísica, y en modelos tanto de la corteza de magnetización y anomalías magnéticas. La figura 4.7 enumera la susceptibilidad para rocas y minerales comunes.

Existen correcciones y filtros que se aplican a los datos crudos para facilitar el procesamiento de los datos, algunos de ellos son:

- Reducción al polo: Esta corrección convierte las anomalías en su forma equivalente en el caso de que estuvieran situadas en el polo norte, utilizando los datos de inclinación y declinación magnética.
- Gradiente horizontal: Las derivadas horizontales proporcionan picos sobre la parte superior de las fuentes e indican fuentes contorneadas por gradientes abruptos e inflexiones (Milligan y Gunn, 1997).
- Gradiente vertical: La primera derivada vertical (gradiente vertical), es físicamente equivalente a medir el campo magnético simultáneamente en dos puntos verticales, uno por arriba del otro, restando los respectivos valores y dividiendo el resultado

por la separación vertical espacial entre ambos puntos de medición (Fantón, 2014).
 - Señal analítica: La amplitud de la señal analítica está relacionada con la amplitud de la magnetización (Nabighian, 1972; Roest y Pilkington, 1993), ver ecuación 1. Cabe destacar también que es una función simétrica en forma de campana cuyo máximo se ubica encima del contacto entre cuerpos, siendo el ancho de la curva de amplitud proporcional a la profundidad del mismo (Salem y Smith 2005). Esta técnica, permite resaltar las anomalías magnéticas producidas por discontinuidades geológicas de mediana a corta longitud de onda (Salem, 2005).

Algunos métodos son usados para estimar la profundidad de las anomalías magnéticas, sin embargo, uno de los más usados es el espectro radial de potencia también conocido como análisis espectral de Fourier, debido a que los datos magnetométricos a través de la transformada de Fourier cambian de su dominio espacial al de número de onda y facilitan así el análisis de sus frecuencias. A través de la relación entre los datos de frecuencia y número de onda se puede llevar a cabo la separación de anomalías regionales, residuales y del ruido; por lo tanto, la pendiente de la línea recta es proporcional al tope del cuerpo. De acuerdo con Rondón Mendoza (2016), si “ k ” denota el número de onda y $S(k)$ el espectro de poder, la profundidad “ d ” al tope del cuerpo podría ser estimada de la relación $S(k) = f(k)$ empleando la fórmula:

$$\ln S(k) = -2kd \quad (4.22)$$

| Susceptibilidades magnéticas de rocas y minerales seleccionados | |
|---|---------------------------------|
| Roca/Mineral | Volumen k (10 ⁻⁶ SI) |
| Rocas Igneas | |
| Andesita | 170,000 |
| Basalto | 250-180,000 |
| Diabasa | 1,000 - 160,000 |
| Diorita | 630 - 130,000 |
| Gabro | 1,000 - 90,000 |
| Granito | 0 - 50,000 |
| Peridotita | 98,000 - 200,000 |
| Piroxenos | 130,000 |
| Riolita | 250 - 38,000 |
| Rocas Igneas | 2,700 - 270,000 |
| Promedio rocas igneas ácidas | 38 - 82,000 |
| Promedio rocas igneas básicas | 550 - 120,000 |
| Rocas Sedimentarias | |
| Arcillas | 170 - 250 |
| Carbón | 25 |
| Dolomita | -950 |
| Calizas | 2 - 25,000 |
| Sedimentos rojos | 10-100 |
| Areniscas | 0 - 20,900 |
| Lutitas | 63 - 18,600 |
| Promedio rocas sedimentarias | 0 - 50,000 |
| Minerales que no tienen hierro | |
| Grafito | -80 - 200 |
| Calcoita | -7.5 - -3.9 |
| Anhidrita | -14 - -80 |
| Yeso | -13 - -29 |
| Hielo | -9 |
| Ortodasa | -13 - -17 |
| Magnesita | -15 |
| Serpentinita | 3,100 - 75,000 |
| Halita | -10 - -16 |
| Galena | -33 |
| Cuarzo | -13 - -17 |
| Casiterita | 1,100 |
| Celestita | -16 - -18 |
| Esfalerita | -31 - 750 |

Figura 4.7: Valores de Susceptibilidad magnética para rocas y minerales comunes. Tomado y adaptado de P. Hunt, 1995.

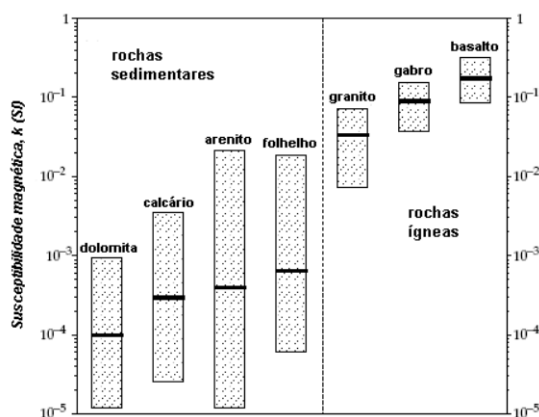
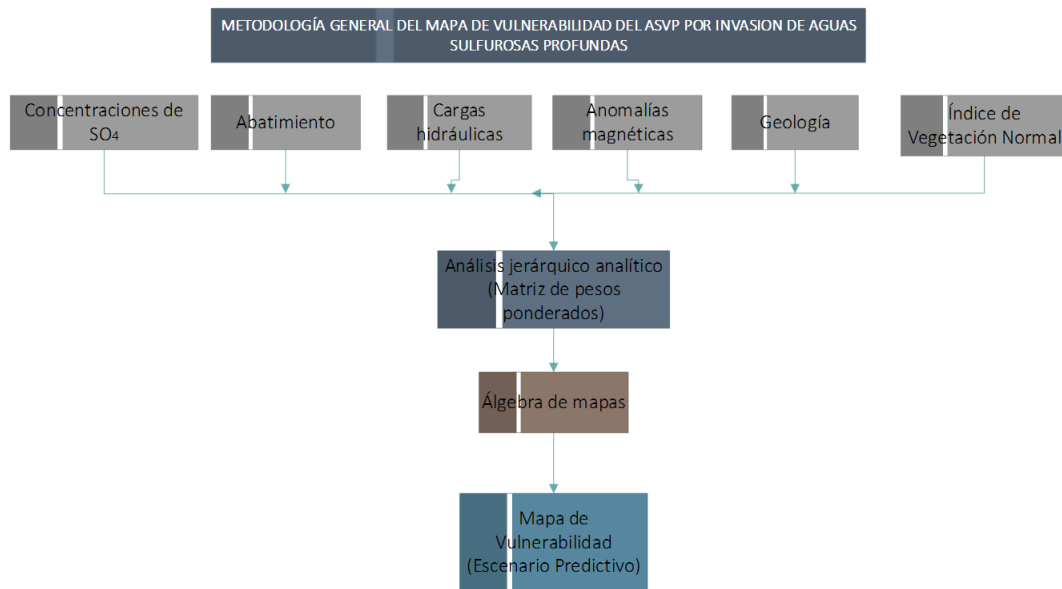


Figura 4.8: Rangos de valores medios de susceptibilidad magnética de algunos tipos de rocas más comunes (W.Lowrie 1997).

5. METODOLOGÍA Y PROCESAMIENTO

5.1. Metodología general

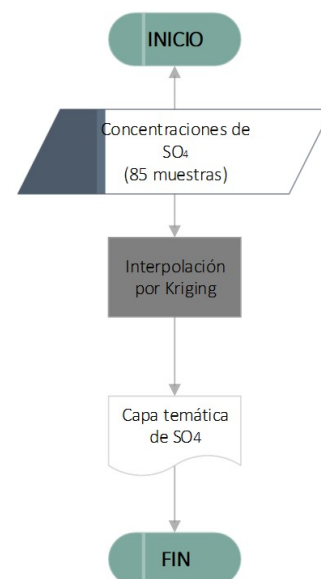
Se llevaron a cabo procedimientos individuales de cada una de las capas temáticas en función con 6 variables:



Para cada una de ellas se llevará a cabo un procedimiento único, donde la metodología será descrita en el apartado correspondiente. Finalmente la información será consolidada bajo el método multicriterio regido por matrices de pesos ponderados, dando como resultado el mapa de vulnerabilidad.

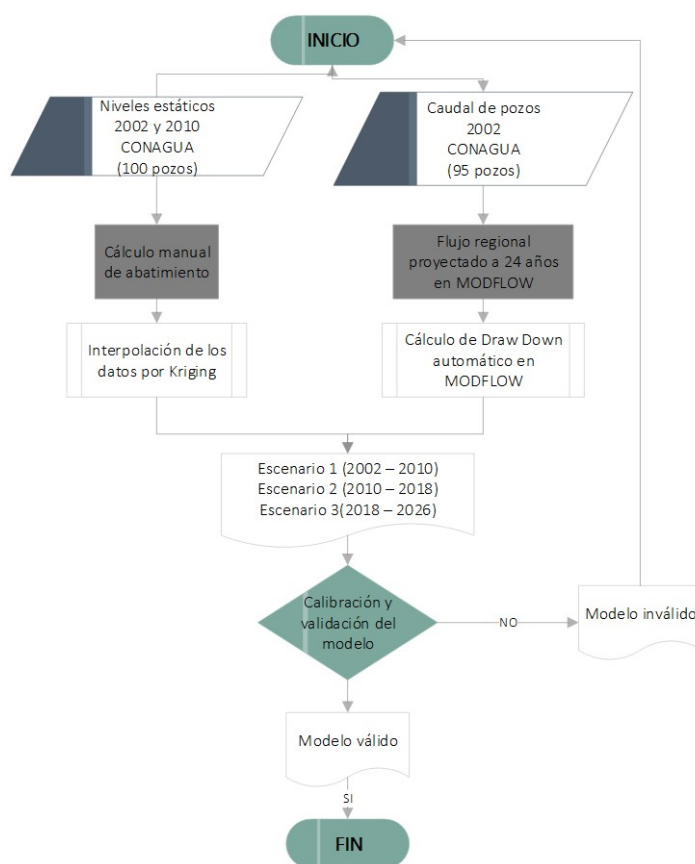
5.1.1. Capa de concentraciones de SO_4

Se recuperaron datos de concentración de SO_4 del INEGI 2017 y Jaime Garfias (2009) dentro del polígono de la zona de estudio. Estos datos reflejan una distribución del contaminante en puntos específicos dentro del mapa y por lo tanto son reflejo de los procesos internos que ocurren en el acuífero. Por lo tanto, el único proceso que se llevó a cabo fue la interpolación de las concentraciones con ayuda del programa SAGA GIS, usando el método kriging.



5.1.2. Capa de abatimiento

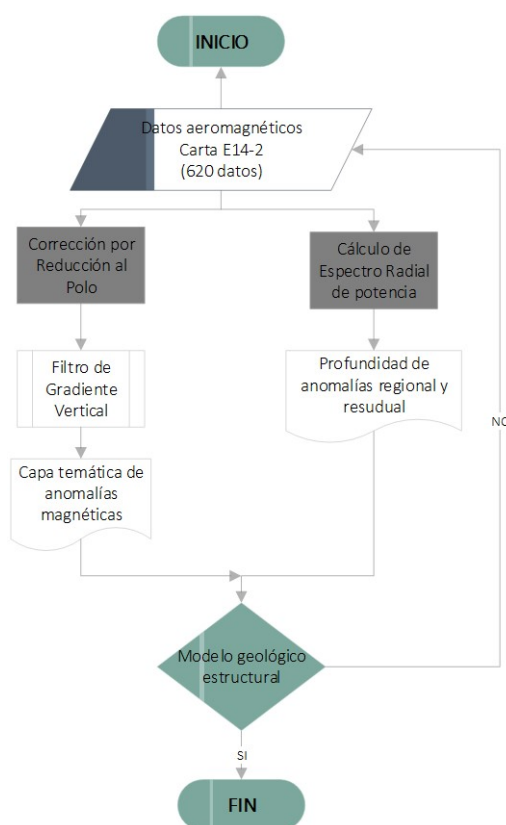
Se llevó a cabo el procesamiento de los niveles estáticos de 100 pozos recuperados del censo oficial de CONAGUA en los años 2002 y 2010. Estos datos sirvieron de base para el cálculo de abatimiento del sistema acuífero para el escenario predictivo que abarca del 2002 - 2026. Se consideró hacer la simulación de los datos en 3 pasos los cuales abarcan periodos de 8 años cada uno. Con ayuda de software GIS se llevó a cabo el procesamiento de los datos para generar la capa temática de abatimiento. También se llevó a cabo el procesamiento del caudal de 84 pozos del año 2002, ubicados dentro del polígono del área de estudio. Este procesamiento se llevó a cabo en MODFLOW 2005; al igual que los niveles estáticos se consideró una simulación temporal en lapsos de 8 años. Ambos resultados fueron de utilidad para llevar a cabo la calibración del modelo y para la validación del modelo se respetó la tendencia de los niveles estáticos.



5.1.3. Capa de anomalías magnéticas:

La principal fuente de información que se tiene del Valle de Puebla es la Carta Aeromagnética de la Ciudad de México E14-2 recuperada del SGM (2007), mostrando datos de campo magnético total preprocesados con correcciones a una escala de 1:250000 km.

Se extrajeron 620 puntos aeromagnéticos de la carta, mismos que sirvieron para obtener el mapa de anomalía magnética tomando el campo magnético residual, sobre el cual se aplicó reducción al polo y otros filtros tales como, gradiente horizontal, señal analítica y gradiente vertical. Tomando este último como el principal determinante de lineamientos que se pueden relacionar con estructuras de tipo falla o fracturas.



5.1.4. Capa de geología:

De acuerdo con el modelo geológico, se contruyó una tabla de pesos ponderados considerando a las evaporitas (yeso y anhidrita) como uno de los principales precursores del agua sulfurosa, debido a que el $CaSO_4$ (sulfato de calcio) contiene el ión de interés.

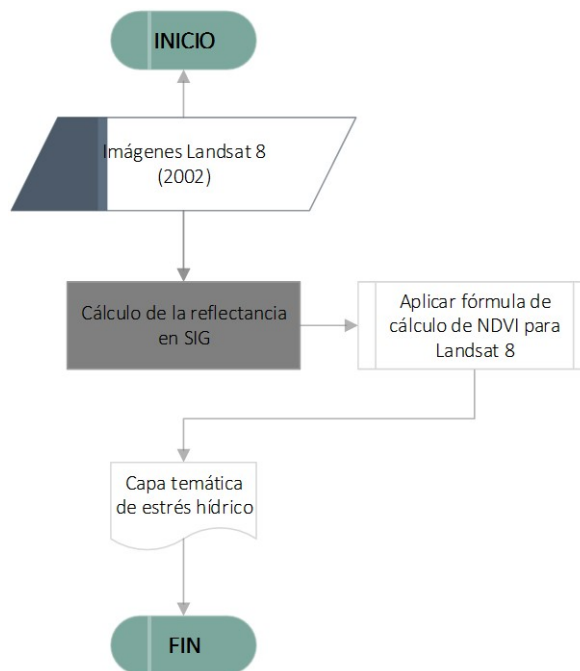
Siguiendo esta lógica y de acuerdo a la distribución de la geología representada en la carta Geológica - Minera E14-2 (2002), fueron asignadas a cada una de las capas litológicas el peso reditivo correspondiente para generar una imagen ráster con estas características incluidas.

| TABLA. MATRIZ DE PESOS PONDERADOS DE LAS CAPAS LITO-GEOLOGICAS ASVP | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|-------|-----|-----|--------|-------|------|------|-------|----------|-------|--------|---------|------|--------|----|-----|--------|-------|---------------|
| | EVAP. | AL | LAC | P. AND | A-D-B | A-B | AND | A - D | T. A - A | T.D/C | T. BLS | T. A -A | LHR. | T. AND | TR | CLZ | Σ | Σ/n | peso reditivo |
| EVAP. | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 4 | 4 | | 38 | 2.53 | 0.104 |
| AL | 0.5 | 1 | 3 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 2 | 2 | | 33.5 | 2.23 | 0.092 |
| LAC | 0.5 | 0.3 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 2 | 2 | | 30.83 | 2.06 | 0.085 |
| P. AND | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 1 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 2 | 2 | 4 | 4 | 2 | 2 | | 38.5 | 2.57 | 0.106 |
| A-D-B | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.25 | 1 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 2 | 2 | | 38.75 | 2.58 | 0.106 |
| A-B | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.25 | 0.25 | 1 | 4 | 4 | 4 | 2 | 4 | 4 | 4 | 2 | 2 | | 33 | 2.20 | 0.091 |
| AND | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.25 | 0.25 | 0.25 | 1 | 4 | 4 | 2 | 4 | 4 | 4 | 2 | 2 | | 29.25 | 1.95 | 0.080 |
| A - D | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.25 | 0.25 | 0.25 | 0.25 | 1 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 2 | 2 | | 27.5 | 1.83 | 0.075 |
| T. A -A | 0.33 | 0.3 | 0.3 | 0.25 | 0.25 | 0.25 | 0.25 | 0.25 | 1 | 2 | 4 | 4 | 4 | 2 | 2 | | 21.24 | 1.42 | 0.058 |
| T.D/C | 0.33 | 0.3 | 0.3 | 0.5 | 0.25 | 0.5 | 0.5 | 0.25 | 0.5 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | | 14.49 | 0.97 | 0.040 |
| T. BLS | 0.33 | 0.3 | 0.3 | 0.5 | 0.25 | 0.25 | 0.25 | 0.25 | 0.25 | 0.5 | 1 | 4 | 4 | 4 | 4 | | 20.24 | 1.35 | 0.056 |
| T. A -A | 0.33 | 0.3 | 0.3 | 0.25 | 0.25 | 0.25 | 0.25 | 0.25 | 0.25 | 0.5 | 0.25 | 1 | 4 | 2 | 2 | | 12.24 | 0.82 | 0.034 |
| LHR. T. AND | 0.33 | 0.3 | 0.3 | 0.25 | 0.25 | 0.25 | 0.25 | 0.25 | 0.25 | 0.5 | 0.25 | 0.25 | 1 | 2 | 2 | | 8.46 | 0.56 | 0.023 |
| TR | 0.25 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.25 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 1 | 4 | | 11 | 0.73 | 0.030 |
| CLZ | 0.25 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.25 | 0.5 | 0.5 | 0.3 | 1 | | 7.25 | 0.48 | 0.020 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | 364.25 | 24.28 | 1.000 |

Figura 5.1: Matriz de pesos ponderados de las unidades litológicas que conforman el sistema acuífero. Espinoza Juárez T. (2022), en preparación. Simbología: EVAP. = Evaporitas, AL= Aluvión, LAC= Lacustre, P. AND= Pórfido Andesítico, A-D-B= Andesita-Dacita-Basalto, A-B= Andesita-Basalto, AND= Andesita, A-D= Andesita-Dacita, T.A-A= Toba Andesítica-Andesita, T.D/C= Toba Dacítica del Cuaternario, T. BLS= Tobas grupo Balsas, T.A-A= Toba Andesítica-Andesita, LHR.T.AND= Lahar de Toba Andesítica, TR= Travertino, CLZ= Caliza.

5.1.5. Capa de NDVI:

Se descargaron dos imágenes satelitales Landsat 8 del año 2020, obtenidas de la plataforma “Earth Explorer” de la USGS, donde se usaron las bandas que corresponden al espectro visible y la banda NIR (Infrarrojo cercano). Las bandas correspondientes al espectro visible RGB fueron empleadas para ubicar las zonas verdes y las zonas urbanizadas. Sin embargo, el objetivo principal de las imágenes satelitales fue realizar el cálculo del NDVI. Para este trabajo el NDVI se calculó para poder localizar las zonas dentro del polígono que sufren de estrés hídrico.

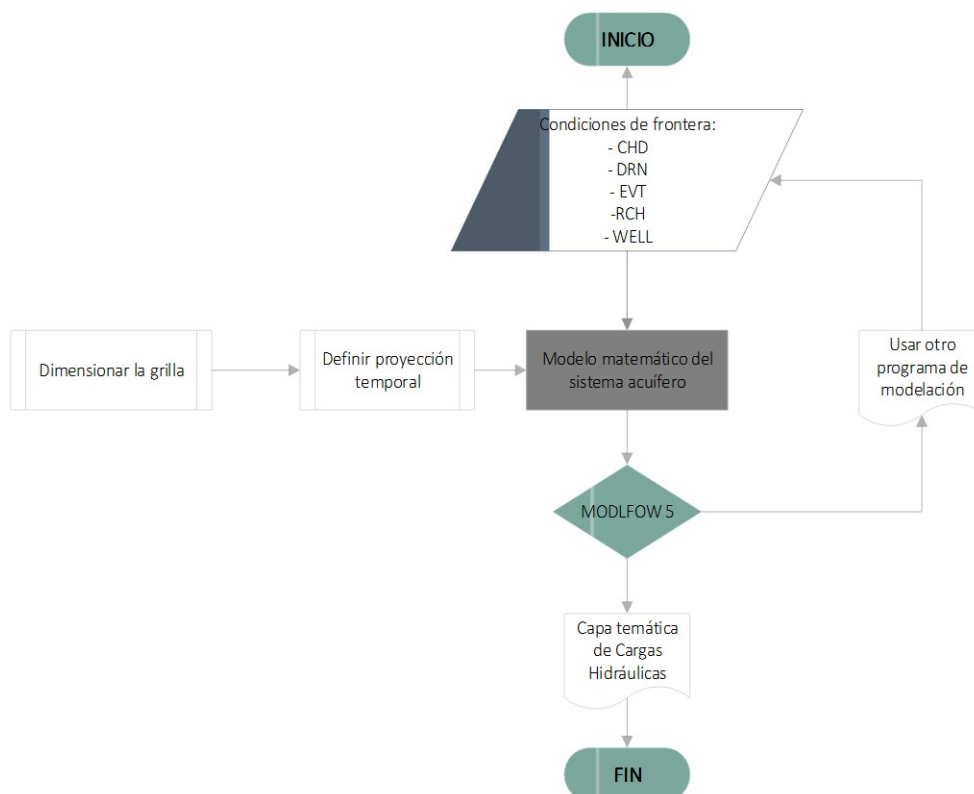


5.1.6. Capa de gradiente hidráulico:

La construcción de esta capa se llevó a cabo en el programa MODFLOW 2005, con el objetivo de generar un modelo matemático del flujo regional en el sistema acuífero haciendo uso de 5 módulos que proporciona el mismo software a través de su interfaz gráfica ModelMuse.

- CHD (Condición de Carga Constante): Tomada desde el “Model Top” y hasta 2 m de profundidad.
- DRN (Drenes): Se consideró el río Atoyac que confluye con el río Zahuapan, mismo que recorre de norte a sur la subcuenca como dren principal. De acuerdo con Muñoz Máximo (2005) se asignó un valor de conductancia igual a 0.001 m/s.
- EVT (Evapotranspiración): Se llevó a cabo el cálculo de evapotranspiración a través del álgebra de mapas aplicando la fórmula de Turc (Remenieras, 1974; Custodio y Llamas, 2001), donde se emplearon datos de precipitación y temperatura media anual extraídos de la base de datos de la NASA. Para el año 2002 se obtuvo un valor promedio de 7.22225E-11 m/s, mismo que fue asignado a este módulo.
- RCH (Recarga): Retomada del trabajo de Muñoz Máximo (2005), se asignó a este módulo un valor de 3.51E-15 m/s.
- Well (Pozos): Fueron importados 84 pozos con su correspondiente caudal hidráulico retomado del Censo oficial de CONAGUA (2002).

Como resultado se obtuvieron 2 mapas de carga hidráulica, el primero abarca el periodo 2002-2010 y el segundo del 2002 - 2026.



| Características del modelo matemático ASVP | |
|--|---|
| Superficie simulada | 4024372898.5 m ² |
| Largo | 349063.77 m |
| Ancho | 115229.05 m |
| Tamaño de la celda | 1000 m |
| Método de discretización | Diferencias finitas (Escala 1:50 000) |
| Filas | 82 |
| Columnas | 82 |
| Discretización vertical | 5 unidades (El espesor varía) |
| Condiciones de frontera | |
| Evapotranspiración | -8.9910x10 ⁻¹⁵ m/s (IMERG y AIRIS, 2002) |
| Conductancia | 0.0005 (Muñoz, 2015) |
| Recarga | 3.51x10 ⁻¹⁵ m/s (CONAGUA, 2010) |
| K U1 | 3.456 m/s (Velázquez O., 2007) |
| K U2 | 0.691 m/s (Velázquez O., 2007) |
| K U3 | 0.009 m/s (Velázquez O., 2007) |
| Almacenamiento específico | 1x10 ⁻⁵ /m |
| Rendimiento específico | 0.2 |

Figura 5.2: Características y resumen de los datos que se emplearon para la construcción del modelo matemático.

Finalmente, fue construida una matriz de pesos ponderados usando a las variables propuestas considerando a la variable de mayor peso a las concentraciones de SO₄.

Para poder asignar una jerarquía a cada una de las variables, se tomó en consideración el criterio de diversos autores los cuales coincidieron en la mayoría de estas variables; por lo tanto, a raíz de esto se logró validar la matriz de pesos ponderados propuesta para este trabajo.

| Autores | Estudio | Criterios |
|--------------------------|--|--|
| Muñoz Máximo (2015) | CAMBIO DEL USO DEL SUELO Y MODELACIÓN HIDROGEOLOGICA DEL ACUÍFERO DEL VALLE DE PUEBLA | Niveles piezométricos Niveles estáticos Geología estratigráfica Geología estructural Geofísica (SEVs) Uso del suelo |
| Salcedo y Sánchez (2013) | MODELO DE OPTIMIZACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS PARA UNA GESTIÓN SOSTENIBLE DEL ACUÍFERO DEL VALLE DE PUEBLA, MÉXICO | Niveles piezométricos Niveles estáticos Geología estratigráfica |
| Arroyo Domínguez (2005) | DETERMINACIÓN DEL ORIGEN DE LA CONTAMINACIÓN NATURAL EN EL ACUÍFERO DEL VALLE DE PUEBLA MEDIANTE ANÁLISIS GEOQUÍMICOS E ISOTÓPICOS | Geoquímica e isótopos estables Geología estratigráfica Geología estructural Geofísica (SEVs) |
| Jiménez Suárez (2006) | ESTUDIO DE INTRUSIÓN DE AGUA GEOTÉRMICA POR EXPLOTACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS EN EL SISTEMA ACUÍFERO DEL VALLE DE PUEBLA, MÉXICO | Geoquímica Niveles piezométricos Abatimiento Geología estratigráfica Geología estructural Geofísica (SEVs) |
| Velázquez Oliman (2007) | CARACTERIZACIÓN GEOQUÍMICA E HIDRODINÁMICA DEL SISTEMA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS DEL VALLE DE PUEBLA, MÉXICO | Geología estratigráfica Geoquímica e isótopos estables Geofísica (SEVs) |
| Garfías J. (2009) | HIDROGEOQUÍMICA Y ORIGEN DE AGUAS MINERALIZADAS EN EL SISTEMA ACUÍFERO DE PUEBLA, MÉXICO. | Geoquímica Geología estratigráfica Geología estructural |

Figura 5.3: Tabla de criterios en los que se basaron diversos autores para sus modelos del ASVP.

| TABLA. MATRIZ DE PESOS PONDERADOS DE LAS CAPAS TEMÁTICAS ASVP | | | | | | | | | |
|---|-----------------|--------|------|------|------|------|----------|------------|---------------|
| | SO ₄ | CRG_HD | ABA | AMG | GEO | NDVI | Σ | Σ/n | Peso reditivo |
| SO ₄ | 1 | 6 | 5 | 5 | 4 | 3 | 24 | 4.8 | 0.328 |
| CRG_HD | 0.16 | 1 | 6 | 5 | 5 | 5 | 22.16 | 4.432 | 0.303 |
| ABA | 0.2 | 0.16 | 1 | 5 | 3 | 2 | 11.36 | 2.272 | 0.155 |
| AMG | 0.33 | 0.2 | 0.2 | 1 | 3 | 2 | 6.73 | 1.346 | 0.092 |
| GEO | 0.25 | 0.2 | 0.33 | 0.33 | 1 | 4 | 6.11 | 1.222 | 0.084 |
| NDVI | 0.33 | 0.2 | 0.5 | 0.5 | 0.25 | 1 | 2.78 | 0.556 | 0.038 |
| | | | | | | | 73.14 | 14.628 | 1 |

Figura 5.4: Matriz de pesos ponderados de las capas temáticas ASVP. Espinoza Juárez T. (2022), en preparación. Simbología: SO₄= Concentraciones de SO₄, CRG_HD= Cargas hidráulicas, ABA= Abatimiento, AMG= Aeromagnetismo, GEO= Geología, NDVI= Índice de Vegetación Normal.

Después se reclasificaron las escalas de valores de cada una de las capas temáticas y se les otorgó el peso reditivo correspondiente para que al sumarlas se respetara la jerarquía de cada capa.

5.2. Procesamiento de datos

En los siguientes apartados se presentan tres procedimientos correspondientes a las capas temáticas de abatimiento, anomalías magnéticas y cargas hidráulicas.

5.2.1. Abatimiento

La evolución del abatimiento se calculó con datos de niveles estáticos y con datos de caudal de pozos.

Validación

Se utilizó la tendencia de los niveles estáticos para validar el modelo, basados en la simulación de la evolución de los mismos en el periodo 2002 - 2010, obteniendo como producto el escenario predictivo de abatimiento 2002 - 2026.

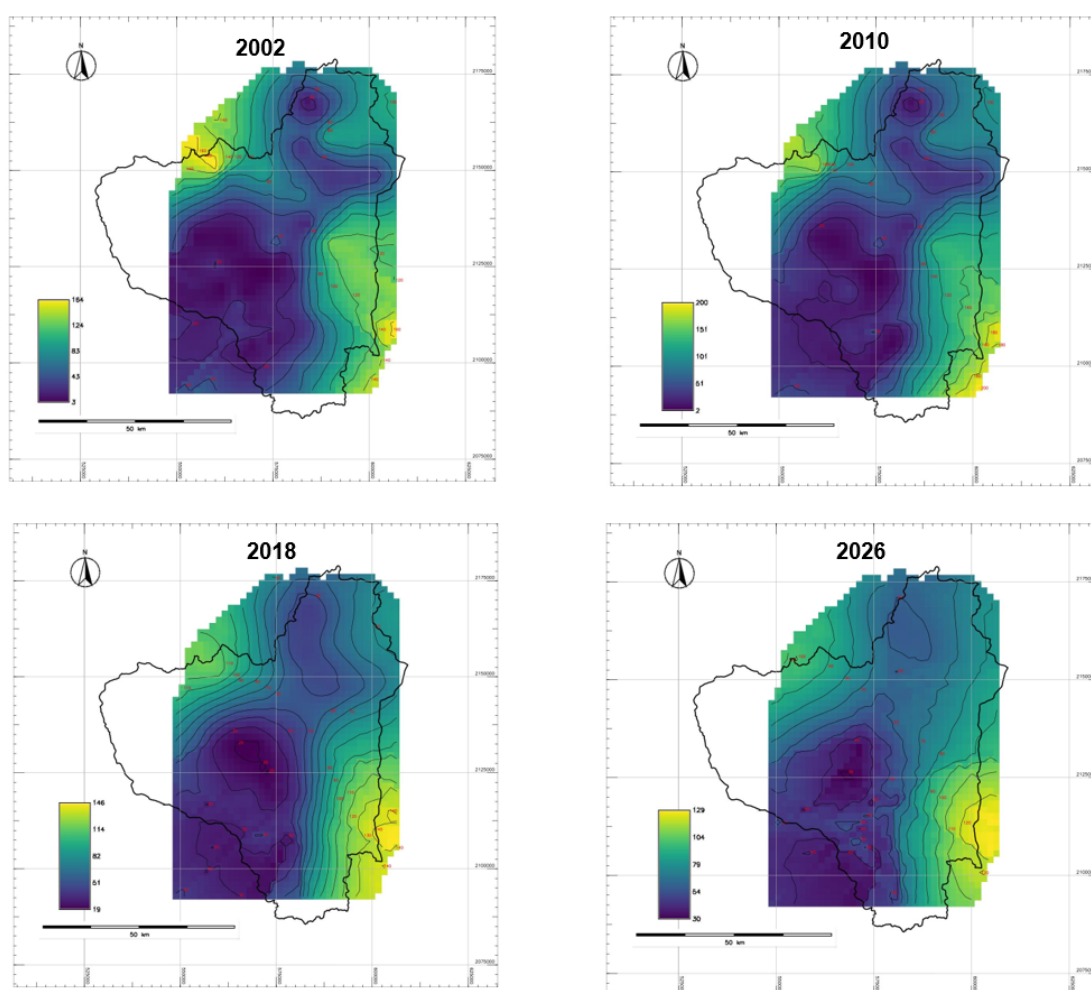


Figura 5.5: Evolución de niveles estáticos 2002 - 2026. Espinoza Juárez T. (2022), en preparación.

- Simulación de evolución de abatimiento (2002 - 2010)

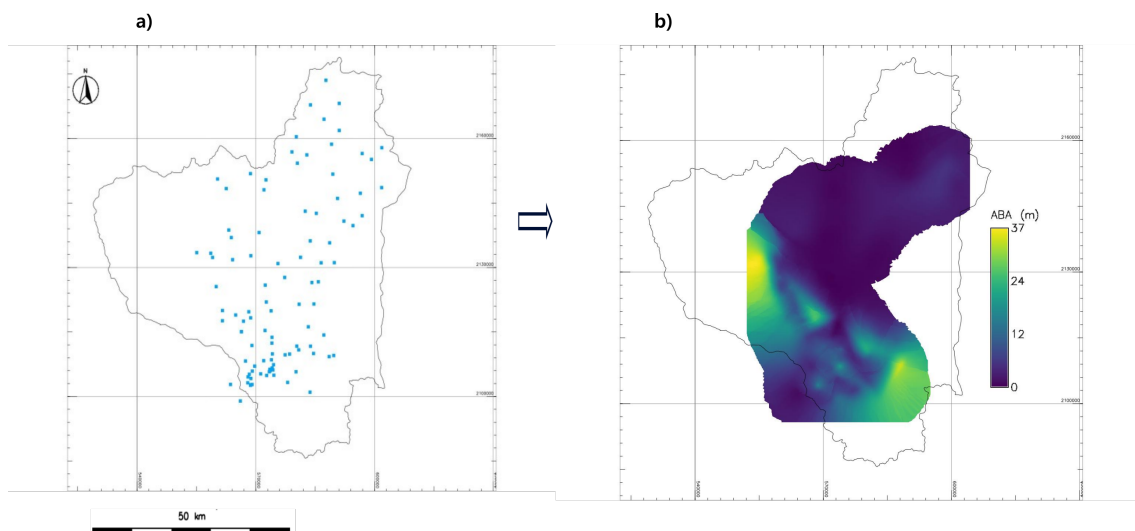


Figura 5.6: Simulación de evolución de abatimiento, validación de datos del ASVP. a) Datos reales de abatimiento de 100 pozos, con un rango de 0 a 47.55 m. b) Datos interpolados de abatimiento, con un rango de 0 a 37 m. Espinoza Juárez T. (2022), en preparación.

- Escenario predictivo final (2002 - 2026)

Calibración

El procesamiento de los caudales de pozos se realizó en MODFLOW 2005, donde se obtuvo como resultados simulaciones mensuales y una simulación a 24 años de “Drawdown”.

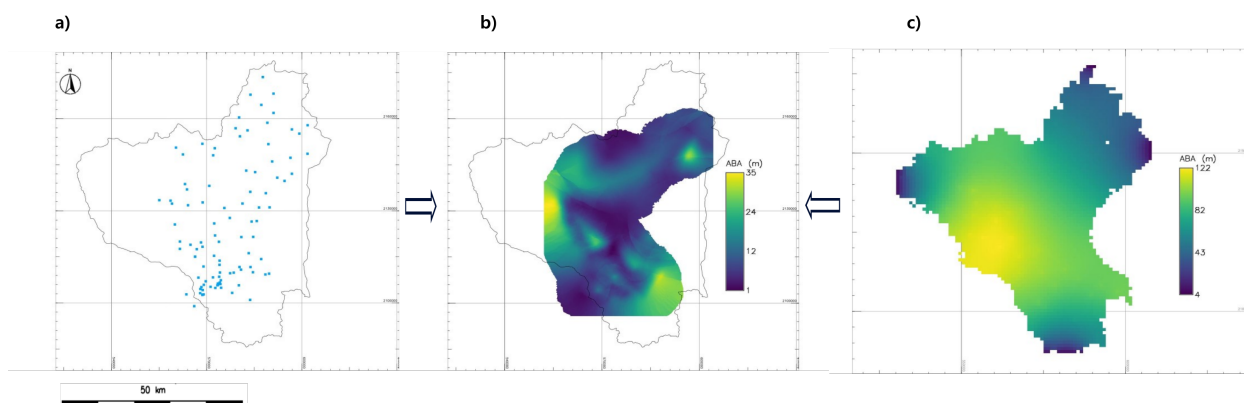


Figura 5.7: Escenario predictivo final (2002 - 2026), validación de datos de abatimiento del ASVP. a) Datos reales de abatimiento de 100 pozos, con un rango de 0 a 160.8 m. b) Datos interpolados de abatimiento, con un rango de 2 a 105 m. c) Datos de abatimiento simulados en MODFLOW a partir de caudales de 95 pozos, con un rango de 4 a 122 m. Espinoza Juárez T. (2022), en preparación.

Finalmente, con una proyección a 24 años se obtuvo un abatimiento total de 34.19 m y anual de 1.4 m.

5.2.2. Concentración de SO₄

Se consideraron 85 muestras en total, recolectadas de pozos. La Figura 5.6 muestra los datos antes y después de la interpolación.

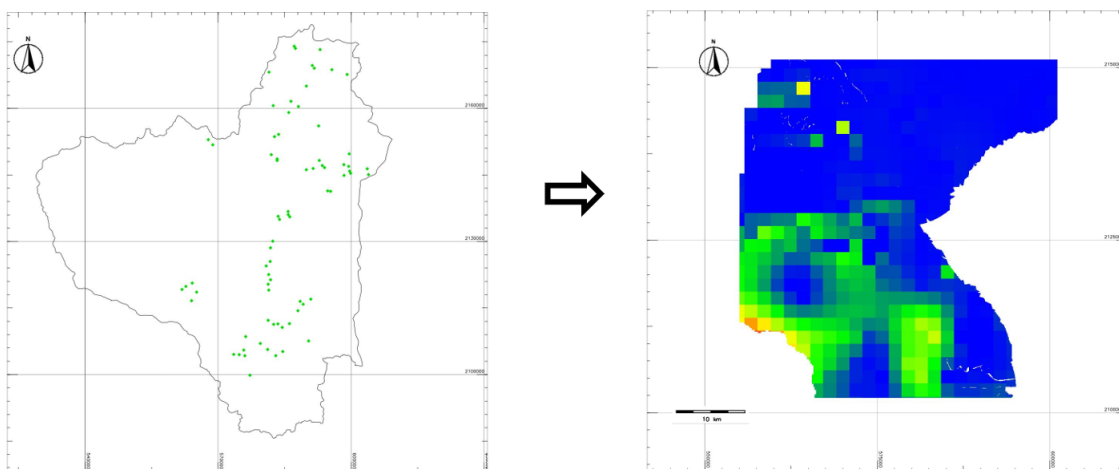


Figura 5.8: Validación de datos de concentración de SO₄ del ASVP. a) Datos reales, con un rango de 0.19 - 794 mg/L. b) Datos interpolados, con un rango de 0 - 1311 mg/L. Datos obtenidos de INEGI (2017) y Garfias (2009).

La gráfica de la figura 5.7 valida los datos de concentración, ya que se encuentran dentro del rango de valores obtenidos de Espinosa (2020) y Jaime Garfias (2009).

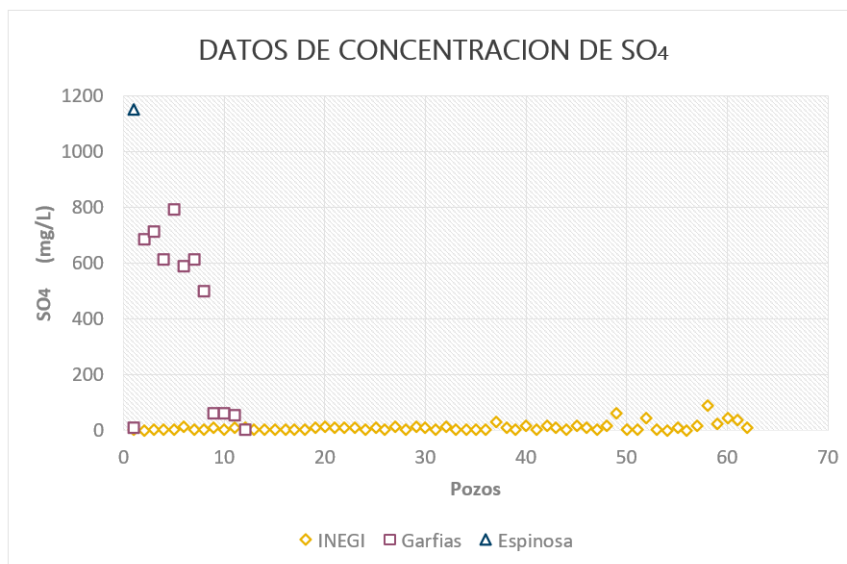


Figura 5.9: Comparación de datos de muestras de pozo de SO₄ de INEGI (2017), Jaime Garfias (2009) y Espinosa (2020). Espinoza Juárez T. (2022), en preparación.

5.2.3. Anomalías magnéticas

Los datos de campo magnético total fueron procesados en MagPick y Oasis montaj, fueron aplicados diferentes filtros con el propósito de identificar lineamientos que sean correlacionables con estructuras de tipo fallas y fracturas.

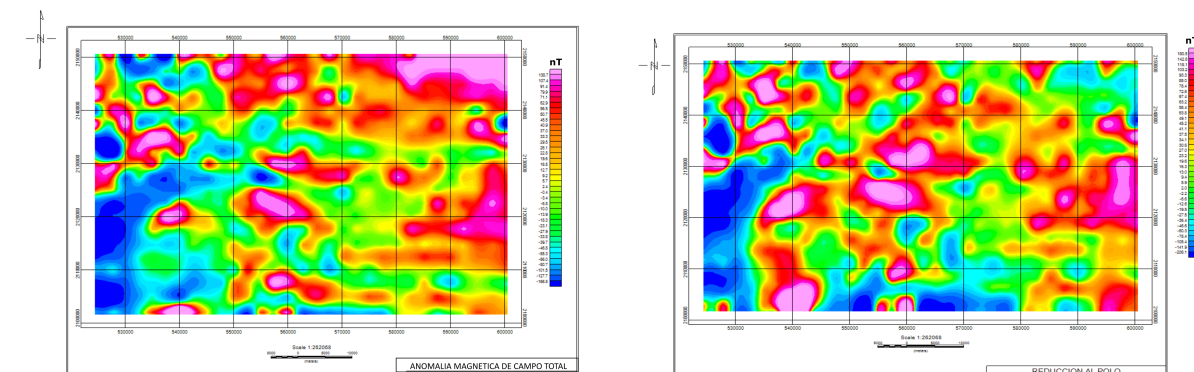


Figura 5.10: a) Mapa de anomalía magnética de campo total. b) Mapa de anomalía magnética reducida al polo. Datos procesados de la Carta Aeromagnética E14-2 (2007), SGM.

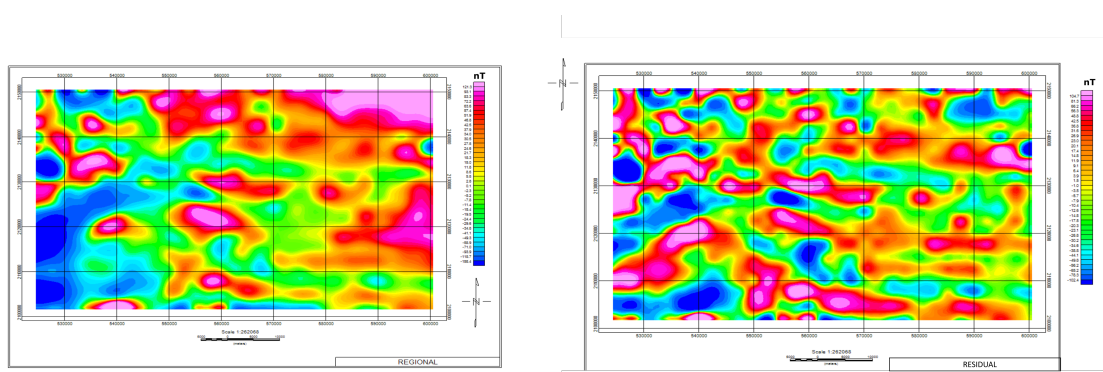


Figura 5.11: a) Mapa de anomalía regional. b) Mapa de anomalía residual. Datos procesados de la Carta Aeromagnética E14-2 (2007), SGM.

Se generó un mapa de Gradiente Horizontal, en donde se logró hacer el reconocimiento de diferentes cuerpos litológicos. El mapa de señal analítica muestra la misma distribución de las anomalías del mapa de gradiente horizontal pero de una forma más puntual, y en conjunto con la geología de la zona, se logran identificar cuatro dominios aeromagnéticos.

- DAMI: Distribución de rocas volcánicas que tienen una transición de magma basáltico - andesítico - dacítico, las cuales forman parte del Itztaccihuatl y el volcán Telapón.
- DAMII: Distribución de rocas volcánicas y tobas de composición basáltica que corresponden a la formación del volcán Popocatepetl.
- DAMIII: Depósitos de brecha volcánica con composición andesítica, estos depósitos corresponden a la formación del volcán La Malinche.
- DAMIV: Distribución de sedimentos que corresponden a un aluvión antiguo.

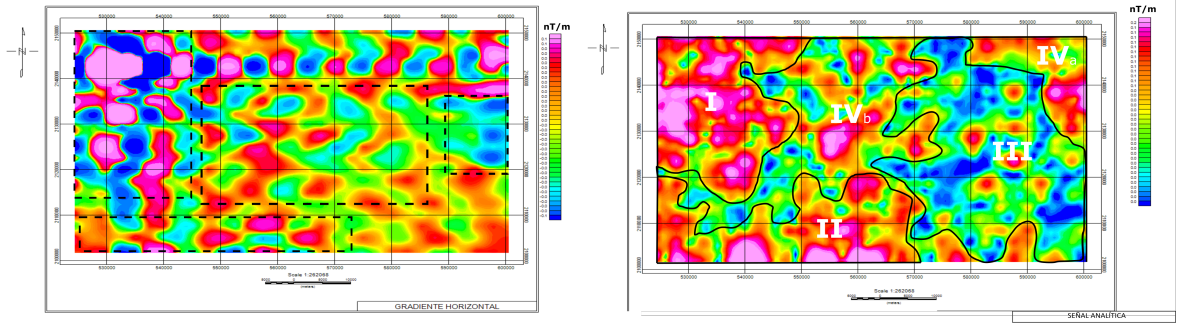


Figura 5.12: a) Mapa de gradiente horizontal. b) Mapa de señal analítica. Datos procesados de la Carta Aeromagnética E14-2 (2007), SGM.

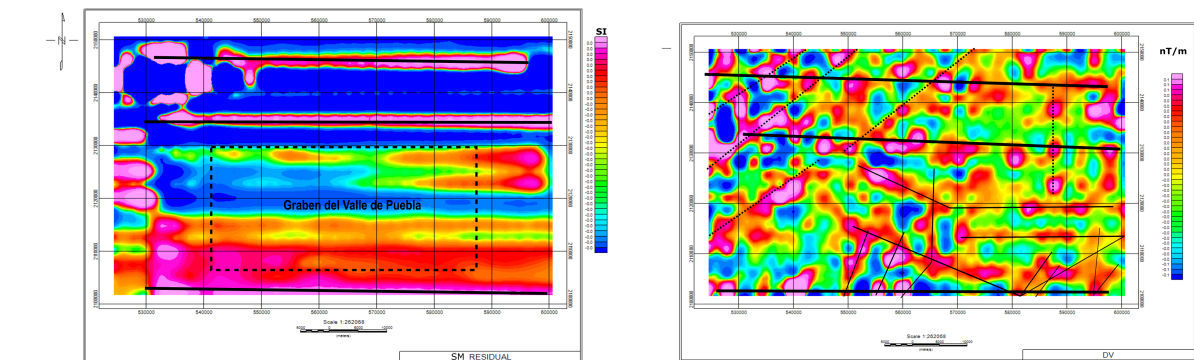


Figura 5.13: a) Mapa de susceptibilidad magnética. b) Mapa primera derivada vertical. Datos procesados de la Carta Aeromagnética E14-2 (2007), SGM.

En la figura 5.13 se observan los lineamientos que son razonablemente asociables a fallas y fracturas que son características del Graben del Valle de Puebla, mismas se pueden inferir con base en la geología y en el mapa de susceptibilidad magnética puesto que refleja un cambio de litología y densidad en materiales. El mapa de susceptibilidades magnéticas arroja valores menores a 0.01 SI, característico de materiales diamagnéticos, minerales que no contienen hierro, algunas rocas sedimentarias como la dolomia y algunos carbonatos.

Extrayendo el espectro radial de potencia, se logró estimar una profundidad aproximada de 4 km para las anomalías regionales y una profundidad aproximada de 1.6 km para las anomalías residuales.

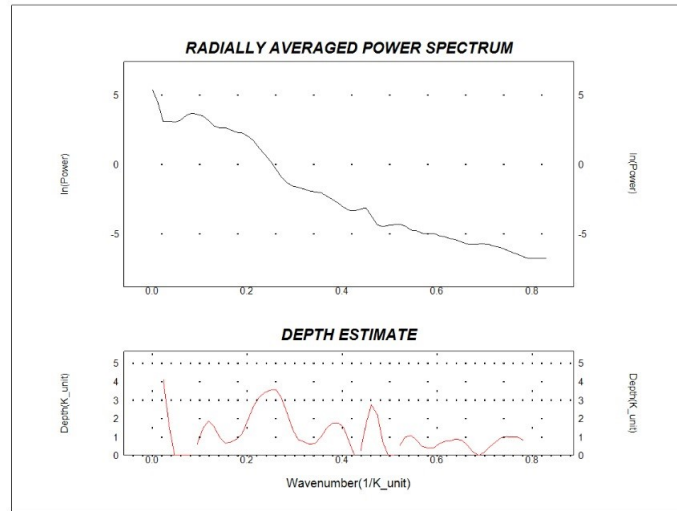


Figura 5.14: Gráfica de Espectro radial de potencia. Eje y=lnP vs eje x=Longitud de onda. Datos extraídos de Carta Aeromagnética E14-2 (2007), SGM.

La Figura 5.15 muestra la similitud que hay entre el mapa de Lermo Samaniego (2006) con los lineamientos obtenidos del procesamiento de datos aeromagnéticos; siendo este trabajo un sustento más de la presencia de estructuras geológicas que rigen la hidrodinámica de la subcuenca.

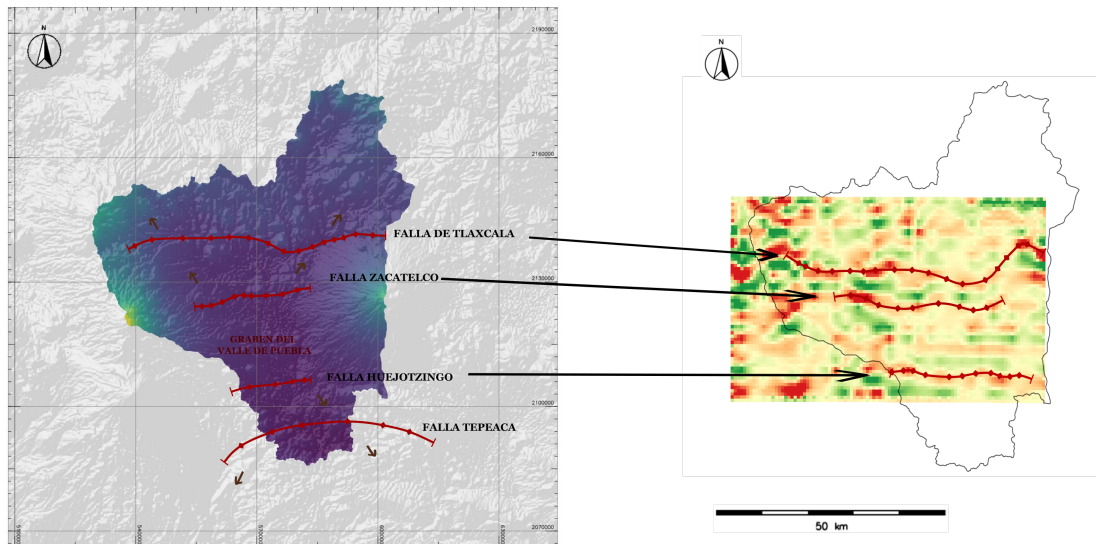
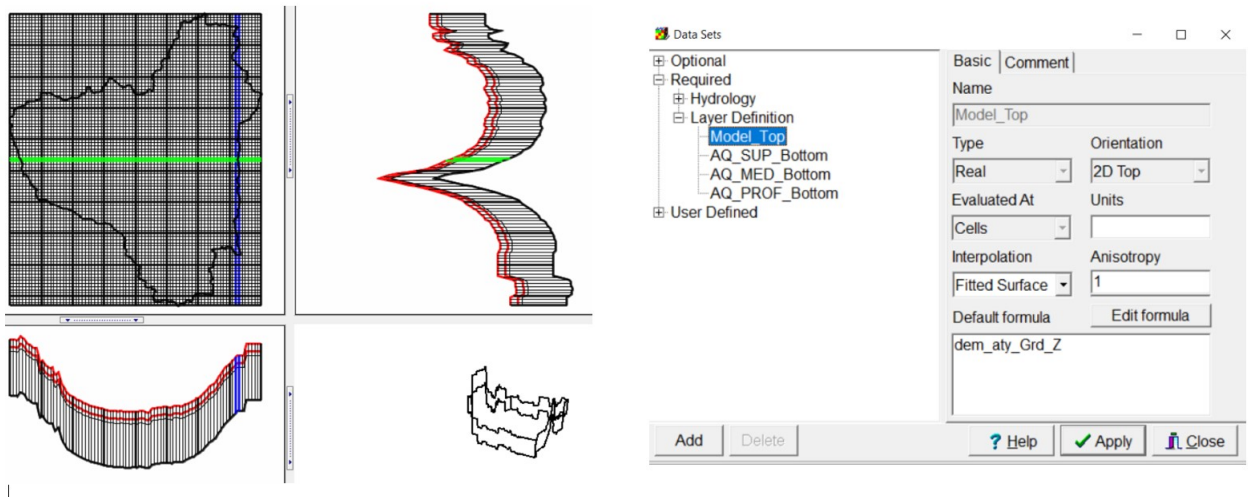


Figura 5.15: Validación de datos aeromagnéticos. Datos extraídos de la Carta Aeromagnética E14-2 (2007), SGM y Lermo Samaniego (2006).

5.2.4. Modelo matemático de flujo regional

El primer paso consistió en abrir la interfaz gráfica ModelMuse y seleccionar la versión de MODFLOW 2005 para a continuación definir el polígono de referencia, así como la grilla en la cual cada celda tiene un tamaño de 1 km², de igual manera se importó un modelo de elevaciones topográficas. A continuación, se modificaron las propiedades de las unidades hidrológicas correspondientes al acuífero superior, medio y profundo; asignando valores de profundidades, espesores, conductividad hidráulica, almacenamiento y rendimiento específico.



En la herramienta “time” se establecieron valores para que la simulación corriera en pasos de 8 años dentro de un periodo total de 24 años. Debido a que al inicio del procesamiento se configuraron las unidades de longitud como m (metros) y las de tiempo como s (segundos), las cantidades ingresadas fueron readaptadas a este sistema.

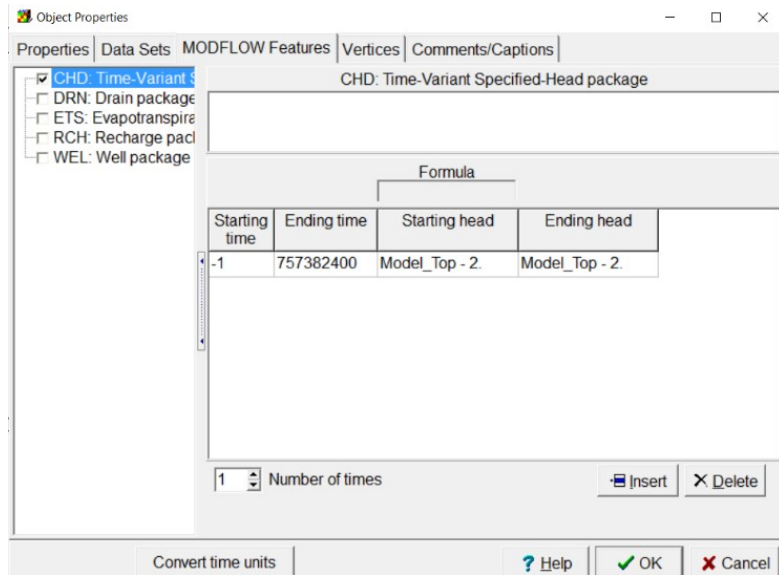
| | | Length | Max first time step length | Multiplier | Steady State/Transient | | | |
|---------------|---------------|-------------|----------------------------|----------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------------------|------------------------------|
| | | 0 | 0 | 0 | - | | | |
| Stress period | Starting time | Ending time | Length | Max first time step length | Multiplier | Steady State/Transient | Drawdown reference | Number of steps (calculated) |
| 1 | -1 | 0 | 1 | 1 | 1 | Steady state | <input checked="" type="checkbox"/> | 1 |
| 2 | 0 | 757382400 | 757382400 | 252460800 | 1 | Transient | <input type="checkbox"/> | 3 |

2 Number of stress periods seconds (1) Time unit (ITMUNI) Delete Insert

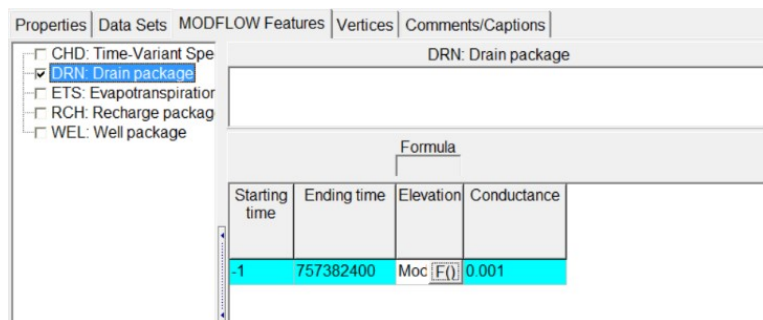
Convert time units Help OK Cancel

El segundo paso consistió en definir las condiciones de frontera (entradas – salidas) haciendo uso de los módulos mencionados en la metodología.

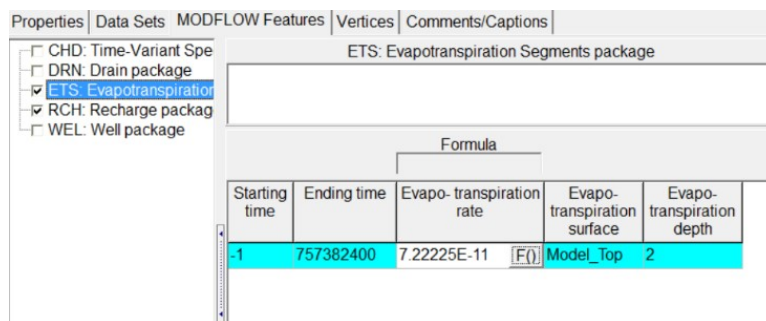
- CHD: Alrededor de la grilla se trazó un polígono que definirá la condición de carga constante dentro del periodo de tiempo de 24 años.



- DRN: Se importó el shapefile del río principal, y a través del módulo “Drain Package” se asignó el valor de conductancia dentro del intervalo de tiempo definido:



- EVT: El valor de evapotranspiración se calculó con la ecuación de Turc a través de los mapas ráster de precipitación media anual y temperatura media anual del 2002. Obteniendo como resultado un mapa ráster de la Tasa de Evapotranspiración.



Se tomó el valor promedio del mapa obtenido y se insertó en el módulo de ETS bajo el intervalo de tiempo definido.

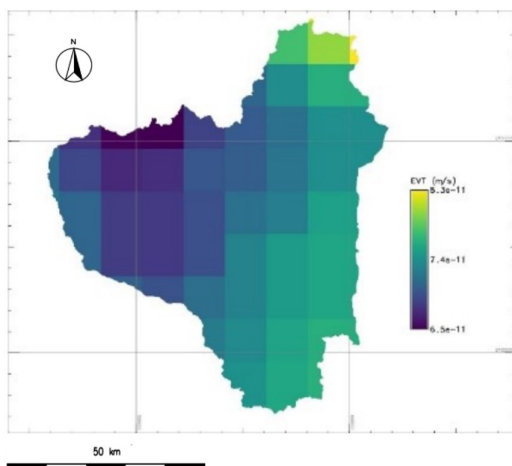
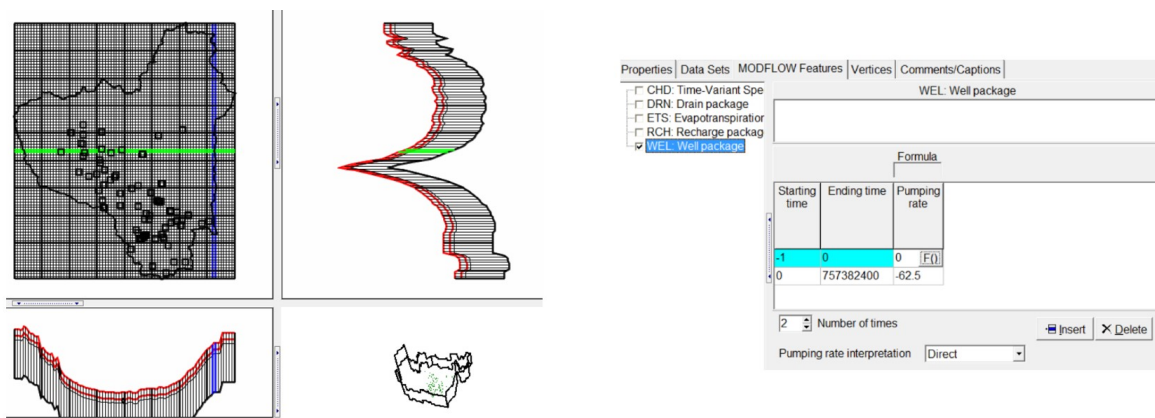


Figura 5.16: Mapa de evapotranspiración real calculada en m/s. Datos extraídos de IMER y AIRIS (2002).

- RCH: En el módulo de recarga se insertó el valor correspondiente bajo el intervalo de tiempo definido.

| RCH: Recharge package | | |
|-----------------------|-------------|---------------|
| Formula | | |
| Starting time | Ending time | Recharge rate |
| -1 | 757382400 | 3.51E-15 |

Well: Se importaron los pozos al modelo considerando la profundidad y su caudal o tasa de bombeo. Se consideró un tiempo inicial igual a cero y el tiempo final de 24 años para la simulación.



Para la tercera etapa se corrió la simulación bajo un modelo polinomial y con un método de diferencias finitas asignando un número máximo de 5000 iteraciones. Como resultado se obtuvo el balance hídrico del sistema acuífero y los 3 escenarios simulados para “cargas hidráulicas” y “abatimiento”.

DRAWDOWN WILL BE SAVED ON UNIT 38 AT END OF TIME STEP 3, STRESS PERIOD 2

1 VOLUMETRIC BUDGET FOR ENTIRE MODEL AT END OF TIME STEP 3, STRESS PERIOD 2

| CUMULATIVE VOLUMES | L**3 | RATES FOR THIS TIME STEP | L**3/T |
|-----------------------|-----------------|--------------------------|--------------|
| IN: | | IN: | |
| --- | --- | --- | --- |
| STORAGE = | 0.9405 | STORAGE = | 0.0000 |
| CONSTANT HEAD = | 7.3096E+15 | CONSTANT HEAD = | 9651134.0000 |
| WELLS = | 1951956224.0000 | WELLS = | 2.5772 |
| DRAINS = | 0.0000 | DRAINS = | 0.0000 |
| RECHARGE = | 10375.7832 | RECHARGE = | 1.3700E-05 |
| ET SEGMENTS = | 0.0000 | ET SEGMENTS = | 0.0000 |
| TOTAL IN = | 7.3096E+15 | TOTAL IN = | 9651137.0000 |
| OUT: | | OUT: | |
| --- | --- | --- | --- |
| STORAGE = | 0.0000 | STORAGE = | 0.0000 |
| CONSTANT HEAD = | 7.2763E+15 | CONSTANT HEAD = | 9607113.0000 |
| WELLS = | 0.0000 | WELLS = | 0.0000 |
| DRAINS = | 3.3343E+13 | DRAINS = | 44024.1016 |
| RECHARGE = | 0.0000 | RECHARGE = | 0.0000 |
| ET SEGMENTS = | -2.4576E+04 | ET SEGMENTS = | -3.2449E-05 |
| TOTAL OUT = | 7.3096E+15 | TOTAL OUT = | 9651137.0000 |
| IN - OUT = | 1073741824.0000 | IN - OUT = | 0.0000 |
| PERCENT DISCREPANCY = | 0.00 | PERCENT DISCREPANCY = | 0.00 |

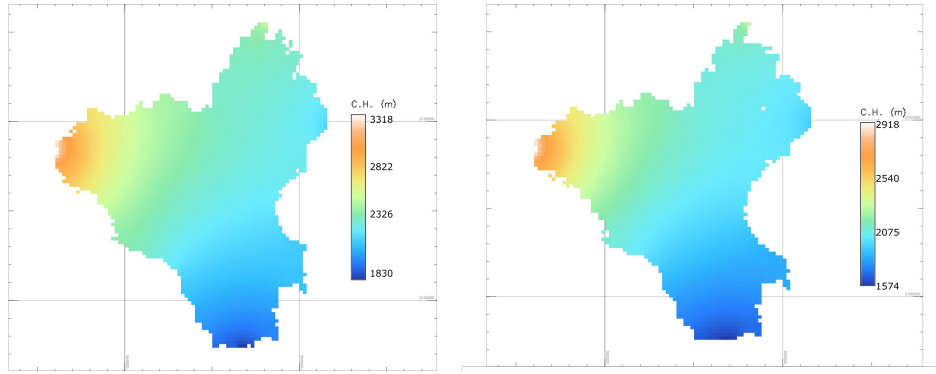


Figura 5.17: Mapas de cargas hidráulicas simuladas a través del tiempo, resultado de modelo del flujo regional. a) Mapa de cargas hidráulicas del primer mes del 2002, b) Mapa de cargas hidráulicas que abarca el periodo de 2018 – 2016. Espinoza Juárez (2022), en preparación.

Finalmente se asignaron 3 puntos de observación para poder apreciar la evolución a través del tiempo de las cargas hidráulicas o niveles piezométricos.

| | | | PUNTO DE PARTIDA | ESCENARIO 1 | ESCENARIO 2 | ESCENARIO 3 |
|---------|--------|---------|------------------|-------------|-------------|-------------|
| | UTM X | UTM Y | 2002 | 2010 | 2018 | 2026 |
| PUNTO 1 | 585588 | 210038 | 2121.654 | 2121.666 | 2047.028 | 2056.976 |
| PUNTO 3 | 576595 | 2111408 | 2161.760 | 2170.294 | 2074.166 | 2095.572 |
| PUNTO 3 | 568748 | 2111144 | 2251.801 | 2146.113 | 2168.080 | 2172.595 |

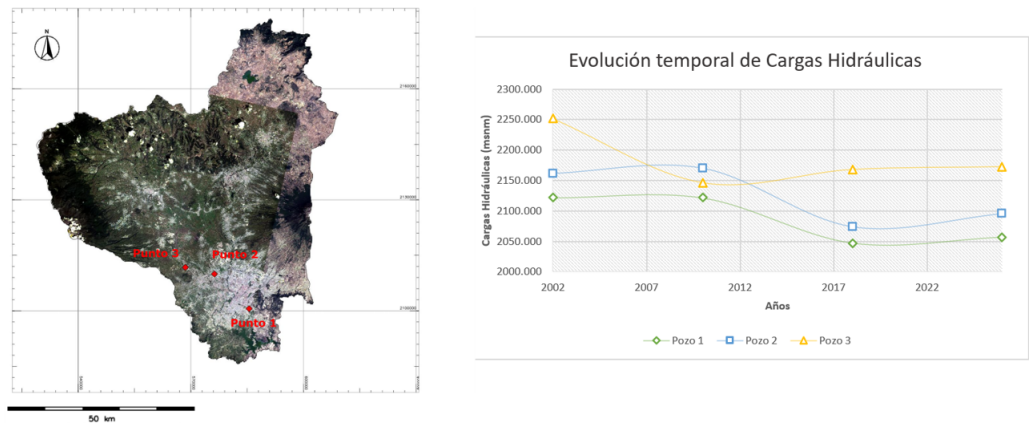


Figura 5.18: Puntos de observación asignados para el mapa de Cargas hidráulicas. Espinoza Juárez (2022), en preparación.

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1. Capas temáticas y reclasificación

Como resultado inicial se obtuvieron las 6 capas temáticas correspondientes a las variables seleccionadas, incluyendo la capa de geología (Figura 3.4).

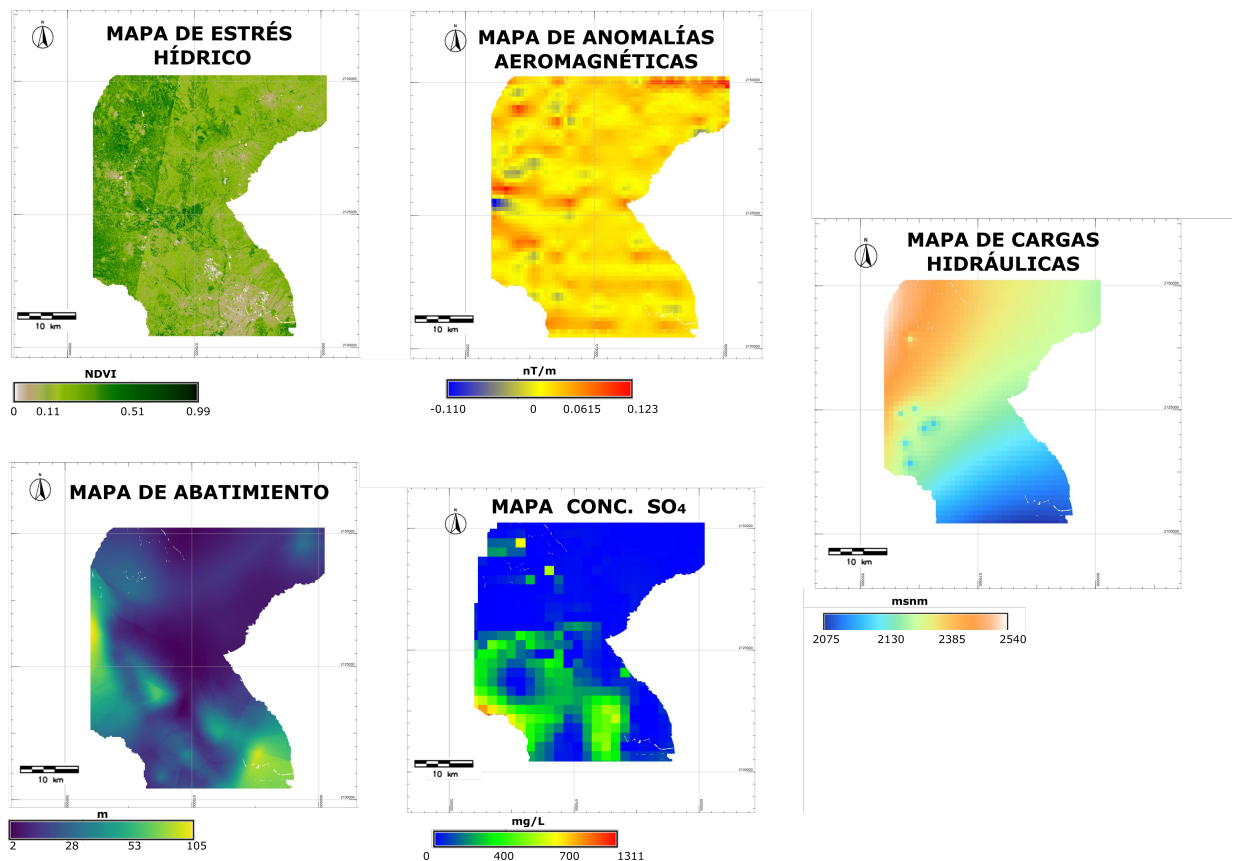


Figura 6.1: Capas temáticas correspondientes a las cinco variables seleccionadas respectivamente. Espinoza Juárez T. (2022), en preparación.

Para obtener el mapa de vulnerabilidad final, se llevó a cabo una reclasificación en tres intervalos:

- 0 - 1 : Baja vulnerabilidad.
- 1 -2 : Media vulnerabilidad.
- 2 - 3 : Alta vulnerabilidad.

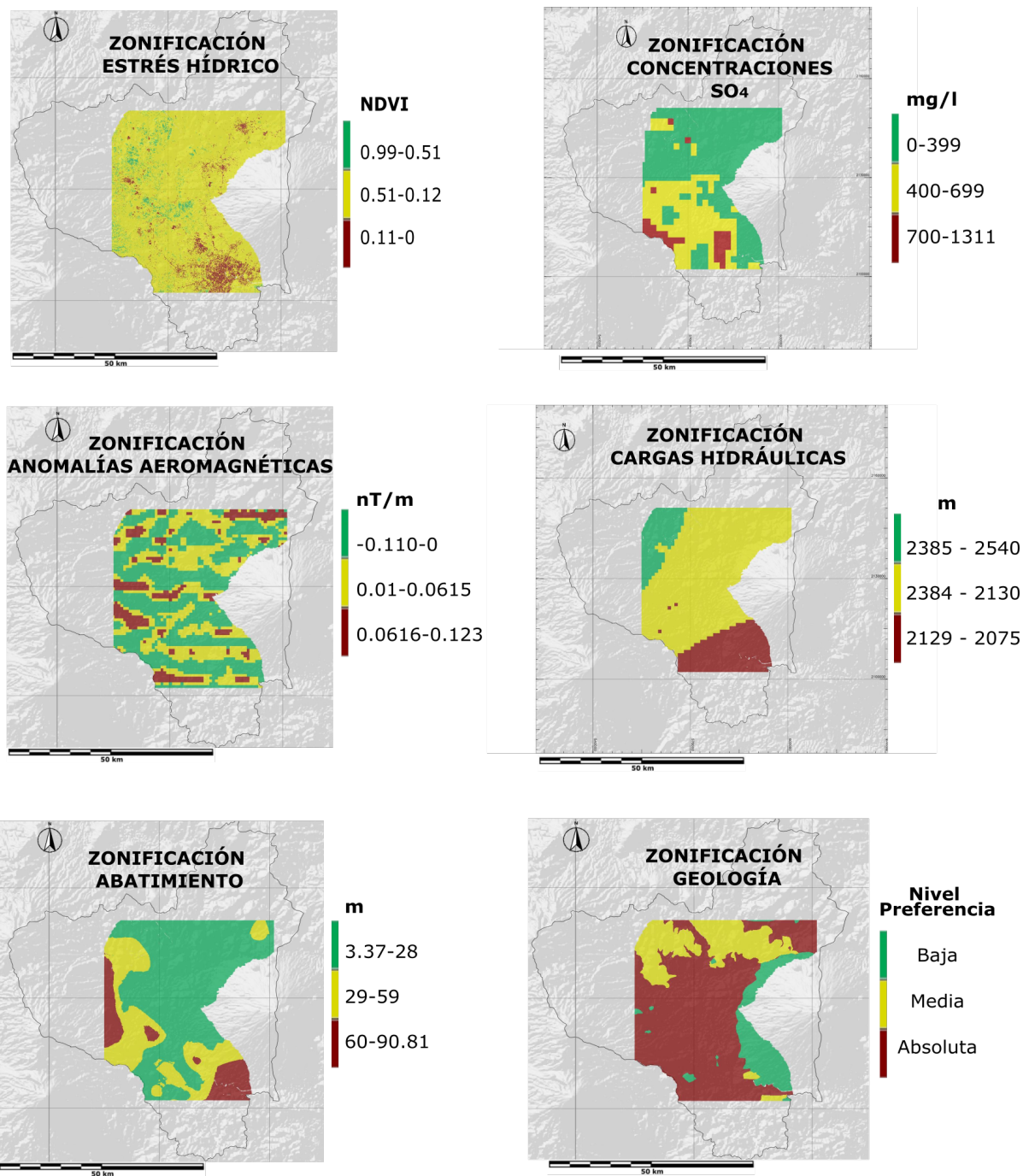


Figura 6.2: Reclasificación de las escalas de las seis capas temáticas en categorías que van del 1-3. Espinoza Juárez T. (2022), en preparación.

6.2. Mapa de vulnerabilidad

En el mapa de vulnerabilidad (Figura 6.3), es posible detectar dos zonas altamente vulnerables a contaminación por aguas sulfurosas profundas.

- Región 1 (oeste): Comprende los municipios de Juan C. Bonilla, San Andrés Cholula, San Pedro Cholula, Huejotzingo, San Martín Texmelucan, Tlaltenango y Chiautzingo.

- Región 2 (sur-sur este): Ubicada en la zona metropolitana de la ciudad de Puebla.

Algo que tienen en común ambas regiones es que se hayan en zonas urbanizadas, sin embargo, su geolocalización también es algo que se debe considerar al momento de interpretar la información, debido a que las condiciones geológicas cambian en función de esto. Por lo tanto, siguiendo esta lógica se han propuesto dos mecanismos que originan el agua sulfurosa:

- Región 1. Asociada a un origen hidrotermal. Debido a que los municipios se encuentran cerca de las faldas del volcán Iztaccíhuatl y Popocatepetl, es razonable pensar que es una zona que presenta múltiples fallas profundas con alto ángulo, mismas que pueden cumplir la función de recarga del acuífero o en su defecto que desarrollen la función de rutas de migración de aguas profundas. De acuerdo con los resultados de los mapas de anomalías magnéticas residuales y regionales, se obtuvieron profundidades que van de 1 a 4 km de profundidad; por lo tanto, una vez que las fallas van más allá del kilómetro de profundidad, encuentran el basamento cristalino sometido a condiciones extremas de presión y temperatura. Arámbula *et al.* (2010) explica el campo de esfuerzos en el Popocatepetl con base en la localización de epicentros de sismos volcanotectónicos, donde el 95 % de estos se localizan directamente por debajo del cráter del volcán a profundidades entre 3 y 4 km. De acuerdo con esta información se puede inferir que las fallas localizadas en las faldas del Iztaccíhuatl son capaces de generar rutas de migración de fluidos altamente enriquecidos en minerales asociados con yacimientos hidrotermales y zonas de mezcla, lo cual se confirma en el trabajo de Rodríguez Espinoza *et al.* (2020) y Flores Márquez (2007).

El trabajo de Velázquez O. (2006) sustenta este hecho, ya que en su trabajo menciona que en el flanco este del Popocatepetl predomina la familia de agua con composición bicarbonatada (Mg-Na-HCO_3), por lo que el origen asociado al estrato de yeso queda descartado.

- Región 2. Asociado a la capa litológica de evaporitas. A comparación de la “Región 1” en la zona metropolitana de Puebla incrementa el número de habitantes debido a que es una zona industrial y por lo tanto la demanda del recurso hídrico va en aumento. Al extraer agua a través de los pozos bajo condiciones de abatimiento se produce la infiltración de agua que hallada en unidades más profundas. De acuerdo con los análisis químicos de Velázquez O. (2007) logra identificar una familia de agua con composición sulfato - bicarbonatada ($\text{Ca-Mg-SO}_4\text{-HCO}_3$) que se encuentra distribuida en el Valle de Puebla; también en el flanco oeste de la Malinche se tiene localizado un manantial de agua rica en sulfuros. Estas evidencias apoyan el origen del agua sulfurosa por el estrato de yeso del Terciario; sin embargo hay puntos específicos dentro del Valle de Puebla donde queda la evidencia de una conexión con el hidrotermalismo, tal es el caso del geiser Cuexcomate (La Libertad) y Agua Azul (Prados Agua Azul).

De acuerdo con lo anterior mencionado, se puede observar una mayor influencia al estrato de yeso para la contaminación natural, sin embargo el origen hidrotermal no se descarta ya que se manifiesta en puntos localizados.

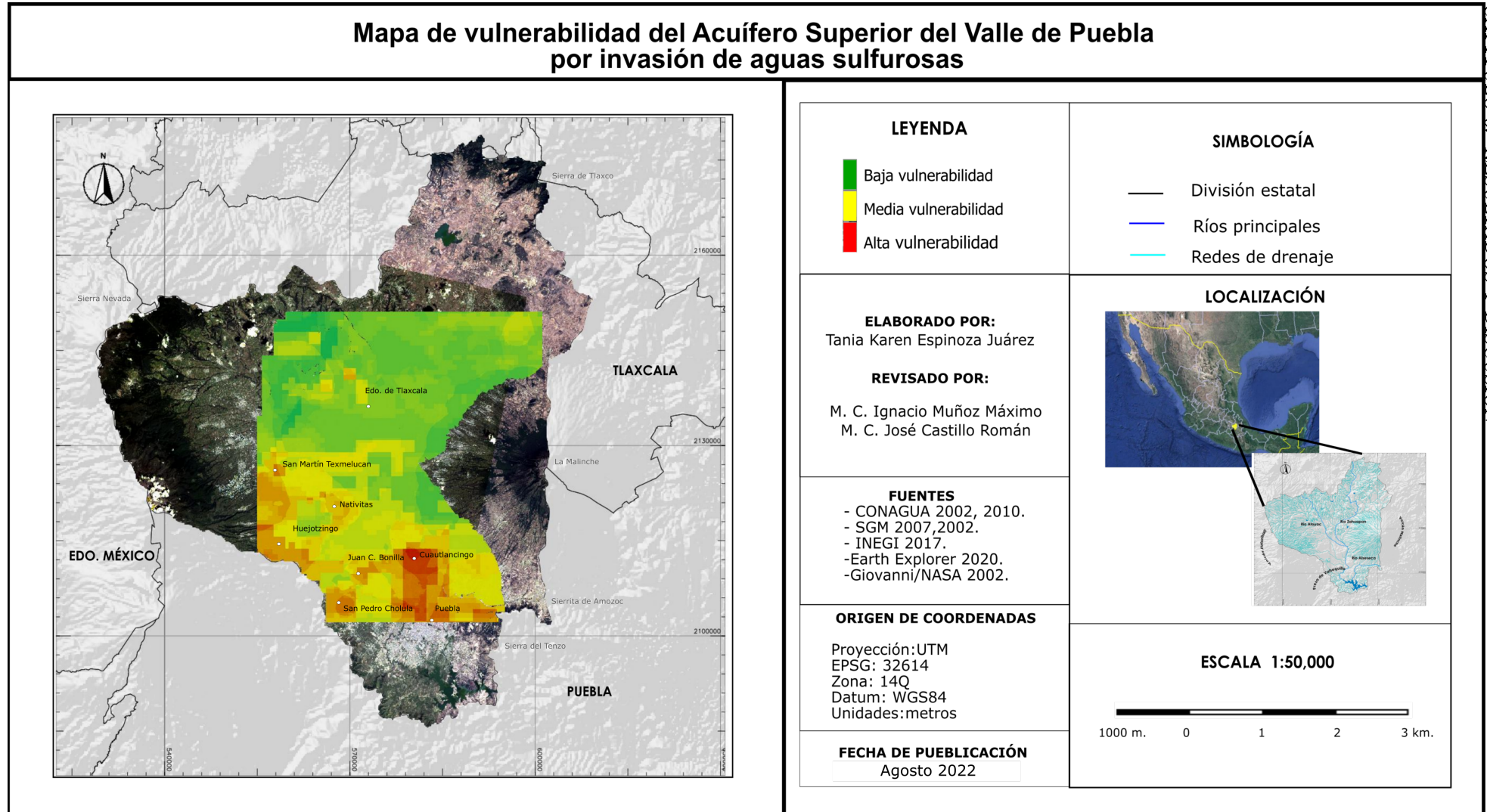


Figura 6.3: Mapa de vulnerabilidad del ASVP, construido a partir de la suma de semáforos de las seis variables involucradas acorde a la matriz de pesos ponderados. Espinoza Juárez T. (2022), en preparación.

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El mapa de vulnerabilidad es el reflejo de las capas temáticas, donde desde un inicio ya se podía observar en el caso de las concentraciones de SO_4 la distribución del contaminante dentro del polígono de estudio, donde finalmente las capas de abatimiento y de cargas hidráulicas expresaron el comportamiento del flujo subterráneo a nivel regional, factor determinante del transporte de solutos a la superficie. De igual manera, la geología es la base del modelo debido a que el flujo de agua se mueve a través de los poros de las distintas unidades litológicas, cambiando así la composición química del agua, como fue el caso de la capa de evaporitas del acuífero profundo. Para complementar esta información era necesario contemplar el factor de estrés hídrico, que como se pudo observar en el mapa delimita a la perfección las zonas de recarga y las zonas con alto estrés hídrico con base en estado de la vegetación.

De acuerdo con los resultados del mapa de vulnerabilidad y debido a la geolocalización de los focos rojos se puede inferir dos posibles orígenes del agua sulfurosa, lo cual es la base para comprender el mecanismo de ascenso de fluidos al ASVP.

Esta información es crucial para identificar y prever futuros planes de manejo, para generar programas estratégicos y acciones efectivas que favorezcan la aplicación de políticas públicas que busquen restituir el equilibrio de cuenca para mitigar y disminuir las posibilidades de migración de aguas sulfurosas y otros tipos de contaminantes al ASVP.

Considerando los resultados del mapa de vulnerabilidad, se hacen las siguientes recomendaciones:

- A las autoridades se recomienda generar un plan estratégico que regule la extracción del recurso hídrico en los focos rojos, lo cual ayudará a que el acuífero tenga una recuperación paulatina.
- De igual manera, se propone llevar a cabo un proceso de remediación de ríos y drenes principales, lo que ayudará a tener una fuente más de abastecimiento de agua a la población y evitará que incremente la extracción de agua subterránea.
- Considerar disminuir las tasas de bombeo en los focos rojos y compensarlo con pozos que se encuentren ubicados lejos de estas zonas es una opción de respaldo temporal, en lo que se observa alguna mejoría de los niveles estáticos de las zonas afectadas.
- Para las secretarías y comisiones involucradas en el tema del agua se recomienda poner en marcha campañas que involucren prospección geofísica y reconocimiento geológico, ya que la información que es de dominio público se encuentra desactualizada e incompleta.
- Para la comunidad científica se recomienda generar mapas a nivel local, lo cual implicaría ampliar el número de datos y recuperar información de los censos más recientes, ya que aportará una mejor resolución al producto final; también se sugiere llevar a cabo estudios geofísicos de tipo gravimétricos y sísmicos para mapear con mayor precisión el sistema de fallas y fracturas que predomina en la zona.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AIRS Science Team / Joao Teixeira (2013), AIRS / Aqua L3 Daily Standard Physical Retrieval (AIRS + AMSU) 1 grado x 1 grado V006, Greenbelt, MD, EE. UU., Centro de Servicios de Información y Datos de Ciencias de la Tierra de Goddard (GES DISC), Acceso: (6 de diciembre del 2021), 10.5067 / Aqua / AIRS / DATA301

Albornoz-Euán *et. al.* (2017). Vulnerabilidad a la contaminación del acuífero yucateco bajo escenarios de cambio climático. SciELO. Ecosistemas y recursos agropecuarios. Recuperado de:
http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-90282017000200275

Arroyo Domínguez. (2005). Determinación del origen de la contaminación natural en el acuífero del Valle de Puebla mediante análisis geoquímicos e isotópicos. (Tesis de maestría). Recuperado de: <http://ri.uaemex.mx/handle/20.500.11799/94845>

Barredo Cano José (1996). Sistemas de Información Geográfica y evaluación multicriterio. Editorial RA-MA. Madrid, España. 264 páginas. Recuperado de:
<http://www.scielo.org.mx/pdf/igeo/n37/n37a11.pdf>

C. Rebollo. Análisis de señales en Geofísica. Clase 15. Geoestadística. Recuperado de: <http://carina.fcaglp.unlp.edu.ar/senales/teorias/Clase15.pdf>

Cervantes Leyva (2005). Diseño de mallas adaptativas aplicando equidistribución. Método de diferencias finitas. Recuperado de:
http://sappi.ipn.mx/cgpi/archivos_anexo/20040014_1512.pdf

CONAGUA (2020). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero alto atoyac (2901), estado de Tlaxcala. Ciudad de México.
https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/Edos_Acuiferos_18/tlaxcala/DR_2901.pdf

Custodio, E. y M. R. Llamas (2001), Hidrología Subterránea, Ediciones Omega, 2ª. edición, Barcelona, España.

Darcy, H., 1856. Les Fontaines Publiques de la Ville de Dijon. Dalmont, Paris, France.

Davis, A.D., Long, A.J., Wireman, M. 2002. KARSTIC: a sensitivity method for carbonate aquifer in karst terrain. Environmental Geology, 42(1):65-72. Doi: 10.1007/s00254-002-0531-1

Delleur, J. W. (Jacques Willy). The Handbook of groundwater engineering. 2nd ed.

Del Pozzo A. L. *et. al.*, (2017). Memoria técnica del mapa de peligros del volcán Popocatepetl. Primera edición. UNAM. Recuperado de:
<https://www.geofisica.unam.mx/assets/monografias22.pdf>

Duarte Aguilar (2013). Vulnerabilidad y riesgo de contaminación de acuíferos kársticos.. Tropical and Subtropical Agroecosystems, vol. 16, núm. 2, pp. 243-263. Universidad Autónoma de Yucatán Mérida, Yucatán, México.
<https://www.redalyc.org/pdf/939/93928324001.pdf>

Elías-Herrera *et. al.*, (2005). La falla de Caltepec: raíces expuestas de una frontera tectónica de larga vida entre dos terrenos continentales del sur de México. Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, Deleg. Coyoacán, 04510, México, DF
<http://boletinsgm.igeolcu.unam.mx/bsgm/index.php/127-sitio/articulos/cuarta-epoca/5701/268-5701-5-elias>

Flores Márquez *et. al.*, (2006). Study of geothermal water intrusion due to groundwater exploitation in the Puebla Valley aquifer system, Mexico. Springer-Verlag, Hydrogeology Journal. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geofísica, Ciudad Universitaria.

Geotecnología S.A. (1997). Actualización del estudio geohidrológico de los acuíferos de Valle de Puebla. Sistema Operador de Agua potable y Alcantarillado de Puebla (SOAPAP). Recuperado de:
<https://www.redalyc.org/pdf/467/46750924006.pdf>

Gómez - Beltrán (2013). Aplicación del modelo Visual MODFLOW para la evaluación de la hidrodinámica del acuífero subyacente a un vertedero de residuos sólidos urbanos. Revista Internacional de Contaminación Ambiental. Recuperado de:
<https://www.revistascca.unam.mx/rica/index.php/rica/article/view/43640>

González García (2012). Anomalías gravimétricas y magnetométricas de los flancos norte y occidente del volcán Nevado del Ruiz: actualización 2011. Proyecto sub09-23 exploración de recursos geotérmicos.
<https://recordcenter.sgc.gov.co/B6/21002000024620/documento/pdf/2105246201101000.pdf>

Grajales Quintero *et. al.* (2013). Los métodos y procesos multicriterio para la evaluación. Luna Azul ISSN 1909-2474. Recuperado de:
<http://www.scielo.org.co/pdf/luaz/n36/n36a14.pdf>

Huffman, GJ, EF Stocker, DT Bolvin, EJ Nelkin, Jackson Tan (2019), GPM IMERG Final Precipitation L3 1 día 0.1 grados x 0.1 grados V06, Editado por Andrey Savtchenko, Greenbelt, MD, Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (DISCO GES), Acceso:
(6dediciembredel2021), 10.5067/GPM/IMERGDF/DAY/06

INEGI (2019). Informe técnico de la cuenca hidrológica Río Alto Atoyac Humedales. Alto Atoyac, Cuenca (México, Estado). Recuperado de
https://www.inegi.org.mx/contenido/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/702825189884.pdf

Jaime Garfias. N. Arroyo. R. Aravena. (2009). Hydrochemistry and origins of mineralized waters in the Puebla aquifer system, Mexico. SpringerLink. Recuperado de:
<https://search.proquest.com/openview/7b9d2837cd799d0a9523bee6bbea820d/1?pg->

origsite = gscholarcbl = 54063

Liliana Ramirez (2004). El modelo multiatributo para el cálculo de la demanda ponderada según necesidades y problemas sanitarios. Recuperado de:
<https://hum.unne.edu.ar/investigacion/geografia/labtig/publicaciones/public14.pdf>

López Loera *et. al.* (2013). Geología y magnetometría aérea del Graben de Villa de Reyes, San Luis Potosí, Mesa Central de México: implicaciones tectónicas y geohidrológicas. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana Volumen 65, núm. 1, 2013, p. 137-156.

López Ramos (2019). Paleogeografía y tectónica del Mesozoico de México. Vol 5 No 2 (1981). Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, Delegación Coyoacán, 04510 México, DF.
<http://www.rmccg.unam.mx/index.php/rmccg/article/view/1320>

Mooser F. *et. al.* (1996). Nuevo mapa geológico de las cuencas de México, Toluca y Puebla, 1:100,000. Comisión Federal de Electricidad. 27 pp., una lámina de leyenda, 35 mapas geológicos a escala 1:100 000 y una lámina de perfiles geológicos. México.
<http://www.scielo.org.mx/pdf/igeo/n103/2448-7279-igeo-103-e60290.pdf>

Muñoz Máximo. (2015). Cambio del uso del suelo y modelación hidrogeológica del acuífero del Valle de Puebla. (Tesis de maestría). COLEGIO DE POSTGRADUADOS.

Murillo Díaz (2004). Recarga de acuíferos, evaluación y análisis de condicionantes técnicos y económicos, acuífero aluvial del bajo Guadalquivir. Escuela Técnica Superior de minas en Madrid. <https://oa.upm.es/344/1/06200409.pdf>

Mochales López (2006). Prospección magnética aplicada a la detección y caracterización de dolinas en el entorno de Zaragoza. Facultad de Ciencias Departamento de Ciencias de la Tierra Área de Geodinámica Interna Universidad de Zaragoza
<https://www.igme.es/zaragoza/tesis/Mochales06postgrado.pdf>

Moran Zenteno (2007). Estratigrafía del Grupo Balsas en el área de Amacuzac, sur de México: relaciones con el volcanismo y deformación eocénicos del sector Tlzapotla-Taxco. Rev. mex. cienc. geol [online]. 2007, vol.24, n.1, pp.68-80. ISSN 2007-2902.
http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1026-87742007000100006script=sci_aabstract

NRC (National Council Research). Ground Water Vulnerability Assessment: Predicting Relative Contamination Potential Under Conditions of Uncertainty. NRC-National Academy Press. Recuperado de:
http://www.nap.edu/catalog.php?record_id=2050 Consultado el 28 de julio de 2011.

Pereira Díaz (2010). La Evapotranspiración Real (ETR) en la cuenca del río La Antigua, Veracruz: estado actual y ante escenarios de cambio climático. Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM ISSN 0188-4611, Núm. 75, 2011, pp. 37-50 <http://www.scielo.org.mx/pdf/igeo/n75/n75a4.pdf>

Ponce, Patricia; Hernández, Orlando. Estimación de la profundidad de la isoterma de Curie en parte de la zona de influencia del volcán Azufreal basada en datos geomagnéticos. Boletín de Geología, vol. 36, núm. 2, julio-diciembre, 2014, pp. 79-90. <https://www.redalyc.org/pdf/3496/349632714005.pdf>

Remenieras, G. (1974), "Evaporación, transpiración y déficit de escurrimiento", Capítulo V, en Tratado de Hidrología Aplicada, Editores Técnicos Asociados, 2ª. edición, Barcelona, España, pp. 205-300.

Rodríguez Espinosa *et. al.* (2020). Geochemical evolution and Boron sources of the groundwater affected by urban and volcanic activities of Puebla Valley, south central Mexico. Elsevier, Journal of Hydrology.

Romero Bernal *et. al.* (2018). Modelo multicriterio aplicado a la toma de decisiones representables en diagramas Ishikawa. Recuperado de: <https://repository.udistrital.edu.co/bitstream/handle/11349/13894/BernalRomeroSergio201?sequence=1>

Ruíz Armando *et. al.* (2015). Estimar la vulnerabilidad intrínseca de los sistemas acuíferos presentes en el área del municipio de Ambalema, departamento del Tolima, Colombia. Universidad Católica de Colombia. Facultad de Ingeniería. Programa de especialización en recursos hídricos. Recuperado de:

<https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/2361/1/VULNER>

SGM. Peligros y riesgos por fenómenos naturales. Recuperado de: <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/157799/Peligros-y-Riesgos.pdf>

Salcedo S., Vicenta E., Garrido H., Martínez M. (2012). Groundwater optimization model for sustainable management of the Valley of Puebla aquifer, Mexico. SpringerLink. Recuperado de: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12665-012->

Sánchez Jara (2012). La teledetección enfocada a la obtención de mapas digitales. Universidad de cuenca. Recuperado de: <https://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/779/1/ti839.pdf>

Sánchez Vélez (2003). La cuenca hidrográfica: unidad básica de planeación y manejo de recursos naturales. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. http://centro.paot.org.mx/documentos/semarnat/cuenca_hidrografica.pdf

Sokolov, A. y Chapman, T. (1981). Métodos de Cálculo del Balance Hídrico. Guía Internacional de investigación y métodos. Instituto de Hidrología de España – UNESCO <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/2595/GalvisKevin2016.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Teresa Reyna *et. al.*, (2010). Solución a la ecuación de Laplace. Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales Universidad Nacional de Córdoba <http://www.dep.hidraulica.efn.uncor.edu/wp-content/uploads/2014/05/Apunte-Solucion-de-Laplace.pdf>

Toscana Lidia *et. al.* (2013). Utilización de un modelo multicriterio para la selección de ONGs que formarán parte de una organización virtual. Recuperado de: <https://repositoriodigital.uns.edu.ar/handle/123456789/5302?show=full>

UNAM. Condiciones geológicas y geotécnicas del valle de Puebla. Capítulo 1. Recuperado de: <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/jspui/bitstream/132.248.52.100/507/4/A4.pdf>

Velázquez Aldo *et. al.* (2017). Determinación de vulnerabilidad de acuíferos usando método SINTACS por aplicación de plaguicidas en suelos B agrícolas en Villa Guerrero, Estado de México. Revista Universitaria de Geografía, vol. 26, núm. 2, pp. 111-129 Universidad Nacional del Sur Bahía Blanca, Argentina. <https://www.redalyc.org/pdf/3832/383254667005.pdf>

Velazquez Oliman. (2007). Geochemical and Hydrodynamic characterization of the groundwater system of Puebla Valley, Mexico (Tesis de doctorado). Northern Illinois University.

Vrba, J., Zaporozec, A. 1994. Guidebook on mapping groundwater vulnerability. International Association of Hydrogeologists. Editorial Hannover H. Heise. Serie: International contributions to hydrogeology, Germany.V.16.

World Health Organization (2003) Hydrogen Sulfide in Drinking-water. Guidelines for Drinking-water Quality., 2nd ed. Vol. 2. p.1-3. Recuperado de: https://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/hydrogensulfide.pdf

Zwahlen, F. 2003. Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (karst) aquifers, scope, goal, results. European Commission, COST Action 620, Belgium. Recuperado de: http://www.bgr.bund.de/EN/Themen/Wasser/Projekte/abgeschlossen/F+E/Cost620/cost620_b02p2.pdf?blob=publicationFilev=1

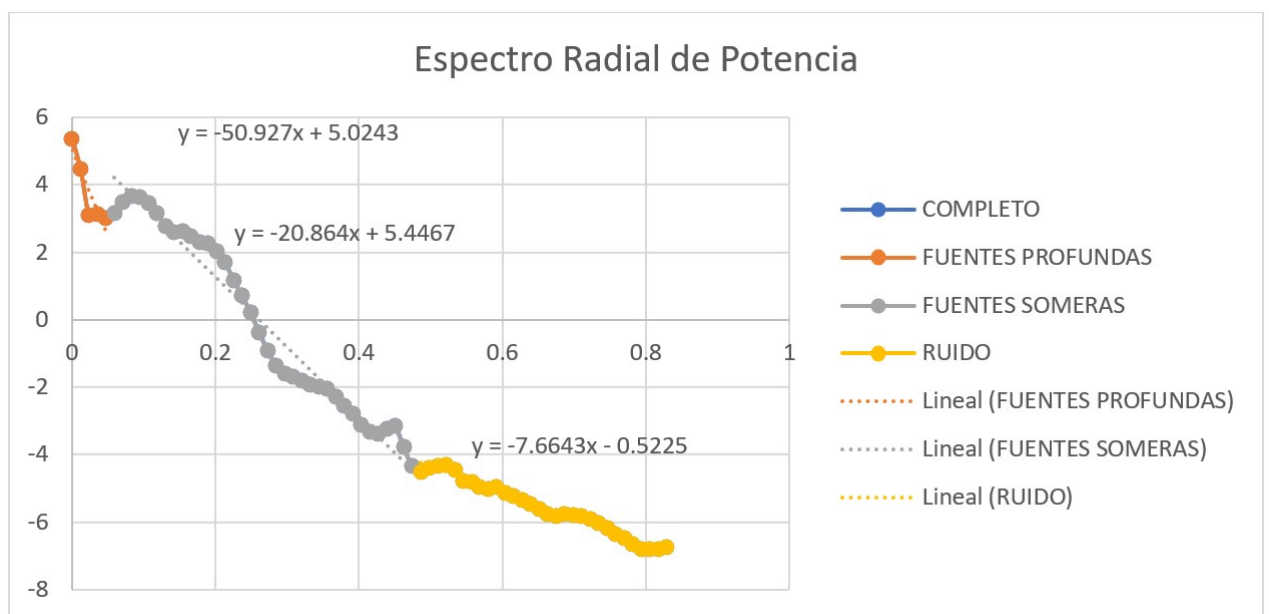
Ziatcova Ekaterina. (2016). Caracterización de la conductividad hidráulica a partir de series históricas de piezometría del acuífero de Agua Amarga, Alicante. Utilización de la herramienta Pest (Modflow) (Tesis de maestría). Recuperado de: <https://repositorio.upct.es/xmlui/bitstream/handle/10317/5733/tfm-zia-car.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

9. ANEXOS

9.1. ANEXO A. Espectro Radial de Potencia.

| NO. ONDA | Ln P | | | | |
|-----------|-----------|----------|----------|----------|----------|
| 0 | 5.37484 | 0.284211 | -1.35856 | 0.568423 | -4.9571 |
| 0.0118421 | 4.46299 | 0.296054 | -1.58525 | 0.580265 | -5.01346 |
| 0.0236843 | 3.09315 | 0.307896 | -1.68021 | 0.592107 | -4.97413 |
| 0.0355264 | 3.13772 | 0.319738 | -1.80375 | 0.603949 | -5.12468 |
| 0.0473686 | 3.02205 | 0.33158 | -1.92404 | 0.615791 | -5.21143 |
| 0.0592107 | 3.15997 | 0.343422 | -1.98199 | 0.627633 | -5.34539 |
| 0.0710528 | 3.49561 | 0.355264 | -2.04685 | 0.639476 | -5.44779 |
| 0.082895 | 3.66727 | 0.367106 | -2.28687 | 0.651318 | -5.59596 |
| 0.0947371 | 3.62109 | 0.378949 | -2.54644 | 0.66316 | -5.74594 |
| 0.106579 | 3.46092 | 0.390791 | -2.80065 | 0.675002 | -5.79818 |
| 0.118421 | 3.16434 | 0.402633 | -3.10448 | 0.686844 | -5.75719 |
| 0.130264 | 2.79462 | 0.414475 | -3.32399 | 0.698686 | -5.76745 |
| 0.142106 | 2.59782 | 0.426317 | -3.36563 | 0.710528 | -5.80022 |
| 0.153948 | 2.62751 | 0.438159 | -3.2314 | 0.722371 | -5.90156 |
| 0.16579 | 2.4826 | 0.450001 | -3.15584 | 0.734213 | -6.02954 |
| 0.177632 | 2.31681 | 0.461844 | -3.76061 | 0.746055 | -6.1927 |
| 0.189474 | 2.26577 | 0.473686 | -4.33927 | 0.757897 | -6.36595 |
| 0.201316 | 2.04308 | 0.485528 | -4.50332 | 0.769739 | -6.47428 |
| 0.213159 | 1.69931 | 0.49737 | -4.39517 | 0.781581 | -6.64545 |
| 0.225001 | 1.1834 | 0.509212 | -4.34683 | 0.793423 | -6.78628 |
| 0.236843 | 0.718778 | 0.521054 | -4.30158 | 0.805266 | -6.79122 |
| 0.248685 | 0.21307 | 0.532896 | -4.45889 | 0.817108 | -6.78705 |
| 0.260527 | -0.36539 | 0.544738 | -4.76252 | 0.82895 | -6.73071 |
| 0.272369 | -0.901542 | 0.556581 | -4.78212 | | |

9.2. ANEXO B. Gráfica del espectro Radial de Potencia.



9.3. ANEXO C. Niveles estáticos y abatimiento.

| POZO | X UTM | Y UTM | NE 2002 | NE 2026 | ABA 2002-2026 |
|---|--------|---------|---------|---------|---------------|
| Baños Públicos Soto.San Martín Texmelucan | 559093 | 2132341 | 6 | 17.79 | 11.79 |
| Baños San Cristobal. Cholula De Rivadavia | 572001 | 2108320 | 24.5 | -1.6 | 0 |
| CFE 1 | 583830 | 2111680 | 34.57 | 112.36 | 77.79 |
| Coronango | 574181 | 2109890 | 14.1 | -0.51 | 0 |
| El Llano Sm Pedro Cosiocan | 559991 | 2125554 | 26.4 | 37.47 | 11.07 |
| Huejotzingo | 564916 | 2118945 | 21.3 | 24.45 | 3.15 |
| Huejotzingo | 561567 | 2117615 | 0.5 | 62.6 | 62.1 |
| Huejotzingo | 569019 | 2111857 | 4 | 57.1 | 53.1 |
| Huejotzingo (Pozo las Animas) | 561584 | 2119988 | 3 | 33.96 | 30.96 |
| Juan C. Bonilla | 566368 | 2115064 | 38 | -40.3 | 0 |
| Juan C. Bonilla | 566383 | 2115058 | 31 | -26.3 | 0 |
| Montilla 1 | 580356 | 2111694 | 19.35 | 125.7 | 106.35 |
| Puebla | 580838 | 2110833 | 23 | -8.83 | 0 |
| Puebla | 584600 | 2110004 | 25.1 | 50.75 | 25.65 |
| Puebla | 588529 | 2109266 | 68.1 | 210.75 | 142.65 |
| Puebla | 580165 | 2105741 | 20.6 | -31.6 | 0 |
| Puebla Parque Industrial Resurrección | 589692 | 2109526 | 70 | 142 | 72 |
| Reyes Tlanechicolpan | 568034 | 2104556 | 16.5 | 24.09 | 7.59 |
| San Andrés Cholula | 574493 | 2107376 | 10 | 35.5 | 25.5 |
| San Andrés Cholula | 572736 | 2104901 | 18.5 | 28.1 | 9.6 |
| San Andrés Cholula | 573401 | 2105770 | 12.3 | 17.4 | 5.1 |
| San Andrés Cholula | 573548 | 2106316 | 16 | 34 | 18 |
| San Andrés Cholula | 573587 | 2105914 | 14.3 | 13.49 | 0 |
| San Andrés Cholula | 574106 | 2106612 | 4 | 85.06 | 81.06 |
| San Andrés Cholula | 574271 | 2106197 | 6 | 19.65 | 13.65 |
| San Andrés Cholula | 574337 | 2106155 | 1 | 42.25 | 41.25 |
| San Andrés Cholula | 574570 | 2104938 | 15 | 18.09 | 3.09 |
| San Baltazar 1 | 583700 | 2100997 | 51.7 | 129.31 | 77.61 |
| San Francisco Coapa | 567408 | 2108235 | 35.6 | 31.16 | 0 |
| San Gabriel Almoloya Santa Bárbara | 574070 | 2112409 | 15.6 | 92.19 | 76.59 |
| San Gregorio Atzompa | 568768 | 2104183 | 2.5 | 145.18 | 142.68 |
| San Gregorio Atzompa | 567958 | 2103183 | 9.5 | 20.6 | 11.1 |
| San Gregorio Atzompa | 569070 | 2102772 | 12.5 | 12.5 | 0 |
| San Gregorio Atzompa | 568659 | 2102600 | 6.7 | 16.6 | 9.9 |
| San Gregorio Atzompa | 568668 | 2102721 | 2.4 | 23.7 | 21.3 |

| | | | | | |
|---|-----------|-----------|--------|--------|---------------|
| San Gregorio Atzompa | 569128 | 2105891 | 2.3 | 45.65 | 43.35 |
| San Jerónimo Tecuanipan | 563617 | 2102788 | 14.3 | -3.1 | 0 |
| San Juan Cuautlancingo | 578549 | 2109859 | 14 | 5.45 | 0 |
| San Luis Tehuiloyocan | 568358 | 2105161 | 15.6 | 44.04 | 28.44 |
| San Martín Texmelucan | 558616 | 2133306 | 6.6 | 2.22 | 0 |
| San Martinito | 578048 | 2103273 | 25.3 | -35.93 | 0 |
| San Miguel Xoxtla | 573867 | 2119915 | 15.3 | -21.72 | 0 |
| San Pedro Cbolula | 569727 | 2107048 | 25.6 | 47.68 | 22.08 |
| San Pedro Cllolula (Sapach 10) | 577401 | 2109679 | 25.8 | -10.68 | 0 |
| San Pedro Cllolula (Soapach 6) | 573961 | 2108530 | 29.3 | 189.68 | 160.38 |
| San Pedro Tlaltenango | 568712 | 2118300 | 1.4 | 84.02 | 82.62 |
| San Pedro Tlaltenango | 566897 | 2117499 | 2 | 83.24 | 81.24 |
| San Pedro Tlaltenango | 568224 | 2119703 | 6 | 100.77 | 94.77 |
| San Rafael Tlanalalpan (Pozo De Agua Potable) | 555077 | 2133459 | 0.5 | 122.78 | 122.28 |
| Santa Isabel Cholula | 566105 | 2098945 | 20 | 32 | 12 |
| Santa María Coronango | 574086 | 2113760 | 19.7 | -5.2 | 0 |
| Santa María Coronango | 572337 | 2115355 | 17 | -4.39 | 0 |
| Santa María Tonantzintla | 571241 | 2105257 | 13.6 | 38.2 | 24.60 |
| ACOPINALCO DEL PE??N | 587719.41 | 2173553.7 | 70.70 | 73.95 | 3.25 |
| S. ANTONIO HUEXOTITLA | 583808.87 | 2167817.1 | 3.75 | 1.45 | 0.00 |
| TLAXCO 1 | 591069.7 | 2168169.2 | 44.81 | 49.92 | 5.11 |
| SAN LUIS TLAXCO 2 | 587236.38 | 2164501.2 | 20.60 | 20.52 | 0.00 |
| BENITO JUAREZ TEZOYO | 580232.59 | 2160423 | 60.47 | 62.45 | 1.98 |
| GRANJA ECATEPEC 2 | 591089.97 | 2161885.8 | 86.86 | 105.39 | 18.53 |
| TECOPILCO 7 | 579128.97 | 2156895.4 | 43.13 | 28.23 | 0.00 |
| GRANJA COL. MU?OZ | 582898.25 | 2156202.2 | 16.54 | 29.58 | 13.04 |
| GRANJA ECATEPEC 1 | 589138.76 | 2158685.1 | 107.83 | 100.24 | 0.00 |
| KYMBERL CLARK | 596883.25 | 2156521 | 94.48 | 90.94 | 0.00 |
| RANCHO PITZOCALES | 601837.24 | 2157864.1 | 89.09 | 106.31 | 17.22 |
| CD. IND. XICOHTENCATL 2 | 599222.88 | 2155150.4 | 63.30 | 86.25 | 22.95 |
| TECOPILCO 1 | 580499.16 | 2154257.8 | 37.45 | 39.79 | 2.34 |
| SAN FCO. ATEXCATZINGO 1 | 589461.9 | 2151717.9 | 26.49 | 36.99 | 10.50 |
| TOTOLAC 1 | 601787.46 | 2148589.2 | 24.52 | 37.00 | 12.48 |
| ESPA?ITA | 560337.58 | 2150588.8 | 181.90 | 194.66 | 12.76 |
| HUEYOTLIPAN 1 | 568648.94 | 2151823.4 | 88.14 | 92.65 | 4.51 |
| SAN MANUEL TLALPAN | 572576.29 | 2150387.9 | 98.72 | 99.71 | 0.99 |

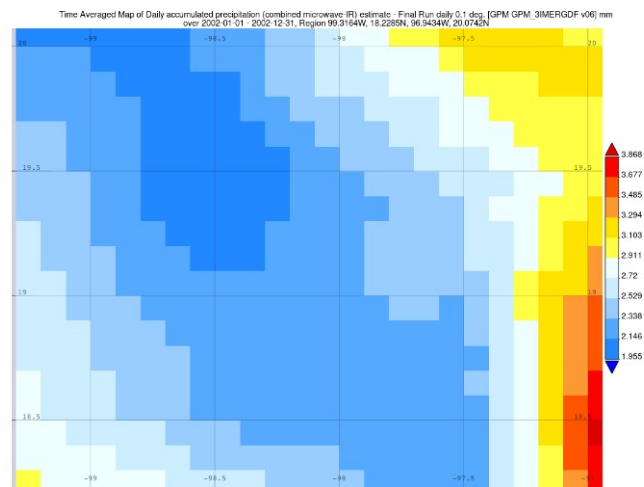
| | | | | | |
|--------------------------|-----------|-----------|--------|--------|--------------|
| SIST. LA CONSTANCIA | 562532.25 | 2148355.4 | 61.27 | 86.45 | 25.18 |
| S. MA. IXCOTLA | 572075.21 | 2148080.1 | 89.30 | 85.71 | 0.00 |
| ROM AND HASS | 590656.52 | 2146073.7 | 28.26 | 36.46 | 8.20 |
| SANTA MARIA TEXCALAC 1 | 596410.81 | 2147280.8 | 23.93 | 75.75 | 51.82 |
| SAN DAMIAN TLACOCALPAN | 582479.97 | 2143089.7 | 78.64 | 98.00 | 19.36 |
| EL LLANO ATLIHUETZIA | 585288.62 | 2142610.9 | 46.29 | 50.04 | 3.75 |
| SAN MIGUEL CONTLA | 592255.58 | 2140797.5 | 53.40 | 59.75 | 6.35 |
| SAN ANTONIO COAXOMULCO 1 | 594560.19 | 2139739.6 | 100.80 | 111.71 | 10.91 |
| XALTIANQUISCO 1 | 596885.02 | 2142051.2 | 82.06 | 87.84 | 5.78 |
| SAN MIGUEL LA PRESA | 563178.2 | 2138715 | 16.80 | 61.78 | 44.98 |
| POPOCATLA 1 | 563808.71 | 2136962.1 | 16.73 | 28.31 | 11.58 |
| SANTIAGO XOCHIMILCO | 570827.97 | 2138134.6 | 23.60 | 39.00 | 15.40 |
| TEX FIL | 583760.39 | 2136179.2 | 9.05 | 15.12 | 6.07 |
| XALTIPAN | 588671.22 | 2135735.2 | 77.06 | 81.50 | 4.44 |
| GPE. VICTORIA | 564139.15 | 2131814.6 | 1.82 | 2.30 | 0.48 |
| TECUEXCOMAC 1 | 568741.6 | 2132738.1 | 11.86 | 12.00 | 0.14 |
| CUAMILPA | 575590.67 | 2130923.9 | 58.73 | 62.00 | 3.27 |
| ATLAHAPA | 581302.8 | 2132359.4 | 26.57 | 44.00 | 17.43 |
| TLALTELULCO 3 | 586519.04 | 2131086.2 | 88.20 | 92.80 | 4.60 |
| SAN PEDRO TLALCUAPAN | 589832.08 | 2131126.8 | 138.40 | 162.00 | 23.60 |
| SN. JUAN TEPACTEPEC | 572385.1 | 2125891.3 | 1.48 | 3.40 | 1.92 |
| ZACUALPAN | 577294.51 | 2127682 | 3.50 | 6.10 | 2.60 |
| TEOLOCHOLCO 1 | 584178.59 | 2126510.5 | 51.37 | 54.80 | 3.43 |
| VIVERO TEOLOCHOLCO | 585801.25 | 2126665.5 | 74.34 | 81.90 | 7.56 |
| PORTALES | 572654.63 | 2121967.1 | 2.56 | 9.20 | 6.64 |
| XICOHTZINCO 1 | 580942.45 | 2121448.5 | 17.47 | 18.10 | 0.63 |
| MAZATECOCHCO 2 | 584689.34 | 2121511.6 | 72.13 | 105.00 | 32.87 |
| TENANCINGO 2 | 583264.79 | 2116196.4 | 45.70 | 48.00 | 2.30 |
| CENTRO | 587200.3 | 2114284.3 | 94.65 | 106.20 | 11.55 |

9.4. ANEXO D. Caudales de pozo.

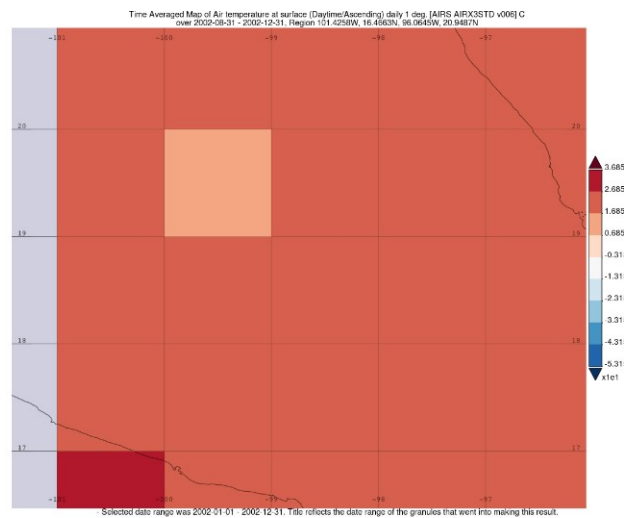
| Pozo | X UTM | YUTM | PROFUNDIDAD | Q m3/s | T inicial | T final |
|------------------------------|--------|---------|-------------|----------|-----------|-----------|
| Atlixcayotl 2 | 576931 | 2101651 | 200 | 0.0625 | 0 | 757382400 |
| Atlixcayotl 3 | 576473 | 2101346 | 200 | 0.074 | 0 | 757382400 |
| Atlixcayotl 4 | 576018 | 2101043 | 162.5 | 0.0441 | 0 | 757382400 |
| Atlixcayotl 5 | 511532 | 2102054 | 200 | 0.0099 | 0 | 757382400 |
| Atlixcayotl 6 | 515595 | 2100762 | 162 | 0.0863 | 0 | 757382400 |
| Atlixcayotl 7 | 575217 | 2100514 | 200 | 0.0425 | 0 | 757382400 |
| Atlixcayotl 8 | 574931 | 2100326 | 215 | 0.042 | 0 | 757382400 |
| Atlixcayotl 9 | 574490 | 2100041 | 150 | 0.0305 | 0 | 757382400 |
| Autopista | 585832 | 2110204 | 206 | 0.0149 | 0 | 757382400 |
| Barranca Honda 1 | 581434 | 2113951 | 139 | 0.0454 | 0 | 757382400 |
| Barranca Honda 2 | 581151 | 2113832 | 98 | 0.0493 | 0 | 757382400 |
| Barranca Honda 3 | 580802 | 2114139 | 100 | 0.0315 | 0 | 757382400 |
| Barranca Honda 4 | 581944 | 2113661 | 190 | 0.0491 | 0 | 757382400 |
| Clavijero | 589733 | 2105156 | 100 | 2.192099 | 0 | 757382400 |
| Cuanala | 567583 | 2116882 | 99.06 | 2.208408 | 0 | 757382400 |
| Domingo Arenas | 560926 | 2114090 | 200 | 2.272846 | 0 | 757382400 |
| Huejotzingo | 563788 | 2121710 | 200 | 2.23 | 0 | 757382400 |
| Huejotzingo | 561620 | 2119787 | 123 | 2.263696 | 0 | 757382400 |
| Huejotzingo | 561844 | 2125482 | 200 | 2.249272 | 0 | 757382400 |
| Huejotzingo | 559820 | 2117781 | 300 | 2.314409 | 0 | 757382400 |
| Huejotzingo | 559038 | 2123909 | 200 | 2.296041 | 0 | 757382400 |
| Huejotzingo | 565348 | 2122748 | 200 | 2.215889 | 0 | 757382400 |
| Huejotzingo | 566060 | 2123501 | 150 | 2.21 | 0 | 757382400 |
| Infonavit Amalucan | 589797 | 2106933 | 200 | 0.0152 | 0 | 757382400 |
| Santa Clara Atoyatenco No. 3 | 575458 | 2131003 | 200 | 0.065 | 0 | 757382400 |
| SOAPACH 2 | 582477 | 2120374 | 200 | 0.0405 | 0 | 757382400 |
| Tomalimla No. 3 | 590086 | 2139808 | 150 | 0.0182 | 0 | 757382400 |
| Ixtacuixtla | 560800 | 2139162 | 200 | 2.407315 | 0 | 757382400 |
| Ixtacuixtla | 568165 | 2132562 | 151 | 2.212587 | 0 | 757382400 |
| Laguna San Bdtazar 1 | 582718 | 2101938 | 128 | 0.0257 | 0 | 757382400 |
| Lardizábal | 564119 | 2131639 | 141 | 2.226145 | 0 | 757382400 |
| Las Carretas | 576881 | 2109545 | 98 | 0.032 | 0 | 757382400 |
| Malintzi 2 | 588158 | 2110067 | 90 | 0.0201 | 0 | 757382400 |
| México 68 | 588281 | 2106935 | 144 | 0.0487 | 0 | 757382400 |
| Nealtican 09 | 564626 | 2103630 | 130 | 0.09 | 0 | 757382400 |
| Nealtican 10 (Acuexcomac 10) | 564011 | 2103415 | 157 | 0.0905 | 0 | 757382400 |
| Nealtican 2 | 561257 | 2109123 | 159.7 | 0.0095 | 0 | 757382400 |
| Nealtican 3 | 561106 | 2108722 | 175 | 0.035 | 0 | 757382400 |
| Nealtican 4 | 561335 | 2108499 | 117 | 0.116 | 0 | 757382400 |
| Nealtican 5 | 561194 | 2107798 | 150 | 0.0253 | 0 | 757382400 |
| Nealtican 6 (Acuexcomac 6) | 562744 | 2106728 | 120 | 0.0626 | 0 | 757382400 |
| Nealtican 7 (Acuexcomac 7) | 563232 | 2106499 | 100 | 0.085 | 0 | 757382400 |
| Nealtican 8 (Acuexcomac 8) | 565355 | 2103591 | 27 | 0.085 | 0 | 757382400 |
| No Definida | 553121 | 2134871 | 176.4 | 0.0791 | 0 | 757382400 |

| | | | | | | |
|--|--------|---------|-----|----------|---|-----------|
| Parque Juárez (Huexotitla) | 583928 | 2104413 | 150 | 0.0252 | 0 | 757382400 |
| Puebla | 585644 | 2110561 | 90 | 2.209094 | 0 | 757382400 |
| Col San José El Rincón | 584077 | 2087862 | 60 | 2.064133 | 0 | 757382400 |
| Puebla | 592317 | 2108667 | 48 | 2.262106 | 0 | 757382400 |
| Puebla | 591090 | 2091977 | 57 | 2.06 | 0 | 757382400 |
| Puebla | 579186 | 2090216 | 42 | 2.08 | 0 | 757382400 |
| Puebla | 585065 | 2097715 | 18 | 2.077614 | 0 | 757382400 |
| Puebla | 597156 | 2105796 | 30 | 2.279247 | 0 | 757382400 |
| Puebla | 578074 | 2108655 | 40 | 2.119573 | 0 | 757382400 |
| Recta Cholula 1 | 576406 | 2107554 | 17 | 0.02 | 0 | 757382400 |
| Recta Cholula 6 (Col. Bello Horizonte) | 577909 | 2107355 | 80 | 0.0666 | 0 | 757382400 |
| San Andrés Calpan | 555035 | 2112749 | 30 | 2.482593 | 0 | 757382400 |
| San Andrés Cholula | 574018 | 2102533 | 29 | 2.125947 | 0 | 757382400 |
| San Andrés Cholula | 575901 | 2101493 | 30 | 2.113532 | 0 | 757382400 |
| San Andrés Cholula | 573141 | 2103484 | 25 | 2.147448 | 0 | 757382400 |
| San Andrés Cholula | 574090 | 2112230 | 18 | 2.175107 | 0 | 757382400 |
| San Baltazar 1 | 583100 | 2100997 | 44 | 0.017 | 0 | 757382400 |
| San Baltazar Tetela | 587000 | 2091841 | 100 | 2.06 | 0 | 757382400 |
| San Cristóbal Tulcingo | 582229 | 2113837 | 40 | 0.0247 | 0 | 757382400 |
| San Fco. Totimehuacan | 594157 | 2092168 | 105 | 2.08454 | 0 | 757382400 |
| San Fco. Tláloc | 553923 | 2141867 | 170 | 2.337911 | 0 | 757382400 |
| San José De La Cañada | 581467 | 2113751 | 160 | 2.155238 | 0 | 757382400 |
| San Lorenzo Amecatla | 578828 | 2116981 | 75 | 0.0141 | 0 | 757382400 |
| San Lorenzo Chiautzingo | 552421 | 2124653 | 96 | 2.479017 | 0 | 757382400 |
| San Lorenzo Chiautzingo | 556070 | 2122905 | 92 | 2.352736 | 0 | 757382400 |
| San Lucas El Grande | 553914 | 2138014 | 120 | 2.356637 | 0 | 757382400 |
| San Lucas El Grande | 554101 | 2134738 | 100 | 2.32621 | 0 | 757382400 |
| San Martín Texmelucan | 560070 | 2129099 | 150 | 2.263595 | 0 | 757382400 |
| San Martín Texmelucan | 560281 | 2128076 | 125 | 2.265076 | 0 | 757382400 |
| San Martín Texmelucan | 560780 | 2132891 | 150 | 2.239248 | 0 | 757382400 |
| San Mateo Cuanala | 567459 | 2112469 | 136 | 2.213112 | 0 | 757382400 |
| San Matías Talancaleca | 549674 | 2138922 | 180 | 2.472316 | 0 | 757382400 |
| San Miguel | 599722 | 2106602 | 10 | 0.0408 | 0 | 757382400 |
| San Miguel Xoxtla | 573895 | 2119743 | 18 | 2.190921 | 0 | 757382400 |
| San Salvador El Verde | 554049 | 2130399 | 15 | 2.34066 | 0 | 757382400 |
| Santa Rita Tlahuapan | 546003 | 2131859 | 36 | 2.576626 | 0 | 757382400 |
| Santa Rosa | 587815 | 2106648 | 70 | 0.013 | 0 | 757382400 |
| Sta. Clara Ocoyucan | 571481 | 2096583 | 14 | 2.091669 | 0 | 757382400 |
| Xilotzingo (Universidades) | 583396 | 2100284 | 16 | 0.055 | 0 | 757382400 |
| Xonacatepec 2 | 585978 | 2106022 | 12 | 0.0215 | 0 | 757382400 |
| Xonacatepec 4 | 592118 | 2108986 | 20 | 0.05 | 0 | 757382400 |
| Xoxtla I (HYLSA 1) | 571700 | 2118617 | 20 | 0.05 | 0 | 757382400 |
| Barrio Del Alto No. 2 | 581291 | 2137950 | 15 | 0.0468 | 0 | 757382400 |
| Coatepec | 580320 | 2100083 | 9 | 0.009 | 0 | 757382400 |
| Ignacio Zaragoza No.5 | 575458 | 2131003 | 9 | 0.0666 | 0 | 757382400 |
| La Tranquilidad No.4 | 554628 | 2131691 | 25 | 0.033 | 0 | 757382400 |
| Papalotla Almecatla | 582477 | 2120374 | 9 | 0.05 | 0 | 757382400 |
| San Andrés Cuamilpa | 590086 | 2139808 | 14 | 0.0086 | 0 | 757382400 |
| San Antonio Papalotla No. 1 | 561538 | 2111685 | 13 | 0.0086 | 0 | 757382400 |
| San Martín Texmelucan | 561538 | 2111685 | 170 | 0.0657 | 0 | 757382400 |
| San Pedro Muñoztla No. 2 | 581291 | 2137950 | 130 | 0.0165 | 0 | 757382400 |

9.5. ANEXO E. Datos de precipitación acumulada anual 2002 (IMERG).



9.6. ANEXO F. Datos de temperatura media anual 2002 (AIRIS).



9.7. ANEXO G.Evidencias fotográficas.



Figura 9.1: Talud de ladera con rocas meteorizadas en el cerro de Xicotécatl (Tlaxcala) . Espinoza Juárez T. (2022)



Figura 9.2: Depósitos de arena con granulometría variada la cual es evidencia de presencia de un antiguo río en cerro de Xicotécatl (Tlaxcala). Espinoza Juárez T. (2022)



Figura 9.3: Derrame basáltico con vista hacia el escarpe de falla en cerro de Xicoténcatl (Tlaxcala). Espinoza Juárez T. (2022)



Figura 9.4: Secuencia de estratos intercalados de arenas con granulometría variada y tobas basálticas en el cerro de Xicoténcatl (Tlaxcala). Espinoza Juárez T. (2022)



Figura 9.5: Carbonatos con plegamiento intenso y presencia de fracturas, y fallas de tipo rotacional (vetas sigmoidales y en echelon); rocas calizas de color grisáceo en la parte inferior y travertinos de color hueso en la parte superior. Arco Oriente Periférico (Puebla). Espinoza Juárez T. (2022)



Figura 9.6: Pliegue tumbado de composición carbonatada; rocas calizas de color grisáceo en la parte inferior y travertinos de color hueso en la parte superior. Arco Oriente Periférico (Puebla). Espinoza Juárez T. (2022)