



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO**  
**INSTITUTO DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA**

---

---

**ÁREA ACADÉMICA DE QUÍMICA**  
**DOCTORADO EN CIENCIAS AMBIENTALES**

**ANÁLISIS INTEGRAL DEL AGUA SUBTERRÁNEA**  
**EN EL VALLE DE TULANCINGO:**  
**BALANCE, CARACTERIZACIÓN Y VULNERABILIDAD**

**TESIS**

Para obtener el grado de  
**DOCTORA EN CIENCIAS AMBIENTALES**

Presenta:

**M. en C. Ingrid Árcega Santillán**

Directores:

**Dra. Elena María Otazo Sánchez**

**Dr. Eric Galindo Castillo**

Pachuca de Soto, Hidalgo. Diciembre de 2015.



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO**  
**Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería**  
*Institute of Basic Sciences and Engineering*  
**Dirección**  
 Dean

M. en A. JULIO CÉSAR LEINES MEDÉCIGO  
 DIRECTOR DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR  
 P R E S E N T E

Por este conducto le comunico que el Comité Revisor asignado a la alumna **M. en C. Ingrid Árcaga Santillán**, del “Doctorado en Ciencias Ambientales”, con número de cuenta 118235, que presenta el manuscrito de tesis titulado “**Análisis integral del agua subterránea en el Valle de Tulancingo: Balance, caracterización y vulnerabilidad**”, después de revisar el trabajo antes referido, ha decidido autorizar la impresión del mismo hechas las correcciones que fueron acordadas.

A continuación se registran las firmas de conformidad de los integrantes del Comité Revisor.

PRESIDENTE	Dr. Otilio Arturo Acevedo Sandoval
SECRETARIO	Dr. Eric Galindo Castillo
VOCAL	Dra. Elena María Otazo Sánchez
SUPLENTE	Dra. Claudia Romo Gómez



Sin otro particular, reitero a Usted la seguridad de mi atenta consideración.

ATENTAMENTE  
 “Amor, Orden y Progreso”  
 Mineral de la Reforma, Hidalgo, 16 de noviembre del 2015.




Dr. Orlando A. de los Angeles  
 Director del ICBI

Ciudad del Conocimiento  
 Carretera Pachuca - Tulancingo km. 4.5  
 Colonia Carboneras  
 Mineral de la Reforma, Hidalgo, México, C.P. 42184  
 Tel. +52 771 7172000 exts 2231, Fax 2109  
 direccion\_icbi@uaeh.edu.mx



[www.uaeh.edu.mx](http://www.uaeh.edu.mx)

## **AGRADECIMIENTOS**

---

---

Deseo expresar mi más sincero y profundo agradecimiento:

A mi comité tutorial: Por sus valiosas observaciones, por sus enseñanzas y por sus acertados comentarios que ayudaron al mejoramiento de este trabajo.

Gracias:

Dra. Elena María Otazo Sánchez

Dr. Erik Galindo Castillo

Dra. Claudia Romo Gómez

Dr. Otilio Arturo Acevedo Sandoval

Finalmente a todas aquellas personas que han contribuido para llegar al término de la presente tesis. Gracias:

Ing. Santiago M. Arellano Islas

Arquitecta Sonia Órtiz Camacho

Ing. Nallely Ávila

Ing. Samanta Márquez Benítez

Dra. Irais Gómez

Dra. Brenda Ponce Lira

## **DEDICATORIA**

---

---

Especialmente dedico y agradezco este trabajo a:

Dios por las bendiciones que he recibido durante mi vida porque sin él nada es posible, por siempre poner en mi camino a personas hermosas que me quieren y me apoyan.

A mis padres Ricardo y Tere, por su apoyo y comprensión, por estar siempre cuando los necesito, y pues en especial a ti papi que aunque ya no estás físicamente conmigo sabes que te amo con todo mi ser y que me haces mucha falta, espero te sientas muy orgulloso de mi. Tú mami, gracias siempre por las porras, por mantener unida a la familia, por cuidar a mis hijas y sobre todo por inculcarme siempre el amor a Dios, eres un ejemplo de vida y un excelente ser humano.

Mi esposo Fred, por tu apoyo y siempre caminar conmigo de la mano de Dios, por tu amor, tu comprensión, tus consejos y sobre todo por ayudarme con mis dudas para la realización de éste trabajo, sin ti nada de esto hubiera sido posible, te amo y sobre todo gracias por la hermosa familia que hemos formado.

A mis hermosas hijas Ivanna y Rafaela, las amo tanto que sólo espero ser una excelente madre para que sean unas mujeres de bien y se sientan orgullosas de mí, que Dios las bendiga siempre y a mí me dé salud para permitirme verlas crecer, son mi motor y mi fuerza.

Doctora Elena, gracias siempre por todo su apoyo, por no juzgarme y siempre tenerme confianza, no tengo como agradecerle a Dios el que la hubiera puesto en mi camino, es un ser humano hermoso que siempre está dispuesta a ayudar, Dios la bendiga siempre porque se lo merece, la quiero mucho.

Dra. Claudia, gracias por todo su apoyo y comprensión, Dios la bendiga.

Mis hermanos:

Gerardo: gracias por tu apoyo, te admiro por el ser humano que eres, por ser una persona tan responsable a tu edad, por cuidar y ver por mis hijas, por el amor que nos das, que Dios te bendiga siempre gordo, te amo y te mereces todo lo mejor.

**DEDICATORIA**

---

---

Riky: gracias por tu apoyo, por aclarar mis dudas para la realización de éste trabajo, que Dios te bendiga, por ser un ejemplo de motivación para todos, te amo.

Vero: por tu apoyo, tus oraciones, pero sobre todo el amor que le tienes a mis hijas, que Dios te bendiga, te amo.

Tíos y primos: Por las muestras de cariño, confianza y apoyo recibido a lo largo de mi vida. Y por la motivación en todo momento. Gracias tío Joaquín, Tía Chelo, Tía Lucha.

A mis amigos y compañeros de generación, mucho éxito en sus vidas.

## FINANCIAMIENTO

---

El presente Trabajo de Investigación se realizó en el laboratorio de Ciencias Ambientales del Centro de Investigaciones Químicas de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, gracias al financiamiento de los siguientes proyectos:



PRODEP. (PROMEP) 2013: **“Evaluación del impacto ambiental por actividades antropogénicas: alternativas de mitigación”** dentro de la Red Temática de Investigación: CALIDAD AMBIENTAL Y DESARROLLO SUSTENTABLE.



CEAA-COTAS TULANCINGO 2012-2014: **“Calidad del agua del acuífero del valle de Tulancingo”** Provenientes del fondo fue estatal un convenio de coordinación entre el estado y la federación para atender el tema de capacitación e investigación ramo 16 anexo 31 del Decreto de Presupuesto de Egresos de la Federación, para el ejercicio fiscal 2011.



Un especial agradecimiento al apoyo otorgado por el CONACYT durante 3 años mediante la beca como estudiante del Doctorado en Ciencias Ambientales, perteneciente al Programa Nacional de Posgrado de Calidad con registro del PNPC CONACYT 003199.

---

---

**Este Trabajo de Investigación se ha presentado en los siguientes congresos:**

1. XI Congreso Internacional y XVII Nacional de Ciencias Ambientales. Mazatlán Internacional Center, Mazatlán, Sinaloa. 5-7 de junio de 2012. Ponencia oral:

Caracterización hidrogeoquímica del acuífero de Tulancingo, Hidalgo.

Ingrid Árcega, Elena M. Otazo, Eric Galindo, Otilio Acevedo y Claudia Romo

2. Cátedra de Química Mario Molina 2012. Pachuca, Hidalgo. 9-11 de mayo de 2012. Cartel:

Caracterización Hidrogeoquímica del Acuífero de Tulancingo, Hidalgo.

Ingrid Árcega, Elena M. Otazo, Eric Galindo, Otilio Acevedo y Claudia Romo.

3. XIII Congreso Internacional y XIX Nacional de Ciencias Ambientales. Centro de Convenciones, Acapulco, Guerrero. 17-19 de Junio de 2014.

Determinación del Índice de Vulnerabilidad mediante el método DRASTIC modificado en el Acuífero del Valle de Tulancingo, Hidalgo.

Árcega S. I., Otazo S. E. M., Galindo C. E., Acevedo S. O. A., Romo G. C.,  
Montelongo R. M. M.

**Artículos en extenso:**

**Determinación del Índice de Vulnerabilidad mediante el método DRASTIC  
modificado en el Acuífero del Valle de Tulancingo, Hidalgo.**

Árcega S. I., Otazo S. E. M., Galindo C. E., Acevedo S. O. A., Romo G. C., Montelongo R.  
M. M.

**Memoria:** XIII Congreso Internacional y XIX Nacional de Ciencias Ambientales. Acapulco  
17-19 de Junio de 2014. ISBN: 978-607-9232-19-1. Pag. 618-626

**PUBLICADO: 06 de noviembre de 2014**

**Artículo:**

**Determinación del Índice de Vulnerabilidad mediante el método DRASTIC caso:  
Acuífero del valle de Tulancingo, Hidalgo, México.**

Árcega S. I.1, Otazo S. M. E.1, Galindo C. E.2, Acevedo S. O. A.3, Romo G. C.1

**Revista:** Revista Iberoamericana de Ciencias. ISSN: 2334-2501. (Clave: 1400101)

**ACEPTADO el 27 de octubre de 2015**



## **Abreviaturas**

<b>Alk</b>	Alcalinidad Total
<b>Ca</b>	Calcio
<b>C</b>	Concentración
<b>CE</b>	Conductividad Eléctrica
<b>CONAGUA</b>	Comisión Nacional de Agua
<b>COTAS</b>	Consejo Técnico de Aguas Subterráneas
<b>CEAA</b>	Comisión de Agua y Alcantarillado del Estado de Hidalgo
<b>AE.A.A.</b>	Espectroscopía de absorción atómica
<b>EDTA</b>	Ácido etilendiaminotetraacético
<b>EPA</b>	Agencia de Protección Ambiental
<b>ES</b>	Escurrimiento superficial
<b>ETR</b>	Evapotranspiración
<b>FRX</b>	Fluorescencia de rayos X
<b>HPLC</b>	High Performance Liquid Chromatography
<b>Hum</b>	Humedad gravimétrica
<b>I</b>	Infiltración
<b>ICP</b>	Inductively Coupled Plasma Spectrometry
<b>IV</b>	Índice de Vulnerabilidad
<b>ICP</b>	Plasma de inducción acoplada.

<b>K</b>	Potasio
<b>Mg</b>	Magnesio
<b>mmhos/cm</b>	Milimohs por centímetro = (miliohm-cm) <sup>-1</sup>
<b>msnm</b>	Metros sobre el nivel del mar
<b>Na</b>	Sodio
<b>Ø</b>	Diámetro promedio de partícula
<b>OMS</b>	Organización mundial de la Salud
<b>P</b>	Espacio poroso total
<b>ppb</b>	Partes por billón
<b>STD</b>	Sólidos Totales disueltos
<b>SEMARNAT</b>	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
<b>SGM</b>	Servicio Geológico Mexicano
<b>SIG</b>	Sistemas de Información Geográfica
<b>SST</b>	Sólidos suspendidos totales
<b>UAEH</b>	Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo
<b>UNAM</b>	Universidad Nacional Autónoma de México
<b>UV/VIS</b>	Espectroscopía ultravioleta visible
<b>W</b>	Capacidad de saturación de humedad
<b>W<sub>s</sub></b>	Capacidad de retención de humedad volumétrica
<b>ρ</b>	Densidad real
<b>μS/cm</b>	Micro Siemens por centímetro

## Tabla de Contenidos

Tabla de Contenidos .....	3
Índice de Tablas .....	6
Índice de Figuras .....	7
1. Introducción .....	9
2. Antecedentes .....	11
2.1. Fuentes de recarga de los acuíferos .....	11
2.2. Calidad del agua subterránea .....	14
2.2.1. Temperatura.....	15
2.2.2. pH .....	15
2.2.3. Oxígeno disuelto.....	15
2.2.4. Demanda de oxígeno.....	15
2.2.5. Potencial Redox .....	15
2.2.6. Alcalinidad .....	16
2.2.7. Conductividad eléctrica .....	16
2.2.8. Sólidos totales disueltos .....	16
2.2.9. Cationes Mayoritarios .....	16
2.2.10. Aniones Mayoritarios .....	17
2.2.11. Dureza .....	18
2.3. Vulnerabilidad de un acuífero .....	18
2.3.1. Métodos para evaluar vulnerabilidad.....	19
2.3.2. DRASTIC.....	21
2.4. El agua subterránea en México. ....	23
2.5. Características del área de estudio.....	25
2.5.1. Localización y pozos de agua del área de estudio.....	25
2.5.2. Geología .....	27
2.5.3. Estratigrafía .....	28
2.5.4. Hidrogeología .....	30
2.5.5. Hidrogeoquímica .....	32
2.5.6. Geoquímica .....	33
3 Objetivos .....	34

Objetivo General .....	34
Objetivos Específicos.....	34
4. Materiales y Métodos .....	36
4.1. Balance hidrometereológico .....	36
4.1.1. Vegetación y uso de suelo .....	36
4.1.2. Cálculo de la precipitación media.....	36
4.1.3. Escurrimiento superficial .....	37
4.1.4. Infiltración .....	39
4.1.5. Evapotranspiración.....	39
4.1.6. Interpolación y mapeo de datos .....	40
4.1.7. Modelo digital de elevaciones .....	41
4.2. Análisis datos hidrogeoquímicos .....	41
4.2.1. Metodología para la toma de muestras .....	41
4.2.2. Parámetros hidrogeoquímicos a evaluar .....	43
4.2.3. Clasificación del agua mediante datos hidrogeoquímicos .....	44
4.2.4. Límites permisibles de calidad del agua .....	46
4.3. Cálculo del Índice de Vulnerabilidad (IDV).....	47
5. Resultados y Discusión .....	49
5.1. Balance hidrometereológico de la cuenca.....	49
5.1.1. Generación del modelo digital de elevaciones .....	49
5.1.2. Generación de mapas para obtener el balance hidrometereológico .....	50
5.1.2.1 Uso de suelo .....	50
5.1.2.2 Precipitación.....	51
5.1.2.3 Evapotranspiración.....	53
5.1.2.4 Escurrimiento superficial.....	56
5.1.2.5 Textura .....	60
5.1.2.6 Infiltración .....	61
5.1.2.7 Potencial de Recarga .....	62
5.2. Caracterización hidrogeoquímica .....	64
5.2.1. Cationes Mayoritarios .....	66
5.2.2. Aniones Mayoritarios .....	67
5.2.3. Procesos Hidrogeoquímicos .....	68

5.2.4.	Análisis de datos hidrogeoquímicos .....	69
5.2.5.	Métodos de interpolación .....	72
5.2.6.	Mapas de líneas de isoconcentraciones de iones .....	78
5.3.	Análisis de la Vulnerabilidad .....	85
5.3.1.	Generación de mapas de los parámetros de DRASTIC.....	85
5.3.2.	Cálculo del Índice de Vulnerabilidad.....	95
5.3.3.	Relación entre el Índice de Vulnerabilidad y componentes del agua .....	98
6.	Conclusiones .....	106
8.	Recomendaciones .....	108
7.	Bibliografía .....	109

## Índice de Tablas

Tabla 1. Principales métodos para evaluar la vulnerabilidad de un acuífero. Adaptación de la fuente (Auge 2004) .....	19
Tabla 2. Valores finales de vulnerabilidad. Escala según (Auge 2004) .....	22
Tabla 3. Valores de K reportados según uso de suelo, textura y pendientes del terreno. Obtenidos de (Galindo-Castillo et al. 2010; NOM-011-CONAGUA-2015 2015).....	38
Tabla 4. Tabla de valores de K para zonas urbanas. Valores obtenidos de (Galindo-Castillo et al. 2010).....	38
Tabla 5. Valores permisible establecidos en la NOM-127-SSA1-1994 (mg/L) .....	46
Tabla 6. Valores del peso (w) asignado para cada parámetro (r) en el cálculo de IDV mediante método DRASTIC .....	48

## Índice de Figuras

Figura 1. Esquema de recarga de un acuífero. Fuente: (Kasenow 2006).....	13
Figura 2. Información necesaria para aplicar el método DRASTIC.....	21
Figura 3. Acuíferos sobreexplotados de México (CONAGUA 2012).....	24
Figura 4. Mapa de ubicación del acuífero del Valle de Tulancingo (Lesser I et al. 2007) ...	26
Figura 5. Principales usos del agua subterránea y su balance hídrico. Fuente:(Lesser-y-Asociados 2006).....	26
Figura 6. Diagrama de la metodología seguida para el cálculo del balance hidrometereológico. Fuente: Elaboración propia. ....	40
Figura 7. Ejemplo de filtros y membranas.....	42
Figura 8. Ejemplo de la toma de muestra en campo.....	43
Figura 9. Localización de los puntos de muestreo. ....	43
Figura 10. Equipo Hanna HI9828.....	44
Figura 11. Diagrama de Piper.....	45
Figura 12. Diagrama de Schoeller. ....	45
Figura 13 Ejemplo de los pasos a realizar en ArcGIS para obtener el mapa de vulnerabilidad. Fuente: Elaboración propia. ....	48
Figura 14. Modelo digital de elevaciones del acuífero del Valle de Tulancingo .....	50
Figura 15. Mapa de uso de suelo.....	51
Figura 16. Mapa de precipitación media.....	52
Figura 17. Mapa de temperatura.....	53
Figura 18. Mapa de parámetro de Turc.....	54
Figura 19. Mapa de evapotranspiración.....	55
Figura 20 Mapa de coeficiente de escurrimiento (k).....	57
Figura 22. Mapa de escurrimiento superficial.....	59
Figura 23. Mapa de textura .....	60
Figura 24. Mapa de infiltración del Acuífero del Valle de Tulancingo .....	61
Figura 25. Mapa de recarga del Acuífero del Valle de Tulancingo.....	63
Figura 26. Gráficas de parámetros físicos vs distancia a la recta virtual S-N.....	65
Figura 27. Gráficas de concentraciones de cationes mayoritarios vs distancia (km) a la recta virtual N-S.....	66
Figura 28. Gráficas de concentraciones de aniones mayoritarios vs distancia (km) a la recta virtual.....	67
Figura 29. Gráficas de sólidos totales disueltos vs concentración de cationes mayoritarios. ....	68
Figura 32. Diagrama de Schoeller. ....	71
Figura 35. Interpolación realizada mediante el método Kriging exponencial.....	73
Figura 36. Interpolación realizada mediante el método Kriging gaussiano .....	74
Figura 37. Interpolación realizada mediante el método Kriging lineal.....	74
Figura 38. Interpolación realizada mediante el método Kriging esférico .....	75

---

Figura 39. Interpolación realizada mediante el método vecino natural.....	75
Figura 42. Gráfica de correlación entre datos calculados y reales utilizando los distintos métodos de interpolación del software ARCGis 10.1 .....	77
Figura 42. Grado de error de los métodos de interpolación spline estándar y spline de tensión. ....	78
Figura 43. Mapa de isoconcentraciones de calcio.....	79
Figura 45. Mapas de isoconcentraciones de sodio, sulfatos, cloruros y nitratos.....	80
Figura 46. Mapa de isoconcentraciones de fosfatos. ....	81
Figura 51. Mapas de isoconcentraciones de sodio en manantiales y pozos. ....	84
Figura 52. Mapa de isoconcentraciones de sólidos totales disueltos en manantiales y pozos.....	84
Figura 53. Reclasificación de niveles estáticos del acuífero de Tulancingo 2006, para su aporte al IDV mediante DRASTIC.....	85
Figura 55. Reclasificación de la geología para el método DRASTIC.....	88
Figura 56. Mapa de uso de suelo y vegetación del Acuífero del Valle de Tulancingo. Fuente: CONABIO.....	89
Figura 58. Mapa de porcentaje de elevación. ....	90
Figura 63. Reclasificación conductividad hidráulica para el método DRASTIC. ....	94
Figura 64. Mapa de vulnerabilidad del Acuífero del Valle de Tulancingo .....	97

# 1. Introducción

La contaminación de acuíferos es un creciente problema el cual exige cada vez una mayor demanda para su análisis y evaluación. Los acuíferos someros como es el caso del acuífero del Valle de Tulancingo pueden causar contaminación transversal de acuíferos profundos por la penetración de un acuitardo intermedio a través de intervalos arenosos, a lo largo del revestimiento de pozos, o en las inmediaciones de lentes de acuitardos.

El valle de Tulancingo se ubica en la Región Hidrológica No. 26 “Cuenca del Río Pánuco”, ubicada al centro-noreste de la República Mexicana. La Subregión corresponde al Alto Pánuco del Río Moctezuma, del cual es afluente el río que recibe diferentes nombres: Quetzalapa, Amajac, Metztlán y Río Grande Tulancingo. La cuenca en la que se aloja el acuífero corresponde a la Parte Alta de la Cuenca del Río Metztlán, cuya superficie abarca porciones de los Estados de Puebla, Hidalgo y Veracruz.

En el Valle de Tulancingo el estado de los ríos está profundamente influido por la actividad humana, un ejemplo es la incorporación de los residuales de suero lácteo a las corrientes fluviales y los vertidos de aguas municipales e industriales sin tratar. Por ello, se considera que el acuífero está amenazado por la actividad humana y es necesario evaluar su vulnerabilidad ante las actividades antropogénicas y controlar su calidad sistemáticamente debido a que no se le da ningún tipo de tratamiento a los desechos originados y esta situación tiene un impacto sobre el acuífero y suelo de la región.

El acuífero del Valle de Tulancingo cubre una superficie 1,021 km<sup>2</sup>, que representa cerca del 4.98% del territorio estatal y se localiza en la porción suroriental del Estado de Hidalgo. Según la literatura, el Valle presenta dos acuíferos, uno superior, que es de tipo libre, y el inferior de tipo confinado.

De los 308 aprovechamientos de agua subterránea, 209 se destina a las actividades agrícolas, 33 para uso público urbano, 35 para uso doméstico y 31 para uso industrial. El volumen total de agua extraído por bombeo, para este 2006 fue de 111 Mm<sup>3</sup>, de los cuales 78.5% son para uso agrícola, 18.8% para uso público urbano, 1.85% para uso doméstico y 2.0% para uso industrial.

Dado el incremento de la población en el Valle de Tulancingo y las actividades económicas a las que se ha dedicado la población desde hace varios años, principalmente la agricultura, la ganadería, la elaboración de quesos y la industria textil, es necesario evaluar hidrogeoquímicamente las condiciones actuales en las que se encuentra el acuífero y la calidad del agua, para conocer las características actuales del agua subterránea del acuífero del valle, evaluar su posible contaminación y determinar las fuentes de donde provienen.

Por este motivo se realizaron muestreos de 47 pozos y se obtuvieron los parámetros físico-con los cuales se crearon mapas de isoconcentraciones de los elementos presentes. Además se calculó el Índice de Vulnerabilidad (IVD) en cada punto del acuífero mediante el método DRASTIC y se realizó un análisis geoespacial, vinculando estos resultados con los mapas anteriores. De esta manera se logró establecer correlaciones del IVD con parámetros químicos más representativos de la actividad antropogénica, detectando las zonas de mayores amenazas.

Por otra parte, las posibilidades de recarga potencial del acuífero deben ser valoradas para tener un referente ante posibles afectaciones climáticas a futuro y para valorar los riesgos de sobreexplotación que surjan debido al aumento de la población y el desarrollo social e industrial.

## 2. Antecedentes

El agua subterránea es la mayor fuente de agua dulce disponible. Más de la mitad de la población mundial la utiliza para su consumo y además posee un gran número de ventajas debido a su buena calidad natural, pues en general es libre de patógenos, color y turbiedad, y puede ser consumida directamente o con un tratamiento sencillo. El agua subterránea está ampliamente distribuida en el planeta y se pueden desarrollar sistemas de abastecimiento en lugares muy próximos a los sitios donde se presenten las necesidades, evitando así la construcción de grandes sistemas de distribución. En general no se afectan ante la presencia de sequías cortas. Por ello, su demanda se ha incrementado con el tiempo y existe una gran preocupación mundial ante el uso no sustentable de este recurso (Gleeson et al. 2012; Vorosmarty et al. 2015).

### 2.1. Fuentes de recarga de los acuíferos

La estimación de la recarga del agua subterránea es importante para una protección óptima y un manejo correcto de los recursos hídricos, la recarga es variable en espacio y tiempo, por lo que es necesario implementar metodologías para identificar áreas de recarga natural y evitar así la mayor pérdida de recurso hídrico, pérdida que además significa un déficit en la disponibilidad del agua potable para la población, y en un futuro pueda ocasionar conflictos políticos y sociales (Oki and Kanae 2006).

Toda unidad hidrológica, ya sea superficial o subterránea, recibe aportaciones y también descarga cierto volumen de agua, además es capaz de contener un volumen variable y durante un tiempo llegan a estar en equilibrio, la expresión cuantitativa de este equilibrio constituye el balance hídrico. El reconocimiento de la necesidad de estructurar un balance, es fundamental para alcanzar el uso racional de los recursos del agua, en determinado espacio y tiempo, así como para establecer un control y adecuada distribución de los mismos (Kasenow 2006).

El agua del subsuelo se renueva por procesos activos de recarga desde la superficie. La renovación se produce lentamente cuando la comparamos con la de los cuerpos de agua superficiales, como los lagos. El periodo necesario para renovar por completo un depósito a su tasa de renovación normal (tiempo de residencia) es muy largo. La renovación puede

ser interrumpida por la impermeabilidad de las formaciones geológicas superiores o por sequía.

Existen también acuíferos fósiles, que son bolsones de agua subterránea formados en épocas geológicas pasadas y que ya no tienen recarga. Por ello mantienen una composición isotópica diferente a los que tienen tiempos de residencia cortos.

El agua de las precipitaciones tiene distintas vías de salida una vez que alcanza el suelo. Principalmente sigue tres alternativas. Las escorrentías se deslizan por la superficie del terreno en cauces pequeños hasta formar los ríos. Otra parte del agua se evapora desde las capas superficiales del suelo o pasa a la atmósfera como evapotranspiración a través de las plantas. La restante se infiltra en el terreno como agua subterránea (Kasenow 2006).

La facilidad para la infiltración depende de varios factores:

- La naturaleza del material geológico influye según su permeabilidad. Esto depende de la porosidad y de la mineralogía del sustrato. Por ejemplo, los minerales arcillosos se hidratan fácilmente y se hinchan en algún grado, lo que produce una disminución de la porosidad y convierte en impermeable al sustrato.
- Otro factor desfavorable para la infiltración es una pendiente marcada.
- La presencia de vegetación densa influye de forma más compleja, porque por una parte reduce el agua que llega al suelo (interceptación), pero a su vez aumenta el efecto de las precipitaciones en el tiempo, ya que el agua que retiene el follaje se desprende poco a poco. Esto reduce las escorrentías y aumenta la infiltración. Otro efecto favorable de la vegetación se relaciona con las raíces, que favorece la formación de suelo, generalmente más permeable que la mayoría de los materiales pétreos.
- La velocidad a la que el agua se traslada dentro del acuífero depende la permeabilidad del material, que se relaciona con el volumen de los poros y del grado de intercomunicación entre ellos. Los acuíferos suelen ser materiales sedimentarios de grano relativamente grueso (gravas, arenas, limos, etc.). Si los poros son suficientemente amplios, una parte del agua circula libremente a través de ellos impulsada por la gravedad, pero otra queda fijada por las fuerzas de la capilaridad y otras motivadas por interacciones entre ella y los minerales.

En resumen, la recarga se define como la entrada de agua dentro de la zona saturada donde comienza a formar parte de las reservas subterráneas. Esta entrada se produce de dos formas: por un movimiento descendente del agua debido a la gravedad y por un movimiento horizontal del flujo debido a las diferentes conductividades de las capas que constituyen el perfil del suelo (Figura 1) (Kasenow 2006).

Es importante prestar atención en la estimación de la recarga de los acuíferos, ya que es necesario determinar la cantidad de agua que llega a ellos, su calidad, procedencia y las zonas donde se presenta recarga o descarga del flujo subterráneo, por este motivo su cuantificación, por lo que el primer paso es realizar el balance hidrometeorológico el cual se describe en este trabajo y consiste en medir la cantidad de agua que llega superficie y puede infiltrarse y es un aspecto incluido dentro de estudios referentes a los recursos de agua subterránea, al transporte de contaminantes, a la subsidencia o al diseño de campos de pozos (Sophocleous 2010).

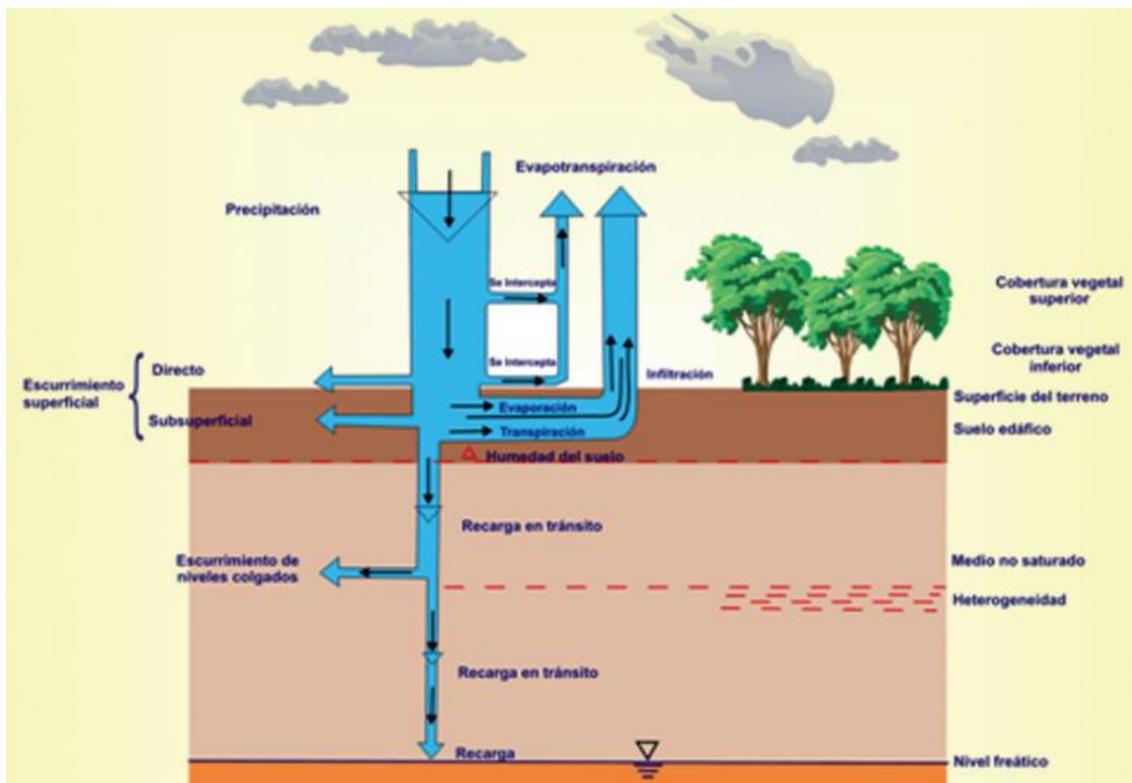


Figura 1. Esquema de recarga de un acuífero. Fuente: (Kasenow 2006)

La recarga a un acuífero puede producirse por medio de transferencias desde otras unidades hidrogeológicas o acuíferos; pero también puede darse de manera artificial producto de actividades como la irrigación, fugas de redes de abastecimiento urbano o de riego, así como por infiltraciones de embalses y depósitos

Recarga Urbana, producto de fugas de redes de abastecimiento y redes de alcantarillado definen la recarga localizada como una categoría intermedia la cual implica un movimiento horizontal del agua (Custodio 2004). Muchas de las técnicas existentes para determinar la recarga no cuantifican el valor real sino que estiman la recarga potencial, y se refiere al agua que se infiltra pero que puede o no alcanzar el nivel freático (Scanlon et al. 2002).

La recarga de agua a un acuífero depende de gran cantidad de variables, las cuales en muchas ocasiones no se determinan de manera exacta y sencilla y aquellas que pueden medirse de manera directa, corresponden a datos puntuales que luego deben extenderse a grandes áreas. Relacionar valores de la recarga sobre un territorio extenso con una o pocas observaciones sobre áreas reducidas o puntuales, o relacionar la distribución temporal de la recarga con observaciones en determinados momentos o en intervalos de tiempo limitados son algunas de las dificultades que aún no se han superado (Custodio 2004). Además, debido a que la recarga es un proceso no lineal, no es posible usar valores promedios de cada factor para obtener un valor de recarga promedio (Scanlon et al. 2002).

## **2.2. Calidad del agua subterránea**

La calidad del agua se define por el cumplimiento de requisitos expresados en normas que establecen los límites permisibles de sus componentes disueltos de manera cuantitativa. Estos límites varían entre los países y se definen diferentes calidades según su uso. En México se definen los procedimientos para la determinación de estas concentraciones tanto para el consumo humano (NOM-127-SSA1-1994 1994; NOM-201-SSA1-2002 2002) que recientemente se pretende perfeccionar y ampliar los requisitos (Proyecto 2015). Se definen normas específicas para el cuidado de la calidad de acuíferos (NOM-011-CONAGUA-2015 2015; NOM-015-CONAGUA-2007 2007).

Parámetros como la temperatura, pH, sólidos totales disueltos, potencial redox, oxígeno disuelto, alcalinidad y conductividad eléctrica permiten comprender mejor la evolución, origen, distribución, calidad y los procesos que ocurren dentro de un sistema acuífero.

A continuación se describen brevemente algunas características principales a las que se refieren dichas normas y definen la calidad del agua.

### **2.2.1. Temperatura**

La temperatura del agua es un parámetro físico que varía de acuerdo al gradiente geotérmico ( $\sim 3^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ ), la longitud y profundidad de la cuenca, la zona de recarga y descarga y por lo tanto sirve como indicativo de distintos procesos químicos que puedan ocurrir dentro del sistema. La temperatura a su vez puede afectar procesos de solubilidad y precipitación. La temperatura de la muestra se debe medir in situ a la hora de la extracción del agua para no alterar su valor. En general la temperatura de las aguas subterráneas es estable por lo que valores bajos se asocian a zonas de recarga y valores altos a zona de descarga.

### **2.2.2. pH**

El pH es una medida de la concentración de iones hidrógeno. En general los valores de pH dentro de un acuífero varían entre 6 y 8. El pH es una variable que controla infinidad de procesos entre los que se encuentran procesos de precipitación y disolución, procesos de adsorción, biogeoquímicos y redox. Su determinación debe hacerse in situ.

### **2.2.3. Oxígeno disuelto**

El oxígeno disuelto en el agua puede provenir de la atmósfera o derivarse de procesos de fotosíntesis.

### **2.2.4. Demanda de oxígeno.**

Los contaminantes orgánicos e inorgánicos del agua consumen el oxígeno disuelto en el agua, lo que puede tener un efecto profundo sobre la vida acuática y se relacionan con su presencia. Para determinar esta demanda de oxígeno se han desarrollado varios métodos, basados tanto en el consumo por procesos de origen químico como bioquímico.

### **2.2.5. Potencial Redox**

Es una medida de la actividad de los electrones, está relacionado con el pH y el oxígeno disuelto, conocer los valores de óxido reducción sirve para interpretar la distribución de ciertas especies de minerales a lo largo del acuífero, las reacciones redox son una transferencia de electrones entre átomos y por lo general son reacciones lentas, pero en

ocasiones llegan a intervenir factores bacterianos los cuales pueden acelerar el proceso, se mide en mV.

### 2.2.6. Alcalinidad

La alcalinidad es la capacidad que tiene un agua para neutralizar ácidos. En la mayoría de los sistemas acuíferos son los iones carbonato y bicarbonato los que amortiguan la acidez, por lo que ésta se expresa como mg  $\text{CaCO}_3/\text{L}$ . Los valores más comunes de alcalinidad dentro de un acuífero varían entre 100 y 300 mg  $\text{CaCO}_3/\text{L}$ .

### 2.2.7. Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica es una propiedad que tiene el agua para conducir corriente eléctrica debida a la presencia de electrolitos fuertes y por tanto, a los sólidos totales disueltos de naturaleza inorgánica, conductores de la electricidad como son los cationes  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  y aniones  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$  y  $\text{NO}_3^-$  mayoritariamente. En aguas subterráneas los valores pueden variar de 100 y 2000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

### 2.2.8. Sólidos totales disueltos

Es la suma de los minerales, sales, metales, aniones o cationes que se encuentran disueltos en el agua, mide el peso de todas las sustancias disueltas en el agua incluyendo las sustancias volátiles. El origen de los sólidos disueltos puede ser múltiple, orgánico e inorgánico, tanto en aguas superficiales como subterráneas. Está relacionada con la conductividad eléctrica mediante la fórmula  $\text{STD} = \text{C.E. (mmhos/cm)} \times 700$  y se mide en ppm.

### 2.2.9. Cationes Mayoritarios

Calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ): suele ser el catión mayoritario en las aguas subterráneas debido a su abundancia en las rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas. Su concentración en el agua subterránea está controlada por los procesos de precipitación-disolución en un sistema carbonatado y bicarbonatado, y también por intercambio catiónico. La concentración de calcio en un sistema acuífero es entre 10 y 250 mg/L.

Magnesio ( $\text{Mg}^{2+}$ ): puede proceder de la disolución de rocas carbonatadas (ej: dolomías o calizas magnésicas), evaporitas, silicatos ferromagnesianos alterados, o de agua marina. El proceso de intercambio iónico influye en su concentración en el agua subterránea

debido a que el ion magnesio es generalmente retenido por el ion calcio. Su concentración en aguas subterráneas no suele sobrepasar los 40 mg/L, pero en terrenos calcáreos puede alcanzar valores mayores a 100 mg/L y en ambientes evaporíticos mayores a 1000 mg/L.

Sodio ( $\text{Na}^+$ ): proviene de la meteorización de silicatos y disolución de rocas sedimentarias, principalmente sales muy solubles por lo que tienden a permanecer disueltas en el agua. Los procesos de intercambio catiónico son los principales en los que intervienen al ser adsorbidos por arcillas.

Potasio ( $\text{K}^+$ ): proviene de la meteorización de feldespatos y de la disolución de evaporitas. Tiende a ser fijado a arcillas y a ser adsorbido a minerales con alta capacidad de intercambio iónico. En aguas subterráneas no suele sobre pasar los 20 mg/L.

### **2.2.10. Aniones Mayoritarios**

Bicarbonato ( $\text{HCO}_3^-$ ): deriva de la disolución de calizas, dolomías y  $\text{CO}_2$  en el agua. En las aguas subterráneas el ion bicarbonato suele variar entre 50 y 400 mg/L pero puede llegar a alcanzar valores de hasta 800 mg/L.

Cloruro ( $\text{Cl}^-$ ): generalmente la mayoría de las rocas presentan concentraciones de cloruros y aunque no están presentes en grandes proporciones al ser sales muy solubles pasan rápidamente a fases acuosas pudiendo alcanzar concentraciones muy altas. El ion cloruro no forma sales de baja solubilidad, no se oxida ni se reduce, no es absorbido significativamente y tampoco forma parte de procesos bioquímicos en aguas naturales por lo que, además, se considera un trazador. Su concentración en el agua subterránea no suele sobre pasar los 150 mg/L y cuando llega a alcanzar valores superiores a los 300 mg/L produce un sabor salado al agua.

Sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ): la disolución de yeso y anhidrita aporta la mayor cantidad de este ion al agua subterránea, aunque también puede proceder de la oxidación de sulfuros y de la descomposición de materia orgánica. Suele formar iones complejos con sodio y calcio. Su concentración en aguas subterráneas es entre 2 y 150 mg/L.

Nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ): es la forma más común en la que se encuentra en el agua subterránea, los procesos de óxido-reducción de las especies nitrogenadas están influenciadas por fenómenos biológicos como es la fotosíntesis y reducción bacteriana principalmente, su

concentración varía entre 0.1 y 10 mg/L principalmente en aguas subterráneas pero en aguas contaminadas puede alcanzar valores de hasta 200 mg/L.

### **2.2.11. Dureza**

Comúnmente se refiere al contenido de calcio y magnesio disueltos en el agua, mismos que producen incrustaciones en las tuberías y le dan un sabor indeseable al agua potable. La mayoría de los suministros de agua potable tienen un promedio de 250 mg/l de dureza.

### **2.3. Vulnerabilidad de un acuífero**

La primera vez que se utilizó el término de vulnerabilidad de un acuífero fue en la década de los 60's por el hidrogeólogo francés Margat (Margat 1968). En un principio sólo eran utilizados aspectos y características cualitativas, pero con el paso de los años se dieron cuenta que además de tenían que cuantificar los contaminantes y la calidad del agua subterránea (Ramos Leal et al. 2012).

A lo largo de los años el término de vulnerabilidad de un acuífero ha ido variando para diversos autores, algunos de ellos toman el término de vulnerabilidad en función exclusivamente al medio como: tipo de acuífero, permeabilidad, profundidad, recarga, entre otros; mientras que otros investigadores además de tomar en cuenta el comportamiento del medio le dan un peso muy importante al tipo de contaminante y su carga para así obtener una vulnerabilidad específica.

Desde los años 90's se propuso hacer una definición de vulnerabilidad en función del tipo de acuífero: libre y semiconfinado y contaminantes naturales y artificiales. Algunas de las principales definiciones son las siguientes:

- (Foster and Hirata 1991): La vulnerabilidad de un acuífero a contaminación, representa su sensibilidad para ser adversamente afectado por una carga contaminante impuesta.
- (Carbonell 1993): La tendencia de los contaminantes a localizarse en el sistema de agua subterránea, luego de ser introducidos por la parte superior del acuífero más somero.

- (Vrba and Zaporozec 1994): Una propiedad intrínseca del sistema de agua subterránea que depende de la sensibilidad del mismo a impactos humanos o naturales.
- (Custodio 1995): la vulnerabilidad a la contaminación expresa la incapacidad del sistema para absorber las alteraciones, tanto naturales como artificiales.
- (Auge 2004): Indica que la vulnerabilidad se puede definir como el nivel de penetración con que un contaminante alcanza una posición específica en un sistema acuífero, después de su introducción en alguna posición sobre la zona no saturada.

La vulnerabilidad intrínseca de un acuífero implica la relación con la velocidad con la que un contaminante puede alcanzar hasta la zona saturada del subsuelo. Una mayor rapidez de migración de la contaminación a través de la zona no saturada del subsuelo será entendida como mayor vulnerabilidad de éste. En general la vulnerabilidad de un acuífero depende principalmente de la accesibilidad del soluto y capacidad de atenuación de la zona no saturada. El riesgo de contaminación del agua subterránea es la probabilidad de que estas se contaminen por alguna sustancia en concentraciones por encima de las normas internacionales o nacionales (Foster et al. 2013).

### 2.3.1 Métodos para evaluar vulnerabilidad

Existen cinco principales metodologías que se utilizan para llevar a cabo la evaluación de vulnerabilidad de un acuífero (Auge 2004). Cada una de ellas toma en cuenta diferentes parámetros (Tabla 1) y la selección del método a utilizar dependerá de la información con la que se cuenta.

De la tabla 1 se aprecia el mayor grado de amplitud en la cobertura el método DRASTIC, ya que utiliza más parámetros que los demás. Es por ello que se utiliza con más frecuencia en la literatura consultada para estudio de numerosos casos. Se citan algunos ejemplos (Awawdeh and Jaradat 2009; Baalousha 2006; Denny et al. 2007) y también se ha utilizado en combinación con Sistemas de Información Geográfica (Anane et al. 2013; Babiker et al. 2005; Hamza et al. 2007; Mimi et al. 2012)

*Tabla 1. Principales métodos para evaluar la vulnerabilidad de un acuífero. Adaptación de la fuente (Auge 2004)*

	<b>DRASTIC</b>		<b>GOD*</b>		<b>SINTACS*</b>		<b>EPIK*</b>		<b>Ekv</b>
<b>D</b>	Deph (nivel freático)	<b>D</b>	Depth (profundidad del agua)	<b>S</b>	Sogglacenza (profundidad del agua)			<b>E</b>	Espesor de la sección subsaturada
<b>R</b>	Recharge (recarga)			<b>I</b>	Infiltrazione (infiltración)	<b>I</b>	Infiltration (Infiltración)		
<b>A</b>	Aquifer (geología del acuífero)	<b>O</b>	Over all aquifer class (tipo acuífero)	<b>A</b>	Acquifero (características del acuífero)	<b>E</b>	Epikarstic (características epikarst)		
<b>S</b>	Soil (suelo)			<b>T</b>	Tipologia (tipo de suelo)	<b>P</b>	Protective cover (cobertura edáfica)		
<b>T</b>	Topography (topografía)			<b>S</b>	Superficie (topografía)				
<b>I</b>	Impact (zona saturada )	<b>G</b>	Ground water (litología de la cobertura)	<b>N</b>	Non saturo (zona subsaturada)	<b>K</b>	Karst network (red kárstica)		
<b>C</b>	Hydraulic Conductivity (conductividad hidráulica)			<b>C</b>	Conductibiza (conductividad hidráulica)			<b>Kv</b>	Permeabilidad vertical de la sección subsaturada

\*Nota: El orden de las letras no coincide con el acrónimo, ya que se colocaron según la similitud de cada línea. Se incluyen los parámetros con el nombre en el idioma original utilizado por el autor.

### 2.3.2. DRASTIC

El método DRASTIC fue desarrollado en el año de 1987 para la EPA por Aller (Aller et al. 1985), con el fin de evaluar la vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos. Es un método muy utilizado debido a que sirve tanto para dar resultados cualitativos como cuantitativos (Coello 2002).

Los factores que utiliza se muestran en la Figura 2 junto con la información necesaria:

- D → Profundidad del agua subterránea
- R → Recarga neta
- A → Geología del acuífero
- S → Tipo de suelo
- T → Topografía
- I → Material geológico de la zona no saturada
- C → Conductividad hidráulica

Cada rango de cada factor se evalúa con respecto a los otros para determinar su significación relativa en la contaminación potencial. A cada rango de los factores DRASTIC se le asigna un valor numérico que oscila entre 1 y 10. Los factores C, R, D, T y S tienen asignado un único valor por rango, mientras que para los factores A e I se considera un valor típico dentro de un intervalo.

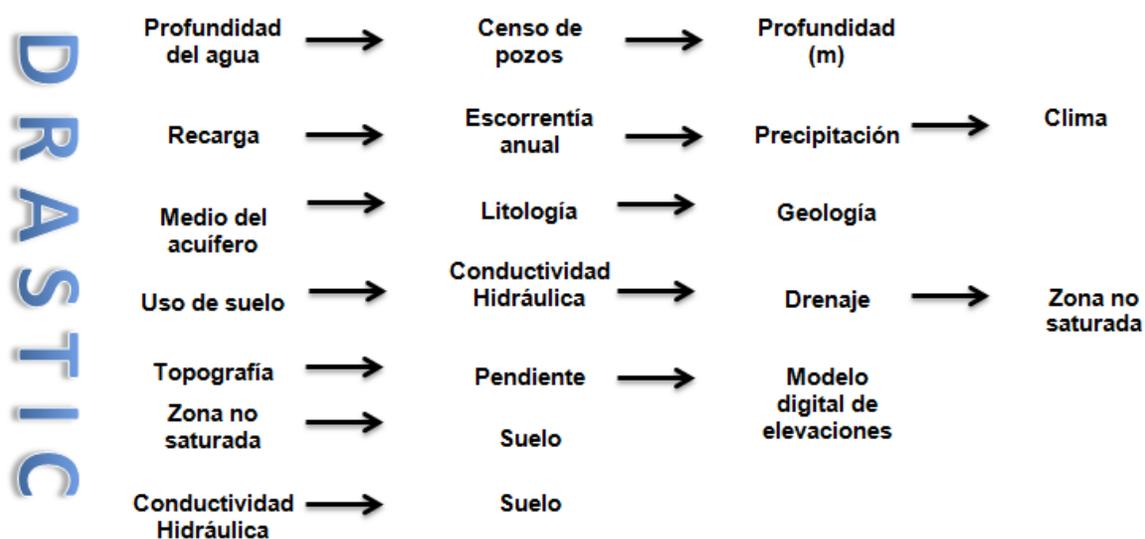


Figura 2. Información necesaria para aplicar el método DRASTIC

El método posee tres supuestos importantes: el contaminante es introducido sobre la superficie de la tierra, el contaminante es trasladado al agua subterránea por precipitación y el contaminante es móvil en el agua.

Para cuantificar cada uno de los factores DRASTIC se aplica un sistema de evaluación en el que se establecen tres parámetros significativos: pesos, rangos y valores.

- **Pesos:** Cada factor se evalúa respecto a los otros para determinar la importancia relativa de cada uno. A cada factor se le asigna un peso relativo que va de 2 a 5. Los factores más significativos tienen un peso de 5 y los menos significativos de 2. Estos pesos son constantes y no modificables en la estimación de la vulnerabilidad.
- **Rangos:** Cada factor se divide en rangos numéricos o tipos medios significativos con nombres descriptivos, que tienen un impacto en la contaminación potencial de los acuíferos.
- **Valores.** Cada rango de cada factor se evalúa con respecto a los otros para determinar su significación relativa en la contaminación potencial. A cada rango de los factores DRASTIC se le asigna un valor numérico que oscila entre 1 y 10. Los factores C, R, D, T y S tienen asignado un único valor por rango, mientras que para los factores A e I se considera un valor típico dentro de un intervalo.

Tabla 2. Valores finales de vulnerabilidad. Escala según (Auge 2004)

<b>Grado Vulnerabilidad</b>	<b>Valor DRASTIC</b>	<b>Calificación</b>
Muy Bajo	23-64	1
Bajo	64-105	2
Moderado	105-146	3
Alto	146-187	4
Muy Alto	187-230	5

DRASTIC ha sido utilizado por varios autores para evaluar la vulnerabilidad de acuíferos en varios países y se han realizado variaciones al método original diseñado por Aller (Alam et al. 2012; Anane et al. 2013; Ramos Leal et al. 2012)

---

## 2.4. El agua subterránea en México.

En México, la distribución geográfica del agua no coincide con la distribución geográfica de la población. El volumen de agua renovable promedio en el país per cápita es de 4,028 metros cúbicos por habitante por año. Sin embargo, existen diferencias sustanciales entre el Sureste y el Norte del territorio; se observan áreas con gran escasez de agua y regiones con frecuentes eventos hidrometeorológicos que significan costosas inundaciones y afectación de asentamientos humanos e infraestructura.(CONAGUA 2012)

En la zona centro–norte del país se concentra 27 % de la población, se genera 79% del PIB y se cuenta con sólo 32% del agua renovable; en cambio, en la zona sur donde existe el 68% del agua el país, se asienta sólo 23% de la población y se genera 21% del PIB. El país se ha dividido en 13 regiones hidrológico-administrativas, las cuales están formadas por agrupaciones de cuencas, consideradas las unidades básicas de gestión de los recursos hídricos, sus límites respetan los municipales, para facilitar la administración e integración de la información socioeconómica (CONAGUA 2012).

La mala calidad del agua superficial limita su aprovechamiento, en términos de DBO (demanda biológica de oxígeno): 22.7% del agua superficial se encuentra contaminada o fuertemente contaminada. 33.2% del agua superficial tiene calidad aceptable. 44.1% del agua superficial observa calidad buena y excelente (CONAGUA 2012).

Si bien oficialmente 92.0% de la población tiene acceso al servicio público de agua potable, dicho porcentaje disminuye dramáticamente cuando se considera su calidad.

De acuerdo a los trabajos realizados por la CONAGUA, el INEGI y el INE, se han identificado 1,471 cuencas hidrográficas en el país, las cuales se han agrupado y/o subdividido en cuencas hidrológicas para fines de publicación de la disponibilidad de aguas superficiales. Al 31 de diciembre de 2009 se tenían publicadas las disponibilidades de 722 cuencas hidrológicas, en tanto que para el 31 de diciembre de 2010 se habían añadido otras nueve cuencas. Las cuencas del país se encuentran organizadas en 37 regiones hidrológicas, que a su vez se agrupan en las 13 regiones hidrológico-administrativas (CONAGUA 2012).

El 78% del agua se utiliza para fines agropecuarios. El sector agropecuario genera 62% de las aguas residuales (cargas orgánicas, plaguicidas y fertilizantes, entre otros

contaminantes). El agua para usos agropecuarios es virtualmente gratuita, no paga derechos por el uso del recurso y además recibe un alto subsidio en el costo de la energía para los casos en los que se utilizan aguas subterráneas, lo cual promueve la ineficiencia y la sobre-explotación (CONAGUA 2011).

A partir de la década de los setenta, ha aumentado de manera significativa el número de acuíferos sobreexplotados. Al 31 de diciembre de 2010 existían 101 acuíferos explotados (Ver Figura 1). De los acuíferos sobreexplotados se extrae aproximadamente el 49% del agua subterránea para todos los usos. De acuerdo con los resultados de los estudios recientes se define si los acuíferos se consideran sobreexplotados o no, en función de la relación extracción/recarga (CONAGUA 2011).



Figura 3. Acuíferos sobreexplotados de México (CONAGUA 2012)

---

## **2.5. Características del área de estudio**

El acuífero del Valle de Tulancingo satisface las necesidades de agua de aproximadamente 250,000 habitantes, siendo la única fuente de abastecimiento del vital líquido. Dado el incremento de la población de Tulancingo y su zona conurbada así como las actividades económicas a las que se ha dedicado la población desde hace varios años, como la agricultura, la ganadería, la elaboración de quesos y la industria textil principalmente, es imperante evaluar hidrogeoquímicamente las condiciones en las que se encuentra el acuífero y la calidad del agua que se tiene de acuerdo a la normatividad actual que es la (NOM-127-SSA1-1994 1994), ya que durante muchos años se han tenido fuentes de contaminación puntuales, las cuales ya podrían tener un impacto sobre el acuífero o el suelo, poniendo en riesgo el abastecimiento de agua en un futuro para toda la población.

Se reporta la existencia de 2 acuíferos, uno somero de donde se extrae agua de norias con niveles estáticos a profundidades del orden de 5.5 metros, en basalto y material piroclástico areno-arcilloso, poco consolidado y otro profundo que es explotado por pozos cuyo nivel estático varía de 30 a 90 metros de profundidad, es de tipo libre aunque localmente en algunas zonas se comporta como semiconfinado (Lesser-y-Asociados 2006)

### **2.5.1. Localización y pozos de agua del área de estudio**

El acuífero del Valle de Tulancingo se localiza en la porción suroriental del Estado de Hidalgo, representa cerca del 4.98% del territorio estatal, comprende los municipios de Santiago Tulantepec, Cuautepec de Hinojosa, Tulancingo, Metepec, Acatlán, Agua Blanca, Singuilucan, Acaxochitlán, Tenango de Doria y Huasca de Ocampo (Figura 2). Tiene una superficie aproximada de 1,021 km<sup>2</sup> (Lesser-y-Asociados 2006).

En el censo realizado por Ariel en el año 1999, se reportaron un total de 308 aprovechamientos de agua subterránea en el acuífero; de estos aprovechamientos 209 se destina a las actividades agrícolas, 33 para uso público urbano, 35 para uso doméstico y 31 para uso industrial. El volumen total extraído por bombeo, para este año es de 111 Mm<sup>3</sup>/año, de los cuales 78.5% son para uso agrícola, 18.8% para uso público urbano, 1.85% para uso doméstico y 2.0% para uso industrial (Lesser-y-Asociados 2006).

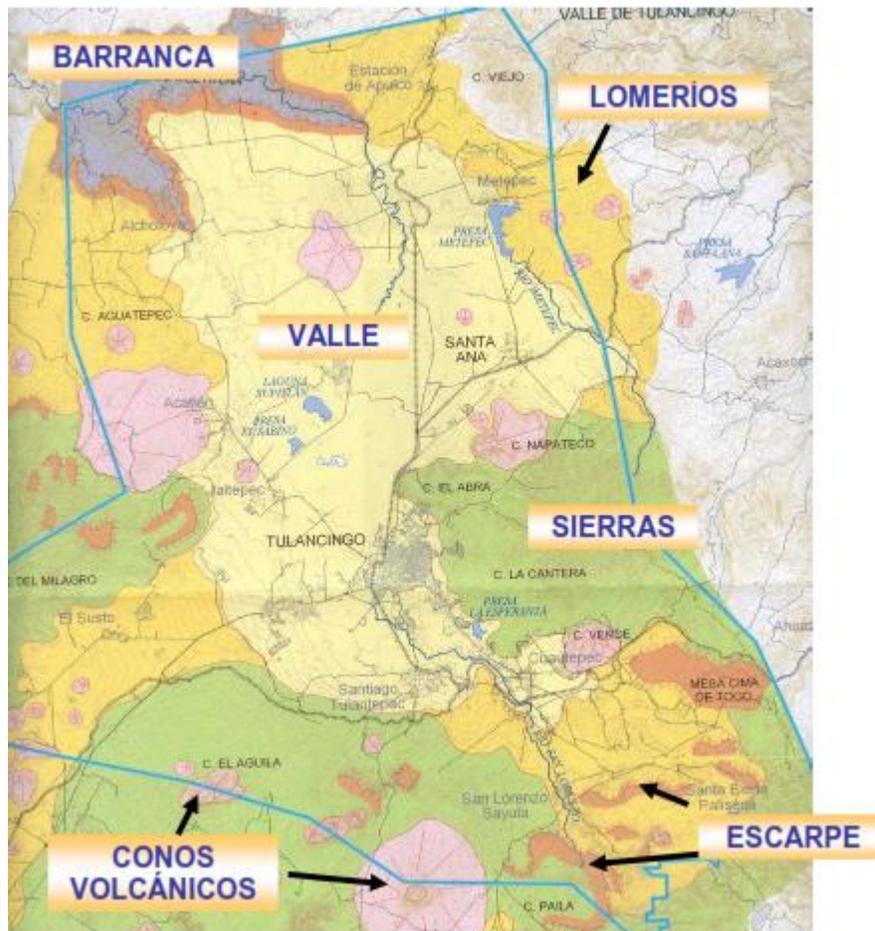


Figura 4. Mapa de ubicación del acuífero del Valle de Tulancingo (Lesser I et al. 2007)

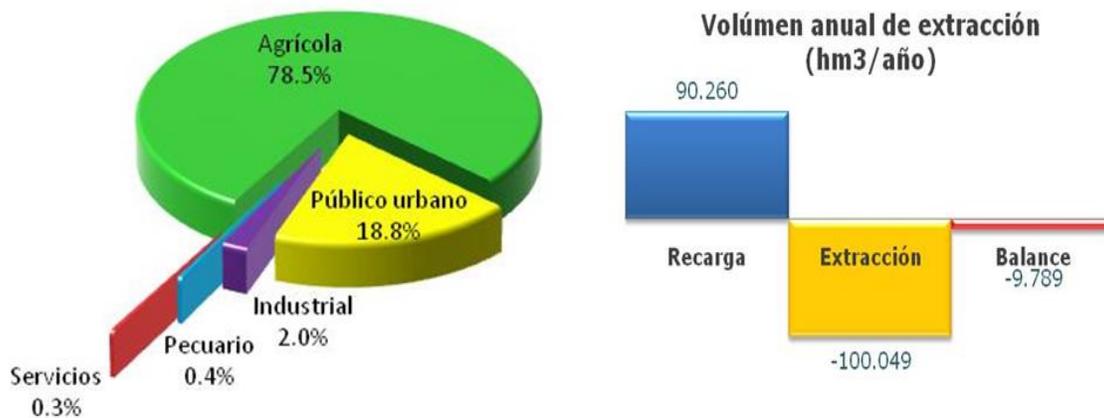


Figura 5. Principales usos del agua subterránea y su balance hídrico. Fuente:(Lesser-y-Asociados 2006).

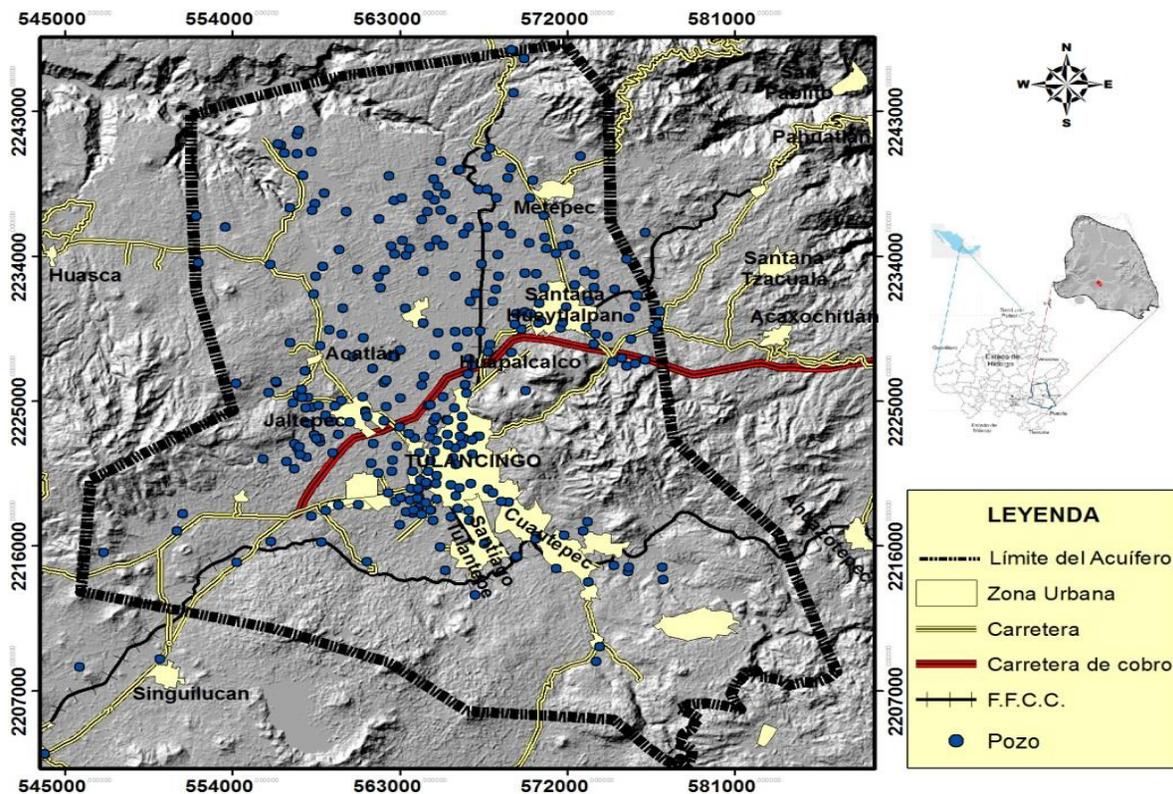


Figura 6. Ubicación de los pozos en el Valle de Tulancingo

### 2.5.2. Geología

El área de estudio queda comprendida dentro de las Provincias Geológicas del Eje Neovolcánico y la Sierra Madre Oriental; sin embargo, en superficie únicamente se encuentran rocas volcánicas características del Eje Neovolcánico, las cuales están sobreyaciendo discordantemente a las rocas mesozoicas de la Sierra Madre Oriental. De tal forma la edad de las formaciones geológicas en esta región, varía desde el Terciario Inferior (Oligoceno) hasta el Reciente. Las rocas más antiguas corresponden al Grupo (SEMARNAT-SGM 2010) respectivamente. En el valle se encuentra una capa de clásticos con capas lenticulares de basaltos de la Formación Atotonilco, correspondientes las tres unidades del Terciario (Ferrari et al. 2012; SEMARNAT-SGM 2010).

Material aluvial. Corresponde a sedimentos subsuperficiales constituidos por gravas, arcillas y limos que presentan de 1 a 20 m de espesor (SEMARNAT-SGM 2010).

Basaltos. Es la unidad geológica de mayor distribución en la zona de estudio. En la parte más somera, los basaltos presentan intenso fracturamiento y alta vesicularidad, disminuyendo estas características conforme se profundizan; en algunas porciones aflora, y en otras subyace al material aluvial, su espesor varía entre 20 y 44 m en promedio.

Piroclásticos intercalados con rocas volcánicas (Formación Atotonilco El Grande). Es una alternancia de materiales piroclásticos, capas de cenizas volcánicas (tezontle y pómez) y eventualmente, riolitas y basaltos; se distribuyen ampliamente en el valle, tiene espesores que varían de 50 m a posiblemente más de 120 m, se encuentran poco consolidados, y subyace a los basaltos (SEMARNAT-SGM 2010).

Riolitas Navajas. Son potentes derrames de riolitas masivas poco fracturadas, que subyacen a la formación Atotonilco El Grande y a los derrames basálticos, posiblemente descansan en forma discordante en rocas del Grupo Pachuca y de la Formación Mezcalá (SEMARNAT-SGM 2010).

En la región existen una gran cantidad de fallas y fracturas, que han afectado primordialmente a las rocas volcánicas. En términos generales, es posible diferenciar dos sistemas de fracturas y fallas, el principal con una orientación promedio de N30°E y al cual corresponde la falla de mayores dimensiones (32 km de longitud), que se manifiesta en la superficie por una persistente alineación de aparatos volcánicos (SEMARNAT-SGM 2010), debido a estas características el acuífero tiene características hidrogeológicas favorables.

### 2.5.3. Estratigrafía

El **Grupo Pachuca** es la denominación que se da a una serie de rocas volcánicas de composición variada entre las que predominan andesitas y dacitas, cuya edad varía del Oligoceno al Mioceno y que han sido ampliamente estudiadas principalmente por los yacimientos minerales del área de Pachuca-Real del Monte. En la zona de estudio las rocas que constituyen al Grupo Pachuca forman las elevaciones topográficas del límite oriental y están constituidas por derrames lávicos, tobas y brechas de tipo riolítico, así como lavas dacíticas, las cuales han sido asignadas al Mioceno. Existen derrames de composición riolítica entre las que destacan el Cerro Viejo al noreste del Valle de Tulancingo y las elevaciones topográficas ubicadas al oriente de la Ciudad de Tulancingo, entre las que se cuentan los cerros de El Abra, Napateco y la Cantera. Estas rocas de

composición riolítica se encuentran masivas y presentan un color rosa pardo, estructura fluidal, frecuentemente asociados con brechas constituidas por fragmentos angulosos de material riolítico. Llegan a incluir intercalaciones de tobas de color café claro con textura arenosa, así como derrames de dacitas masivas de color gris. Se le asigna una edad del Mioceno-Oligoceno y se estima que presentan un espesor mayor de 400 metros (SEMARNAT-SGM 2010).

Sobre la unidad anterior se encuentra la Formación Riolita Navajas, la cual se encuentra constituida por derrames de riolita fluidal de color rosa claro y pardo, masiva. Aflora en el Cerro El Milagro (en la porción poniente del valle de Tulancingo), donde los potentes derrames riolíticos se encuentran morfológicamente bien conservados. Presenta un espesor de alrededor de 500 metros y se asigna al Plioceno (SEMARNAT-SGM 2010).

La **Formación Atotonilco el Grande** corresponde a capas delgadas de pómez con un espesor entre 5 y 35 cm, las cuales se encuentran pseudoestratificadas o intercaladas con material piroclástico poco consolidado, de textura gruesa, que incluyen fragmentos de obsidiana de textura gruesa, de dimensiones variables, así como piroclásticos de textura arenosa de composición riolítica y basáltica que hacia algunas zonas presenta clastos de mayor tamaño. Se intercala con capas de cenizas finas, capas de pómez y derrames de basalto. Aflora en la porción sur del Cerro El Abra y se encuentra intercalada con materiales granulares que rellenan el Valle de Tulancingo. Tiene un espesor de 40 a 60 metros y se asigna al Plioceno. En edad se correlaciona con la Formación Navajas, de la cual se distingue por su litología, en especial la presencia de horizontes de pómez (SEMARNAT-SGM 2010).

**Derrames basálticos y clásticos asociados.** corresponden a potentes derrames de lava de composición basáltica, caracterizada por la presencia de olivino, por incluir un gran número de vesículas y en algunas zonas encontrarse muy fracturada. Corresponden a flujos de lava eyectados por aparatos volcánicos ubicados en el sur del Valle de Tulancingo, así como en la porción noreste. Incluye horizontes de material piroclástico de color gris oscuro, en algunas zonas con tono rojizo, provenientes de conos cineríticos que se extienden principalmente sobre la sierra del sur del valle, destacando entre ellos el Cerro El Águila por su elevación. En general, corresponde a una intercalación de corrientes de lava basáltica con piroclásticos, asociados a la eyección de las lavas que se

acumularon formando varios conos volcánicos que dan origen a las sierras del sur y noreste (SEMARNAT-SGM 2010).

La unidad descrita como derrames basálticos incluye a una intercalación de piroclásticos y basaltos. Los piroclásticos presentan diferente textura, predominando la arenosa pero en algunos sitios incluye piroclásticos de mayor tamaño y en otras zonas capas de cenizas finas. Aflora en la porción norte y noroeste del Valle de Tulancingo, donde constituye aparatos volcánicos que se consideran más jóvenes que las sierras del sur. Los basaltos presentan color oscuro, corresponden a basaltos de olivino y espesor que podría alcanzar hasta 60 metros. Se asigna al Cuaternario considerándose (SEMARNAT-SGM 2010).

Por lo que se refiere a los clásticos arcillosos, arenosos y conglomerados, corresponden a piroclásticos de textura arenosa y arcillosa, los cuales se encuentran poco consolidados y tienen intercalaciones de materiales aluviales de textura variada, desde fina hasta clastos de varios centímetros de diámetro. Corresponde al material más superficial que constituye el Valle de Tulancingo, el cual se encuentra interdigitado con algunos sedimentos aluviales de granulometría variada y su origen correspondió a las últimas emanaciones volcánicas de los conos cineríticos que se encuentran rodeando prácticamente a todo el valle (SEMARNAT-SGM 2010).

Las rocas más nuevas corresponden a aluviones del Cuaternario los que corresponden a sedimentos areno-arcillosos acarreados por las corrientes superficiales y acumulados en depresiones principalmente al sur-este y oeste de la Ciudad de Tulancingo. Su espesor es de 3 a 15 metros.

#### **2.5.4. Hidrogeología**

El valle de Tulancingo, se ubica en la Región Hidrológica No. 26 “Cuenca del Río Pánuco”, ubicada al centro-noreste de la República Mexicana. La Subregión corresponde al Alto Pánuco del Río Moctezuma, del cual es afluente el río que recibe diferentes nombres: Quetzalapa, Amajac, Metztlán y Río Grande Tulancingo. La cuenca en la que se aloja el acuífero corresponde a la Parte Alta de la Cuenca del Río Metztlán, cuya superficie abarca porciones de los estados de Puebla, Hidalgo y Veracruz (CONAGUA 2012).

Se denomina Valle de Tulancingo a la subcuenca en donde se aloja el acuífero del mismo nombre, dentro del cual el Río Grande Tulancingo se forma en el estado de Puebla y con diferentes nombres cruza la subcuenca hasta su confluencia con el Río Metztlán (CONAGUA 2012).

La recarga total está constituida por la recarga natural y la recarga incidental o inducida por la aplicación de agua en las actividades humanas, tanto de origen superficial como subterránea.

Las rocas existentes en el Valle de Tulancingo se clasificaron de acuerdo a su capacidad para permitir la infiltración, circulación y almacenamiento de agua en el subsuelo, en: Rocas permeables y rocas impermeables.

Las rocas permeables corresponden a los materiales aluviales y clásticos arcillosos-arenosos y conglomerados que constituyen el Valle de Tulancingo, con un espesor de cuando menos 200 metros, donde se permite la acumulación de agua en el subsuelo que da lugar al principal acuífero de la región. Estos materiales presentan intercalaciones de lavas basálticas y entre ambos constituyen a la principal unidad acuífera del Valle de Tulancingo (Lesser-y-Asociados 2006).

Otro tipo de materiales permeables corresponden a basaltos y material cinerítico que forman principalmente las sierras del sur y noreste. Están constituidas por lavas fracturadas y piroclásticos permeables, que permiten la infiltración de agua al subsuelo, por lo que funcionan principalmente como zonas de recarga o alimentación al acuífero del valle.

La Formación Atotonilco junto con los clásticos de la Formación y los aluviones dan origen al acuífero de la zona en estudio, mientras que los basaltos y piroclásticos de la Formación que constituyen las partes altas, corresponden a zonas de recarga.

Por otra parte, las rocas impermeables corresponden a la Riolita Navajas y al Grupo Pachuca, las cuales se encuentran constituidas principalmente por materiales de composición riolítica que en general se comportan como impermeables al flujo de agua subterránea y que constituyen las fronteras laterales del acuífero y muy posiblemente también correspondan al basamento (Lesser-y-Asociados 2006).

Las rocas permeables funcionan como zona de recarga o zona acuífera y las impermeables como barrera al flujo subterráneo. Las zonas de recarga se ubican hacia las partes topográficas altas, donde el agua de lluvia se infiltra y circula hacia cotas menores, mientras que en las partes bajas las rocas permeables almacenan agua y funcionan como acuífero. Las principales zona de recarga se ubican en la parte sur, al noreste y al oeste del valle.

### **2.5.5. Hidrogeoquímica**

La principal corriente superficial que drena el Valle de Tulancingo corresponde al Río Grande de Tulancingo que cambia su nombre aguas abajo por Río Alcholya y posteriormente por el de Río Metztlán. Este, se origina al sur del valle, al pie del Cerro Tlacholya al sureste de la zona de estudio, a partir de la confluencia de los ríos Chico y San Lorenzo.

El agua de lluvia que recarga un acuífero tiene escaso contenido iónico, en la escorrentía superficial pero al recorrer la zona no saturada y saturada, se lleva a cabo una interacción agua-roca donde intervienen factores como el geológico, hidrogeológico, geomorfológico, climático, antropogénico entre otros principalmente (Facundo, 1990).

La familia de agua determinada por Lesser y Asociados en 2006 es del tipo sódica-bicarbonatada y sódico mixta-bicarbonatada.

El agua de lluvia pertenece a la misma familia detectada en el Valle de Tulancingo, o sea sódica-bicarbonatada. Se observa que en el subsuelo el agua además de que prácticamente no ha aumentado su contenido salino, éste conserva las características del agua de lluvia. Por otra parte, se confirma que los materiales a través de los cuales circula el agua son de tipo basáltico, los cuales no incluyen minerales de fácil disolución que se puedan incorporar al agua en solución y modificar su composición. En conclusión, corresponden a agua de acuíferos basálticos, por lo que la litología está determinando las características hidrogeoquímicas del tipo de agua, todos estos factores además inciden en el tiempo de contacto entre el agua y la roca y por lo tanto la cantidad de sales disueltas provenientes de los minerales (Lesser-y-Asociados 2006).

### 2.5.6. Geoquímica

La geoquímica de los contaminantes es la disciplina que investiga las interacciones en el subsuelo entre los productos químicos antropogénicos y componentes naturales, actualmente se han llevado a cabo una serie de estudios para comprender la interacción contaminante-suelo y así poder tener un enfoque más claro acerca de su remediación, por lo que cada vez es mayor la cantidad de literatura la cual indica el tipo de contaminante, propiedades, condiciones en las que se encuentra en el suelo y si sus afectaciones son irreversibles (Berkowitz *et al*, 2008).

En el Valle de Tulancingo el estado de los ríos está profundamente influido por la actividad humana. Existe una producción importante de lactosuero. En la mayoría de las empresas del Valle de Tulancingo se mezclan los dos tipos de lactosuero, generando un tercer tipo de lactosuero, resultado de la mezcla del suero dulce y ácido, el cual es utilizado en la elaboración de requesón. El suero que se genera después de la elaboración de requesón, es el que representa el problema ambiental, debido a que en muchas empresas, este subproducto es desechado al ambiente sin ningún tipo de tratamiento (Guerrero, 2010).

En el 2008 se estimó que el derrame diario al suelo y cuerpos de agua de lactosuero en el Valle de Tulancingo era de más de 200 mil litros. La práctica de esta actividad económica tiene alrededor de 30 años por lo que es necesario evaluar y caracterizar el acuífero del Valle debido a que no se le da ningún tipo de tratamiento a los desechos originados y que puede impactar sobre el acuífero y suelo de la región (Callejas-Hernández *et al.* 2012; Guerrero-Rodríguez *et al.* 2010).

## 3 Objetivos

### Objetivo General

Calcular el potencial de recarga con datos de 100 años mediante el balance hidrometeorológico y evaluar la calidad del agua subterránea del acuífero del Valle de Tulancingo mediante la medición de datos hidrogeoquímicos para analizar la relación de actividades antropogénicas con el índice de vulnerabilidad determinado con el método DRASTIC modificado con el uso de suelo.

### Objetivos Específicos

1. Obtener el balance hidrológico del Acuífero del Valle de Tulancingo mediante el cálculo de la infiltración, escurrimiento y evapotranspiración con los datos de precipitación, temperatura, radiación solar, uso de suelo y elevación del terreno en 100 años.
2. Determinar la calidad del agua subterránea mediante la medición de parámetros físico-químicos e identificar las regiones del acuífero con concentraciones de iones que rebasen los límites permisibles establecidos en la NOM127-SSA1-1994.
3. Comprobar y clasificación el tipo de agua subterránea del acuífero inferior ya que ahí están localizados todos los pozos del acuífero del Valle de Tulancingo de acuerdo a datos físico-químicos de los años 2006, 2013 y 2014 utilizando los diagramas de Piper y Shoeller.
4. Distinguir los sistemas de flujo de agua subterránea utilizando los datos de análisis del agua de cada pozo y las correlaciones entre ellos, teniendo en cuenta su georreferenciación.
5. Determinar el índice de vulnerabilidad mediante el método DRASTIC modificado con el parámetro de uso de suelo y llevar a cabo el análisis espacial mediante la generación del mapa de vulnerabilidad.

6. Estudiar la correlación entre el Índice de Vulnerabilidad y los datos hidrogeoquímicos del acuífero para detectar sus amenazas mediante la identificación de los componentes más significativos.

## 4. Materiales y Métodos

### 4.1. Balance hidrometeorológico

Los SIG son una herramienta muy importante para combinar información espacial (y temporal) procedente de varias fuentes, como Modelos Digitales del Terreno, Teledetección o modelos hidrogeológicos. Para el cálculo del balance hidrometeorológico se utilizaron datos de un periodo de tiempo de 100 años (1911-2011) tomados de la red meteorológica del Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM (Fernandez-Eguiarte et al. 2011).

#### 4.1.1. Vegetación y uso de suelo

Éste factor determina la infiltración de agua de precipitación hacia el subsuelo en determinada área, el tipo de vegetación y uso de suelo pueden llegar a afectar el escurrimiento superficial el cual es un componente del balance hídrico.

Los tipos de uso de suelo localizados en el área de estudio son 4: bosque, pastizal, uso agrícola y área urbana. En el caso del suelo urbano o sin uso, se consideró que no se producía recarga asociada (SEMARNAT-SGM 2010).

#### 4.1.2. Cálculo de la precipitación media

La precipitación media (P) en determinada área se representan por la siguiente ecuación de Castany (Castany 1971)

$$P - ETR - ES - 1 = 0$$

Donde P se expresa en unidades de volumen, ETR y ES son los volúmenes de la evapotranspiración y del escurrimiento superficial (escorrentía)

Por tanto:

$$P = ETR + ES + 1$$

La precipitación es la principal fuente de abastecimiento de agua hacia el subsuelo, por eso es recomendable tener datos precisos para la exactitud de los resultados.

El método de Media Aritmética, consiste en realizar una suma del valor registrado en cada una de las estaciones meteorológicas ubicadas dentro del área de estudio y dividirla por el número total de estaciones. Se trata de un método de resolución rápida y que conlleva un

grado de precisión muy relativo, el cual dependerá del número de estaciones y su ubicación dentro de la cuenca para permitir una buena distribución. Es el único método que no requiere de un conocimiento previo de la ubicación de cada estación meteorológica (Galindo-Castillo et al. 2010).

$$P = \frac{\sum_{i=1}^n P_i}{n}$$

Donde:

P= precipitación media sobre la cuenca

P<sub>i</sub>= precipitación observada en la estación i

n= número de estaciones meteorológicas

Así la precipitación media de la cuenca se obtiene sumando los productos de las precipitaciones de cada estación por el área del polígono correspondiente y dividiendo la suma entre el área total de la misma cuenca.

$$P_m = \frac{(p_1 a_1) + (p_2 a_2) + (p_3 a_3) \dots + (p_n a_n)}{A}$$

Donde:

P<sub>m</sub>: precipitación media de la cuenca

p= precipitación media de cada polígono

a= área correspondiente a cada polígono

A= área total de la cuenca

#### **4.1.3. Escurrimiento superficial**

Para este cálculo se siguió la metodología descrita en (Galindo-Castillo et al. 2010). Es necesario primero calcular el coeficiente de escurrimiento (K), el cual es una relación entre la lámina de agua precipitada en una zona y la cantidad de agua que escurre superficialmente (E<sub>s</sub>).

$$K = E_s / P$$

El valor de K se identifica como la cobertura vegetal, uso de suelo, textura y las pendientes del terreno. Los valores de K utilizados se muestran en las tablas 4 y 5.

Tabla 3. Valores de K reportados según uso de suelo, textura y pendientes del terreno. Obtenidos de (Galindo-Castillo et al. 2010; NOM-011-CONAGUA-2015 2015)

Uso de suelo	Pendiente %	Textura		
		Gruesa	Media	Fina
Bosque	0-5	0.10	0.30	0.40
	5-10	0.25	0.36	0.50
	10-30	0.30	0.40	0.60
	>30	0.32	0.42	0.63
Pastizal	0-5	0.15	0.35	0.45
	5-10	0.30	0.40	0.55
	10-30	0.35	0.45	0.65
	>30	0.37	0.47	0.68
Agricultura	0-5	0.30	0.50	0.60
	5-10	0.40	0.66	0.70
	10-30	0.50	0.70	0.80
	>30	0.53	0.74	0.84

La tabla de Chow establece los valores para las zonas urbanas.

Tabla 4. Tabla de valores de K para zonas urbanas. Valores obtenidos de (Galindo-Castillo et al. 2010)

Uso de suelo	Pendiente %	Textura		
		Gruesa	Media	Fina
Zona Urbana	0-5	0.70	0.81	0.92
	5-10	0.76	0.85	0.93
	10-30	0.88	0.91	0.94
	>30	0.95	0.95	0.95

#### 4.1.4. Infiltración

Se refiere al volumen de agua que se percola a través del suelo, el cual puede presentar una mayor o menor permeabilidad, siendo la diferencia de volumen de agua que entra en la cuenca y el volumen que sale, se calcula a partir de:

$$I = V \times A$$

Donde:

V: Volumen total resultante de sumar la precipitación media y la escorrentía.

A= área total del acuífero

#### 4.1.5. Evapotranspiración

Es la cantidad de agua extraída de una determinada área por los procesos combinados de evaporación del suelo y la traspiración de las plantas.

El método de L. Turc (Galindo-Castillo et al. 2010) calcula la evapotranspiración de la siguiente forma:

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0.9 + \frac{P^2}{L^2}}}$$

Donde

$$L=300+25Tp+0.05Tp^3$$

Además L debe calcularse en función de un valor corregido de temperatura (Tp), definido por:

$$Tp = \frac{\sum PiTi}{\sum Pi}$$

Siendo Pi y Ti, valores de precipitación y temperatura respectivamente para cada media mensual.

El diagrama general del procedimiento de la aplicación de la metodología se muestra en la figura 6.



Figura 6. Diagrama de la metodología seguida para el cálculo del balance hidrometeorológico. Fuente: Elaboración propia.

#### 4.1.6. Interpolación y mapeo de datos

Cada uno de los datos de interpoló mediante kriging, esta metodología se realizó para los datos de precipitación. Para los datos de temperatura, se tomaron en cuenta las temperaturas medias anuales y los promedios mensuales.

La manera de poder incluir el balance hídrico radica en las herramientas del menú Spatial Analyst, el cual se llama Raster Calculator, en donde se utilizaron los datos de precipitación y temperatura, con sus funciones correspondientes.

El escurrimiento superficial se calculó mediante la asignación de un valor a “k” (Ec. 5), el cual fue identificado para cada estación meteorológica, dependiendo del porcentaje de pendiente, textura, uso de suelo y vegetación del área donde se localizan. Se debe de crear además un mapa de pendientes con la herramienta Slope. Posteriormente, ya identificados los tres factores para asignar el valor de k, para poder aplicar la ecuación ( $Es=P*k$ ), y así obtener los valores de escurrimiento mediante interpolación por Kriging. Este proceso se aplicó tanto a los valores mensuales como anuales.

#### **4.1.7. Modelo digital de elevaciones**

Se realizó el modelo digital de elevaciones mediante el Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0 (CEM 3.0) del INEGI y es un producto que representa las elevaciones del territorio continental mexicano, mediante valores que indican puntos sobre la superficie del terreno, cuya ubicación geográfica se encuentra definida por coordenadas (X, Y) a las que se le integran valores que representan las elevaciones (Z). Los puntos se encuentran espaciados y distribuidos de modo regular.

### **4.2. Análisis datos hidrogeoquímicos**

#### **4.2.1. Metodología para la toma de muestras**

La primera campaña de muestreo se realizó en el mes de octubre del año 2013 y la segunda campaña en mayo de 2014. Se muestrearon 18 pozos del acuífero del Valle de Tulancingo (Figura ¿?). Las muestras de agua provenientes de pozos fueron tomadas directamente de la tubería de descarga después de 5 minutos de haber prendido el pozo. En campo se midieron los parámetros físicos como temperatura, pH, Conductividad Eléctrica, Sólidos Totales Disueltos, Oxígeno Disuelto. La determinación de iones se llevó a cabo en el Laboratorio de Geoquímica Ambiental, del Centro de Geociencias de la Universidad Nacional Autónoma de México.

---

Análisis de aniones por HPLC: ( $F^-$ ,  $Cl^-$ ,  $NO_3^-$ ,  $Br^-$ ,  $PO_4^{2-}$  y  $SO_4^{2-}$ )

---

Análisis de cationes por ICP-Óptico: (Al, As, Ba, Be, Bi, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, K, Li, Mg, Mn, Mo,

---

, S, Sb, Se, Si, Sr, Tl y Zn)

---

Todas las muestras para la determinación de cationes fueron recolectadas en botes de plástico lavados con ácido y enjuagados con agua desionizada. Las muestras para la determinación de aniones fueron recolectadas en botes de plástico lavados únicamente con agua desionizada. Para la determinación de cationes fueron acidificadas ( $\text{pH} < 2$ ) con ácido nítrico ultrapuro. Todas las muestras fueron filtradas antes de ser almacenadas en sus respectivos contenedores con membranas de esteres mezclados de celulosa de  $0.45 \mu\text{m}$  y se mantuvieron a  $4^\circ\text{C}$  hasta el momento de su análisis.



Figura 7. Ejemplo de filtros y membranas

Durante la recolección de muestras y la medición de parámetros de campo se usaron guantes de látex. Todo el equipo fue lavado con agua destilada antes y después de cada medición. Los instrumentos de campo fueron, en su caso, calibrados con soluciones estándar antes de las mediciones. La calibración fue verificada a lo largo de todo el proceso de muestreo. Para determinar una posible variación espacial se trazó una recta virtual en la dirección S-N en el acuífero la cual tiene de largo 40 kilómetros y sirvió para analizar el comportamiento de los parámetros físico químicos respecto a la distancia.



Figura 8. Ejemplo de la toma de muestra en campo

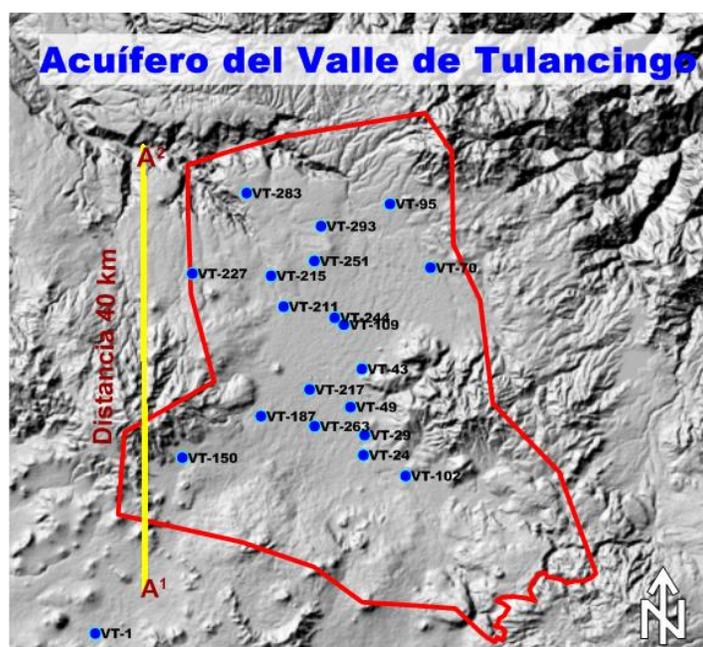


Figura 9. Localización de los puntos de muestreo.

#### 4.2.2. Parámetros hidrogeoquímicos a evaluar

Parámetros como la temperatura, pH, sólidos totales disueltos, potencial redox, oxígeno disuelto, alcalinidad y conductividad eléctrica permiten comprender mejor la evolución, origen, distribución, calidad, y procesos que ocurren dentro de un sistema acuífero. Todos los parámetros se evaluaron en campo con un equipo HI 9828 de Hanna Instruments (Figura 10).



Figura 10. Equipo Hanna HI9828

#### **4.2.3. Clasificación del agua mediante datos hidrogeoquímicos**

Hay que destacar que en la mayoría de los casos la etapa de adquisición de datos puede consumir la mayor parte de los recursos disponibles, tanto desde el punto de vista temporal como desde el económico. La adquisición de dichos datos se realiza normalmente durante la fase de investigación y caracterización del acuífero contaminado, y en la que se procederá a la realización de una campaña de muestreo de suelo y agua subterránea. Comúnmente, los datos de campo y laboratorio se interpretan con la ayuda de diagramas de dispersión y diagramas Piper, Stiff, Schoreller y Gibbs para las muestras de agua subterránea.

Diagrama de Piper: Es un sistema de referencia ternario compuesto de dos triángulos a los costados y un diamante al centro en donde se grafican las concentraciones de cationes y aniones mayoritarios en meq/L. Este diagrama permite representar la composición química del agua y comparar muestras así como agrupar las aguas por familias hidrogeoquímicas y establecer relaciones entre ellas. Empíricamente, se pueden sugerir algunos procesos o reacciones químicas que llevan a cabo en el agua como intercambio iónico, salinización, etc.

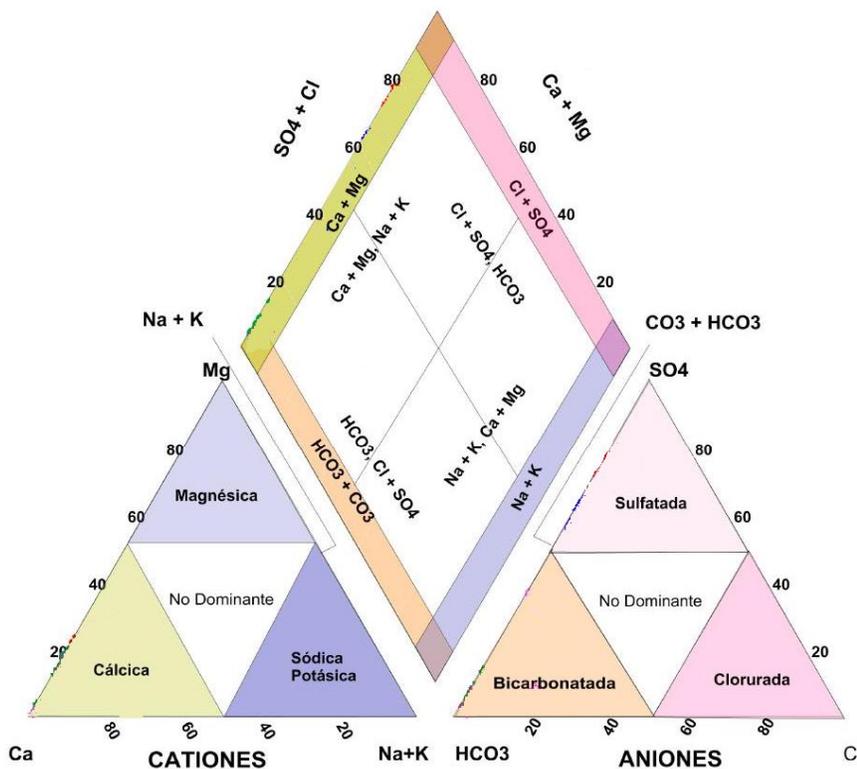


Figura 11. Diagrama de Piper.

Diagrama de Schoeller: Es un eje cartesiano semicuantitativo donde se representan los iones ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ) y la concentración de cada uno de ellos. Este tipo de diagramas permite visualizar rápida y fácilmente máximos y mínimos de uno u otro ion.

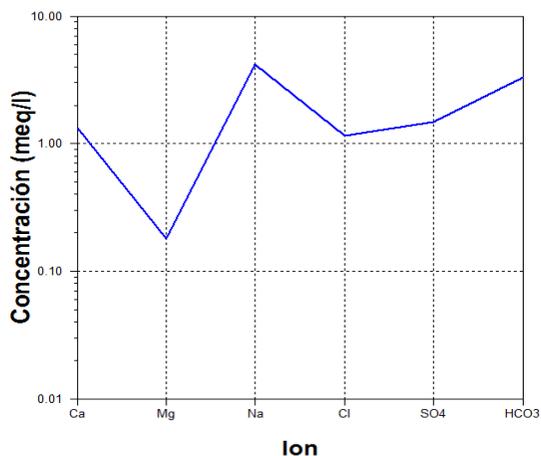


Figura 12. Diagrama de Schoeller.

**4.2.4. Límites permisibles de calidad del agua**

El agua potable debe de contar con ciertas características para ser utilizada para consumo humano, el medir los parámetros físico-químicos nos indican las propiedades y características del agua para clasificar su calidad. El término de calidad del agua se refiere a las características que debe de tener un agua para ser utilizada con un fin determinado, ya sea industrial, para la agricultura, consumo humano, o para ganado, principalmente. En México para el caso del agua para consumo humano se rige por la NOM127-SSA1-1994 la cual indica los límites permisibles de algunas sustancias, para el caso de este estudio sólo se tomaron en cuenta algunos de los siguientes parámetros que vienen dentro de ésta norma:

Tabla 5. Valores permisible establecidos en la NOM-127-SSA1-1994 (mg/L)

CARACTERÍSTICA	LÍMITE PERMISIBLE	CARACTERÍSTICA	LÍMITE PERMISIBLE
Aluminio	0.20	Nitrógeno amoniacal (como N)	0.50
Arsénico	0.05	pH (potencial de hidrógeno) en unidades de pH	6.5-8.5
Bario	0.70	Plaguicidas en microgramos/l	0.03
Cadmio	0.005	Clordano (total de isómeros)	0.30
Cianuros (como CN-)	0.07	DDT (total de isómeros)	1.00
Cloro residual libre	0.2-1.50	Gamma-HCH (lindano)	2.00
Cloruros (como Cl-)	250.00	Hexaclorobenceno	0.01
Cobre	2.00	Heptacloro y epóxido de heptacloro	0.03
Cromo total	0.05	Metoxicloro (1,1,1-Tricloro, 2,2, bis 20,00 (p-metoxi-fenil) etano)	20.00
Dureza total (como CaCO <sub>3</sub> )	500.00	2,4 – D (Acido 2,4 - diclorofenoxiacético)	50
Fenoles o compuestos fenólicos	0.001	Plomo	0.025
Fierro	0.30	Sodio	200.00
Fluoruros (como F-)	1.50	Sólidos disueltos totales	1000.00
Manganeso	0.15	Sulfatos (como SO <sub>4</sub> =)	400.00
Mercurio	0.001	Sustancias activas al azul de metileno (SAAM)	0.50
Nitratos (como N)	10.00	Trihalometanos totales	0.20
Nitritos (como N)	0.05	Zinc	5.00

### **4.3. Cálculo del Índice de Vulnerabilidad (IDV)**

Para calcular el mapa del índice de vulnerabilidad con el software ArcGIS se deben seguir 3 pasos en los que se utilizarán el análisis de superficie (slope), interpolación, reclasificación y el álgebra de mapas, funciones de la herramienta SpatialAnalyst. El procedimiento resumido se representa en la figura 13, que sigue el siguiente orden:

1. Construir cada uno de los mapas que representan la distribución espacial de cada una de las variables. Para ello se utilizaron las herramientas (IDW, Spline) o geoestadísticos (Kriging).
2. Reclasificar los mapas obtenidos para cada una de las variables de acuerdo a los datos. Esto se realiza por medio de la función Reclassify de la extensión SpatialAnalyst.
3. Por último se realiza el álgebra de mapas con los mapas reclasificados del paso anterior, mediante la suma ponderada de cada uno de ellos. Para ello ArcGis cuenta con la herramienta RasterCalculator de la extensión SpatialAnalyst.

Cada uno de los mapas que se emplean para la metodología GRASTIC se realizó con el software ArcGIS, con información proporcionada por el COTAS Tulancingo y la CEA AH.

Los factores de ponderación toman valores de 1 a 10, se utilizan para reclasificar la variación de las propiedades de cada uno de los parámetros utilizados.

La determinación de los índices de vulnerabilidad involucra multiplicar cada uno de los parámetros (r) por el peso que se le asigna (w) a cada uno y se suma el total:

$$\text{IDV} = \text{DrDw (profundidad)} + \text{RrRw (recarga)} + \text{ArAw (geología)} + \text{SrSw (suelo)} + \text{TrTw (topografía)} + \text{Irlw (zona saturada)} + \text{CrCw (conductividad hidráulica)}$$

Los pesos de cada variable (w) que se utilizaron en la ecuación anterior se muestran en la tabla 6 para cada uno de los factores a evaluar en el método DRASTIC.

Tabla 6. Valores del peso (w) asignado para cada parámetro (r) en el cálculo de IDV mediante método DRASTIC

Parámetro (r)	D <sub>w</sub>	R <sub>w</sub>	A <sub>w</sub>	S <sub>w</sub>	T <sub>w</sub>	I <sub>w</sub>	C <sub>w</sub>
Peso (w)	5	4	3	2	1	5	3

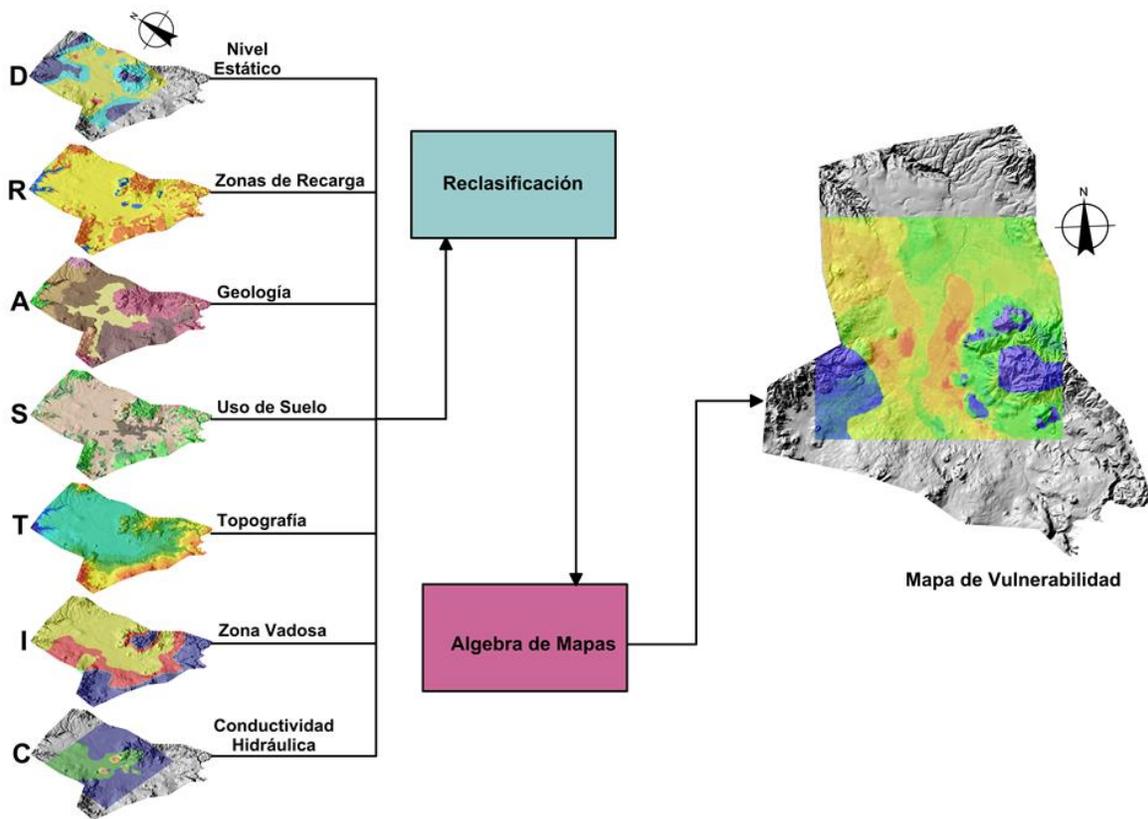


Figura 13 Ejemplo de los pasos a realizar en ArcGIS para obtener el mapa de vulnerabilidad. Fuente: Elaboración propia.

## **5.Resultados y Discusión**

### **5.1. Balance hidrometeorológico de la cuenca**

Toda unidad hidrológica, ya sea superficial o subterránea, recibe aportaciones y también descarga cierto volumen de agua. Además es capaz de contener un volumen variable y durante un tiempo llegan a estar en equilibrio, cuya expresión cuantitativa constituye el balance hídrometeorológico, que significa el potencial de recarga. Esta cantidad no define si alimenta el acuífero superior o el inferior y no tiene en cuenta la demanda. Por ello, es un dato de recarga potencial.

El reconocimiento de la necesidad de estructurar un balance es fundamental para alcanzar el uso racional de los recursos del agua en determinado espacio y tiempo, así como para establecer un control y adecuada distribución de los mismos.

#### **5.1.1. Generación del modelo digital de elevaciones**

Primeramente se realizó el modelo digital de elevaciones, el cual se muestra en la figura 14. Contar con los continuos del CEM representó ventajas importantes, al disponer de información homogénea, completa y actualizada, con mayor facilidad para acceder a ella y derivar productos con mayor calidad teniendo una resolución de 15 x 15 metros en cada pixel.

Como se observa de la figura 14, las mayores elevaciones se encuentran al sur del valle y éstas constituyen las zonas de recarga principales. Las menores altitudes se encuentran hacia el norte y por tanto, los flujos de las escorrentías y ríos van en dirección Sur-Norte. Éstas descargan sus aguas en el río Tulancingo, que a su vez se dirige hacia la Barranca de Meztlán.

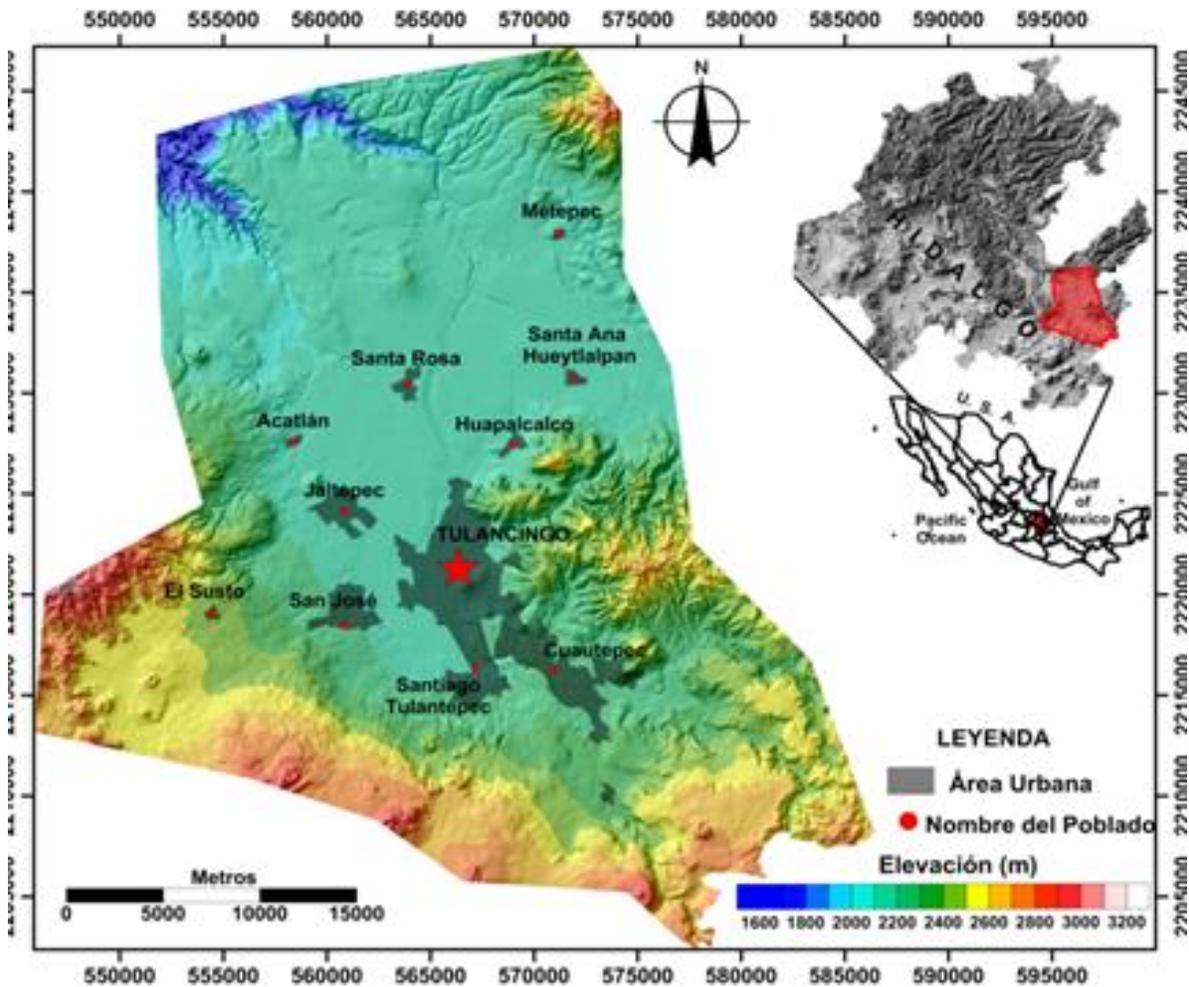


Figura 14. Modelo digital de elevaciones del acuífero del Valle de Tulancingo

## 5.1.2 Generación de mapas para obtener el balance hidrometeorológico

### 5.1.2.1 Uso de suelo

Los tipos de uso de suelo localizados en el área de estudio son 4: bosque, pastizal, uso agrícola y área urbana. En el caso del suelo urbano o sin uso, se consideró que no se producía recarga asociada. El mapa de uso de suelo se muestra en la Figura 15. Los bosques se presentan en las zonas montañosas y se observa un alto predominio de la actividad agrícola y pecuaria. En el área central y norte existe la industria de producción de derivados lácteos, dominada principalmente por pequeños productores de queso con vertidos de suero lácteo.

La extensión urbana más grande se localiza al centro del valle. Existe una actividad industrial importante en el sur de la ciudad de Tulancingo, principalmente en el sector textil y de producción de alimentos.

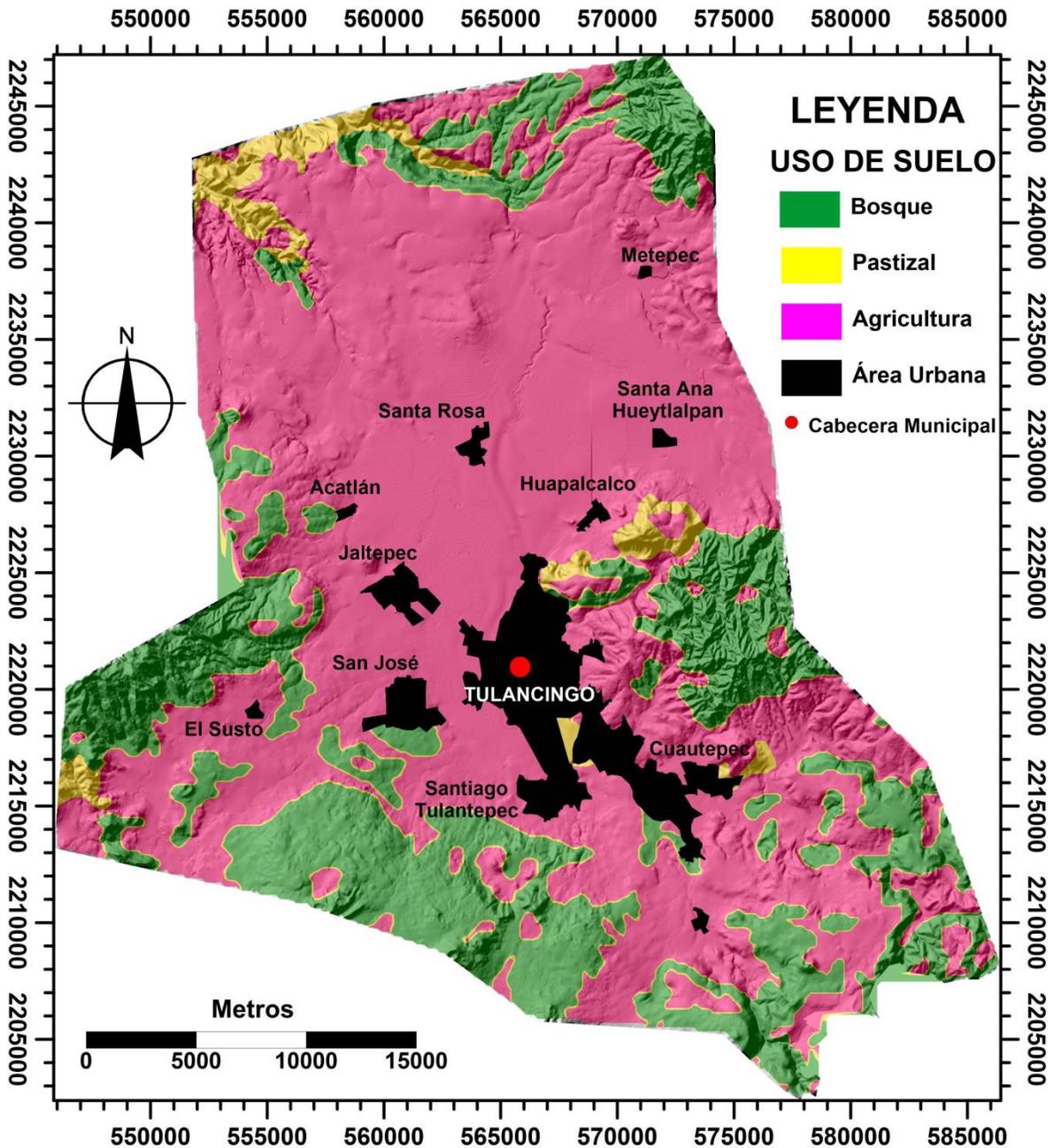


Figura 15. Mapa de uso de suelo

### 5.1.2.2 Precipitación

Es el volumen de agua en determinada área. El mapa de precipitaciones medias anuales se muestra en la figura 16. Se observa que los mayores valores se encuentran en las

zonas montañosas que rodean al valle, especialmente en el NE. La precipitación anual promedio en la zona de estudio, resultó de 752.59 mm/año, y si el área del balance considerado exclusivamente del Valle es de 1061.50 km<sup>2</sup>, esto da como resultado un volumen total precipitado de 798,874, 285 mm<sup>3</sup>/año. La distribución de precipitaciones muestra una variación que va desde 520 mm/año en la zona centro, hasta 1,134 mm/año en la zona noreste del Valle, hacia la zona de descarga.

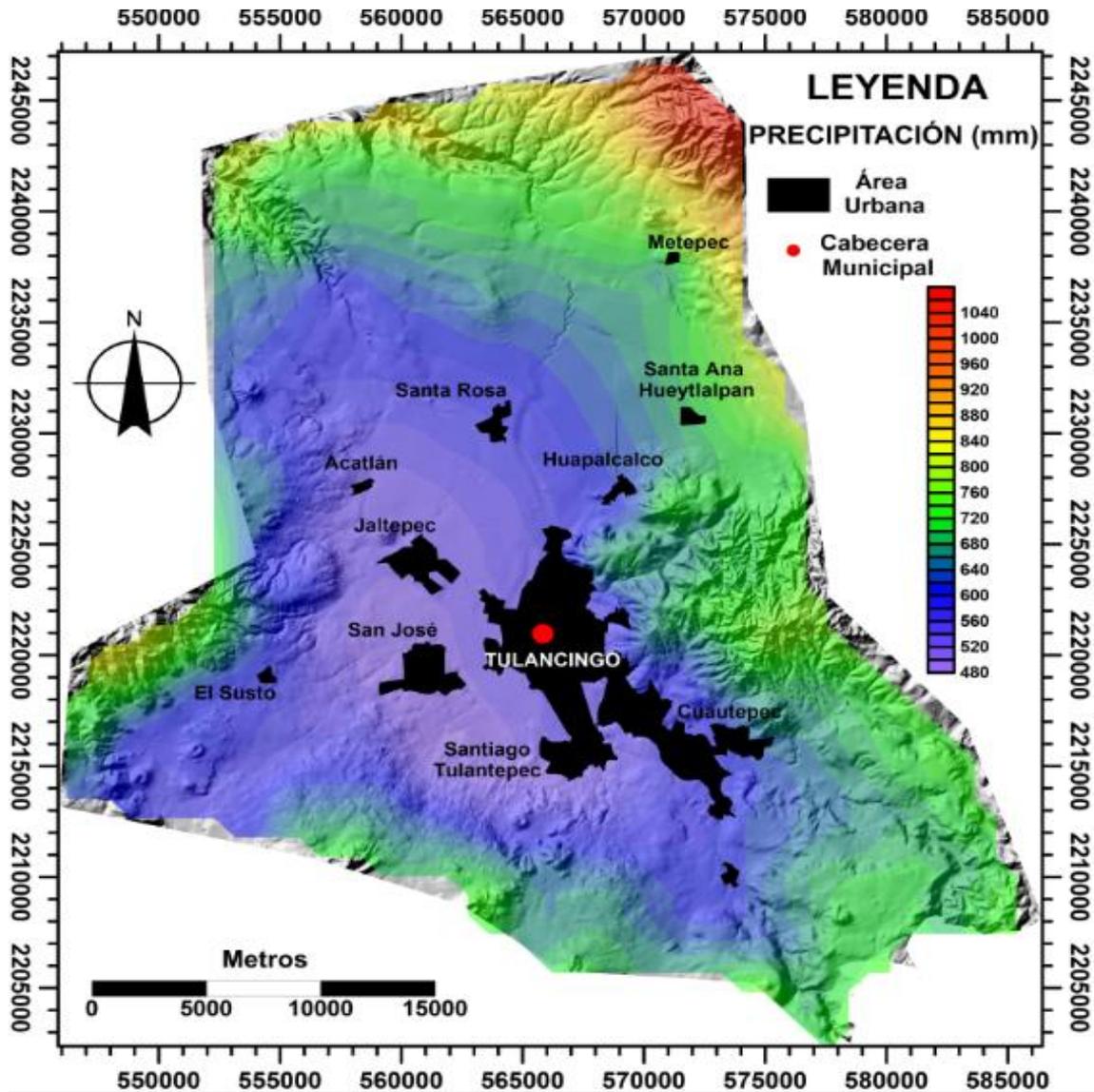


Figura 16. Mapa de precipitación media.

### 5.1.2.3 Evapotranspiración

Es la cantidad de agua extraída de una determinada área por los procesos combinados de evaporación del suelo y la transpiración de las plantas y para poder calcularla se generó el mapa de temperatura (figura 17). Existe una variación gradual en cuanto a temperaturas que va desde 16.5 °C a 14.5°C en las regiones centro y norte.

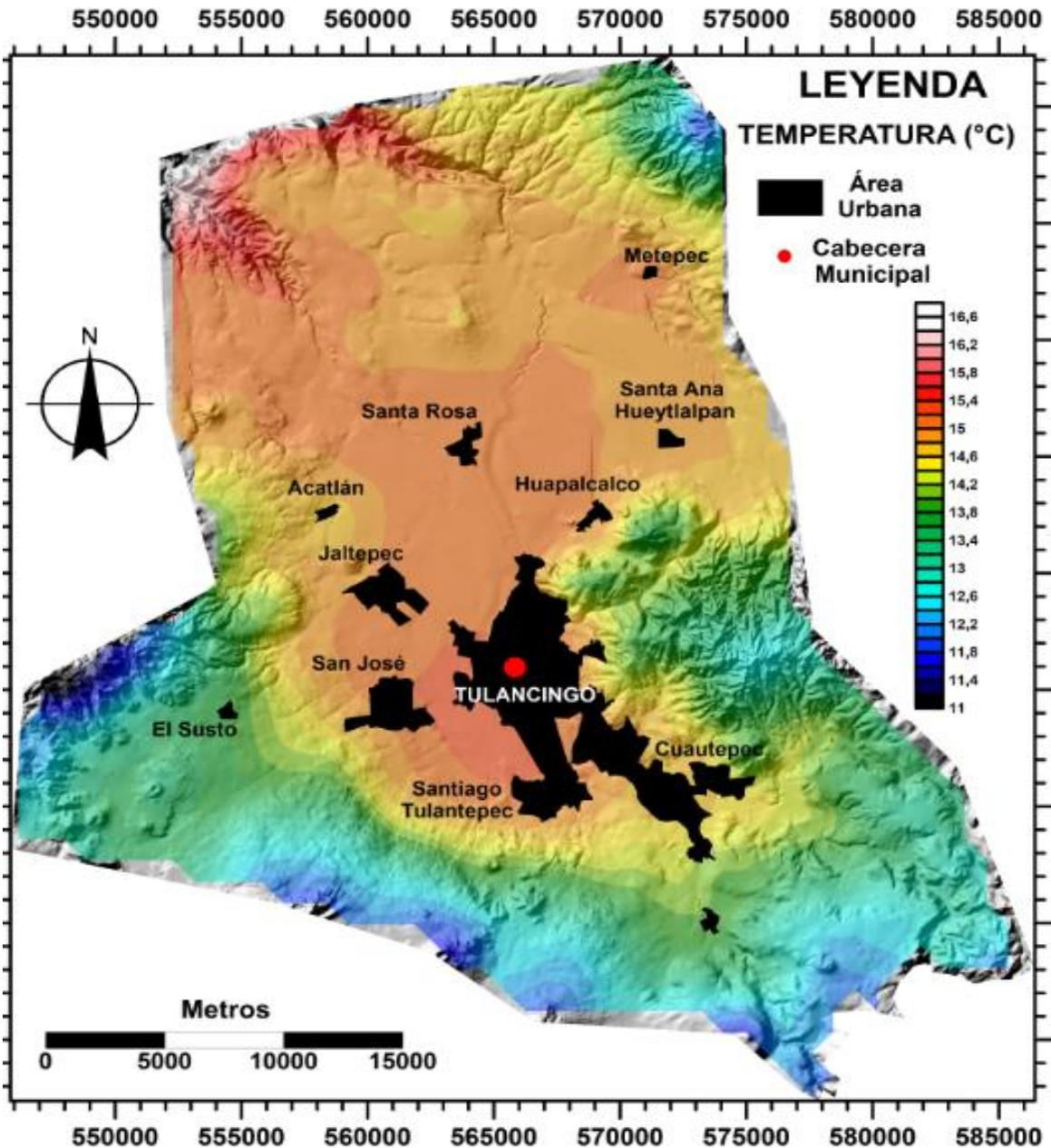


Figura 17. Mapa de temperatura

La distribución de valores del parámetro de Turc se muestra en la figura 18.

El cálculo de evapotranspiración se lleva a cabo mediante la metodología detallada en la sección 4.1.5. De esta manera se generó el mapa de evapotranspiración de la zona, mostrado en la figura 19. Se observa que las zonas con actividad agrícola presentan evapotranspiraciones medias (color verde). Las zonas cercanas a los asentamientos urbanos presentan los valores menores, como es usual.

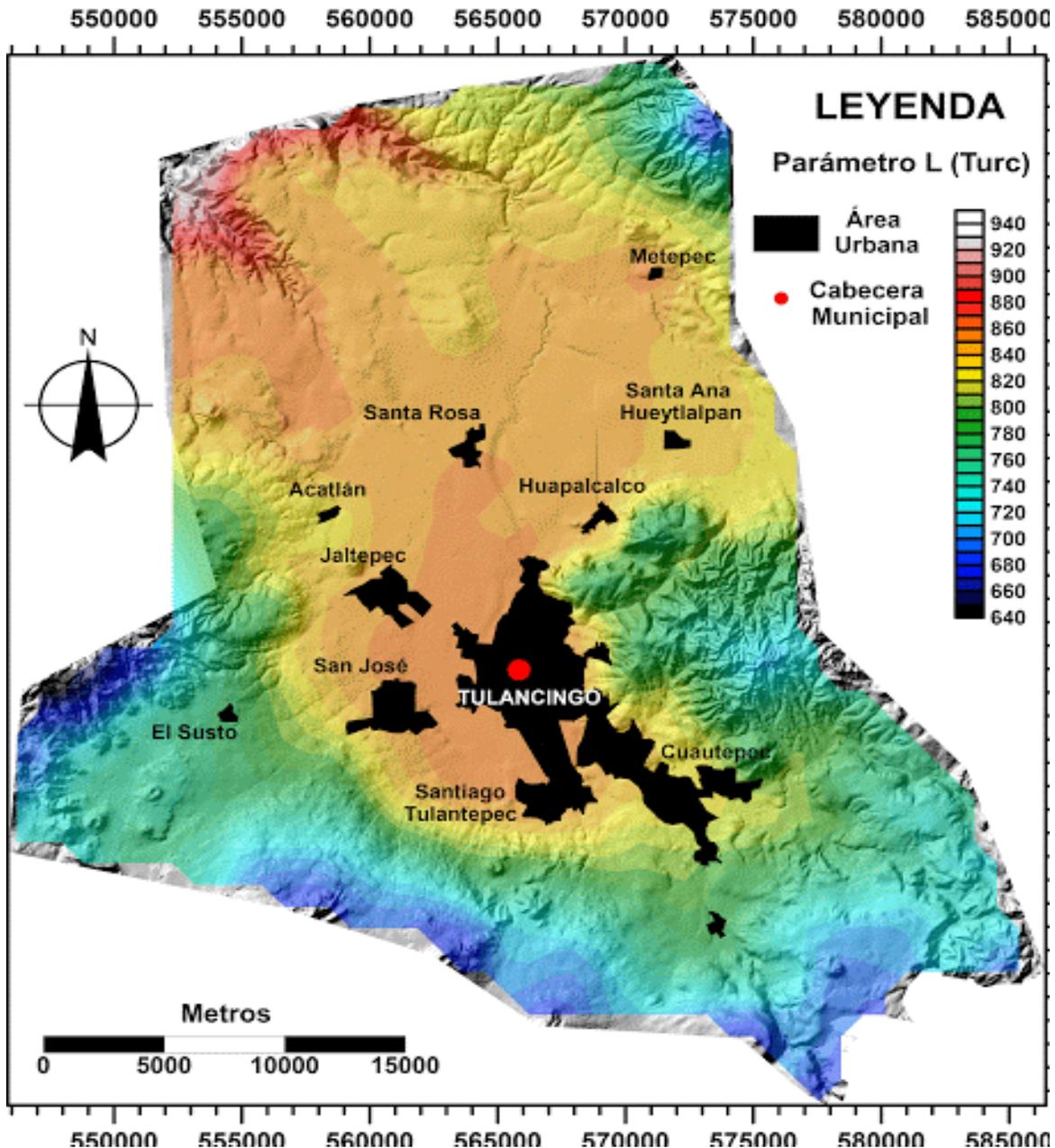


Figura 18. Mapa de parámetro de Turc

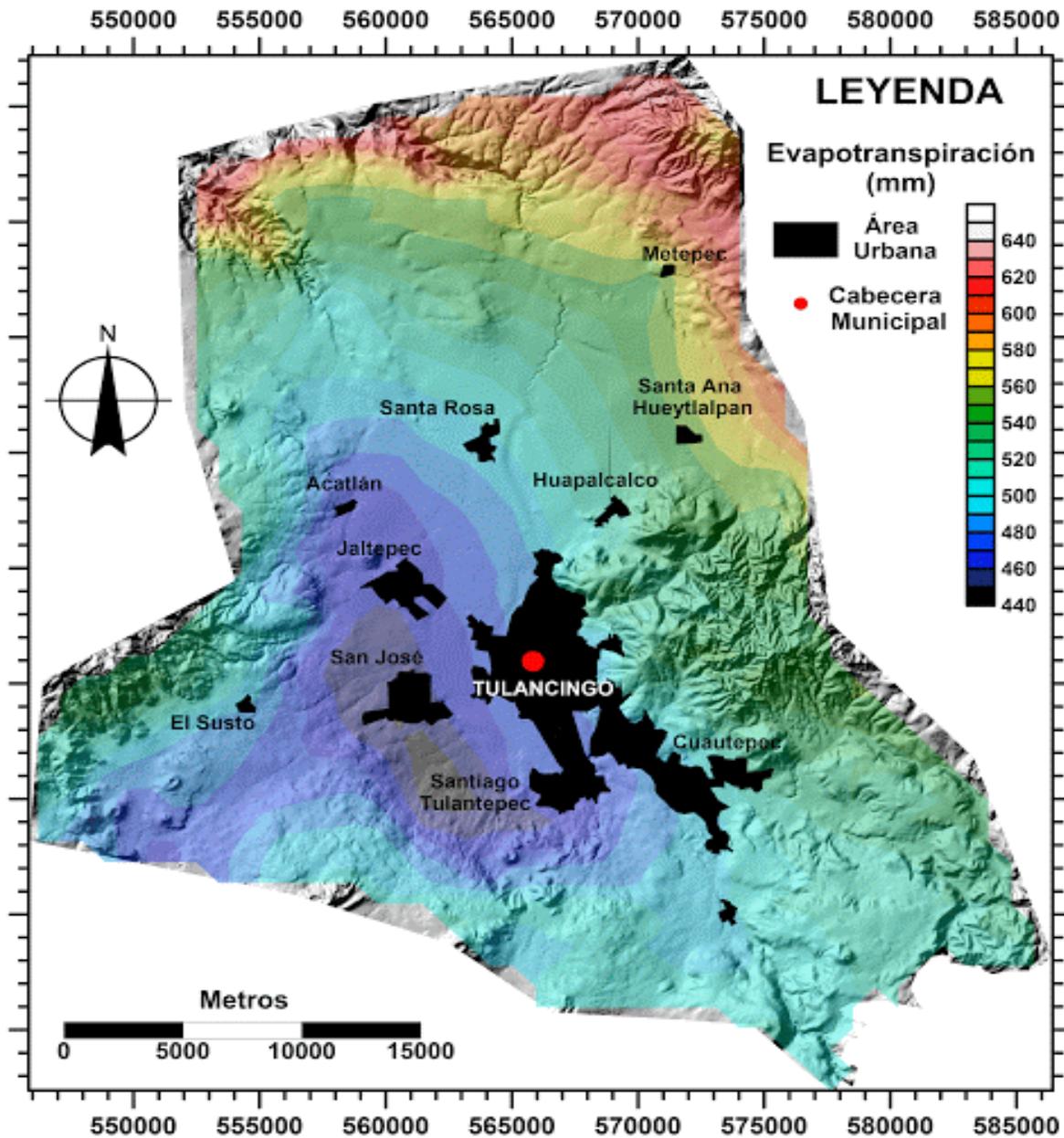


Figura 19. Mapa de evapotranspiración

El mapa de distribución de la evapotranspiración (figura 19) refleja áreas donde una fracción del agua de precipitación se está perdiendo hacia la atmósfera, aunque sean resumideros como es el caso de la zona de Santiago Tulantepec, y la cual se encuentra variando desde 428.60 mm/año en la zona sureste del Valle a 667.12 mm/año en la porción norte del acuífero en los municipios de Metepec y Tenango de Doria. La distribución de este parámetro, se encuentra claramente relacionado con la intensidad de

la precipitación en el Valle, mostrando una mayor pérdida de evapotranspiración en las zonas donde hay mayor precipitación pluvial.

#### **5.1.2.4 Escurrimiento superficial**

Es una relación entre la lámina de agua precipitada en una zona y la cantidad de agua que escurre superficialmente ( $E_s$ ). El escurrimiento superficial se calculó mediante asignar un valor a "k", para obtener el coeficiente de escurrimiento (figura 20), el cual fue identificado para cada estación meteorológica, dependiendo del porcentaje de pendiente (figura 21), textura (figura 23) y uso de suelo (figura 15). Donde se localizan. Se debe de crear además un mapa de pendientes con la herramienta Slope. Posteriormente, ya identificados los tres factores para asignar el valor de k, para poder aplicar la ecuación ( $E_s = P * k$ ), y así obtener los valores de escurrimiento mediante interpolación por Kriging. Este proceso se aplicó tanto a los valores mensuales como anuales.

Se observan los mayores escurrimientos en las zonas montañosas al SO, pero estas zonas no son relevantes debido a que se localizan a la salida de dirección de flujo del acuífero, por lo que las zonas potenciales con mayor escurrimiento superficial se localizan en la periferia de las zonas montañosas al norte del área de estudio. El mapa obtenido se presenta en la figura 20.

Los resultado del escurrimiento medio anual (figura 22) es de  $K=340$  mm/año al centro-sur del acuífero y 240 mm/año hacia el noreste. Se define claramente la dirección de escurrimiento superficial de las zonas más altas a las partes bajas del valle.

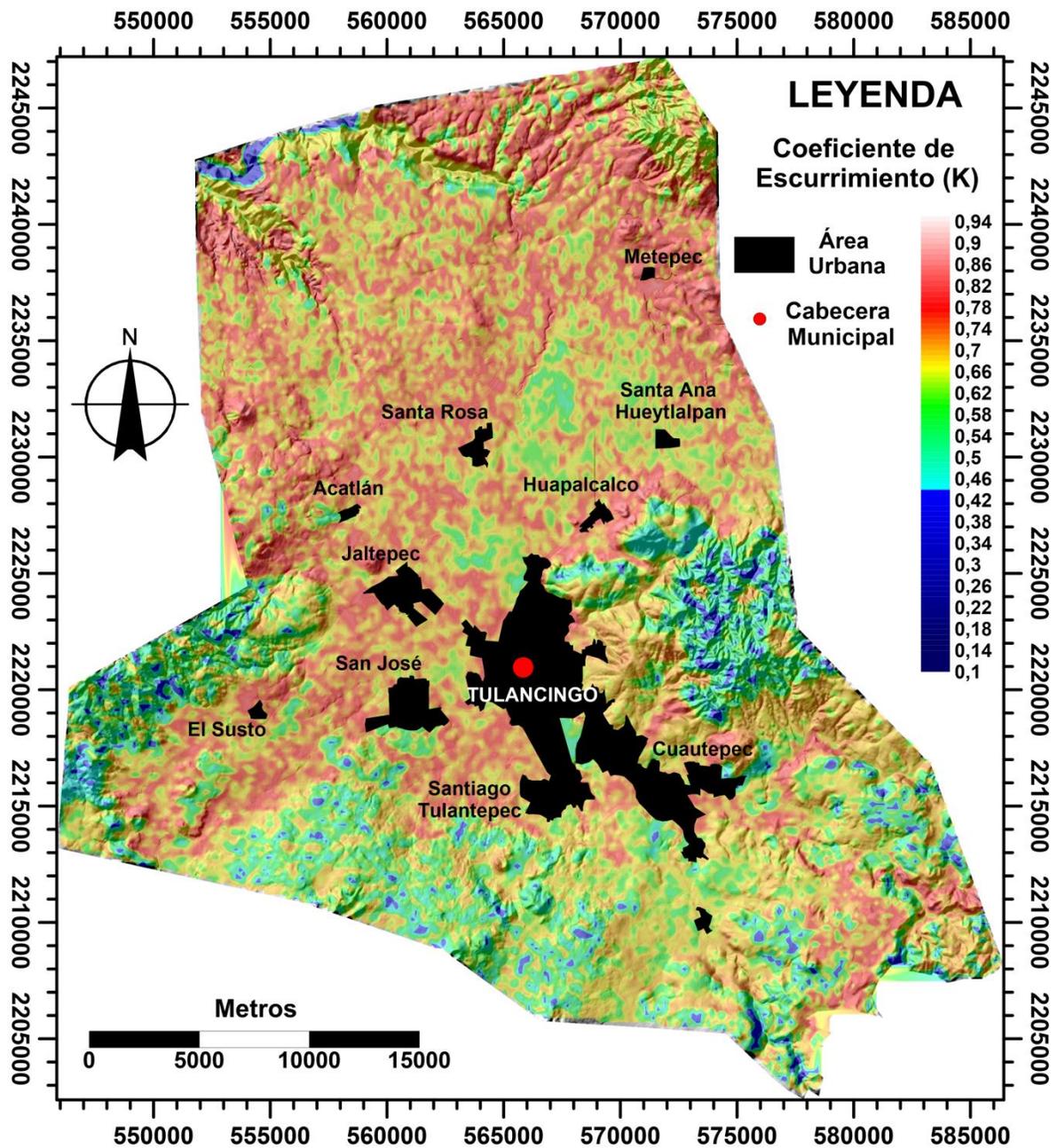


Figura 20 Mapa de coeficiente de escurrimiento (k)



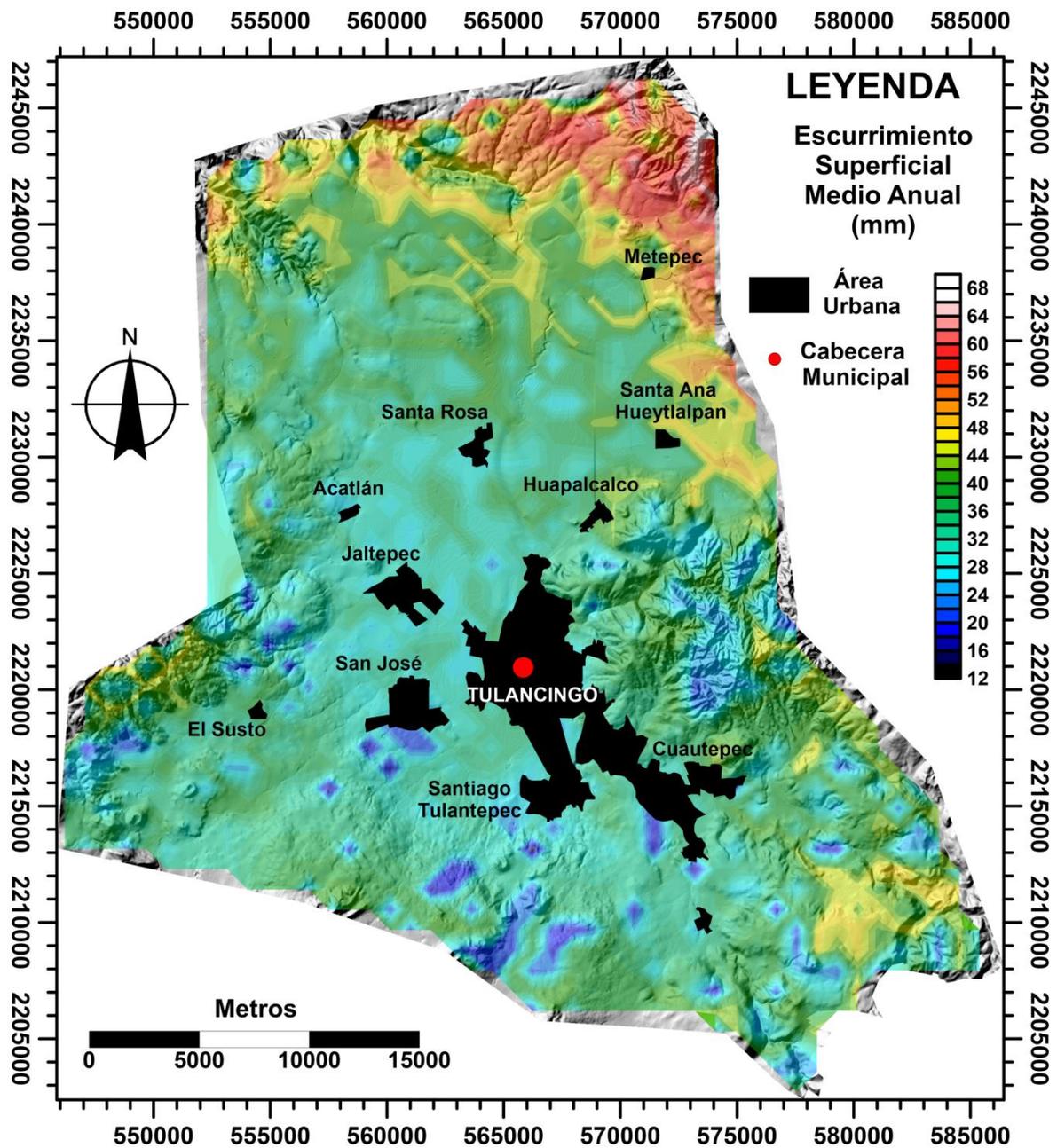


Figura 212. Mapa de escurrimiento superficial

### 5.1.2.5 Textura

El mapa obtenido se presenta en la figura 23. Se observan texturas medianas en la zona norte del valle comprendida por las zonas montañosas y algunas áreas cercanas a las montañas del sur y negativo de donde provienen escurrimientos importantes. Esto facilita la recarga en esas mismas zonas.

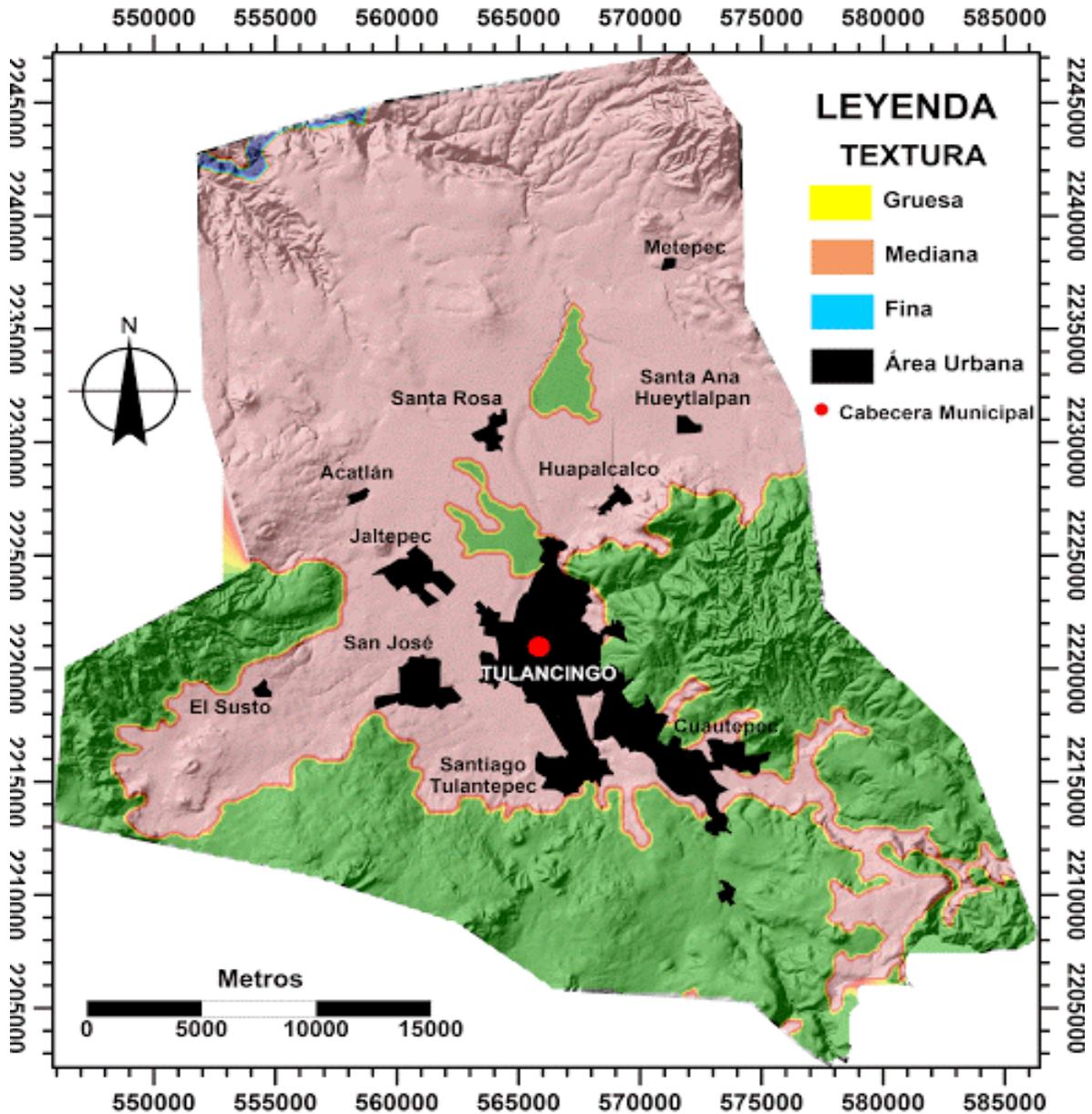


Figura 23. Mapa de textura

### 5.1.2.6 Infiltración

La infiltración se refiere al volumen de agua que se percola a través del suelo. Para este cálculo se utilizaron los mapas descritos en los epígrafes anteriores y se siguió la metodología descrita en 4.1.4. La distribución mayor del volumen de infiltración media anual en el valle se muestra en la figura 24 en color verde ubicadas en las sierras del sur del acuífero, por lo que si en la zona se localizan resumideros se tendría que analizar el poder de infiltración para la recarga del acuífero al inferior de estar formaciones geológicas.

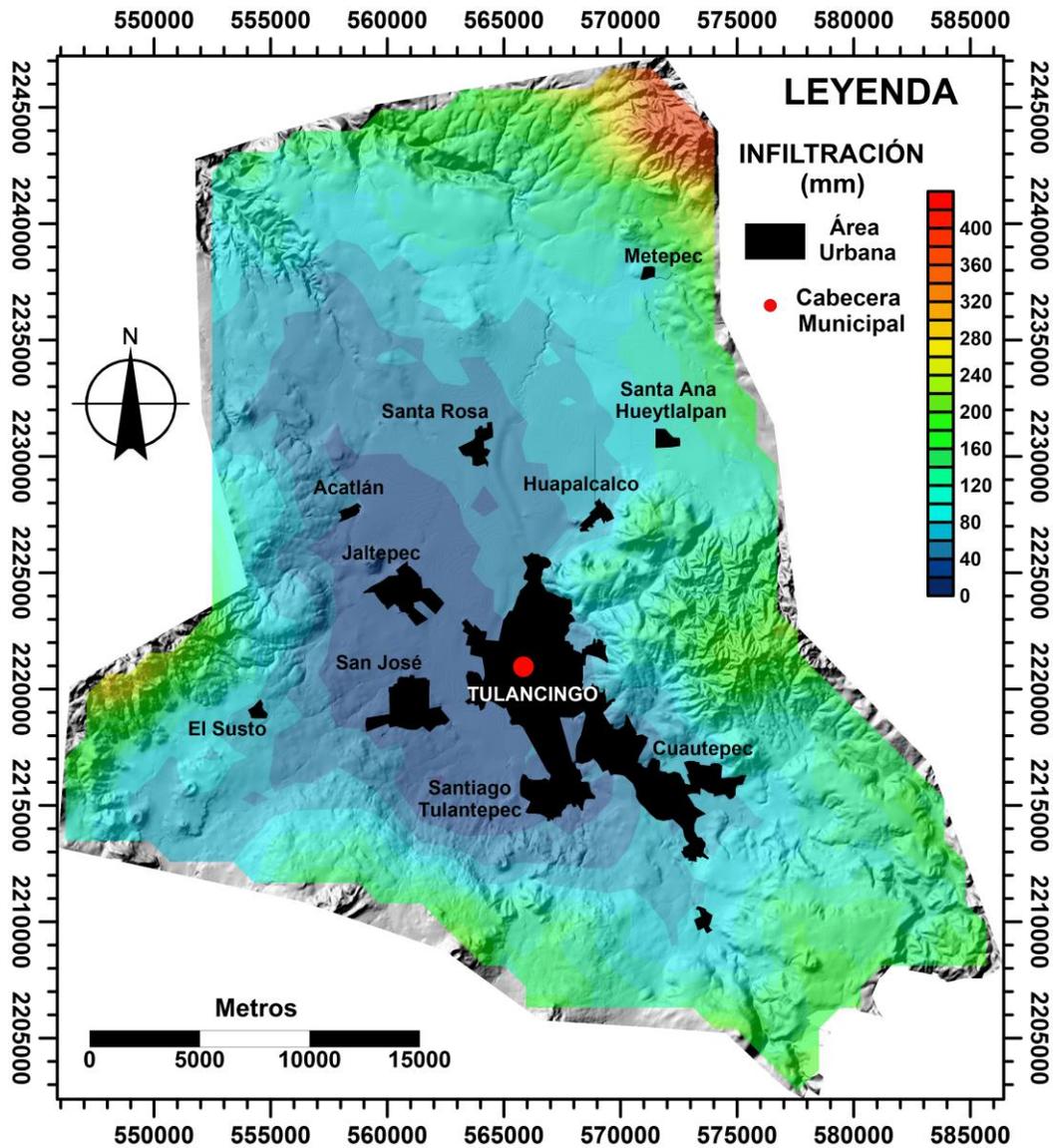


Figura 224. Mapa de infiltración del Acuífero del Valle de Tulancingo

### **5.1.2.7 Potencial de Recarga**

Con el fin de evaluar la variabilidad temporal de las zonas de recarga natural de agua subterránea, fue aplicada para cada mes del año, dando como resultado una serie de mapas de los componentes de balance hídrico para cada caso, determinándose una variabilidad de valores de infiltración y de pérdida de agua. Los meses de junio a octubre son los meses en donde ocurre una mayor infiltración y poca pérdida de agua.

Las zonas del Valle de Tulancingo que representan áreas potenciales de recarga natural de agua subterránea al acuífero, corresponden a las zonas con valores positivos de infiltración, o zonas con menor pérdida de agua de precipitación, sea por escurrimiento superficial o por evapotranspiración.

Las localidades con potencial de recarga son: Cuautepec de Hinojosa, Santiago Tulantepec, Singuilucan y porciones de la Sierra de Tenango de Doria.

La cantidad de precipitación que podría representar recarga al acuífero de manera natural por infiltración corresponde como máximo a 95.40 mm/año, y el cual representa un volumen de 143,760,546 m<sup>3</sup>/año, este valor se obtiene de la multiplicación del volumen de precipitación por el área del acuífero, lo cual representa un 14.3% del total de la precipitación media anual del Valle (figura 25).

Con estos cálculos obtenidos se puede crear posteriormente el mapa de recarga hidrológica del acuífero el cual debe de contar con información actualizadas de las salidas de agua que ocurren (niveles pizométricos, pruebas de bombeo, etc.), y recalcar que los datos finales obtenidos siempre dependerá de la calidad y validez de la información

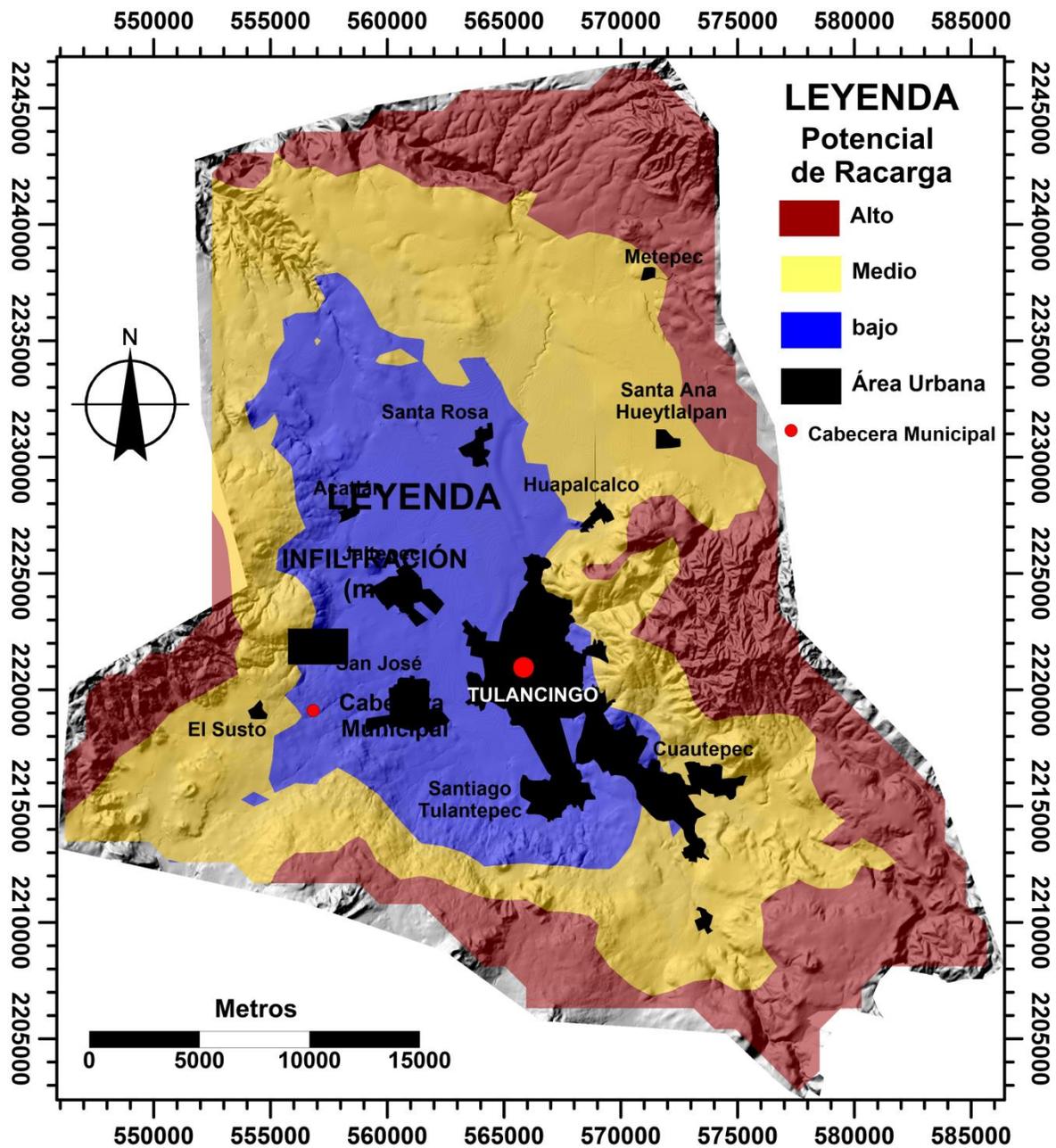


Figura 235. Mapa de recarga del Acuífero del Valle de Tulancingo

## 5.2. Caracterización hidrogeoquímica

Se obtuvo un promedio de los datos hidrogeoquímicos debido a que no hay cambios significativos en algún parámetro de 2006, 2013 y 2014 para construir gráficas, además de que ningún valor sobre pasa la norma. Los parámetros físicos medidos en campo se graficaron de la siguiente manera (figura 26):

Temperatura: Por lo tanto, sirve como indicativo de distintos procesos químicos que puedan ocurrir dentro del sistema. Para el sistema acuífero del Valle de Tulancingo éste parámetro varía entre los 11 a 27 °C como máximo.

pH: En general los valores de pH dentro de un acuífero varían entre 6 y 8.

Alcalinidad: Los valores de alcalinidad en el acuífero del Valle de Tulancingo se localizan entre los 50 a 250 mgCaCO<sub>3</sub>/L.

Conductividad eléctrica: En el sistema Acuífero del Valle de Tulancingo los valores oscilan entre 100-700 µS/cm.

Sólidos totales disueltos: Está relacionada con la conductividad eléctrica mediante la fórmula  $TDS = C.E. (mmhos/cm) \times 700$  y se mide en ppm. Dentro del Acuífero del Valle de Tulancingo los sólidos totales disueltos se encuentran por debajo del límite permisible de la norma 127, menos de 500 ppm en todas las muestras.

Al realizar el análisis espacial de los parámetros físicos a lo largo de una recta virtual de referencia (figura 9) con un transecto de 40 km de A<sup>1</sup>- A, se puede interpretar cómo se están comportando conforme a la distancia e identificar algunos de los procesos que se llevan a cabo dentro del acuífero, como zonas de recarga y descarga. Se observa el incremento de sólidos totales disueltos conforme a la distancia en dirección S-N, por lo que si nuestra dirección de flujo lleva esa misma trayectoria esta bien representado mediante ese parámetro, debido a que conforme aumenta la distancia aumenta el incremento de minerales, sales, aniones y cationes por el contacto con la roca durante mayor tiempo y la mezcla de aguas que comienza a haber al centro del acuífero, por lo que se concluye que las zonas de recarga se localizan al sureste y suroeste del acuífero y la zona de descarga al norte.

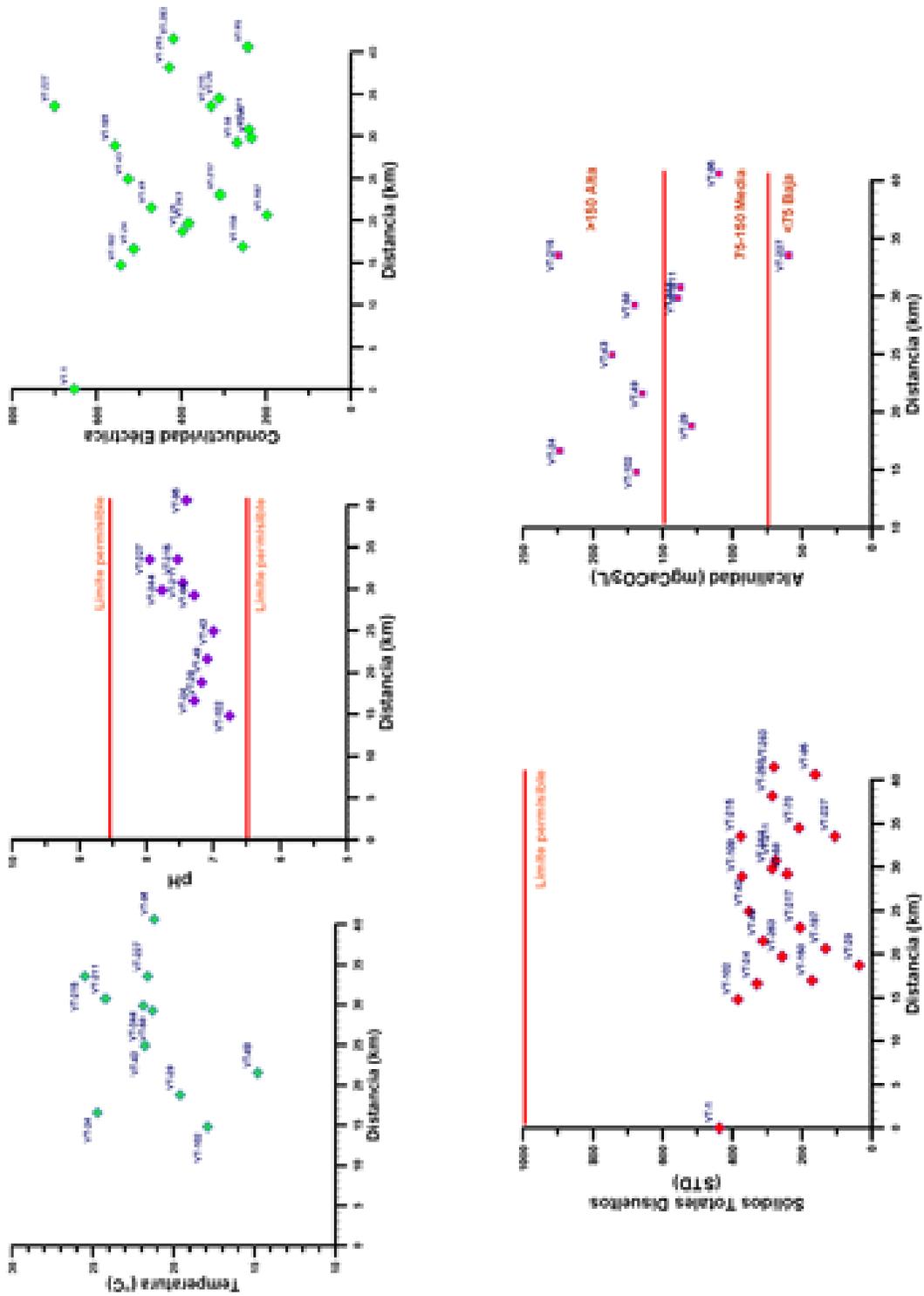


Figura 246. Gráficas de parámetros físicos vs distancia a la recta virtual S-N.

### 5.2.1. Cationes Mayoritarios

Se realizó la gráfica de calcio, magnesio, sodio y potasio en mg/L para observar el comportamiento de sus concentraciones en el acuífero (figura 27). Ninguno de los cationes sobrepasa los límites permisibles de la NOM-127. Calcio y sodio presentan enriquecimiento conforme aumenta la distancia, mientras que magnesio y potasio presentan concentraciones bajas presentando cierta estabilidad menor a 20 mg/L.

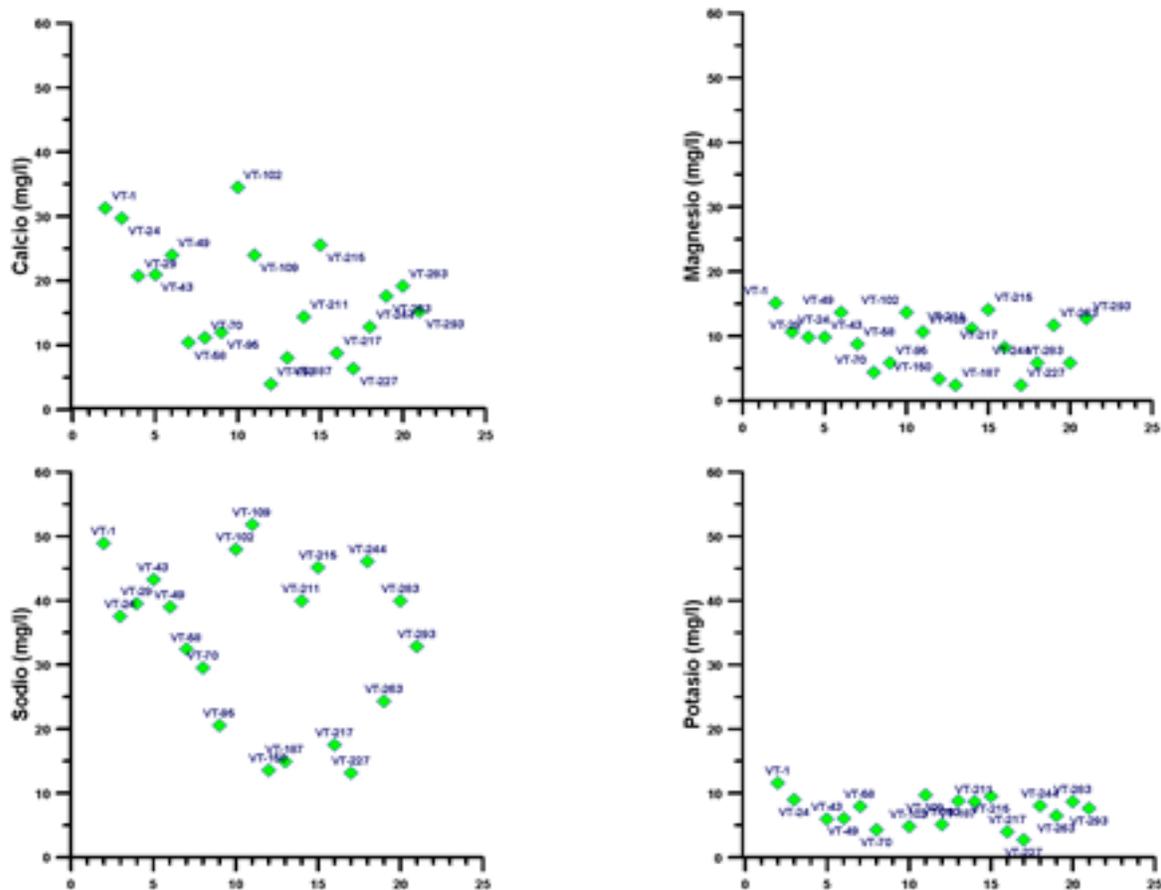


Figura 257. Gráficas de concentraciones de cationes mayoritarios vs distancia (km) a la recta virtual N-S.

### 5.2.2. Aniones Mayoritarios

Los aniones mayoritarios que se analizaron fueron: bicarbonatos, cloruro, sulfato, fosfatos, nitratos y nitritos.

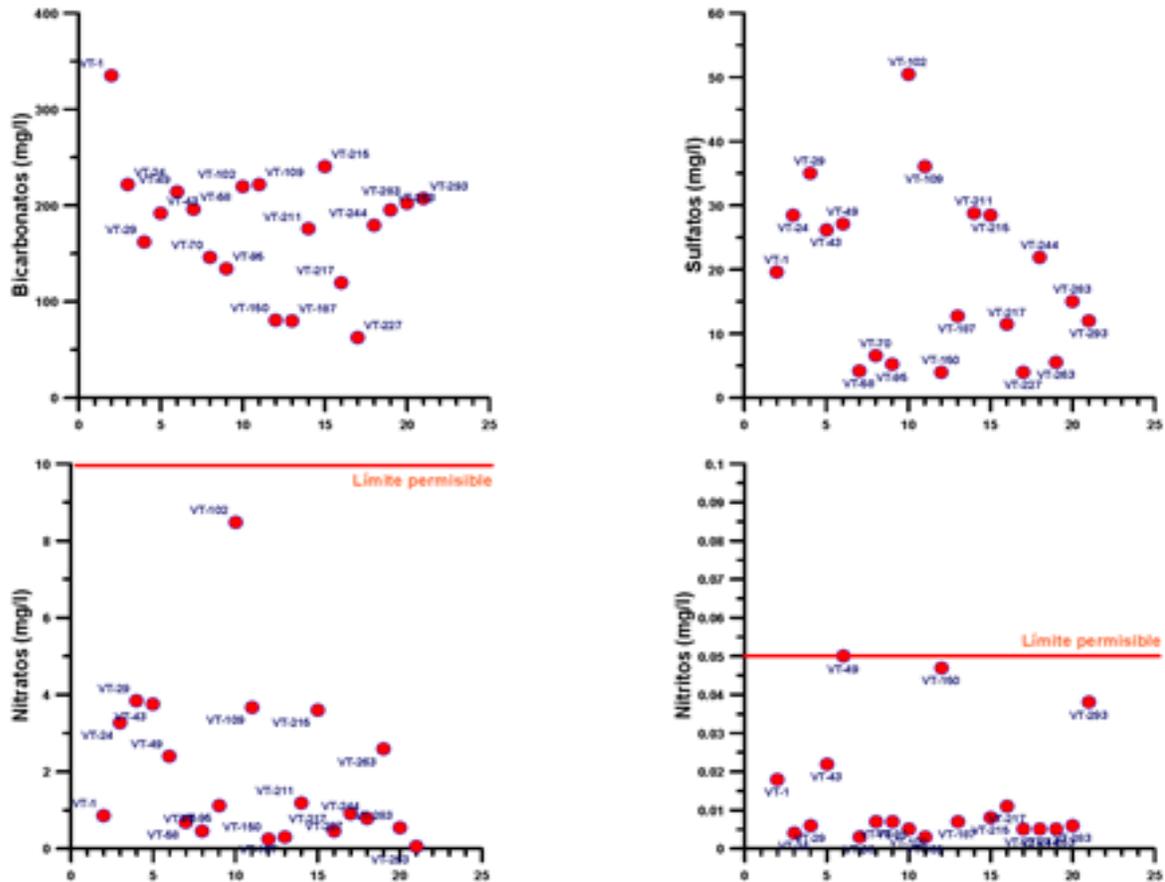


Figura 268. Gráficas de concentraciones de aniones mayoritarios vs distancia (km) a la recta virtual.

En la figura 28 se observan las concentraciones de bicarbonatos, sulfatos, nitritos y nitratos. Ninguno de los parámetros analizados sobrepasa el límites de la NOM-127, solo 3 puntos de nitritos se localizan muy cercanos al límite permisible, pero esos puntos no presentan ni alto contenido en sólidos totales disueltos ni valores alto de nitratos, por lo que se volvieron a muestrear esos 3 puntos para verificar si el resultado es verdadero o hubo algún error al momento del muestreo o del análisis, cuando se tengan estos resultados nuevamente si siguen saliendo las mismas concentraciones ya se buscará darles la explicación correcta a su alto valor.

### 5.2.3. Procesos Hidrogeoquímicos

Para la identificación de miembros terminales se realizaron diversos diagramas de dispersión de sólidos totales disueltos contra aniones y cationes (figura 29), ya que esta variable maestra controla e influye en un sinnúmero de procesos hidrogeoquímicos. Se observan miembros terminales que forman triangulaciones en la mayoría de las gráficas, los pozos que forman estas triangulaciones son el VT-1, VT-29 y VT-227. La muestra VT-1 se localiza al sureste del acuífero en donde comienza la zona de recarga, el punto VT-29 se localiza al suroeste del acuífero y el pozo VT-227 se localiza al noreste, en la zona de descarga del acuífero. Esto nos quiere decir que las características del agua subterránea del acuífero están bien definidas por las concentraciones de iones y sólidos totales disueltos, ya que a mayor trayectoria de dirección de flujo es mayor concentración.

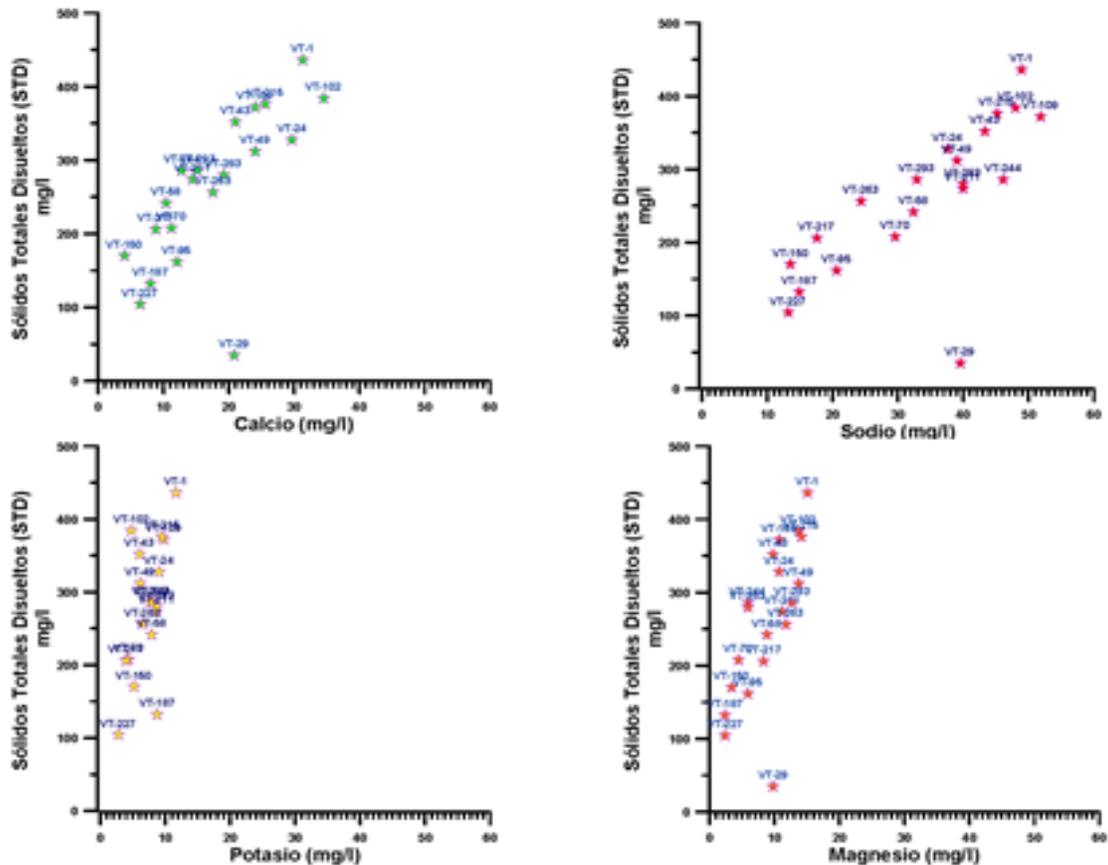


Figura 279. Gráficas de sólidos totales disueltos vs concentración de cationes mayoritarios.

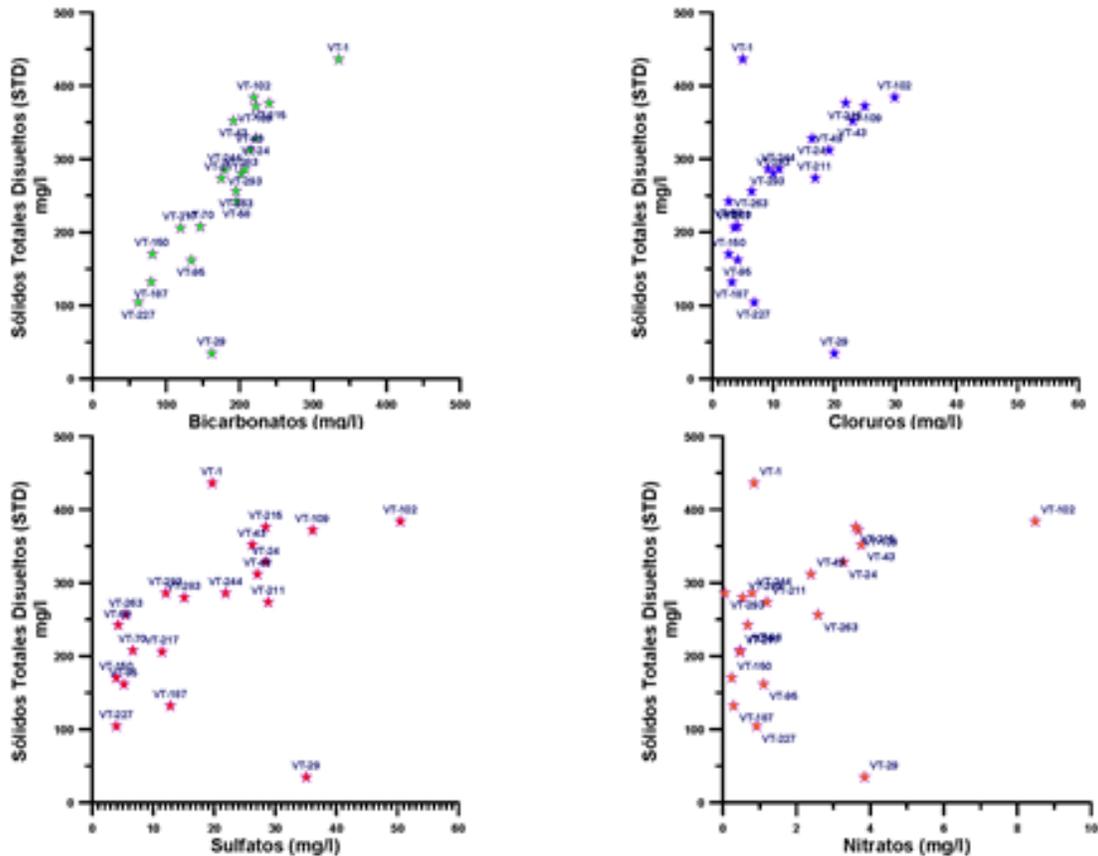


Figura 30. Gráficas de sólidos totales disueltos vs concentración de aniones mayoritarios.

#### 5.2.4. Análisis de datos hidrogeoquímicos

Las aguas subterráneas tienden a evolucionar hacia la composición del agua de mar según la secuencia de Chebotarev, por ejemplo un agua joven de reciente infiltración presentaría la siguiente secuencia:  $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+$  y  $\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^-$ , y en el caso de un agua la cual ya tiene un largo tiempo de residencia la secuencia tiende a invertirse:  $\text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^-$ .

Comúnmente, los datos de campo y laboratorio se interpretan con la ayuda de diagramas de dispersión y diagramas Piper y Schoreller.

Diagrama de Piper: Este diagrama permite representar la composición química del agua y comparar muestras así como agrupar las aguas por familias hidrogeoquímicas y establecer relaciones entre ellas. Las muestras del acuífero se representan en el diagrama de la figura 30.

**Familias de agua del Acuífero Inferior del Valle Tulancingo**

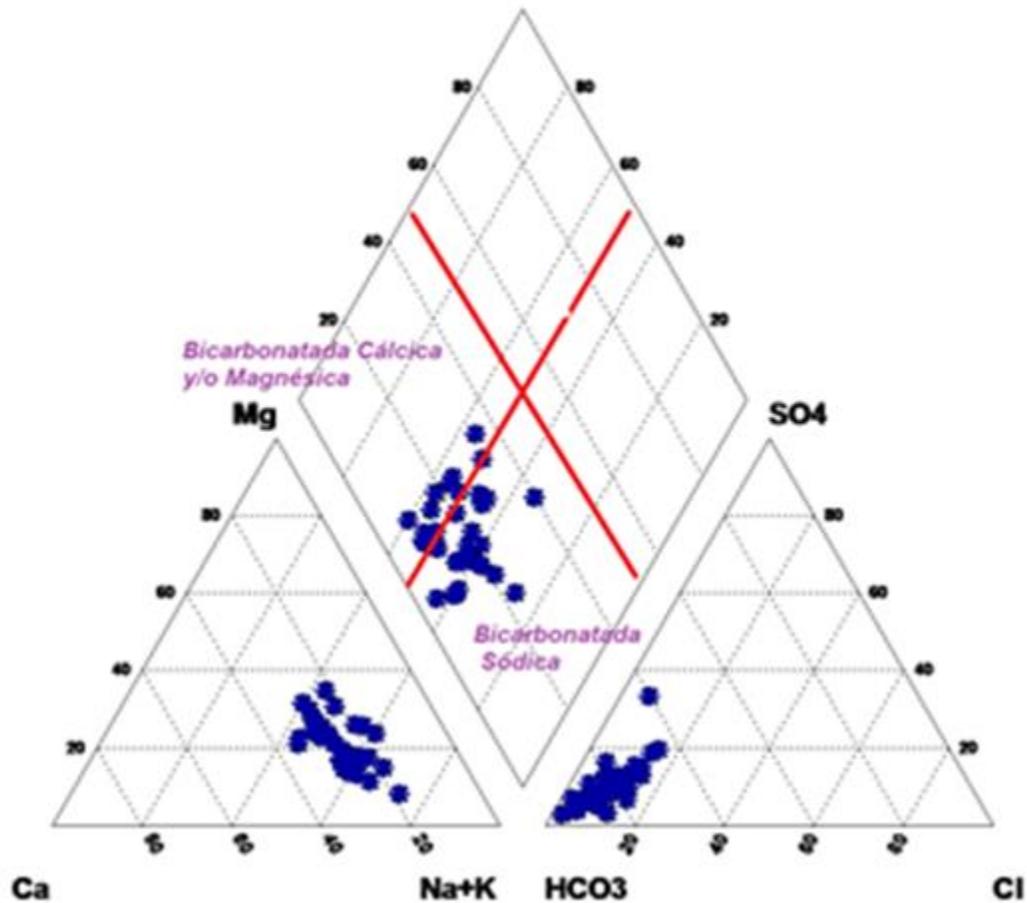


Figura 31. Representación de las muestras de agua en el diagrama de Piper.

En la figura 29 se observan 2 familias de agua: bicarbonatada sódica y bicarbonatada magnésica, estas familias son características de aguas subterráneas las cuales su entorno geológico se localiza dentro de basaltos y rocas de origen ígneo

Diagrama de Schoeller: Es un eje cartesiano semicuantitativo donde se representan los iones ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ) y la concentración de cada uno de ellos. Este tipo de diagramas permite visualizar rápida y fácilmente máximos y mínimos de uno u otro ion. Las muestras de agua del acuífero se presentan en la figura 31.

## Diagrama de Schoeller

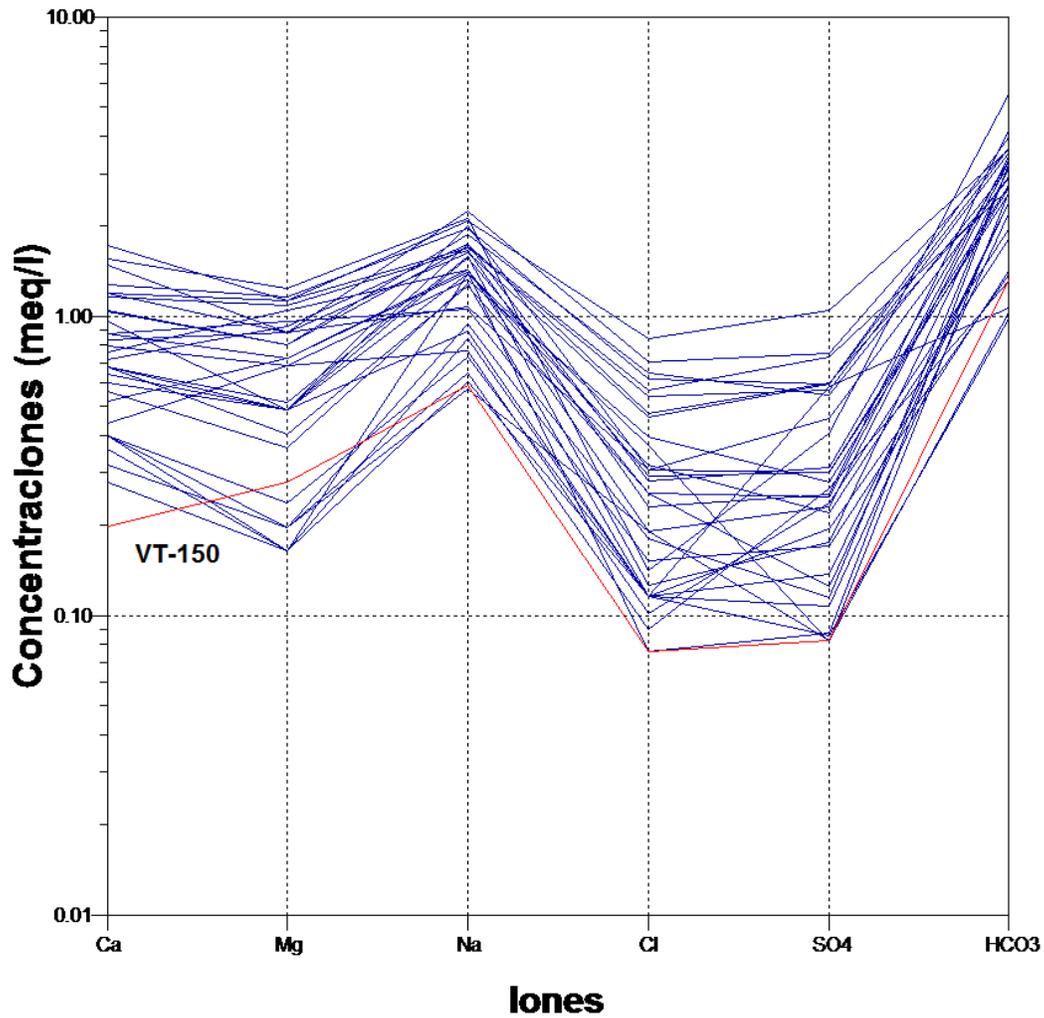


Figura 328. Diagrama de Schoeller.

La configuración de cada mapa se realizó en el programa Surfer Golden, creando 10 mapas de concentraciones de cationes ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{K}^+$ ) y aniones ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{F}^-$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$  y  $\text{NO}_3^-$ ) mayoritarios en mg/l, para observar su distribución espacial en el acuífero.

### 5.2.5. Métodos de interpolación

Se analizaron cada uno de los métodos de interpolación del software ARCGis versión 10.1, para verificar cuál es el que mejor representa los datos reales de campo (figura 32 a 40). Los datos que se analizaron mediante los diferentes métodos de interpolación fueron los de sólidos totales disueltos para éste análisis.

El método más utilizado es Kriging, ya tiene una amplia variedad de aplicaciones y por ello una gran cantidad de compañías diferentes lo utiliza para realizar modelaciones, como son los mapas de líneas de isoconcentraciones, entre otros.

#### Método IDW

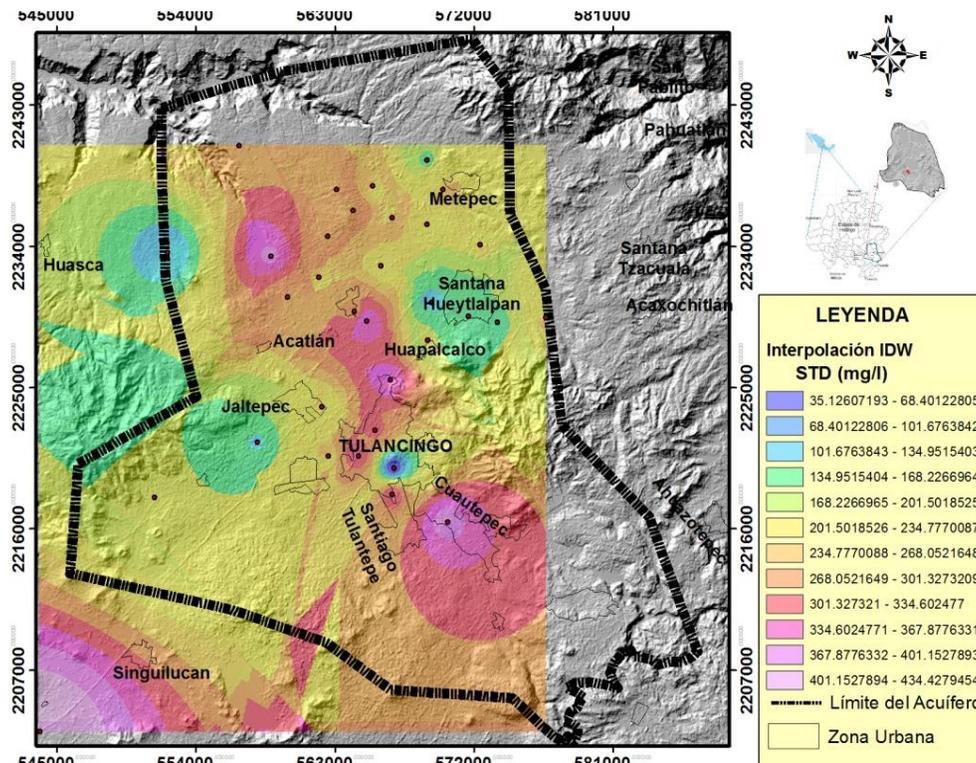


Figura 33. Interpolación de datos de STD mediante el método IDW

Kriging circular:

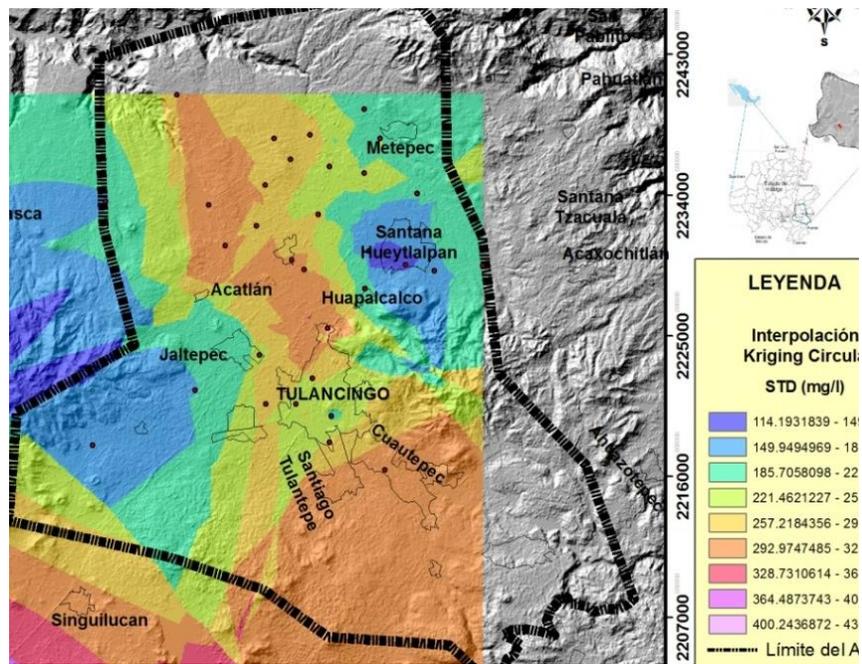


Figura 34. Interpolación realizada mediante el método Kriging

Kriging exponencial:

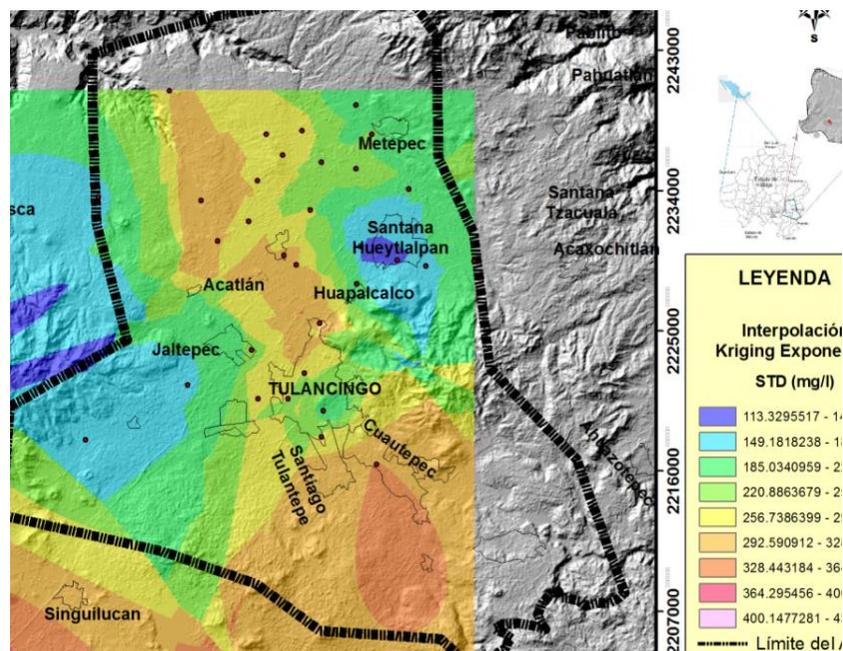


Figura 35. Interpolación realizada mediante el método Kriging exponencial

Kriging gaussiano:

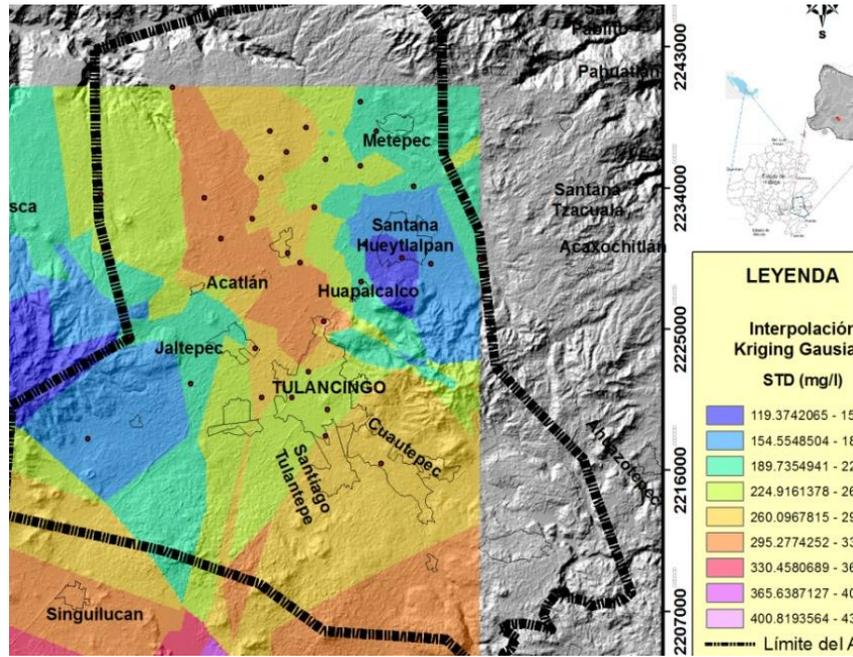


Figura 296. Interpolación realizada mediante el método Kriging gaussiano

Kriging lineal:

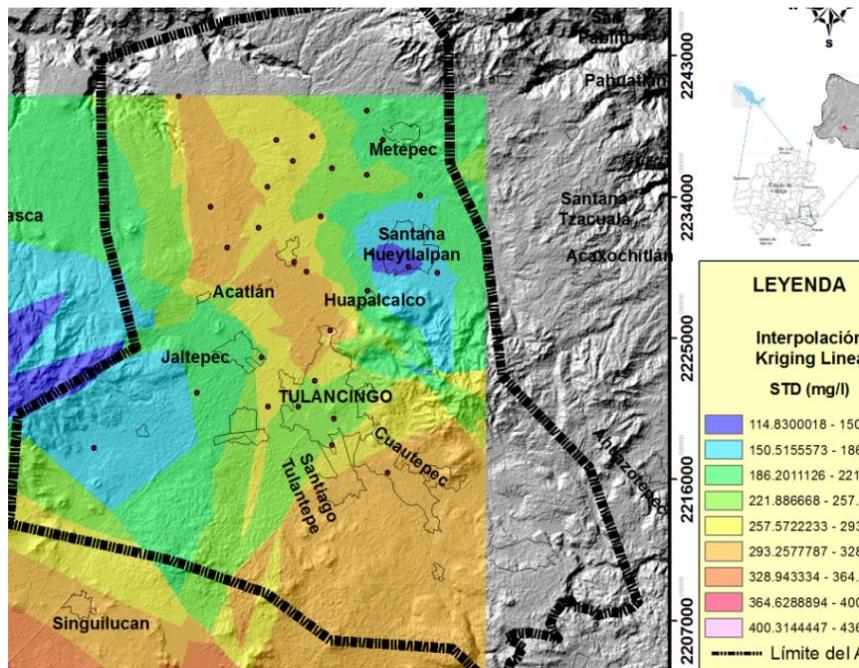


Figura 307. Interpolación realizada mediante el método Kriging lineal

Kriging esférico:

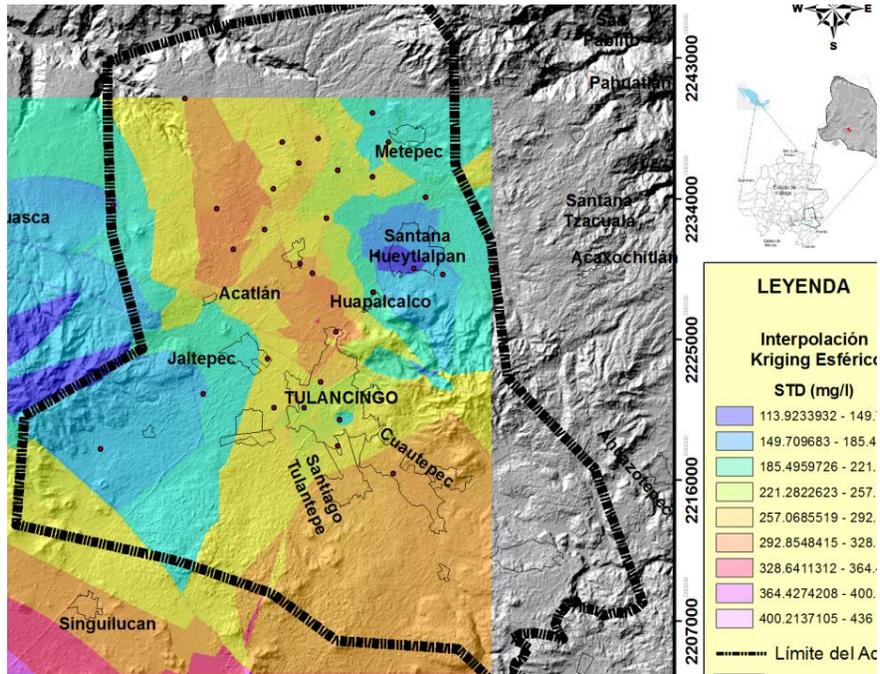


Figura 318. Interpolación realizada mediante el método Kriging esférico

Vecino Natural:

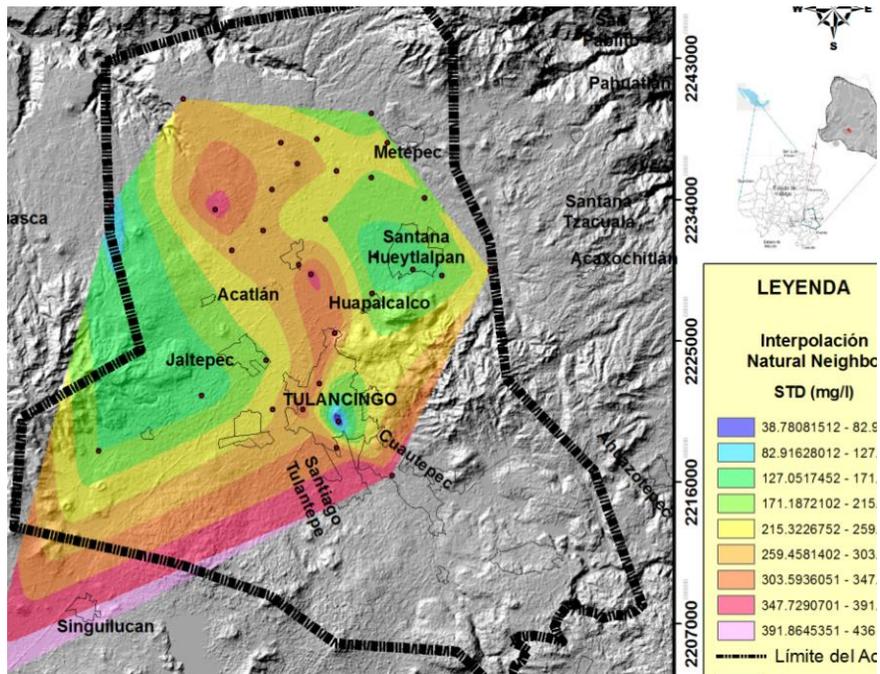


Figura 329. Interpolación realizada mediante el método vecino natural

Spline estándar o regular:

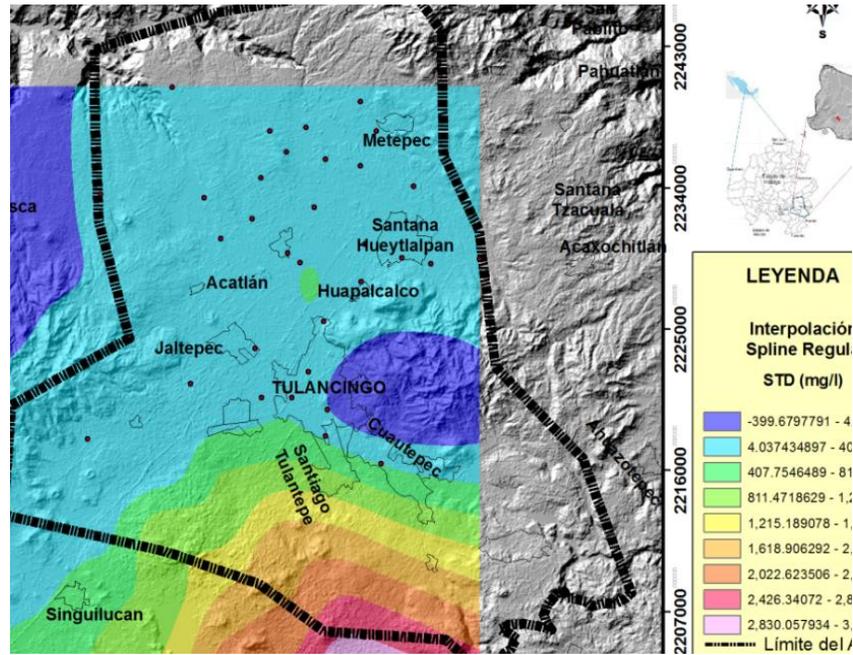


Figura 40. Interpolación realizada mediante el método spline regular

Spline de tensión:

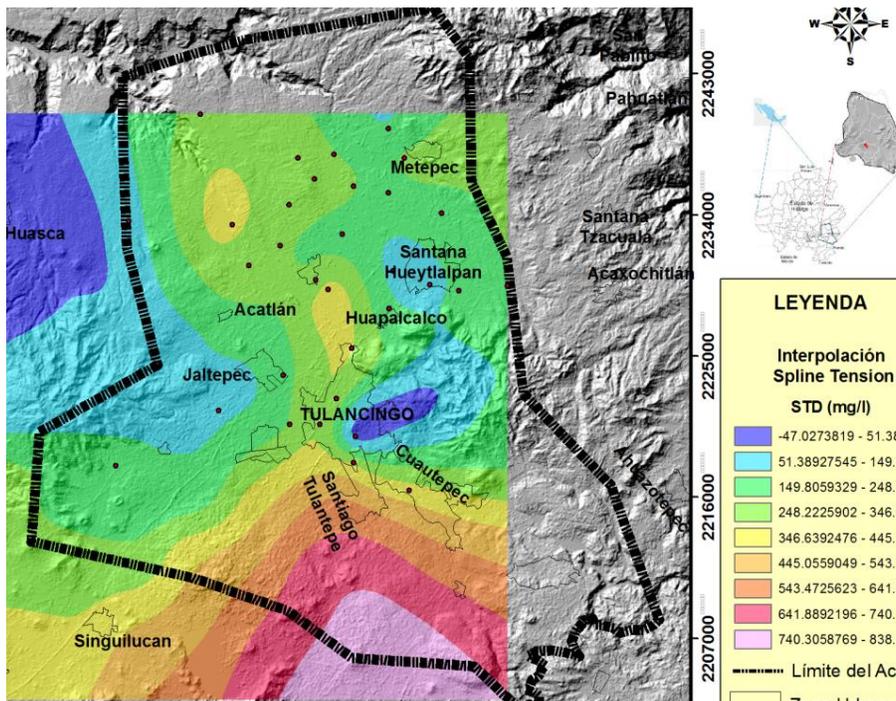


Figura 41. Interpolación realizada mediante el método spline de tensión

De los diferentes métodos de iteraciones que se realizaron, los más adecuados para representar la información obtenida en campo es el de spline estándar y spline de tensión, los cuales como se observa en la figura 41 se adaptan mejor a la recta de los datos reales de campo.

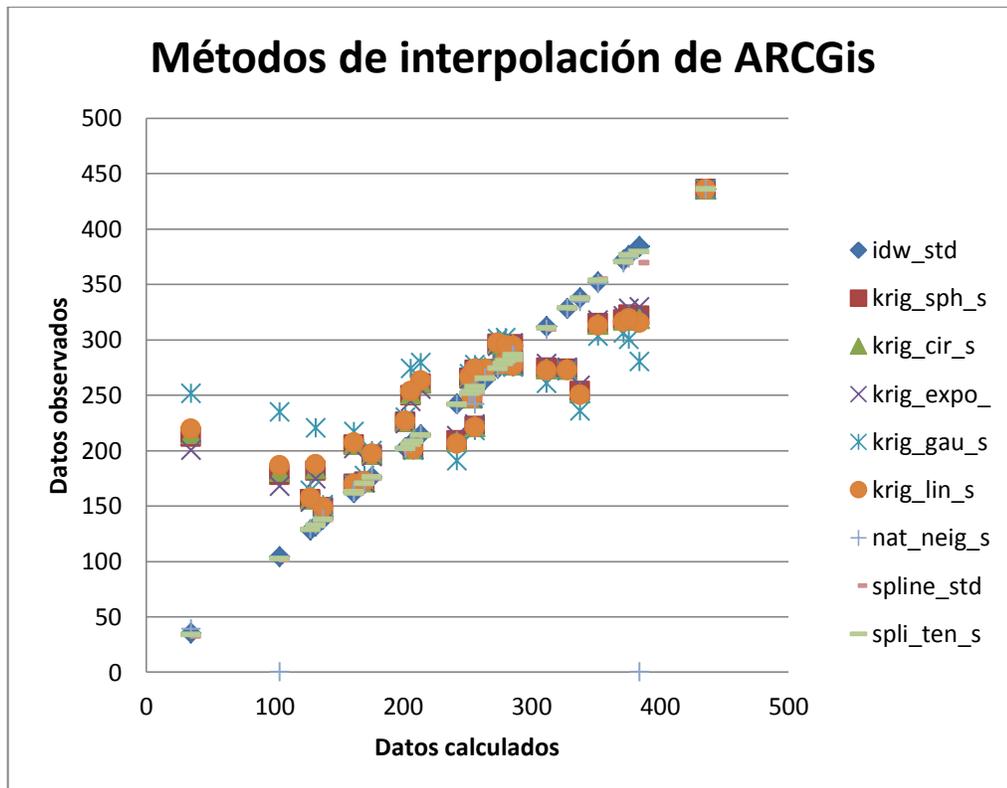


Figura 332. Gráfica de correlación entre datos calculados y reales utilizando los distintos métodos de interpolación del software ARCGis 10.1

De los dos métodos de interpolación el que presenta menor grado de error es el de spline de tensión como se muestra en la figura 42, ya que obtuvo el mejor coeficiente de correlación lineal y cuya pendiente es más cercana a 1. Ver Figura 41. Por ese motivo los mapas correspondientes de isoconcentraciones se procesaron mediante esta técnica.

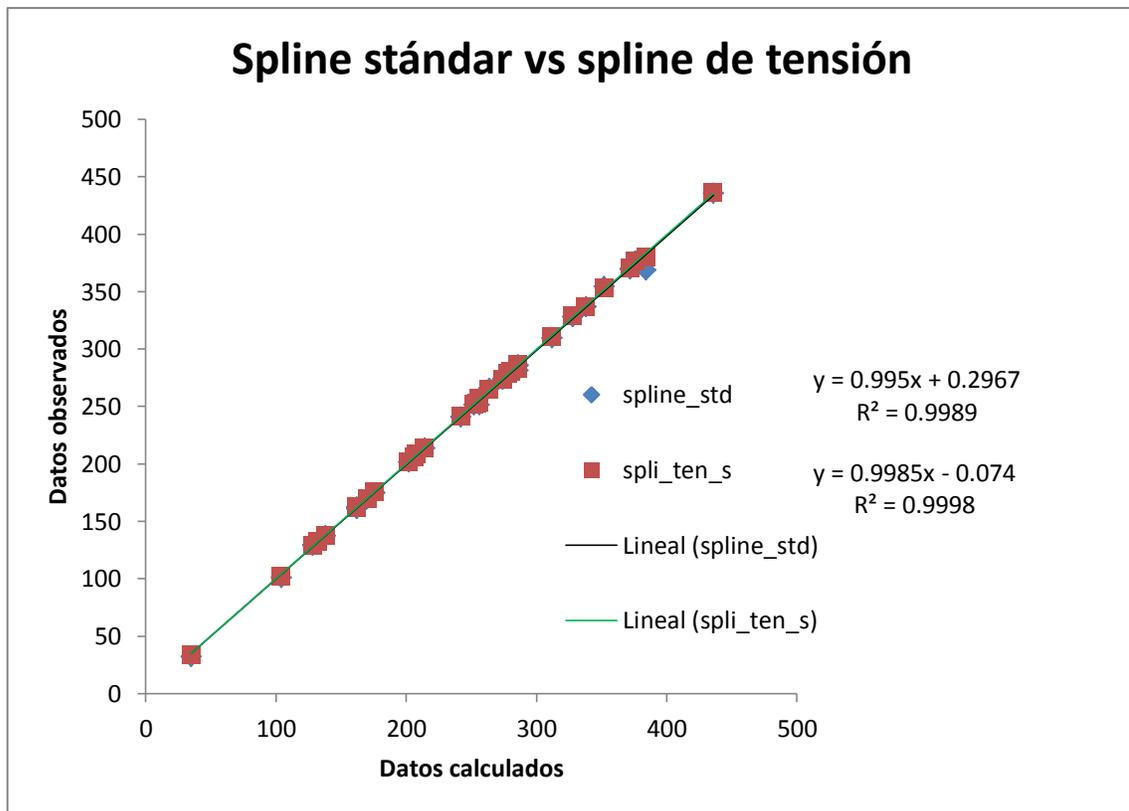


Figura 43. Grado de error de los métodos de interpolación spline estándar y spline de tensión.

### 5.2.6. Mapas de líneas de isoconcentraciones de iones

Se generaron mapas con todos los promedios de aniones y cationes mayoritarios. En la figura 43 se observa una zona de anomalía en el municipio de Acatlán para la concentración de  $\text{Ca}^{2+}$ , lo mismo ocurre con  $\text{Mg}^{2+}$ . El municipio de Cuauhtepic presenta valores altos en estas concentraciones por lo que sería importante solicitar información de la región para configurar mejor los mapas de isoconcentraciones y analizar si existe un problema de contaminación y tomar medidas de precaución para la zona centro de Tulancingo debido a las direcciones de flujo, que son de Sur a Norte.

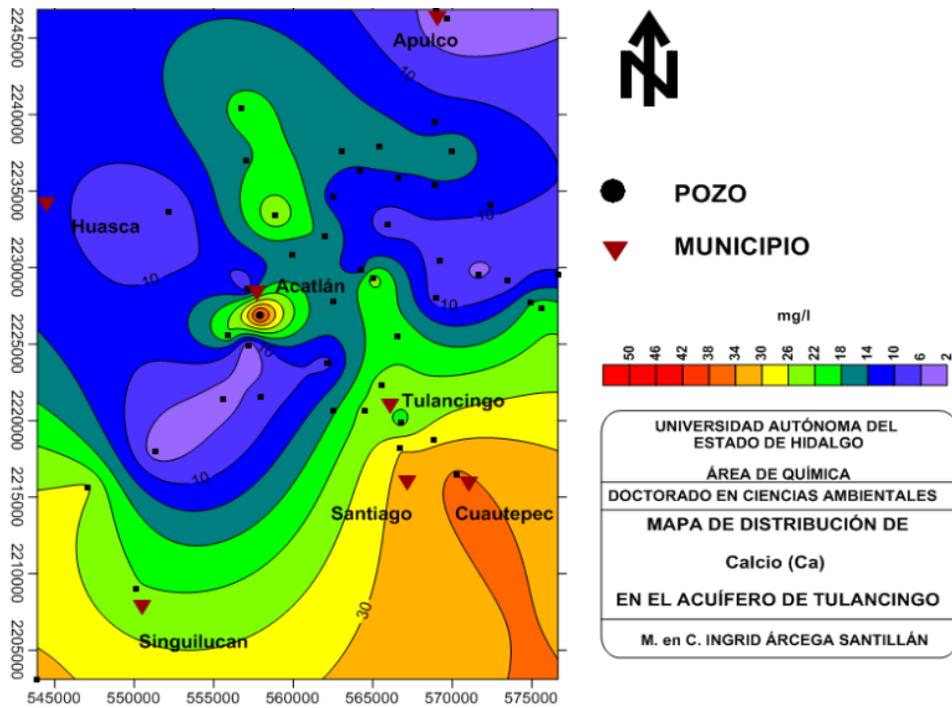


Figura 34. Mapa de isoconcentraciones de calcio.

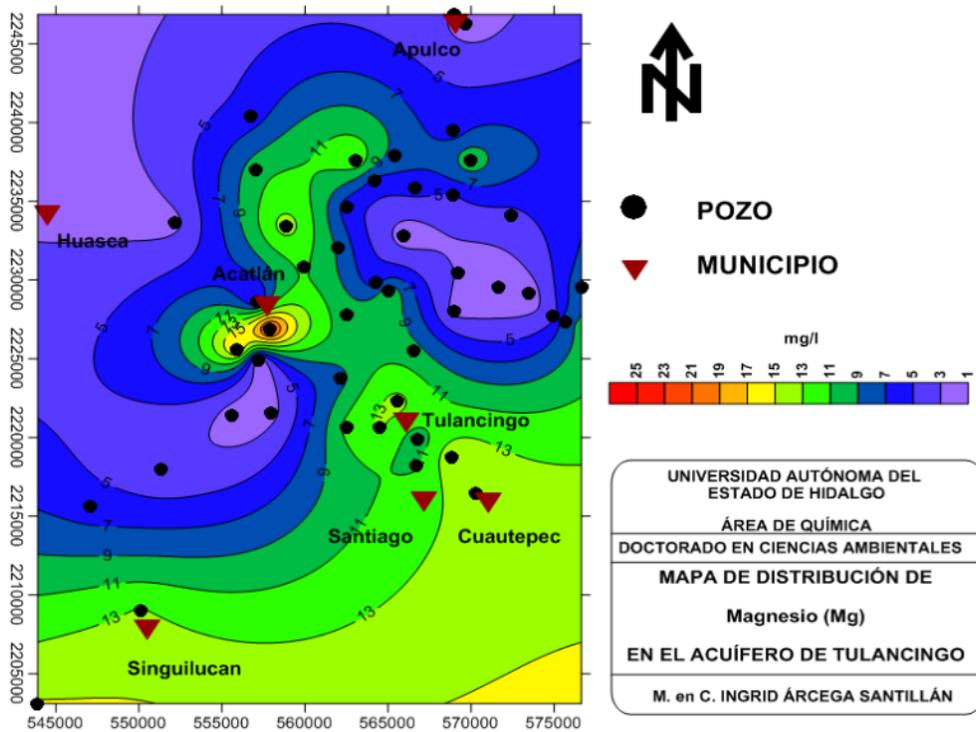


Figura 45. Mapa de isoconcentraciones de magnesio.

Para las concentraciones de  $\text{Na}^+$ ,  $\text{SO}_4^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$  y  $\text{NO}_3^-$  como nitrógeno (N), el comportamiento es el mismo se siguen observando zonas de anomalías en la zona de Acatlán y elevación de las concentraciones en el municipio de Cuauhtepac (figura 45).

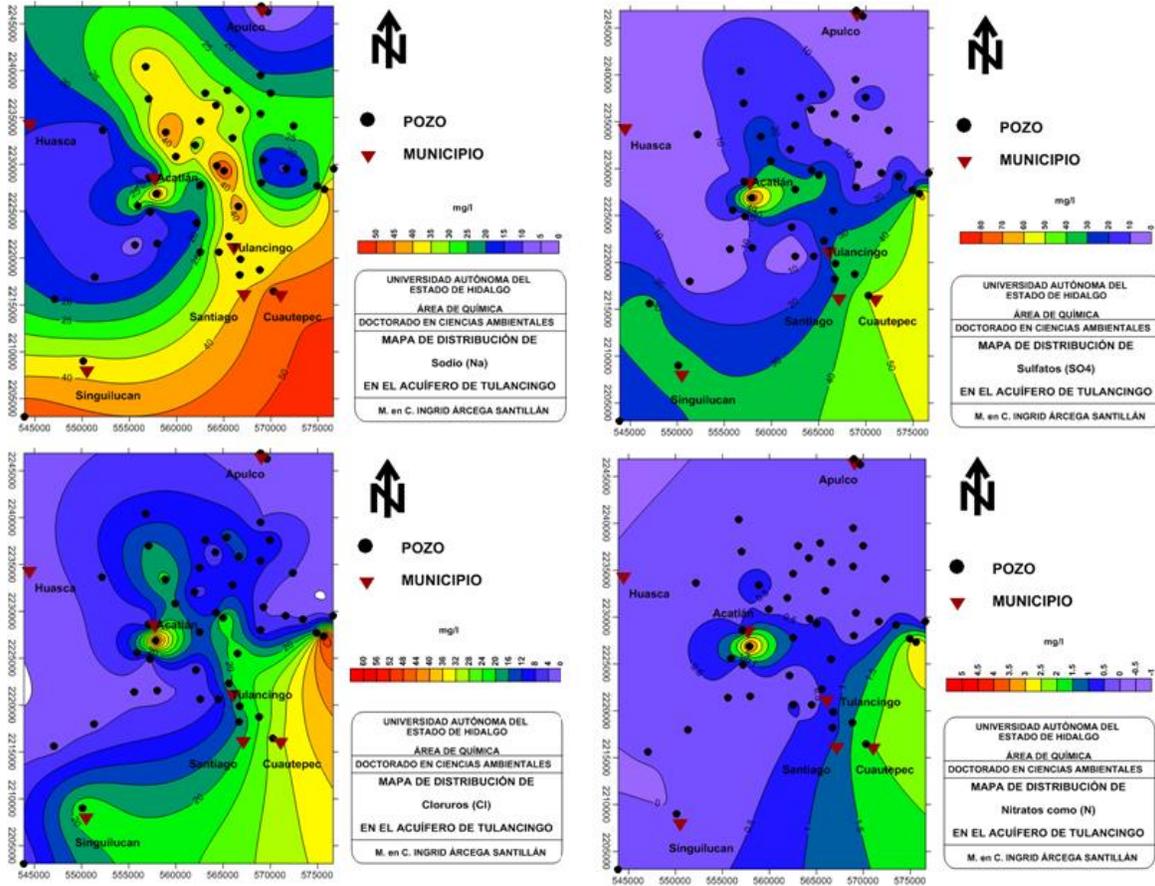


Figura 46 Mapas de isoconcentracines de sodio, sulfatos, cloruros y nitratos.

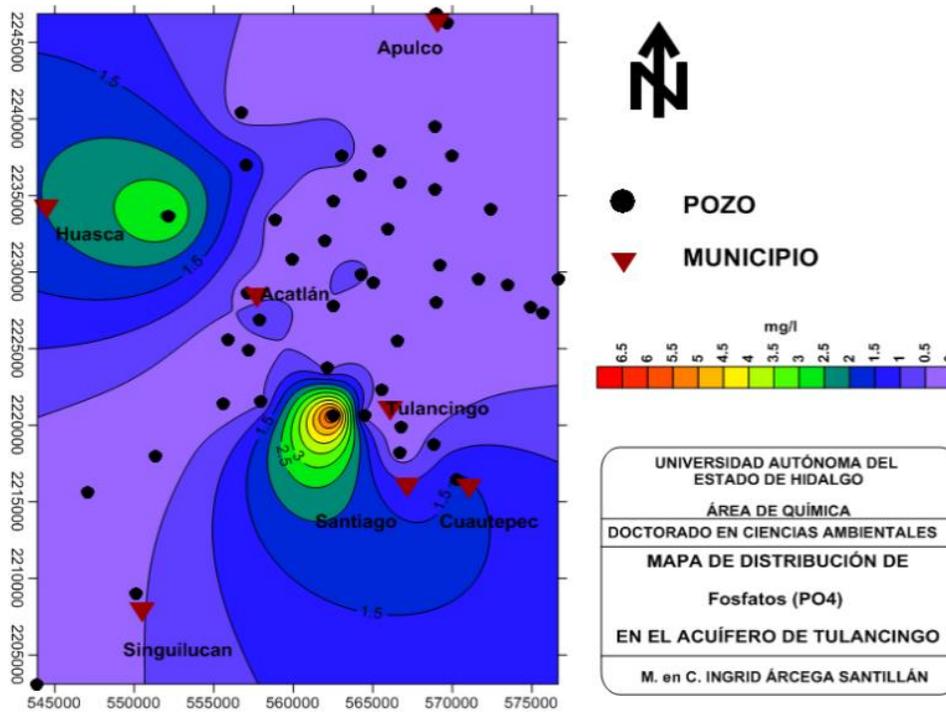


Figura 47. Mapa de isoconcentracines de fosfatos.

En la zona de Tulancingo se observa una anomalía bastante importante la cuál es necesario analizar si la ubicación del pozo muestreado se encuentra cerca de una industria que esté generando el aumento en las concentraciones de fosfatos (figura 46), mientras que en comparación con Acatlán los valores son sumamente bajos.

Para el caso de potasio, carbonatos y fluoruros no se observan zonas de anomalías importantes (figura 47) dando como resultado que las concentraciones estan en relación con la geología de la zona.

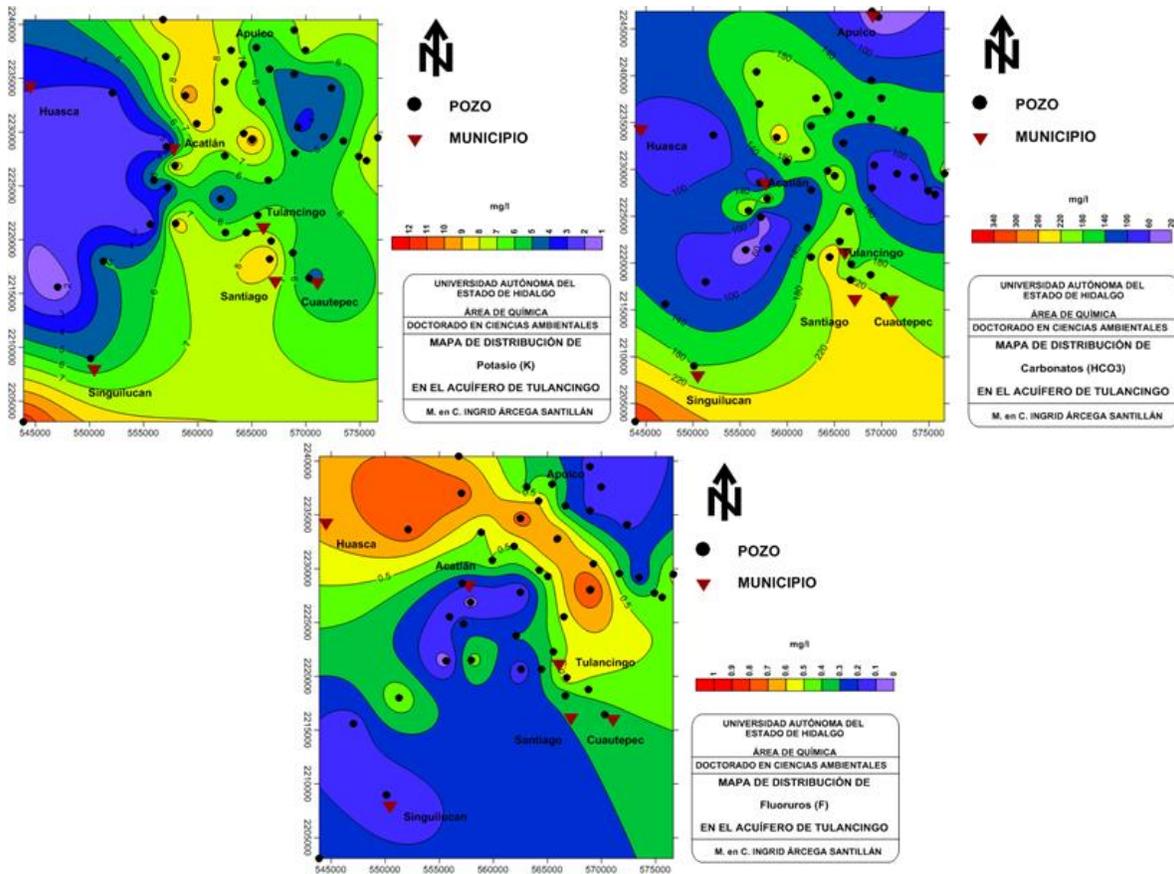


Figura 48. Mapas de isoconcentracines de potasio, carbonatos y fluoruros.

Para corroborar mejor la información obtenida de los datos de isoconcentraciones, se procesaron los datos hidrogeoquímicos del muestreo de Lesser y Asociados 2006, por lo que se decidió separar los datos de norias y los datos de pozos, debido a que los pozos están perforados a más de 40 metros infiriendo que están localizados en el acuífero inferior, mientras que las norias y manantiales se encuentran más cerca de la superficie localizados en el acuífero superior. A continuación se presentan mapas de isocomparación entre datos de manantiales (acuífero inferior) y datos de pozos (acuífero superior) (figuras 48-52).

En el caso de calcio se observa que la anomalía sólo se localiza en el acuífero superior, mientras que en el acuífero inferior sólo hay una importante concentración en la zona de Cuautepec (figura 48). Lo mismo ocurre para las concentraciones de magnesio (figura 49). Este hecho demuestra que está ocurriendo un problema de contaminación en el acuífero superior en la zona de Acatlán debido a una fuente puntual que pudiera ser la industria del queso que siempre arroja sus desechos al suelo o cuerpo de agua cercano.

Por este motivo es necesario realizar además análisis de suelo en esta región para comprender el comportamiento del contaminante antes de llegar al acuífero.

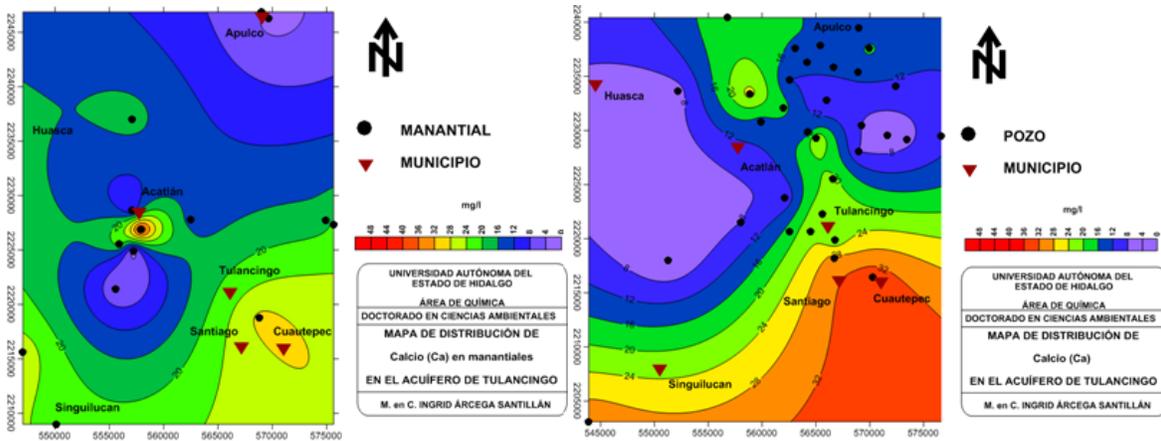


Figura 49. Mapas de isoconcentracines de calcio en manantiales y pozos.

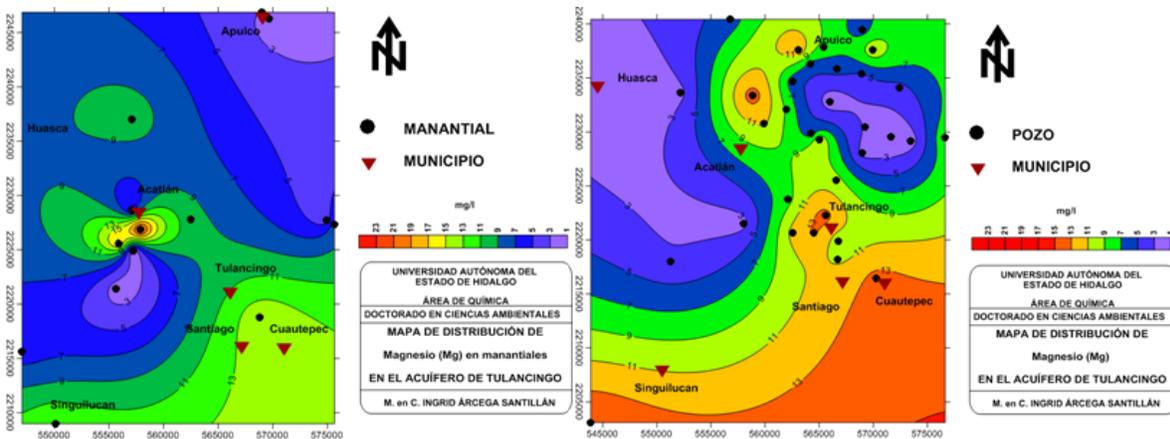


Figura 50. Mapas de isoconcentracines de magnesio en manantiales y pozos.

Un comportamiento similar a los anteriores iones se observa en el cloruro (figura 50), sodio (Figura 51) y sólidos totales disueltos (Figura 52).

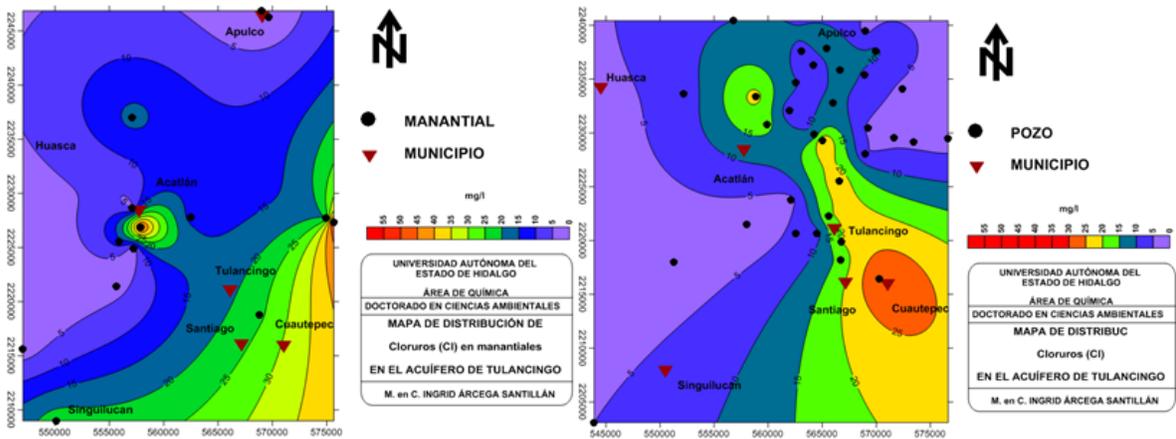


Figura 51. Mapas de isoconcentracines de cloruros en manantiales y pozos.

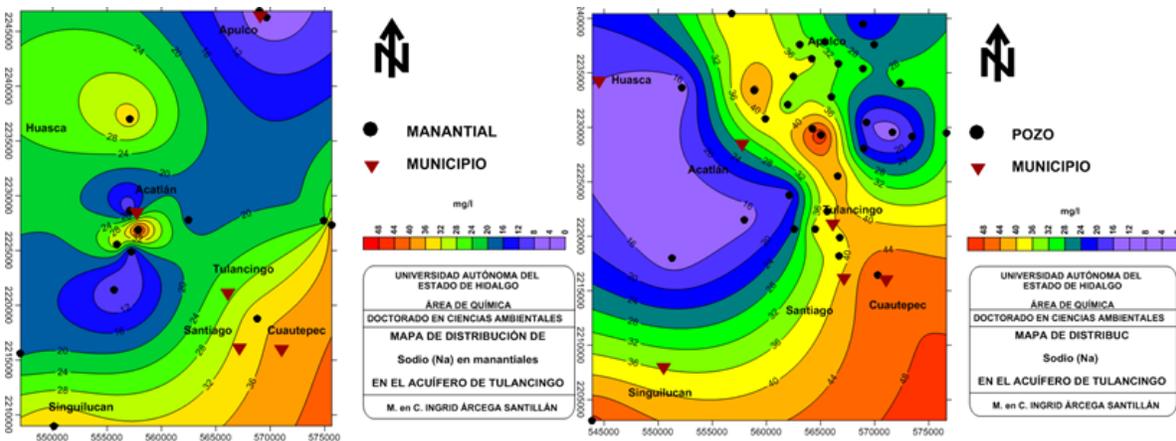


Figura 52. Mapas de isoconcentracines de sodio en manantiales y pozos.

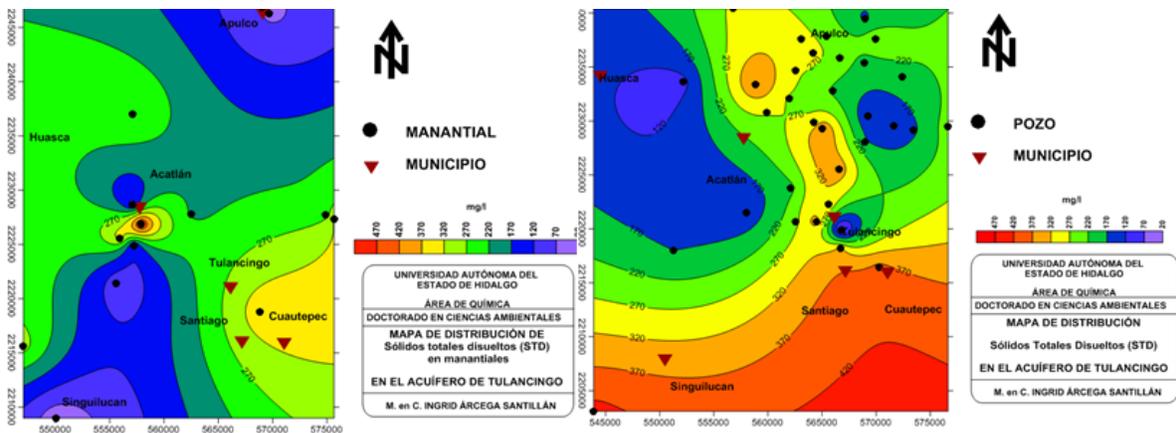


Figura 53. Mapa de isoconcentracines de sólidos totales disueltos en manantiales y pozos.

### 5.3. Análisis de la Vulnerabilidad

#### 5.3.1. Generación de mapas de los parámetros de DRASTIC

Se tuvieron que crear los 7 mapas de la metodología de DRASTIC modificado para por primera vez obtener el mapa de índice de vulnerabilidad del acuífero del Valle de Tulancingo.

Depth (profundidad del nivel estático): este mapa se realizó con datos de Lesser y Asociados 2006, en donde el nivel estático más profundo es de 182 metros y el más somero de 40 metros, originalmente este parámetro fue desarrollado para acuíferos que no sobrepasaban los 30 metros de profundidad en su nivel estático, sin embargo en situaciones como las que se tienen en México se conocen casos de contaminación en acuíferos con profundidades mayores a 30 metros (Ramos Leal 2005b), para el caso de nuestra área de estudio la clasificación de los rangos es de 1-5 (Al-Zabet 2002):

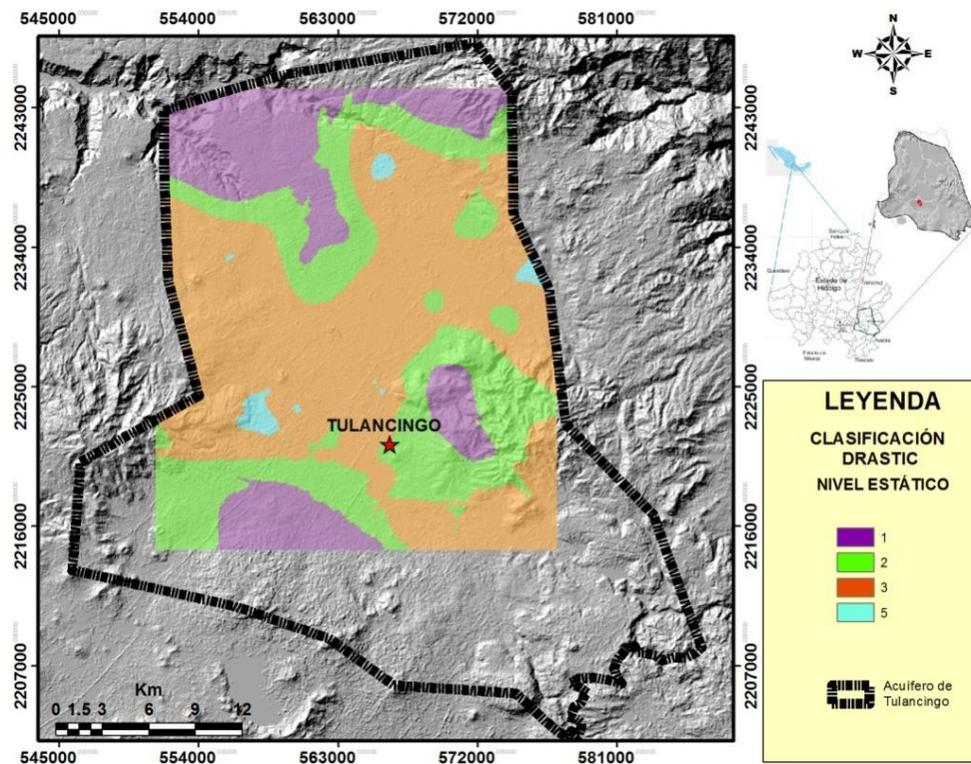


Figura 535. Reclasificación de niveles estáticos del acuífero de Tulancingo 2006, para su aporte al IDV mediante DRASTIC.

<b>Profundidad</b>	<b>Valoración</b>
<b>(m)</b>	<b>D<sub>r</sub></b>
30-50	5
50-75	3
75-100	2
>100	1

Recharge (Recarga): Para la generación de este mapa se tomaron los datos del estudio Hidrogeológico de Lesser 2006, se estableció la ecuación de balance volumétrico del acuífero en el cual las entradas de agua subterráneas son iguales a las salidas más el cambio de almacenamiento.

Las entradas corresponden a recarga por flujo subterráneo y a la infiltración, tanto aquella procedente de la lluvia dentro de la zona, como la infiltración generada por retornos de riego. Las salidas se dividen en el flujo subterráneo que sale del sistema acuífero al norte, la salida por manantiales y la extracción a través de pozos(Lesser 2006):

Entradas	54.8	hm <sup>3</sup> /año
Infiltración	19.7	hm <sup>3</sup> /año
Extracción	80.6	hm <sup>3</sup> /año
Salidas Subterráneas	4.4	hm <sup>3</sup> /año
Cambio de almacenamiento	10.5	hm <sup>3</sup> /año

Aquifer Media (Geología del acuífero): El camino que un contaminante puede seguir para alcanzar la superficie del agua subterránea está fuertemente influenciado por las fracturas o grietas presentes en las rocas que debe atravesar y que muchas veces pueden proporcionar un fácil acceso para que el contaminante alcance el agua subterránea (Chitsazan and Akhtari 2009).

En general, cuanto mayor sea el tamaño del grano y más fracturas existan en el medio, mayor será la permeabilidad, menor la capacidad de atenuación del contaminante y mayor la posibilidad de contaminación de las aguas subterráneas.

Los valores asignados para cada campo de la geología están dentro de los rangos de 2-9 debido a que todas son rocas volcánicas (Ramos Leal 2005a).

Tipo de material	Clase (Ar)
Lutita masiva	1-3
Ígnea-Metamórfica	2-5
Ígnea-Metamórfica alterada	3-5
Till glacial	4-6
Arenisca estratificada, caliza, lutita	5-9
Arenisca masiva	4-9
Caliza masiva	4-9
Arena y grava	4-9
<b>Basaltos</b>	<b>2-10</b>
Caliza cárstica	9-10

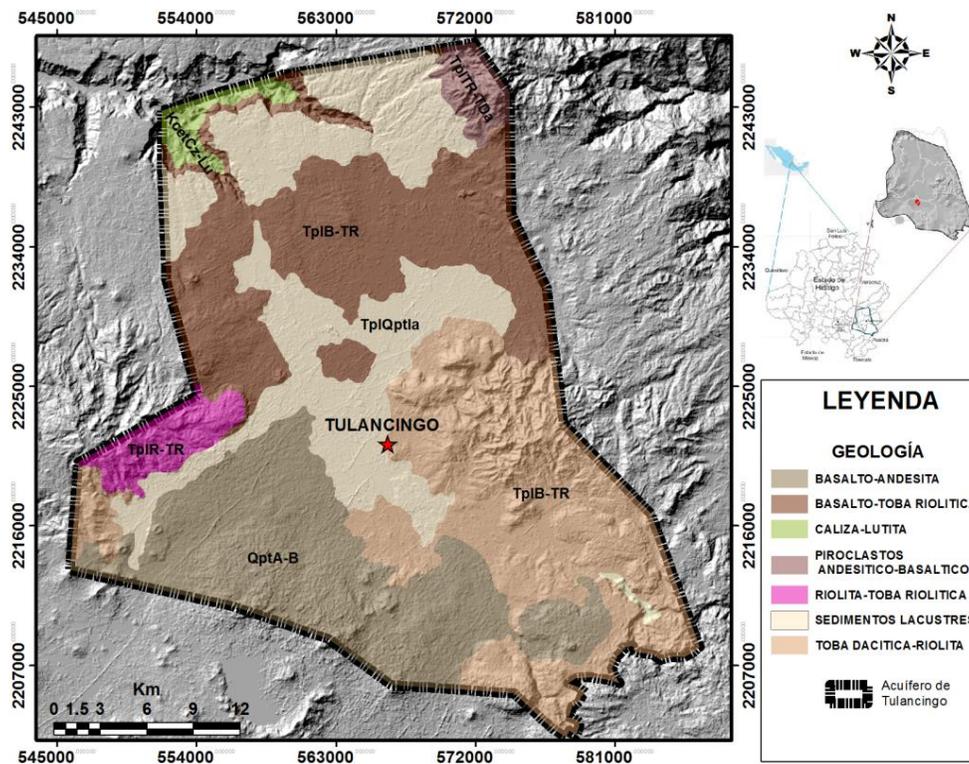


Figura 55. Geología del Acuífero del Valle de Tulancingo.

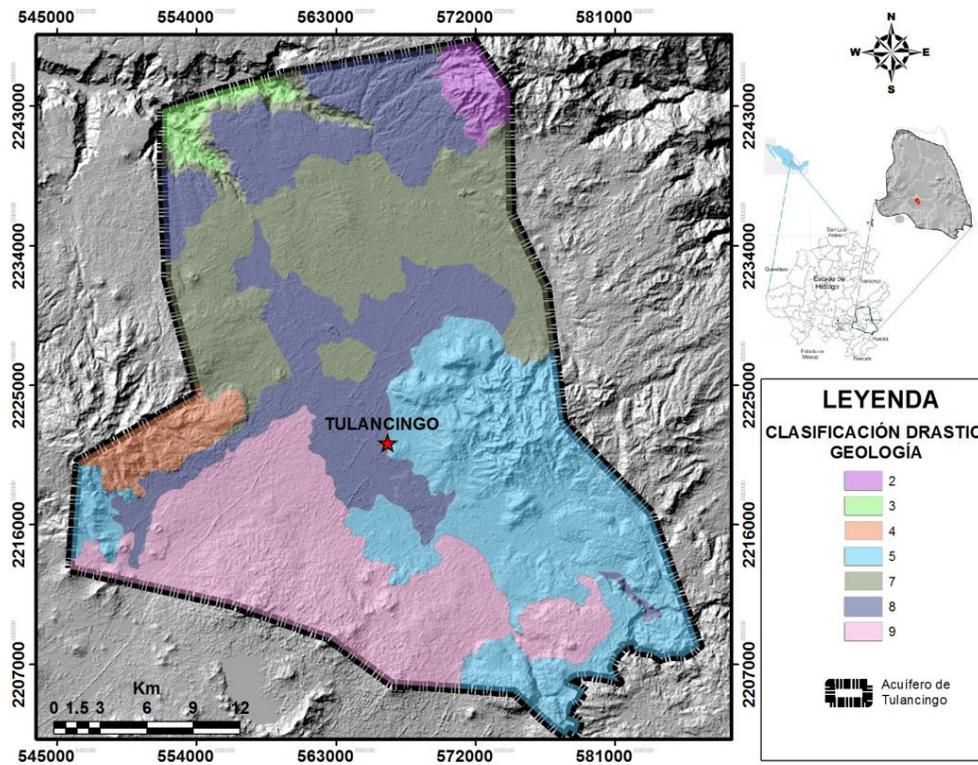


Figura 56. Reclasificación de la geología para el método DRASTIC.

Soil (Suelo): se refiere a la parte superior de la zona no saturada, que se caracteriza por una actividad biológica significativa. En este estudio se decidió hacer un cambio en este parámetro para correlacionar la vulnerabilidad con la actividad antropogénica que se localiza en superficie, como son las industrias, la actividad agrícola y pecuaria, las zonas urbanas, entre otros. Para tal caso, el método DRASTIC fue modificado para observar si existe una correlación entre el uso de suelo y las posibles fuentes, Esta metodología ya ha sido reportada por (Awawdeh, 2010).

Uso de suelo	Clase (Sr)
Forestal	1
Urbano	5
Tierra desnuda	2
Agricultura	3
Pastizales	2

Los datos se obtuvieron de la cota 1:250 00 de la CONABIO.

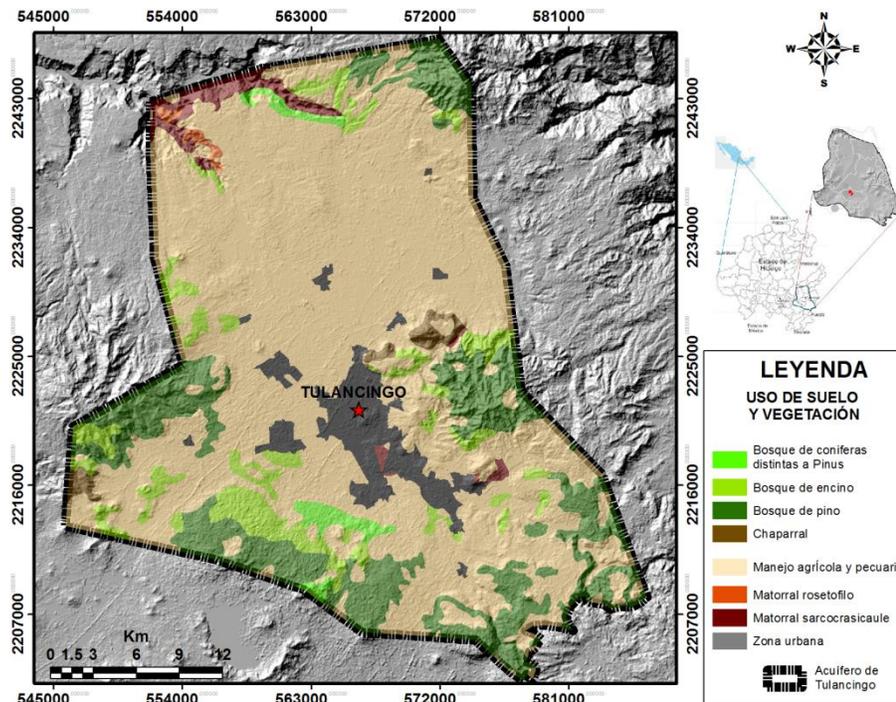


Figura 57. Mapa de uso de suelo y vegetación del Acuífero del Valle de Tulancingo.  
Fuente: CONABIO

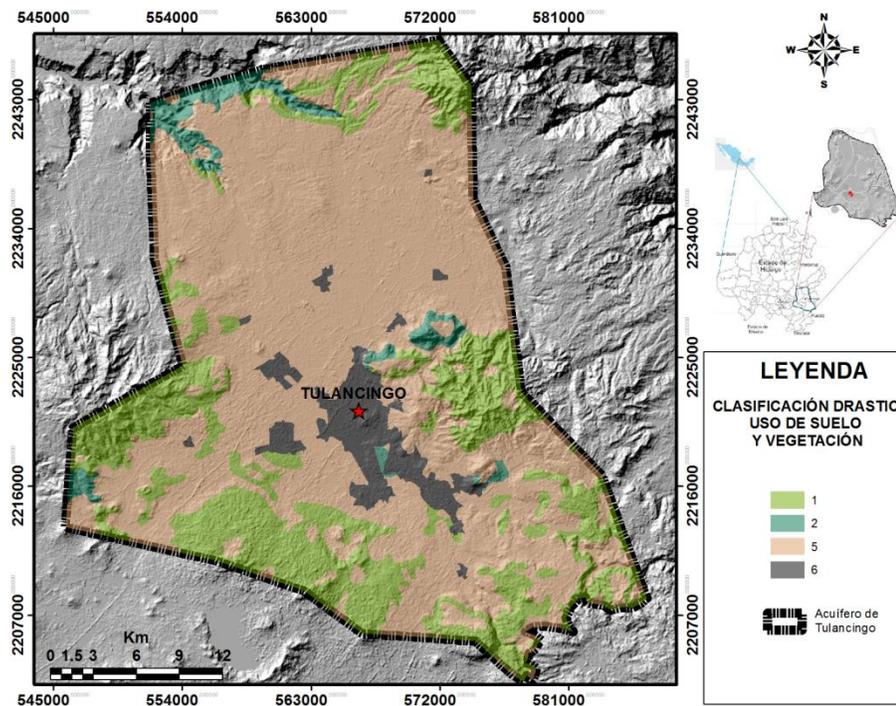


Figura 58. Reclasificación del mapa de uso de suelo y vegetación para el método DRASTIC.

Topography (topografía): Según sea la pendiente del terreno así será la probabilidad de que un contaminante permanezca en el sitio donde ha sido depositado o se aleje del lugar por efecto de la escorrentía superficial, y por consiguiente no se infiltre a través del terreno en una zona donde podría alcanzar el nivel de agua de un acuífero. Por otra parte, la topografía también influye en el desarrollo del suelo, por lo que afecta indirectamente a la posibilidad de atenuación de los contaminantes. Este mapa se generó a partir del modelo digital de elevaciones, el slope que se generó está en porcentaje debido a que el método DRASTIC trabaja con valores de porcentajes como se muestra en la siguiente tabla.

<b>% Pendiente</b>	<b>Clase (Tr)</b>
0-7	9
7-15	6
15-23	3
23-33	2
>33	1

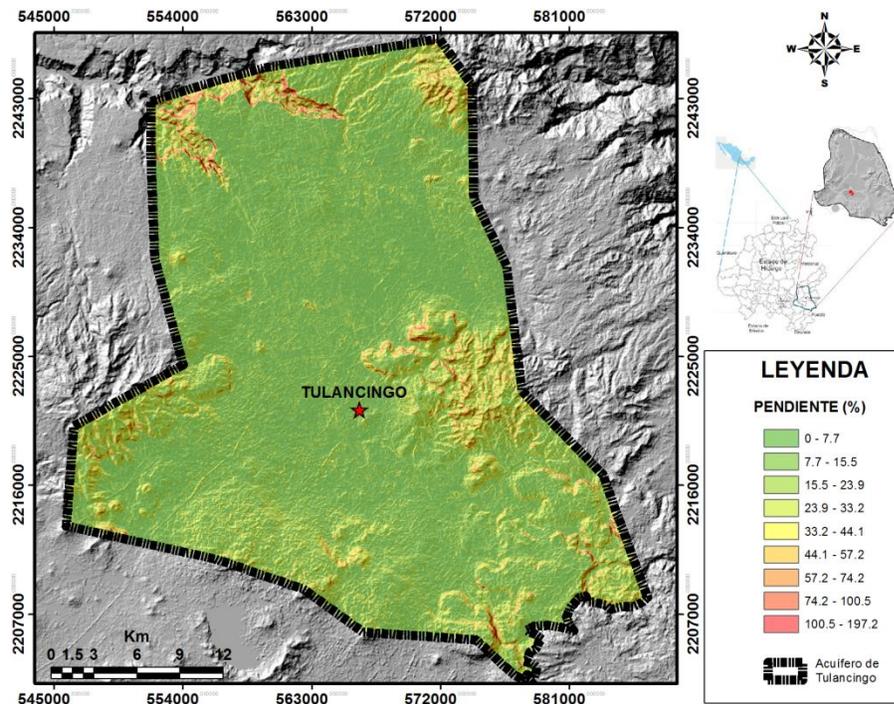


Figura 59. Mapa de porcentaje de elevación.

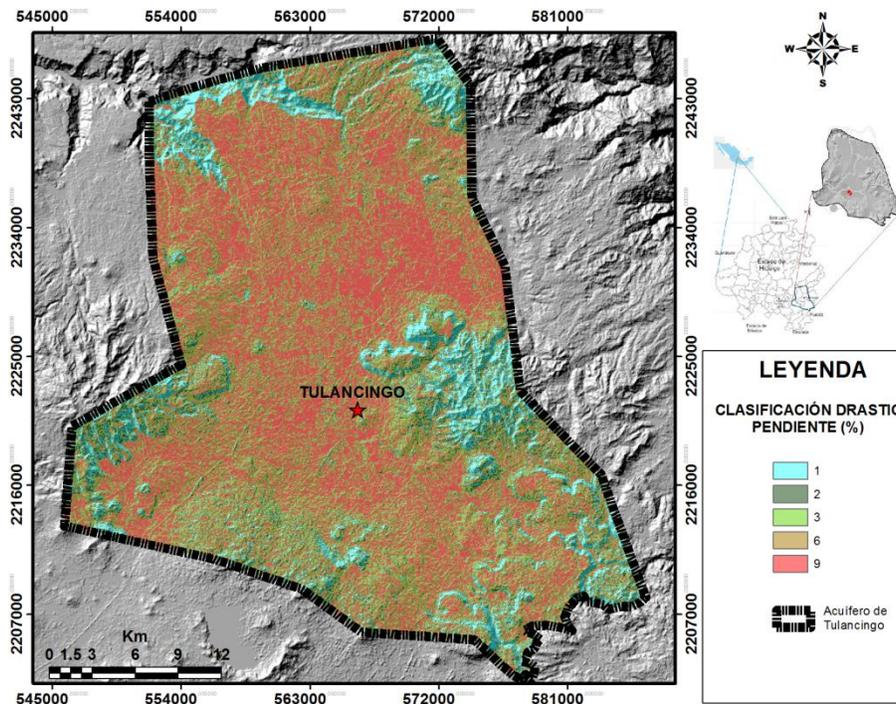


Figura 60. Reclasificación de porcentaje de pendiente para el método DRASTIC.

Impact (impacto de la zona no saturada): La zona no saturada es aquella que se encuentra por encima de la superficie del agua subterránea y por debajo del nivel del suelo. Determina las características que van a condicionar la atenuación de los contaminantes en el espacio comprendido entre el suelo y el nivel freático. Para el caso de nuestra área de estudio la zona no saturada se encuentra entre el acuífero superior y el inferior, es la zona que sirve como su división, los datos para realizar este mapa fueron tomados de los sondeos de geofísica: sondeos eléctricos verticales (SEV), mediciones electromagnéticas (TEMS) y gravimetría, los cuales indican la resistividad y la densidad de las diferentes unidades geológicas del acuífero se localizan entre 50 y 100 metros de profundidad (Lesser 2006).

La correlación entre la zona no saturada y el uso de suelo son una herramienta importante para la localización de las áreas con mayor vulnerabilidad (Umar et al. 2009), por lo que si determinada área tiene menor espesor en la zona vadosa y tiene un uso de suelo por ejemplo industrial, existirá mayor riesgo de vulnerabilidad.

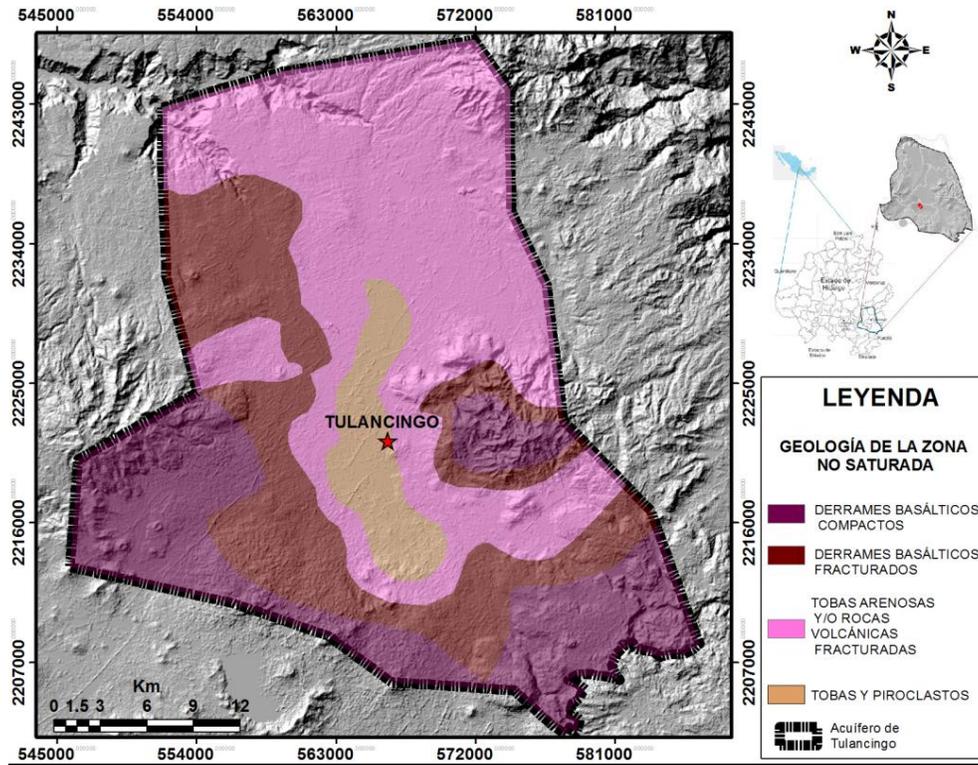


Figura 61. Mapa de la zona no saturada del acuífero del Valle de Tulancingo.

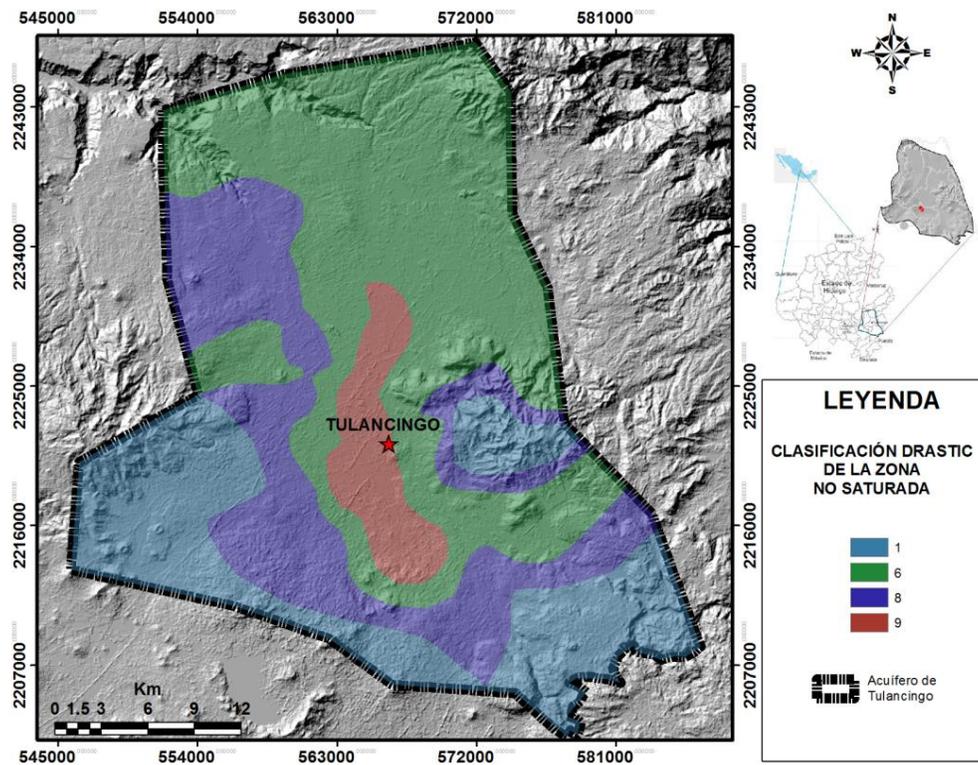


Figura 62. Reclasificación mapa zona no saturada para el método DRASTIC.

Hydraulic Conductivity (conductividad hidráulica del acuífero): Se refiere a la capacidad de los materiales del acuífero para transmitir agua, lo que a su vez controla la velocidad a la que fluye el agua, bajo la acción de un gradiente hidráulico. En general, conductividades elevadas están asociadas a una vulnerabilidad alta, debido a que el contaminante se puede mover más fácilmente de un punto a otro una vez que ha sido introducido en el acuífero.

Los datos procesados se obtuvieron del estudio de Lesser, 2006, que publicó pruebas de bombeo de 42 pozos en el Valle y los datos de transmisibilidad que reporta fueron interpretados por los métodos de Theis y Hantush (Lesser 2006).

La conductividad hidráulica fue calculada a partir de:

$$T = Kb$$

Donde T= Transmisibilidad

K= Conductividad Hidráulica

b= espesor de la capa

por lo tanto despejamos K, y b lo tomamos como un valor de 100 metros.

$$K = T/b$$

Valores del mapa creado para vulnerabilidad:

<b>Conductividad Hidráulica m/día</b>	<b>Clase (Cr)</b>
0-4	1
4-8	1
8-13	1
13-18	2
18-22	2
22-28	2
28-37	6
37-50	8
50-90	9

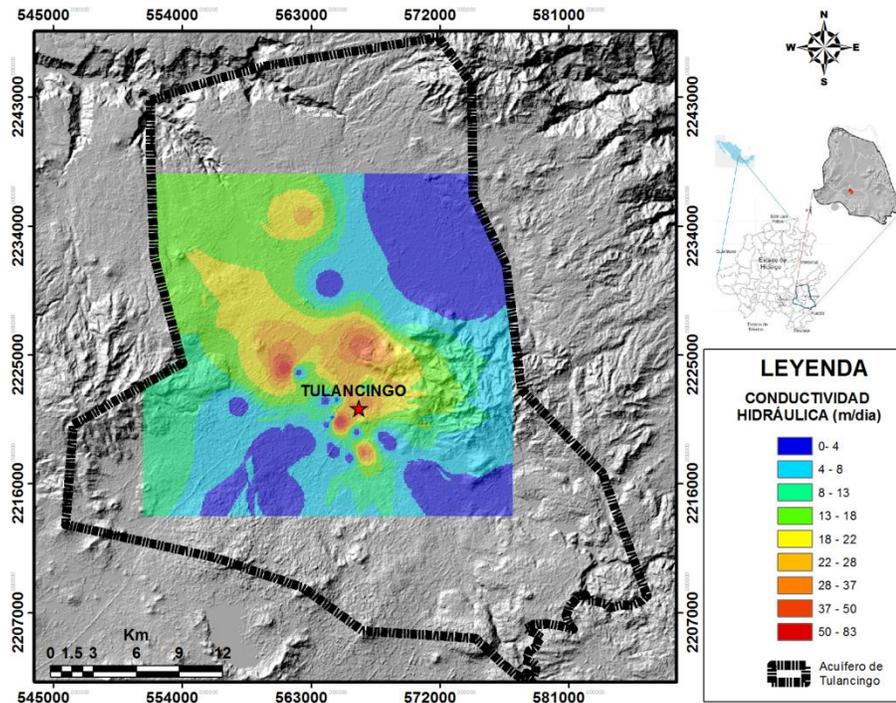


Figura 63. Conductividad Hidráulica del acuífero de Tulancingo.

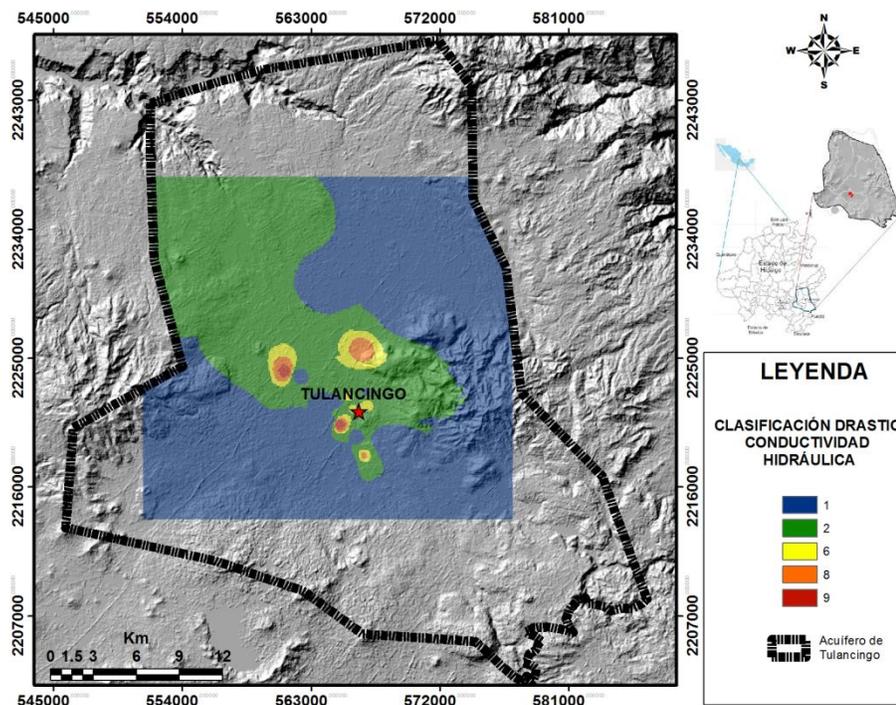


Figura 64. Reclasificación conductividad hidráulica para el método DRASTIC.

### 5.3.2. Cálculo del Índice de Vulnerabilidad

El método posee tres supuestos importantes: el contaminante es introducido sobre la superficie de la tierra, el contaminante es trasladado al agua subterránea por precipitación y el contaminante es móvil en el agua. En los últimos años, el método DRASTIC ha sido modificado en usar, quitar o modificar parámetros, de acuerdo a las características del área de estudio (Awawdeh and Jaradat 2009). Por otra parte, este método no utiliza una prueba de validación estándar para el acuífero. De este modo, varios investigadores han continuado desarrollando o modificado modelos, de acuerdo a sus propios intereses, disponibilidad de datos y características propias del acuífero a estudiar (Neshat et al. 2013).

Para cuantificar cada uno de los factores DRASTIC se aplica un sistema de evaluación en el que se establecen tres parámetros significativos: pesos, rangos y valores. Pesos: Cada factor se evalúa respecto a los otros para determinar la importancia relativa de cada uno. A cada factor se le asigna un peso relativo que va de 2 a 5. Los factores más significativos tienen un peso de 5 y los menos significativos de 2. Estos pesos son constantes y no modificables en la estimación de la vulnerabilidad. Rangos: Cada factor se divide en rangos numéricos o tipos medios significativos con nombres descriptivos, que tienen un impacto en la contaminación potencial de los acuíferos. Valores. Cada rango de cada factor se evalúa con respecto a los otros para determinar su significación relativa en la contaminación potencial. A cada rango de los factores DRASTIC se le asigna un valor numérico que oscila entre 1 y 10. Los factores C, R, D, T y S tienen asignado un único valor por rango, mientras que para los factores A e I se considera un valor típico dentro de un intervalo. La determinación de los índices de vulnerabilidad involucra multiplicar cada uno de los parámetros (r) por el peso que se le asigna (w) a cada parámetro y se suma el total:

$$\text{Índice de vulnerabilidad} = DrDw \text{ (profundidad)} + RrRw \text{ (recarga)} + ArAw \text{ (geología)} + SrSw \text{ (suelo)} + TrTw \text{ (topografía)} + Irlw \text{ (zona saturada)} + CrCw \text{ (conductividad hidráulica)}$$

Los rangos y parámetros que se utilizaron para cada uno de los mapas fueron los siguientes:

Parámetros	DRASTIC				DRASTIC modificado				DRASTIC modificado AHP			
	Peso	Clasificación	Peso total	Peso	Clasificación	Peso total	Peso AHP	Clasificación AHP	Peso total AHP			
Profundidad del agua subterránea (m) D	0 - <10	5	50	5	10	50	0.251	0.46	0.11546			
	10 - <20	7	35	35	7	35	0.292	0.07329	0.07329			
	20 - <30	5	25	25	5	25	0.134	0.08363	0.08363			
	30 - 40	5	15	15	3	15	0.067	0.01682	0.01682			
Recarga neta (mm/año) R	> 40	1	5	5	1	5	0.047	0.0118	0.0118			
	348 - 476	4	4	4	1	4	0.122	0.00756	0.00756			
	477 - 537	3	12	12	3	12	0.097	0.01183	0.01183			
	538 - 596	5	20	20	5	20	0.16	0.01952	0.01952			
Tipo de acuífero A	597 - 670	7	28	28	7	28	0.263	0.03209	0.03209			
	671 - 787	9	36	36	9	36	0.419	0.05112	0.05112			
	Aluvial	3	30	30	10	30	0.063	0.0255	0.0255			
	Karstico	9	27	27	9	27	0.249	0.01569	0.01569			
Tipo de suelo S	Unidades piroclásticas	7	21	21	7	21	0.172	0.01084	0.01084			
	Depósitos neogene	6	18	18	6	18	0.099	0.00624	0.00624			
	Ophiolite	3	9	9	3	9	0.061	0.00384	0.00384			
	Flysch	2	6	6	2	6	0.038	0.00239	0.00239			
Topografía (Pendiente)% T	Metamórfico	1	3	3	1	3	0.024	0.00151	0.00151			
	Ninguno	2	18	18	9	18	0.032	0.01341	0.01341			
	Grava - arena	8	16	16	8	16	0.263	0.00842	0.00842			
	Arena - arcilla	2	4	4	2	4	0.097	0.00512	0.00512			
Impacto de la zona vadosa I	Arcilla	1	2	2	1	2	0.062	0.00198	0.00198			
	0 - <2	1	10	10	10	10	0.02	0.0094	0.0094			
	2 - <6	9	9	9	9	9	0.262	0.00524	0.00524			
	6 - <12	5	5	5	5	5	0.144	0.00288	0.00288			
Conductividad hidráulica (m/s) C	12 - 200	3	3	3	3	3	0.079	0.00158	0.00158			
	> 20	1	1	1	1	1	0.045	0.0009	0.0009			
	Metamórfico	5	5	5	5	5	0.202	0.00606	0.00606			
	Ophiolitic	1	5	5	1	5	0.042	0.00848	0.00848			
Lineamiento (distancia -m) Lin	Arcilla	2	10	10	2	10	0.057	0.01151	0.01151			
	Volcánica	5	25	25	5	25	0.075	0.01515	0.01515			
	Arcilla - arenisca	6	30	30	6	30	0.112	0.02262	0.02262			
	Arenisca conglomerado	8	40	40	8	40	0.157	0.03171	0.03171			
Uso del suelo (Lu)	Caliza	9	45	45	9	45	0.221	0.04464	0.04464			
	Arena - grava	10	50	50	10	50	0.305	0.06161	0.06161			
	<10 <sup>7</sup>	3	6	6	3	6	0.078	0.00484	0.00484			
	10 <sup>6</sup> - 10 <sup>7</sup>	4	12	12	4	12	0.097	0.00757	0.00757			
Uso del suelo (Lu)	10 <sup>5</sup> - 10 <sup>6</sup>	6	18	18	6	18	0.16	0.01248	0.01248			
	10 <sup>4</sup> - 10 <sup>5</sup>	8	24	24	8	24	0.263	0.02051	0.02051			
	10 <sup>3</sup> - 10 <sup>4</sup>	10	30	30	10	30	0.47	0.03268	0.03268			
	0 - 250	3	3	3	9	27	0.066	0.03102	0.03102			
Uso del suelo (Lu)	250 - 500	7	21	21	7	21	0.262	0.01729	0.01729			
	500 - 750	5	15	15	5	15	0.144	0.0095	0.0095			
	750 - 1000	3	9	9	3	9	0.079	0.00521	0.00521			
	>1000	1	3	3	1	3	0.045	0.00297	0.00297			
Uso del suelo (Lu)	Huertos	5	50	50	10	50	0.167	0.06446	0.06446			
	Campos agrícolas	8	40	40	8	40	0.247	0.04125	0.04125			
	Asentamientos	7	35	35	7	35	0.167	0.02789	0.02789			
	Pastizales	5	25	25	5	25	0.099	0.01653	0.01653			
Uso del suelo (Lu)	Bosque	3	15	15	3	15	0.061	0.01019	0.01019			
	Bare rock	1	5	5	1	5	0.041	0.00685	0.00685			

El mapa final (figura 64) nos muestra tres parámetros para evaluar la vulnerabilidad del acuífero: bajo en tonalidades azules, medio en tonalidades amarillas y alta en tonalidades rojas. Además al mapa se le agregaron datos como las principales actividades antropogénicas de la región, así como la ubicación de los dos principales tiraderos de desechos urbanos y las vías de comunicación.

Valores finales de vulnerabilidad:

Grado Vulnerabilidad	Valor DRASTIC	Calificación
Muy Bajo	23-64	1
Bajo	64-105	2
Moderado	105-146	3
Alto	146-187	4
Muy Alto	187-230	5

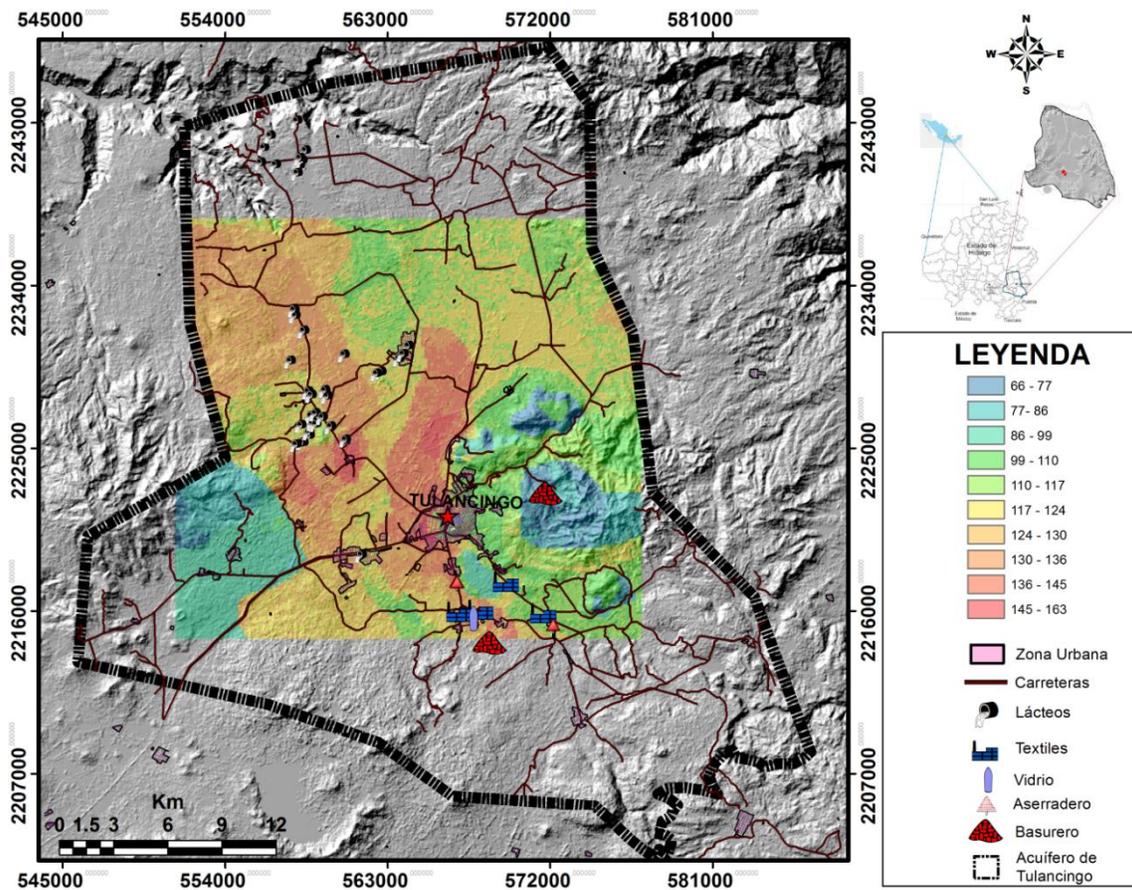


Figura 65. Mapa de vulnerabilidad del Acuífero del Valle de Tulancingo

### **5.3.3. Relación entre el Índice de Vulnerabilidad y componentes del agua**

Una vez obtenido el mapa de vulnerabilidad se hizo la correlación entre cada ión mayoritario del promedio de los datos hidrogeoquímicos y el IDV, para localizar si había alguna anomalía de algún valor con respecto a los valores más alto del índice de vulnerabilidad.

Se realizaron regresiones lineales de cada uno de los iones mayoritarios contra el IDV, para observar que tanto una de las variables afectaba a la otra, y así poder cuantificar su relación. Todas las gráficas dan como resultado una relación lineal positiva y algunas de ellas acercándose demasiado a la recta y casi llegando al valor de 1 como es el caso de Ca, Mg y Cl.

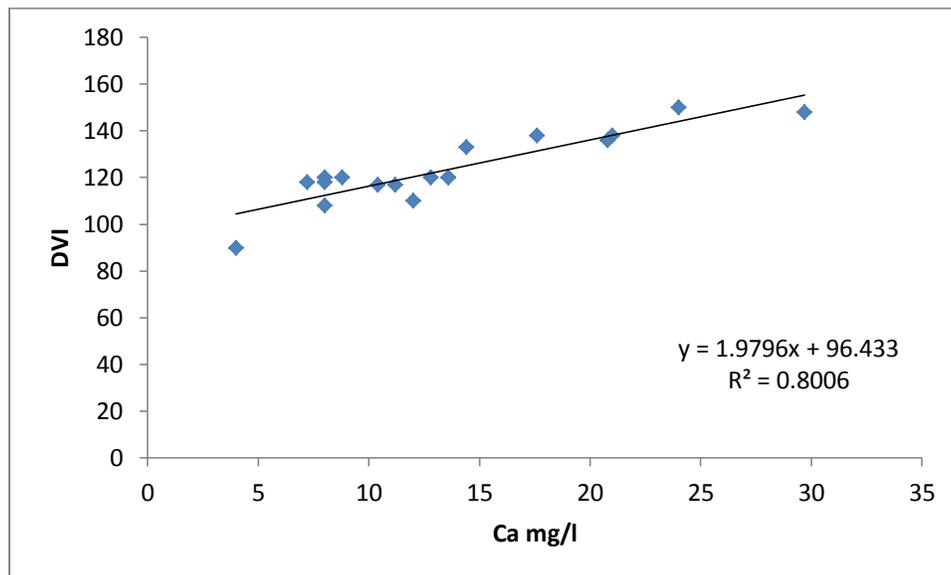
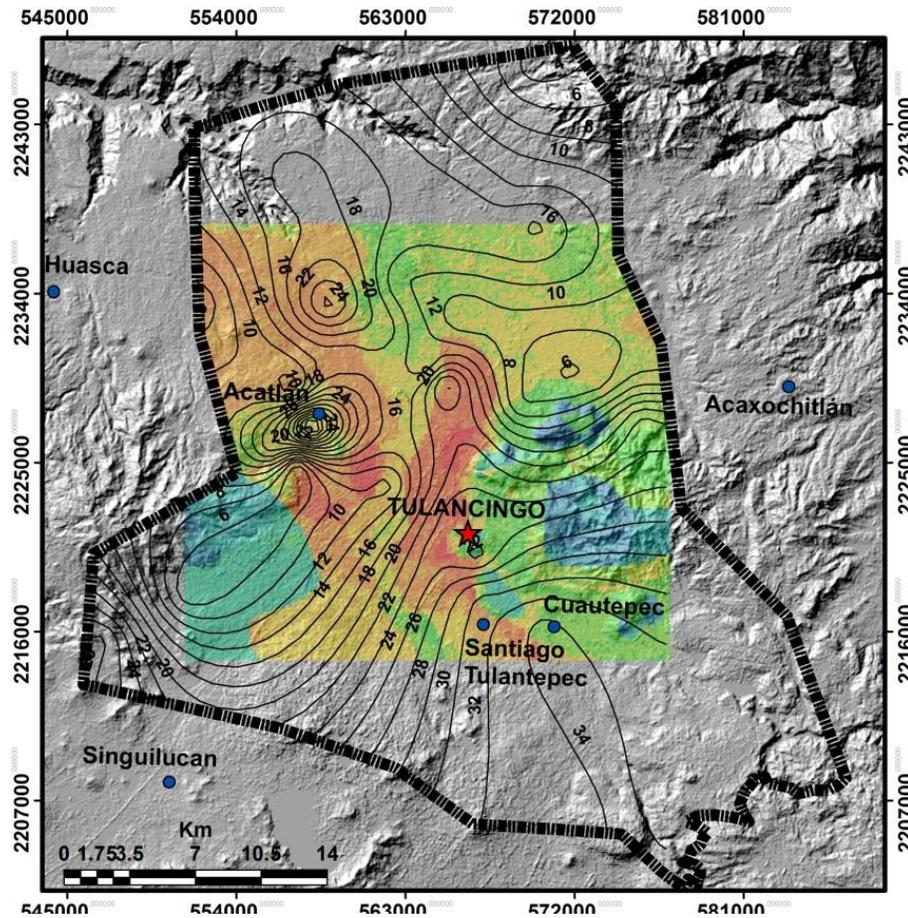


Figura665. Mapa de Ca vs índice de vulnerabilidad y gráfica del cálculo de regresión lineal

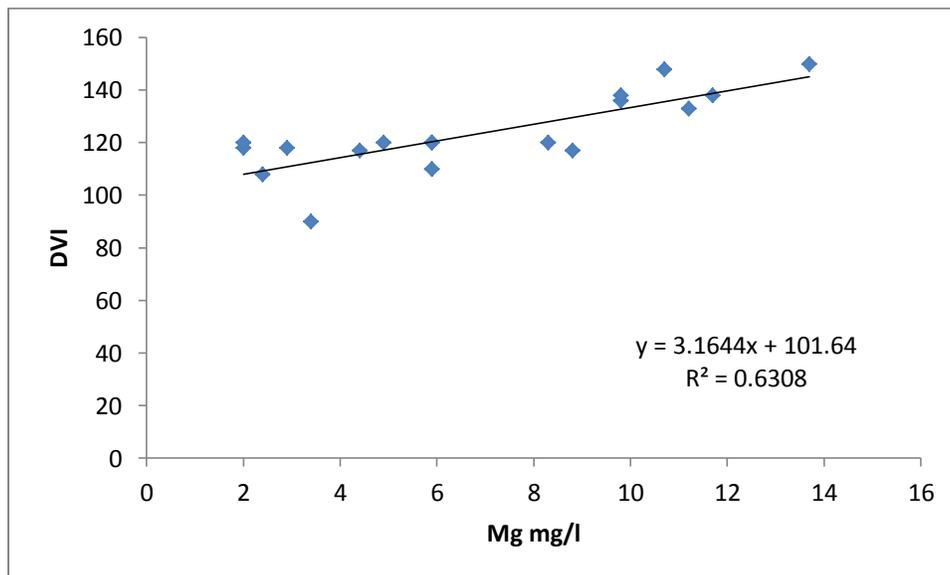
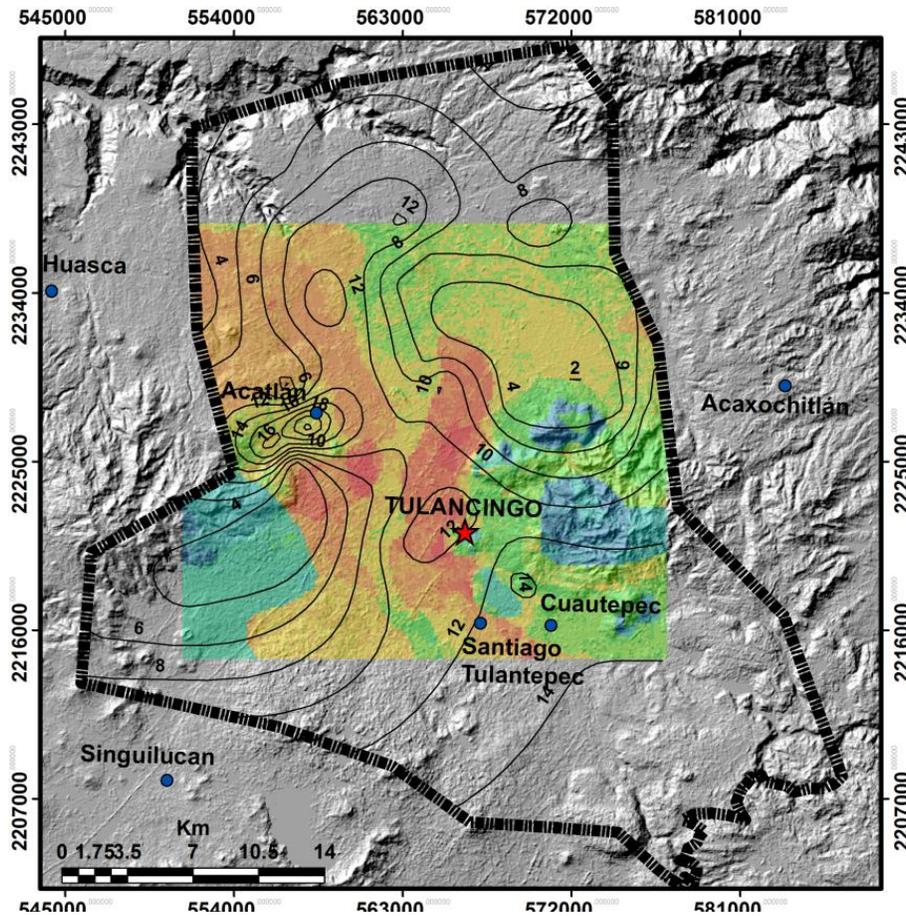


Figura 67. Mapa de Mg vs índice de vulnerabilidad y gráfica del cálculo de regresión lineal

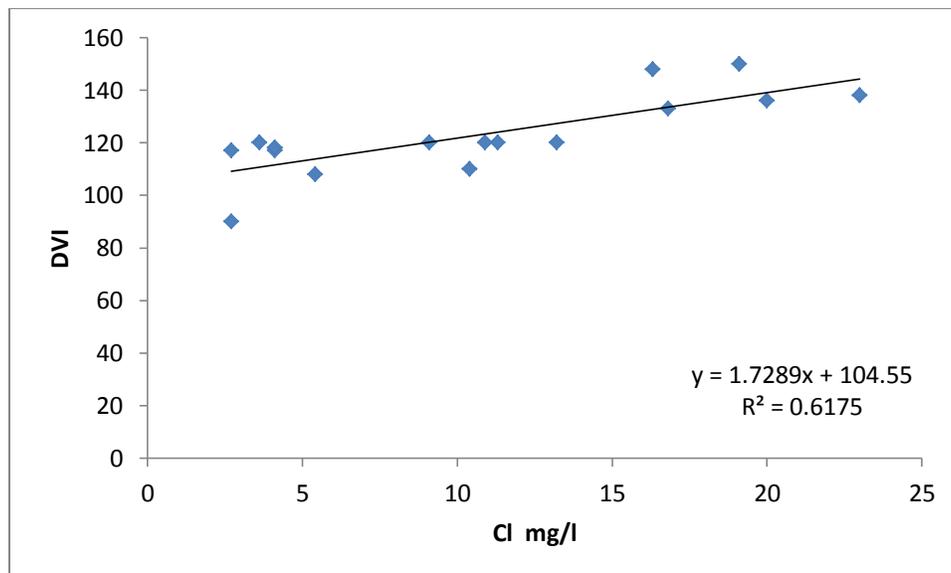
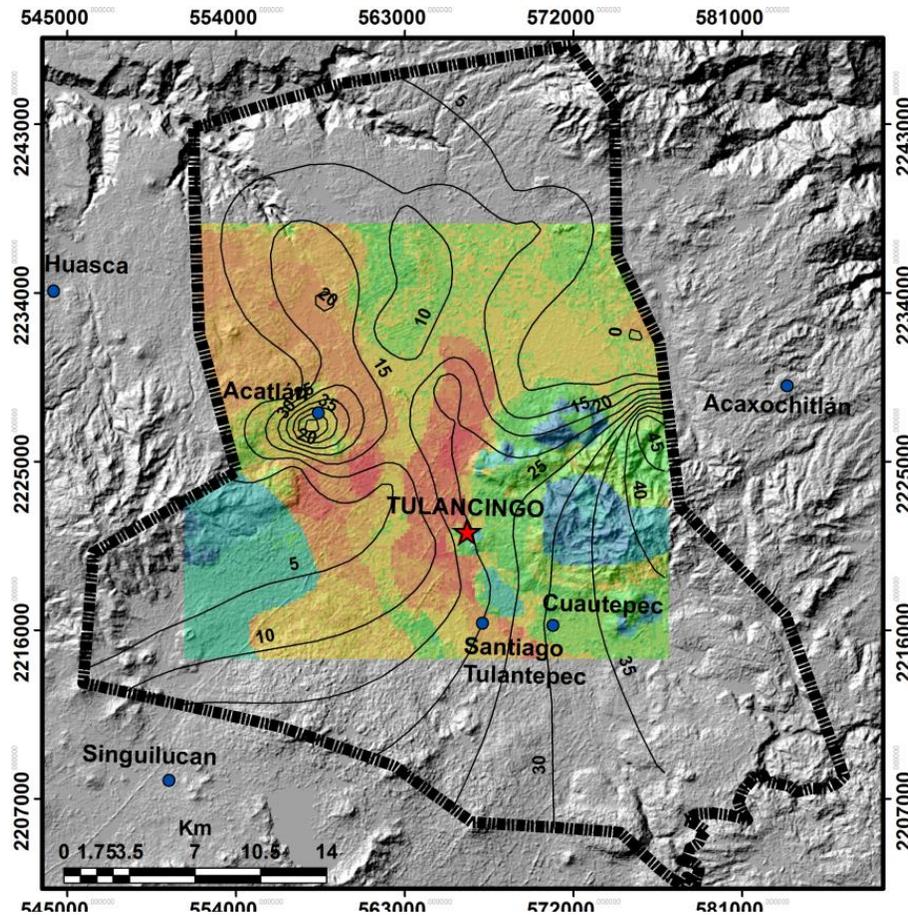


Figura 68. Mapa de Cl vs índice de vulnerabilidad y gráfica del cálculo de regresión lineal

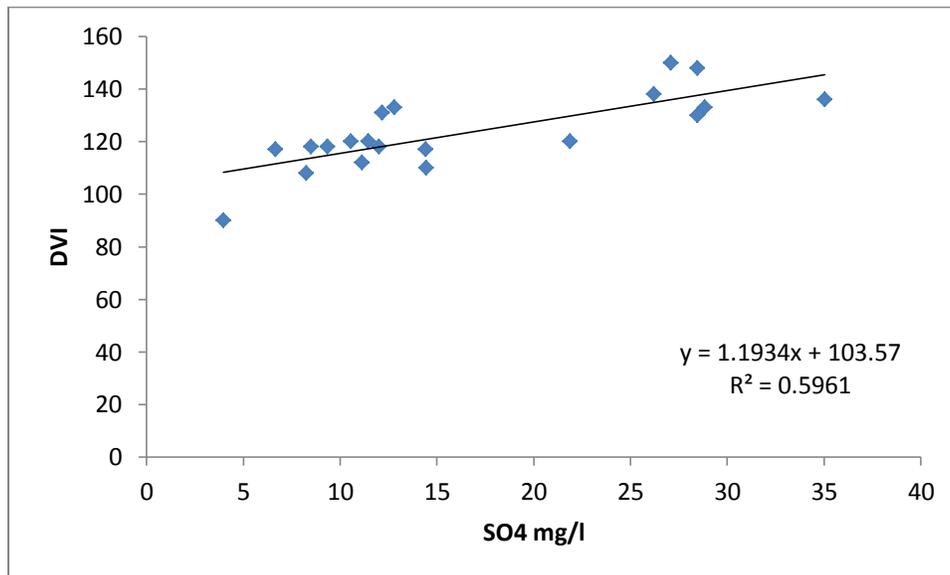
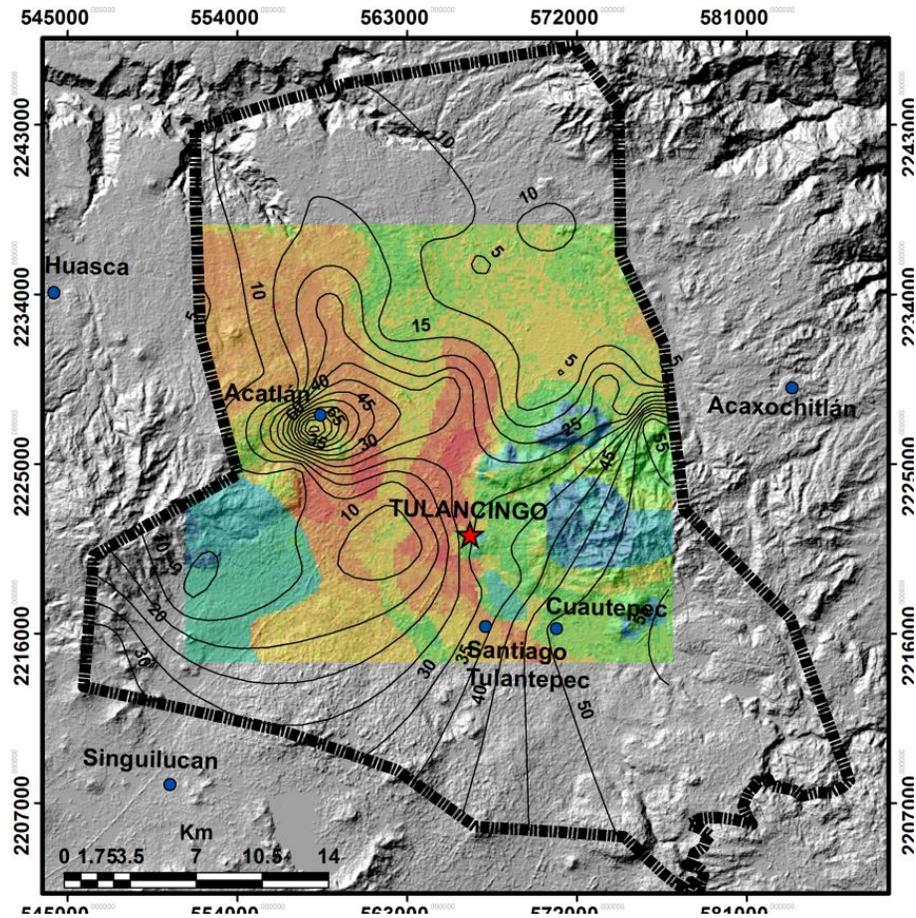


Figura 69. Mapa de SO<sub>4</sub> vs índice de vulnerabilidad y gráfica del cálculo de regresión lineal

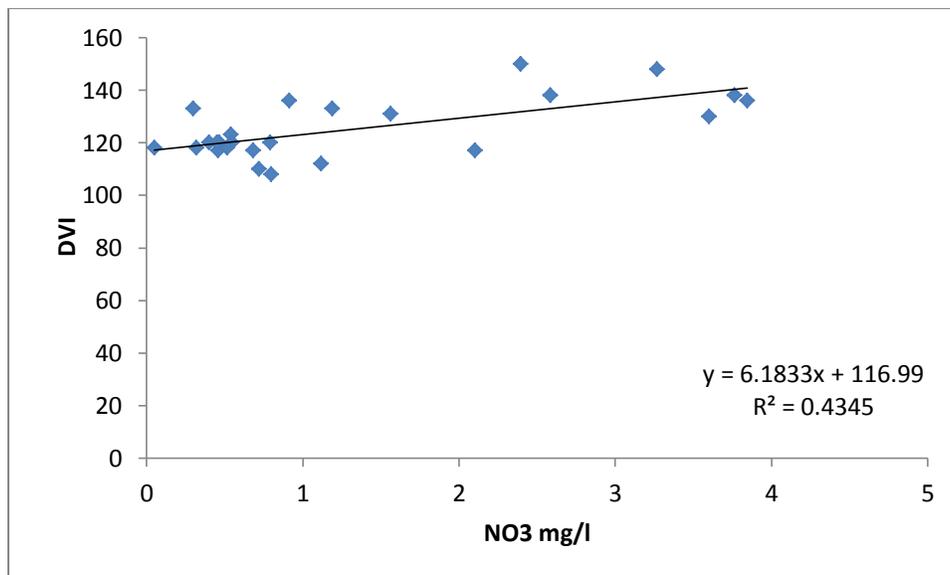
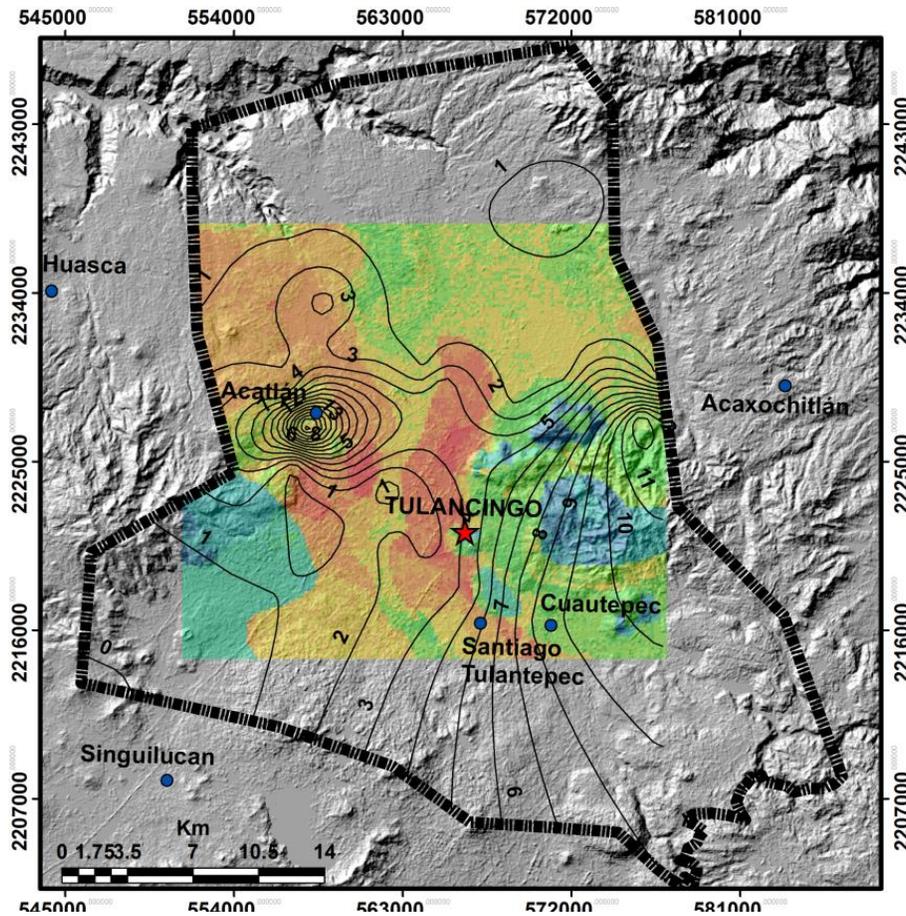


Figura 70. Mapa de NO<sub>3</sub> vs índice de vulnerabilidad y gráfica del cálculo de regresión lineal

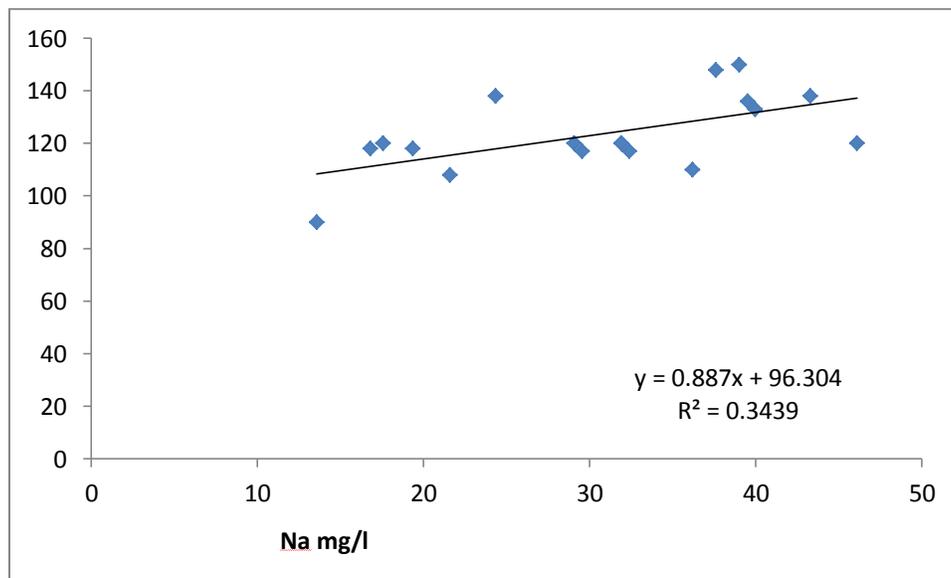
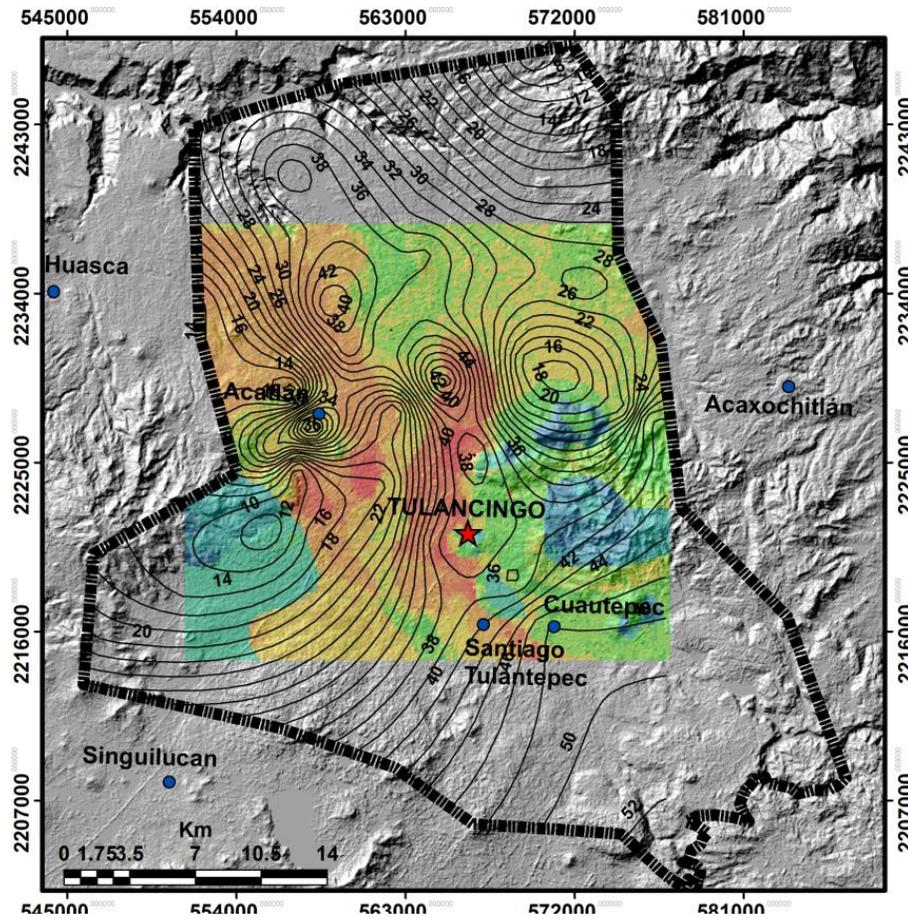


Figura 71. Mapa de Na vs índice de vulnerabilidad y gráfica del cálculo de regresión lineal

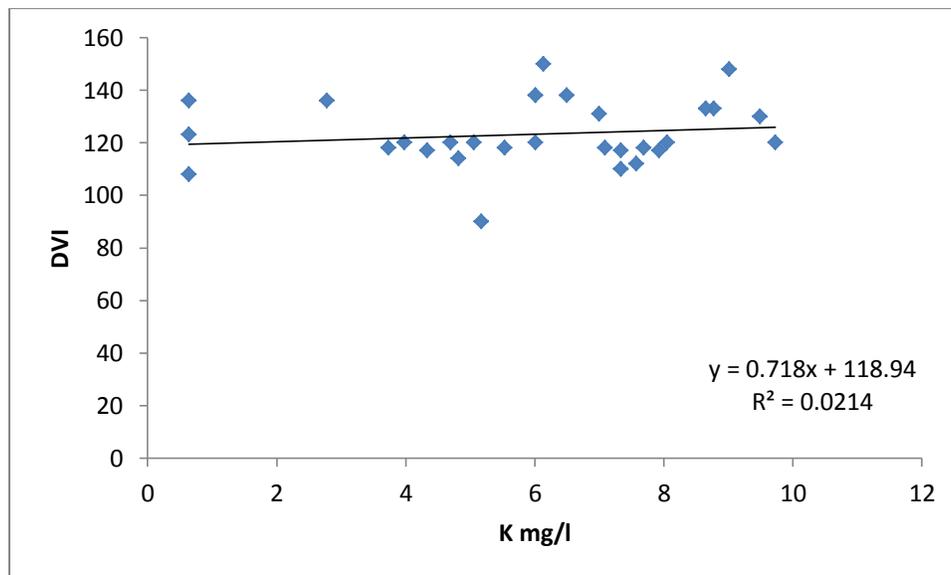
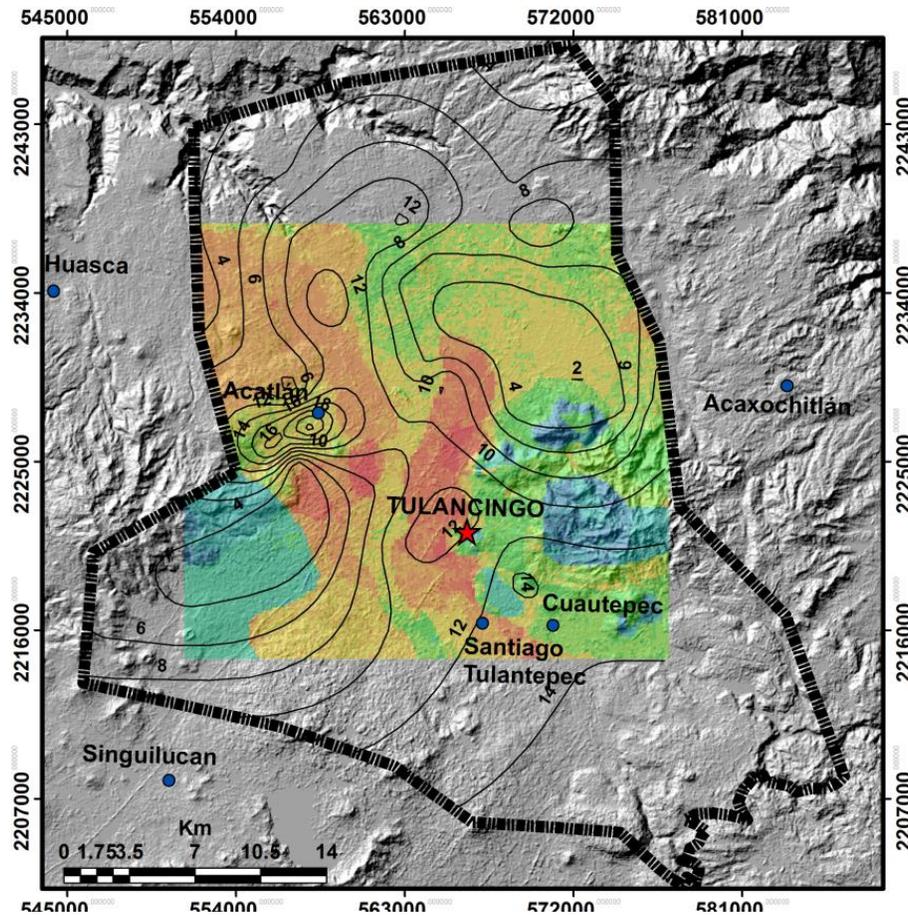


Figura 72. Mapa de K vs índice de vulnerabilidad y gráfica del cálculo de regresión lineal

## 6. Conclusiones

1. Se demuestra que el acuífero del Valle de Tulancingo tiene zonas favorables para la recarga del mismo que se localizan en Cuautepec de Hinojosa, Santiago Tulantepec y Singuilucan, representadas en el mapa de potencial de infiltración.
2. De las herramientas de interpolación de ARCGIS, la que mejor simula la data experimental fue spline de tensión ya que mostró el mejor coeficiente de correlación y la pendiente más cercana a uno en la gráfica de calibración.
3. La calidad del agua del acuífero del Valle de Tulancingo, dado que cumple los límites permisibles de la NOM-127-SSA1, es apta para consumo humano en cuanto a los valores físicos e hidrogeoquímicos. Los diagramas de Piper y Schoeller confirman el resultado reportado en 2006 de que existen dos familias de agua en el acuífero: aguas bicarbonatadas cálcicas y bicarbonatadas magnésicas, características típicas de un acuífero localizado dentro de rocas ígneas y de reciente infiltración.
4. De los datos hidrogeoquímicos se observa que:
  - a) La contaminación existe solamente en el acuífero somero y no en el profundo. Por lo que se concluye que no existe una comunicación evidente del agua entre ambos.
  - b) Los datos de los años 2013 y 2014 no presentan diferencias significativas con los reportados por Lesser en 2006.
  - c) La composición química del agua obedece principalmente al material geológico en donde se encuentra el acuífero y no a las actividades humanas
  - d) Las correlaciones altamente significativas entre los iones y los sólidos totales disueltos comprueban la composición salina de los mismos.
  - e) La correlación lineal observada entre las concentraciones de iones con la distancia a la recta virtual corrobora la dirección de flujo Sur-Norte para el agua del acuífero.

5. En el acuífero de Tulancingo las zonas más vulnerables se encuentran ubicadas al centro del valle en correspondencia con la zona urbana del municipio de Tulancingo la cual tiene el mayor índice de población y por ende la que proporcionaría el mayor impacto antropogénico al acuífero. La actividad agrícola genera una vulnerabilidad media.
  
6. Al estudiar la correlación entre índice de vulnerabilidad con las concentraciones de cada uno de los iones mayoritarios, dio como resultado que ninguno de los iones está relacionado con la vulnerabilidad.
  
7. El método DRASTIC modificado, nombrado en este trabajo como DRALUTIC es una herramienta útil para evaluar la vulnerabilidad de un acuífero ante las actividades relacionadas con el uso de suelo. Se basa en la sustitución de la granulometría por el mapa de uso de suelo y permitió identificar las zonas más vulnerables en el estudio de caso. DRALUTIC es una metodología que se puede utilizar en todos los acuíferos en donde las actividades antropogénicas ponen en peligro la calidad del agua. El grado de precisión dependerá de la cantidad y confiabilidad de los datos

## 7. Recomendaciones

1. Actualizar los mapas del potencial de infiltración cada 5 años, para obtener el balance hidrológico de la cuenca con los datos que vaya generando el COTAS, la CEAA y la CONAGUA, con el fin para tener un óptimo manejo del recurso hídrico, siempre tomando en cuenta que los valores de uso de suelo son imprescindibles para observar los cambios en la infiltración.
2. El mapa final de vulnerabilidad obtenido debe ser utilizado para tomar las medidas de mitigación necesarias para preservar la calidad del agua.
3. Los análisis microbiológicos deben ser realizados para controlar la posible contaminación debido a las aguas residuales municipales, los resumideros y la actividad ganadera.
4. Utilizar otros métodos de análisis estadísticos y de regresiones no lineales entre el Índice de Vulnerabilidad obtenido por el método DRALUTIC y los datos hidrogeoquímicos para comprobar relación entre ellos.
5. Aplicar el método DRALUTIC a otro estudio de caso con mayor actividad industrial y urbana para profundizar en la relación de la vulnerabilidad con datos hidrogeoquímicos

## 8. Bibliografía

- Al-Zabet, T. 2002. Evaluation of aquifer vulnerability to contamination potential using the DRASTIC method. *Environmental Geology*, **43**, 203-208, doi: 10.1007/s00254-002-0645-5.
- Alam, F., Umar, R., Ahmed, S. & Dar, F. 2012. A new model (DRASTIC-LU) for evaluating groundwater vulnerability in parts of central Ganga Plain, India. *Arabian Journal of Geosciences*, 1-11, doi: 10.1007/s12517-012-0796-y.
- Aller, L., Bennett, T., Lehr, J.H. & Petty, R.J. 1985. *DRASTIC- A standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic settings. U.S.* . Environmental Protection Agency.
- Anane, M., Abidi, B., Lachaal, F., Limam, A. & Jellali, S. 2013. GIS-based DRASTIC, Pesticide DRASTIC and the Susceptibility Index (SI): comparative study for evaluation of pollution potential in the Nabeul-Hammamet shallow aquifer, Tunisia. *Hydrogeology Journal*, **21**, 715-731, doi: 10.1007/s10040-013-0952-9.
- Auge, M. 2004. Vulnerabilidad de Acuíferos. Conceptos y Métodos. *In*: CONICET (ed.), Buenos Aires, Argentina.
- Awawdeh, M.M. & Jaradat, R.A. 2009. Evaluation of aquifers vulnerability to contamination in the Yarmouk River basin, Jordan, based on DRASTIC method. *Arabian Journal of Geosciences*, **3**, 273-282, doi: 10.1007/s12517-009-0074-9.
- Baalousha, H. 2006. Vulnerability assessment for the Gaza Strip, Palestine using DRASTIC. *Environmental Geology*, **50**, 405-414, doi: 10.1007/s00254-006-0219-z.
- Babiker, I.S., Mohamed, M.A., Hiyama, T. & Kato, K. 2005. A GIS-based DRASTIC model for assessing aquifer vulnerability in Kakamigahara Heights, Gifu Prefecture, central Japan. *Sci Total Environ*, **345**, 127-140, doi: 10.1016/j.scitotenv.2004.11.005.
- Callejas-Hernández, J., Prieto-García, F., Reyes-Cruz, V.E., Marmolejo-Santillán, Y. & Méndez-Marzo, M.A. 2012. Caracterización fisicoquímica de un lactosuero: potencialidad de recuperación de fósforo. *Acta Universitaria*, **22**, 11-18.
- Carbonell, A. 1993. Groundwater vulnerability assessment: predicting relative contamination potential under conditions of uncertainty. . National Academy Press: 1-204, Washington DC.
- Castany, G. 1971. Tratado práctico de las aguas subterráneas. Ed. Omega, Barcelona, España.
- Chitsazan, M. & Akhtari, Y. 2009. A GIS-based DRASTIC Model for Assessing Aquifer Vulnerability in Kherran Plain, Khuzestan, Iran. *Water Resources Management*, **23**, 1137-1155, doi: 10.1007/s11269-008-9319-8.
- Coello, X. 2002. Metodología para el análisis de la vulnerabilidad de acuíferos en medios urbanos, el caso de Quito Ecuador. . Groundwater and Human Development.
- CONAGUA. 2011. Agenda del Agua 2013. *In*: SEMARNAT-CONAGUA (ed.), Mexico, DF.
- CONAGUA. 2012. Atlas del Agua en México 2012, México, DF.
- Custodio, E. 1995. Explotación racional de las aguas subterráneas. *Acta geológica hispánica*, **30**, 21-48.
- Custodio, E. 2004. Hidrogeología Urbana: una nueva rama de la ciencia hidrogeológica. *Boletín geológico y minero*, **115**, 283-288.

- Denny, S.C., Allen, D.M. & Journeay, J.M. 2007. DRASTIC-Fm: a modified vulnerability mapping method for structurally controlled aquifers in the southern Gulf Islands, British Columbia, Canada. *Hydrogeology Journal*, **15**, 483-493, doi: 10.1007/s10040-006-0102-8.
- Fernandez-Eguiarte, A., Romero-Centeno, J. & R Lobato-Sánchez, R. 2011. Precipitación máxima anual de las acumuladas mensuales (1902-2011).
- Ferrari, L., Orozco-Esquivel, T., Manea, V. & Manea, M. 2012. The dynamic history of the Trans-Mexican Volcanic Belt and the Mexico subduction zone. *Tectonophysics*, **522**, 122-149.
- Foster, S., Hirata, R. & Andreo, B. 2013. The aquifer pollution vulnerability concept: aid or impediment in promoting groundwater protection? *Hydrogeology Journal*, **21**, 1389-1392.
- Foster, S.S.D. & Hirata, R. 1991. Determinación del riesgo de contaminación de aguas subterráneas, una metodología basada en datos existentes. CEPIS, Lima, Perú.
- Galindo-Castillo, E., Otazo-Sánchez, E.M., Reyes L, R., Arellano, S., Gordillo-Martínez, A.J. & C.A., G.-R. 2010. Balance Hídrico en el Acuífero Cuautitlán-Pachuca, México: Proyecciones para 2021. *GEOFOCUS*, 65-90.
- Gleeson, T., Wada, Y., Bierkens, M.F.P. & van Beek, L.P.H. 2012. Water balance of global aquifers revealed by groundwater footprint. *Nature*, **488**, 197-200, doi: 10.1038/nature11295.
- Guerrero-Rodríguez, W., Gómez-Aldapa, C., Castro-Rosa, J., González-Ramírez, C.A. & E.M., S.L. 2010. Caracterización fisicoquímica del lactosuero en el Valle de Tulancingo. *In: Guanajuato, U.d. (ed.) XII Congreso Nacional de Ciencia y Tecnología de Alimentos*, Guanajuato, LA321-LA328.
- Hamza, M.H., Added, A., Rodríguez, R., Abdeljaoued, S. & Ben Mammou, A. 2007. A GIS-based DRASTIC vulnerability and net recharge reassessment in an aquifer of a semi-arid region (Metline-Ras Jebel-Raf Raf aquifer, Northern Tunisia). *J Environ Manage*, **84**, 12-19, doi: S0301-4797(06)00127-7 [pii]
- 10.1016/j.jenvman.2006.04.004.
- Kasenow, M. 2006. *Aquifer Test Data: Analysis and Evaluation*. Water Resources Publication, Colorado. USA.
- Lesser-y-Asociados. 2006. *Estudio Geohidrológico en el Municipio de Tulancingo de Bravo, Hidalgo*. CEEA.
- Lesser I, J.M., Arellano Islas, S., González Posadas, D. & Lesser C., L.E. 2007. *Balance y Modelo del Acuífero de Tulancingo, HGO*.
- Lesser, y.A. 2006. Estudio Hidrogeológico del Acuífero del Valle de Tulancingo.
- Margat, J. 1968. *Vulnérabilité des nappes d'eau souterraines à la pollution. Bases de la cartographie*. BRGM . SLG HYD. Orléans, 198.
- Mimi, Z., Mahmoud, N. & Madi, M. 2012. Modified DRASTIC assessment for intrinsic vulnerability mapping of karst aquifers: a case study. *Environmental Earth Sciences*, **66**, 447-456, doi: 10.1007/s12665-011-1252-0.
- Neshat, A., Pradhan, B., Pirasteh, S. & Shafri, H.Z.M. 2013. Estimating groundwater vulnerability to pollution using a modified DRASTIC model in the Kerman agricultural area, Iran. *Environmental Earth Sciences*, doi: 10.1007/s12665-013-2690-7.
- NOM-011-CONAGUA-2015. 2015. NORMA Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015, Conservación del recurso agua-Que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales. *In: CONAGUA (ed.)*.
- NOM-015-CONAGUA-2007. 2007. NORMA Oficial Mexicana NOM-015-CONAGUA-2007, Infiltración artificial de agua a los acuíferos.- Características y especificaciones de las obras y del agua. *In: SEMARNAT (ed.)*.

- NOM-127-SSA1-1994. 1994. NORMA Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, Salud ambiental, agua para uso y consumo humano-Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización. México, DF.
- NOM-201-SSA1-2002. 2002. NORMA Oficial Mexicana NOM-201-SSA1-2002, Productos y servicios. Agua y hielo para consumo humano, envasados y a granel. Especificaciones sanitarias., México, DF.
- Oki, T. & Kanae, S. 2006. Global hydrological cycles and world water resources. *Science*, **313**, 1068-1072.
- Proyecto, N.O.M. 2015. NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-XXXX, AGUA PARA USO Y CONSUMO HUMANO. LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES DE LA CALIDAD DEL AGUA, CONTROL Y VIGILANCIA DE LOS SISTEMAS DE ABASTECIMIENTO. . *In*: Salud, S.d. (ed.).
- Ramos Leal, J. 2005a. Curso de Vulnerabilidad Acuífera e Índices de Calidad del Agua.
- Ramos Leal, J. 2005b. Informe vulnerabilida IPICYT.
- Ramos Leal, J., Tapia Silva, F. & Sandoval Montes, I. 2012. Analysis of aquifer vulnerability and water quality using SINTACS and geographic weighted regression. *Environmental Earth Sciences*, **66**, 2257-2271, doi: 10.1007/s12665-011-1447-4.
- Scanlon, B.R., Healy, R.W. & Cook, P.G. 2002. Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. *Hydrogeology Journal*, **10**, 18-39.
- SEMARNAT-SGM. 2010. *Ordenamiento Ecológico Territorial de la Región Tulancingo*. Servicio Geológico Mexicano.
- Sophocleous, M. 2010. Review: groundwater management practices, challenges, and innovations in the High Plains aquifer, USA—lessons and recommended actions. *Hydrogeology Journal*, **18**, 559-575, doi: 10.1007/s10040-009-0540-1.
- Umar, R., Ahmed, I. & Alam, F. 2009. Mapping groundwater vulnerable zones using modified DRASTIC approach of an alluvial aquifer in parts of central Ganga plain, Western Uttar Pradesh. *Journal of the Geological Society of India*, **73**, 193-201, doi: 10.1007/s12594-009-0075-z.
- Vorosmarty, C., Hoekstra, A., Bunn, S., Conway, D. & Gupta, J. 2015. Fresh water goes global. *Science*, **349**, 478-479.
- Vrba, J. & Zaporozec, A. 1994. Guidebook on mapping groundwater vulnerability. Heise.