

**DETERMINACIÓN DE LA VULNERABILIDAD DEL
ACUÍFERO REGIÓN MANZANERA – ZAPALINAMÉ
DEL ESTADO DE COAHUILA**

MIGUEL MÁRQUEZ MATEO

TESIS

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO AGRONOMO EN IRRIGACIÓN**

Universidad Autónoma Agraria



Antonio Narro

**División de Ingeniería
Buenavista, Saltillo, Coah.**

Diciembre de 2006

Tesis elaborada bajo la supervisión del comité particular de asesoría y aprobada como requisito parcial, para obtener el título de

INGENIERO AGRONOMO EN IRRIGACIÓN

COMITÉ PARTICULAR

Asesor Principal: _____
Dr. Javier de J. Cortés Bracho

Asesor: _____
Dr. Iliana I. Hernández Javalera

Asesor: _____
Ing. Arturo Monroy Nieto

Dr. Raúl Rodríguez García
Coordinador de la División de Ingeniería

Buenavista, Saltillo, Coahuila, México
Diciembre de 2006

AGRADECIMIENTOS

A Dios Nuestro Señor:

Gracias Señor por que con tu bendición, me guiaste por el camino correcto y me diste la oportunidad de demostrar que en esta vida con tu ayuda y empeño todo se puede lograr.

A la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, por darme la oportunidad de haberme recibido en su seno y haber permitido mi formación profesional instruyéndome en el difícil camino de la vida.

Al Departamento de Riego y Drenaje, y a todo el personal que ahí labora, que de una u otra forma intervinieron e hicieron posible mi formación académica, muchas gracias.

Al Dr. Javier de J. Cortés Bracho, que me permitió realizar el presente trabajo de tesis, por su gran apoyo en la realización del mismo, por compartir su experiencia y enseñanzas.

Al la Dr. Iliana Isabel Hernández Javalera, por su valiosísima contribución en la elaboración y la revisión del presente trabajo, quien sin su ayuda no hubiera podido ser y con su amplia experiencia, que hace mas completo este trabajo.

Al Ingeniero Arturo Monroy Nieto, por su colaboración desinteresada que hizo posible que el presente trabajo sea unos mas de los estudios hechos a una de las regiones del Estado de Coahuila.

DEDICATORIAS

Por su digno ejemplo de honradez, de calidad humana y sencillez, a dos personas de las cuales sin esperar nada a cambio, dan la vida por dar a sus hijos un futuro mejor. Con el presente trabajo por más modesto que sea, brindo a ellos un pequeño tributo de admiración, cariño y respeto, Con gran amor a mis padres:

Sr. Miguel Márquez López

Gracias por tu amor, ejemplo, consejos y confianza que siempre depositaste en mí., y por enseñarme de que a pesar de las dificultades que nos presenta la vida no debemos renunciar.

Sra. Claudia Mateo de Márquez

Por tu confianza, amor, ejemplo y consejos ; pero sobre todo por estar siempre a mi lado alentándome y apoyándome en los momentos más difíciles.

Gracias por darme su más valiosa herencia... Mi Educación.

A mis hermanos:

Morgan Márquez M.

Erick Márquez M.

David Márquez M.

Luís Javier Márquez M.

Melchor Angel Márquez M.

Por su cariño y apoyo incondicional.

Con amor y cariño a ti Manuela.

Por brindarme toda tu comprensión, paciencia, apoyo y estímulo, te doy las gracias por tus sabios consejos de superación y por todos los momentos de felicidad brindada. TE AMO.

A mi pequeño hijo M. Arturo.

Espero que algún día puedas sentirte orgulloso de mí, ya que has sido un aliento en mi vida para no rendirme, gracias a ti me dieron fuerzas para seguir adelante y ser alguien en la vida para poder darte lo mejor .

Fam. López Márquez:

En especial al Sr. Manuel López y Sra. Maria Márquez , por depositar en mí su confianza, por su cariño, consejos y comprensión brindada.

A todos mis Amigos:

A todos ellos que como yo han logrado dar un paso mas en el difícil camino de la vida, agradezco la amistad que me han brindado. A *Benjamín, Francisco, Gerardo, L. Alberto, Eder, Regina, verónica, Yesenia, Vicente, Rubén, Hugo, Jacobo, Vladimir, Robertoni, Mariano, Cristóbal...* y a todos los que no menciono. ¡Gracias y Suerte!

Al campesino.

A quien a pesar de su esfuerzo y labor, permanece olvidado en el campo.

INDICE DE CONTENIDO

	Página
ÍNDICE DE CUADROS	viii
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
INTRODUCCIÓN	1
OBJETIVO	2
REVISIÓN DE LITERATURA	3
DEFINICIONES DE VULNERABILIDAD POR DIFERENTES AUTORES	3
CONTAMINACIÓN DEL AGUA SUBTERRÁNEA	4
VULNERABILIDAD A LA CONTAMINACIÓN DE LOS ACUÍFEROS	5
ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD	6
LA METODOLOGÍA DRASTIC	8
DEFINICIÓN DE PARÁMETROS DE DRASTIC	9
MATERIALES Y METODOS	19
DESCRIPCIÓN DEL ACUÍFERO REGIÓN MANZANERA - ZAPALINAMÉ	19
MATERIALES USADOS EN EL MÉTODO DRASTIC	33
METODOLOGÍA	34
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	44
PROFUNDIDAD	44
RECARGA	46
ACUÍFERO	48

SUELO.....	50
TOPOGRAFÍA	52
IMPACTO EN LA ZONA NO SATURADA	54
CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA	56
ÍNDICES ENCONTRADOS	58
CONCLUSIONES	60
RECOMENDACIONES	61
RESUMEN	62
LITERATURA CITADA	63

ÍNDICE DE CUADROS

	Página
CUADRO 2.1. VALORES PARA LA PROFUNDIDAD DEL ACUÍFERO	10
CUADRO 2.2. VALORES PARA LA RECARGA NETA	11
CUADRO 2.3. VALORES PARA EL MEDIO ACUÍFERO	12
CUADRO 2.4. VALORES CORRESPONDIENTES AL TIPO DE SUELO	14
CUADRO 2.5. VALORES ASOCIADOS A LA TOPOGRAFÍA DE SUELO	15
CUADRO 2.6. VALORES PARA EL IMPACTO EN LA ZONA NO SATURADA	16
CUADRO 2.7. VALORES PARA LA CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA.....	17
CUADRO 2.8. ÍNDICES DE PONDERACIÓN	18
CUADRO 3.1. PROFUNDIDADES DE LOS NIVELES ESTÁTICOS DE LA REGIÓN.....	36
CUADRO 3.2. RECARGA NETA PARA LAS ESTACIONES METEOROLÓGICAS DE LA REGIÓN.....	39
CUADRO 3.3. CLASIFICACIÓN DE LOS RANGOS DE PERMEABILIDAD	42
CUADRO 4.1. VALORES OBTENIDOS PARA LA PROFUNDIDAD DEL ACUÍFERO	44
CUADRO 4.2. VALORES OBTENIDOS PARA LA RECARGA	46
CUADRO 4.3. VALORES OBTENIDOS PARA EL TIPO DE ACUÍFERO	48
CUADRO 4.4. VALORES OBTENIDOS PARA EL TIPO DE SUELO	50
CUADRO 4.5. VALORES OBTENIDOS PARA LA PENDIENTE	52
CUADRO 4.6. VALORES OBTENIDOS PARA EL IMPACTO EN LA ZONA NO SATURADA	54
CUADRO 4.7. VALORES OBTENIDOS PARA EL CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA	56

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
FIGURA 3.1. LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	21
FIGURA 3.2. MAPA DE PROFUNDIDAD AL NIVEL FREÁTICO	37
FIGURA 4.1. MAPA DE PROFUNDIDAD DEL NIVEL ESTÁTICO EN EL ACUÍFERO	45
FIGURA 4.2. MAPA DE RECARGA POR ESTACIÓN METEOROLÓGICA	47
FIGURA 4.3. MAPA DE TIPO DE ACUÍFERO	49
FIGURA 4.4. MAPA DE TIPO DE SUELO	51
FIGURA 4.5. MAPA DE TOPOGRAFÍA (PENDIENTE MEDIA)	53
FIGURA 4.6. MAPA DE IMPACTO EN LA ZONA NO SATURADA	55
FIGURA 4.7. MAPA DE CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA	57
FIGURA 4.8. RESULTADO DE LA UNIÓN DE MAPAS DE LOS PARÁMETRO	58
FIGURA 4.9. MAPA DE VULNERABILIDAD BASADO EN LOS ÍNDICES DRASTIC	60

I. INTRODUCCIÓN

La principal fuente de agua para muchas regiones de nuestro país está constituida por las aguas subterráneas. Sin embargo, en muchos casos, éstas son destino de los residuos de naturaleza líquida, producto de la actividad del hombre. En las zonas agrícola-ganaderas puede generarse contaminación por la aplicación de fertilizantes y/o plaguicidas en exceso y por la descomposición de residuos orgánicos (USDA - SCS, 1992).

El deterioro de los acuíferos puede ser irreversible, o su saneamiento extremadamente costoso (Foster e Hirata, 1991). Además, la percepción de la población acerca de este problema y/o la preocupación por la protección de las aguas subterráneas es escasa o nula.

En años recientes muchos países han experimentado problemas de contaminación del agua subterránea, con una amplia variedad que va desde fuentes puntuales hasta dispersas. La evaluación de la contaminación se ha expresado a través de tres conceptos: vulnerabilidad, sensibilidad y riesgo. Estos tres factores han mostrado prácticamente igual peso en las determinaciones de una clasificación final, usada para dirigir las actividades de monitoreo del agua subterránea (Foster e Hirata, 1988; Rading, 1994).

Por su parte, la vulnerabilidad del agua subterránea es la relativa facilidad con la cual un contaminante puede migrar al acuífero bajo un grupo de condiciones dadas de prácticas de manejo agrícola, características de plaguicidas y condiciones de sensibilidad del acuífero. Sin que sea necesaria una correlación entre la sensibilidad y la vulnerabilidad (USEPA, 1993).

Las evaluaciones de vulnerabilidad del agua subterránea han sido utilizadas cada vez más a partir de los años noventa como una herramienta para planear y manejar los recursos acuíferos en diferentes partes del mundo.

El Estado de Coahuila por sus condiciones de clima y vegetación se encuentra sujeto a ciertas condiciones en cuanto a extracción se refiere, la escasa precipitación pluvial trae como consecuencia el desequilibrio, de ahí que se tiene que recurrir a medidas administrativas y legales como son los decretos de veda y reglamentos.

El primer paso hacia la protección de las aguas subterráneas es tomar conciencia de la escala y de la seriedad del problema. Para ello es necesario cuantificar la propensión de los acuíferos a contaminarse, investigar cuáles son los factores que aumentan el riesgo de contaminación y, acorde a esta información, tomar medidas precautorias para evitar el problema de contaminación (Foster *et al*, 1992). Por lo expuesto anteriormente se pretende el siguiente objetivo.

1.1 Objetivo General

Determinar la vulnerabilidad a la contaminación del Acuífero Manzanera - Zapaliname perteneciente al Estado de Coahuila de Zaragoza utilizando la metodología DRASTIC.

1.1.1. Objetivos Específicos

- Elabora mapas temáticos de los parámetros de la metodología DRASTIC que expresen la influencia que ejercen en la variación de la vulnerabilidad del acuífero.
- Cuantificar las áreas con diferente grado de vulnerabilidad en el acuífero de la región Manzanera – Zapalinamé.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Definición de Vulnerabilidad por Diferentes Autores

Desde que Margat (1968) introdujera el término “vulnerabilidad del agua subterránea a la contaminación”, se han sucedido numerosas definiciones, calificaciones y metodologías sobre el mismo, en muchos casos orientados a su representación cartográfica. Hasta la fecha, sin embargo, no se ha logrado consenso sobre el alcance del término y en este sentido, existen dos grandes corrientes.

Una está representada por aquellos investigadores que consideran a la vulnerabilidad como una propiedad referida exclusivamente al medio (tipo de acuífero y cobertura, permeabilidad, profundidad, recarga, etc.), sin tener en cuenta la incidencia de las sustancias contaminantes (vulnerabilidad intrínseca) y en la otra orientación, se agrupan los que sí le otorgan, además del comportamiento del medio, trascendencia al tipo y carga del contaminante (vulnerabilidad específica).

Aquí se hace una breve referencia a las definiciones más difundidas para caracterizar a la vulnerabilidad del agua subterránea respecto a la contaminación.

Vrba y Zaporozec (1994) definen a la vulnerabilidad como “una propiedad intrínseca del sistema de agua subterránea que depende de la sensibilidad del mismo a los impactos humanos y/o naturales”. De la definición se desprende que los autores incluyen en la misma tanto al sistema subterráneo como a los contaminantes y dentro de estos a los artificiales y a los naturales.

Foster y Hirata (1991) dicen que la “vulnerabilidad del acuífero a la contaminación, representa su sensibilidad para ser adversamente afectado por una carga contaminante impuesta”. En este caso al citar a una carga contaminante impuesta, los autores parecen referirse solamente a una contaminación de origen artificial.

Custodio (1995) señala: “la vulnerabilidad a la polución expresa la incapacidad del sistema para absorber las alteraciones, tanto naturales como artificiales”. Vuelven a aparecer aquí procesos naturales y/o artificiales, como potenciales generadores de la alteración.

Carbonell (1993) define la vulnerabilidad a la contaminación, como la tendencia de los contaminantes a localizarse en el sistema de agua subterránea, luego de ser introducidos por encima del acuífero más somero. En este caso el autor considera solamente la acción de los contaminantes.

EPA (1991) hace referencia a la vulnerabilidad subterránea respecto a un plaguicida, como la facilidad con que un contaminante aplicado en la superficie, puede alcanzar al acuífero en función de las prácticas agrícolas empleadas, las características del plaguicida y la susceptibilidad hidrogeológica. Esta definición incorpora, además de las condiciones del medio, las propiedades del contaminante y las prácticas de cultivo (vulnerabilidad específica).

2.2. Contaminación del Agua Subterránea

Custodio (1983) señala que las actividades humanas producen gran cantidad de desechos y provocan perturbaciones en el ciclo hidrológico y en la circulación de las aguas. El resultado es con frecuencia una contaminación de las mismas, unas veces de forma depurable pero otras veces prácticamente irreversible. La contaminación de las aguas superficiales es muy visible y por ello es capaz de poner en movimiento acciones y remedios para evitarla. No sucede normalmente lo mismo en las aguas subterráneas, que al no ser visibles y estar su explotación muy distribuida la acción protectora llega con frecuencia tarde, y ello en el supuesto de que llegue a producirse.

Los posibles orígenes de la contaminación de los acuíferos son muy variados y es difícil recogerlos todos en forma sintética. Siguiendo en parte a Schoeller (1969),

puede efectuarse la siguiente clasificación, que en ocasiones es repetitiva pero que es útil a efectos de discusión.

- a) Contaminación por actividades domésticas.
- b) Labores agrícolas.
- c) Ganadería.
- d) Por aguas superficiales.
- e) Aguas salinas.
- f) Actividades mineras.
- g) Industriales.
- h) Nucleares.
- i) A través de pozos mal construidos o abandonados.
- j) A través de sistemas de vertido de aguas residuales.
- k) Por pozos de inyección.
- l) Vertido de basuras.
- m) A causa de acciones químicas provocadas sobre el ciclo del agua

2.3. Vulnerabilidad a la Contaminación de los Acuíferos

El término vulnerabilidad a la contaminación del acuífero es usado para representar las características intrínsecas que determinan su susceptibilidad a ser adversamente afectado por una carga contaminante que cause cambios químicos, físicos o biológicos que estén por encima de las normas de utilización del agua. Según Foster e Hirata (1988) la vulnerabilidad es primeramente una función de:

- la inaccesibilidad de la zona saturada, en sentido hidráulico, a la penetración de contaminantes;
- la capacidad de atenuación de los estratos encima de la zona saturada del acuífero, como resultado de su retención física y reacción química con los contaminantes.

Alvarado R. J, (2000), menciona que el agua subterránea, en ciertas condiciones, constituye un importante recurso de abastecimiento de agua para distintos usos. En algunas ocasiones, las características propias del sistema natural determinan que la cantidad, accesibilidad y en especial la calidad del agua subterránea se torne inadecuada para algunos o todos los usos requeridos. Por lo tanto, es importante dejar claro que el agua subterránea no siempre es sinónimo de recurso disponible. En muchas ocasiones, los recursos hídricos subterráneos suelen perder tal categoría al estar afectados por distintas actividades contaminantes que incorporan al agua subterránea una variedad de sustancias tóxicas (metales pesados, con puestos orgánicos, organismos patógenos, etc.) En general, los contaminantes entran al medio subterráneo a través de tres caminos:

- a) La disposición de líquidos o productos solubles con el agua, sobre la superficie del terreno.
- b) El entierro de sustancias en el subsuelo, por encima del nivel freático.
- c) La inyección de materiales en el subsuelo por debajo del nivel freático. A la hora de inferir el potencial de contaminación de un acuífero, es indispensable conocer las características del ambiente hidrogeológico, así como también haber definido su modelo conceptual de funcionamiento.

2.4. Estudios Técnicos realizados con Anterioridad

La empresa Estudios Geológicos y Obras Civiles (1974), realizó un estudio geohidrológico en la Región Manzanera-Zapalinamé durante el cual fueron censados 184 aprovechamientos, 169 pozos y 15 norias. Se definieron dos tipos de acuíferos, en rocas calizas que constituyen las estructuras geológicas que forman el cuerpo de las sierras y el subsuelo, y en depósitos aluviales que rellenan los valles. En la confluencia de los valles El Tunal y Los Lirios, se identificó un cono de abatimiento debido a la extracción intensiva que se estimaba en 5.82 Mm³/año. En el cañón Los

Lirios se estimó una recarga lateral del orden de 0.11 Mm³/ año. En el Valle de Jamé la salida subterránea fue mínima (0.03 Mm³/año) indicando la explotación total de su recarga. En el valle de San Antonio de las Alazanas la entrada subterránea fue similar a la salida (1.26 Mm³/año y 1.5 Mm³/año respectivamente), demostrando que la explotación era muy reducida.

La compañía Geoexploraciones y Construcciones S. A. (1983) realizó un estudio de prospección geohidrológica regional con el propósito de localizar fuentes de abastecimiento de agua a la Ciudad de Saltillo. Al sur en la zona de Cerro de En medio, Emiliano Zapata y Los Llanos se recomendaron perforaciones a 500 m hasta la cima de la Formación Taraises. En la Sierra de Arteaga en donde termina la estructura, se recomendó perforar, debido a que se encuentra aflorando la Formación Aurora. Se recomendó perforar un pozo exploratorio a 700m de profundidad en la Sierra Zapalinamé con el objetivo de la Formación Cupido. Otras zonas de interés fueron el Valle San José de los Nuncios para interceptar la salida de flujo subterráneo y la zona de falla en la región Jagüey de Ferniza.

En el estudio de geología estructural y de evaluación geohidrológica que realizó la empresa GEOIDE (1995) cubriendo casi en su totalidad la parte de la Sierra Madre Oriental conocida como “Curvatura de Monterrey”, se estimó una recarga natural de los acuíferos en rocas calizas del orden de 51 Mm³/año deducida del método de Knisel. Como posibles fuentes de abastecimiento de agua potable a la Ciudad de Saltillo, se recomendó la perforación exploratoria en la porción sur y sureste del Valle de Saltillo, así mismo se recomendó la exploración geofísica y la perforación exploratoria en el flanco sur de la estructura de Loma Larga.

La Comisión Nacional del Agua (1997), llevo a cabo trabajos de actualización geohidrológica en la zona, que permitieron determinar los parámetros hidráulicos de los acuíferos, el régimen de flujo, los volúmenes de extracción y la calidad del agua subterránea. Los resultados más importantes son una extracción de 70 Mm³/año por medio de 657 aprovechamientos, de los cuales 651 son pozos, cinco norias y una

galería filtrante. El Valle de Emiliano Zapata, específicamente en el Rancho Cerro En medio, y el Valle Huachichil, fueron establecidas como posibles fuentes adicionales de abastecimiento de agua potable a la Ciudad de Saltillo, por las características geológicas favorables que presentan los acuíferos calizos.

2.5. La Metodología DRASTIC

Uno de los métodos más empleados en la actualidad para estimar la vulnerabilidad de un acuífero a la contaminación, es el de índice DRASTIC, desarrollado por la Agencia de protección ambiental de E.E.U.U. (Aller *et al.*, 1987). Este método, es uno de los más conocidos entre modelos similares utilizados para tal fin (Auge, 2003). Es muy utilizado en los EEUU y también fue adoptado en Europa (Lobo *et al.*, 1997; Martínez *et al.*, 1998; Secunda *et al.*, 1998), Asia (Sharadghah, 2001; Thirummalaivasan *et al.* 2003) y Australia (Piscopo, 2001).

La metodología DRASTIC es un sistema paramétrico de evaluación que incluye siete características fundamentales, a las que asigna valores, y un multiplicador (peso según su importancia). Gran parte del presente trabajo consistió en la ponderación de esos siete parámetros, a saber:

D - Profundidad al acuífero (Depth to wa ter)

R - Recarga neta (Recharge)

A - Tipo de acuífero (Aquifer media)

S - Tipo de suelo (Soil media)

T - Topografía, Pendiente (Topography)

I - Impacto del tipo de zona vadosa (Impact of the Vadose Zone Media)

C - Conductividad hidráulica (Conductiv ity of the aquifer)

El sistema permite determinar un valor numérico para cada sitio hidrogeológico por medio de un modelo aditivo (de la sumatoria de los valores asignados a cada parámetro). Cada uno de los siete factores recibe un peso ponderado.

Hay un peso especial para zonas agrícolas. La vulnerabilidad puede ser determinada por la ecuación:

$$DrDw+RrRw+ArAw+SrSw+TrTw+IrIw+CrCw = \text{Contaminación potencial}$$

Donde r es el índice y w es la ponderación.

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.

Esta metodología utiliza un sistema paramétrico de evaluación que incluye siete características fundamentales a las que asigna valores numéricos entre uno y diez de acuerdo a la importancia relativa de cada una en el proceso de existencia y expresión del agua subterránea, que se escoge de acuerdo al acuífero particular de que se trate, y un multiplicador entre uno y cinco (peso ponderado según su importancia) recomendado por los autores del método para expresar generalidades propias del agua del subsuelo. Como resultado de esta evaluación se obtiene un mapa, mostrando zonas con mayor o menor sensibilidad a la contaminación.

2.6. Definición de Parámetros de DRASTIC

DRASTIC es definido como una unidad cartografiable con características hidrogeológicas comunes, debido a que el método emplea el sistema de jerarquías numéricas, a las que se les asigna un peso relativo para los diferentes parámetros que ayudan en la evaluación de la contaminación (de aquí que sea relativa) a la vulnerabilidad del agua subterránea, las cuales se aplican como parámetro de un GIS.

2.6.1. Profundidad al Acuífero (Depth to water)

Las aguas someras tienen una mayor oportunidad para que el contaminante alcance al agua subterránea que en pozos de niveles profundos. Este parámetro considera la profundidad del nivel piezométrico en el caso de un acuífero libre o del techo del acuífero para uno confinado. La vulnerabilidad disminuye con la profundidad. En su valoración pueden emplearse datos de puntos de agua, estudios hidrogeológicos y mediciones de campo. Para una obra lineal se considerarán captaciones situadas dentro de las celdas definidas o las más próximas.

Si se dispone de una serie temporal de evoluciones piezométricas conviene considerar el nivel más alto al ser éste el más desfavorable (para acuíferos libres). En el caso de un acuífero muy explotado que ha cambiado su funcionamiento hidráulico de confinado a libre, será preferible tomar la profundidad del techo del acuífero.

La metodología asigna puntajes crecientes para rangos de profundidad cada vez menores, los cuales están asociados a grados de vulnerabilidad. Esto se muestra en el cuadro siguiente.

Cuadro 2.1. Valores para la profundidad del acuífero (Aller et al. 1987)

Rango de Profundidades (m)	Clasificación Dr
0.0 – 1.5	10
1.5 – 4.6	9
4.6 – 9.1	7
9.1 – 15.2	5
15.2 – 22.9	3
22.9 – 30.5	2
>30.5	1

2.6.2. Recarga Neta (Recharge)

La recarga neta es la cantidad de agua que se percola al acuífero. Este es el principal vehículo que transporta al contaminante al agua subterránea. A mayor recarga habrá más oportunidad de que el contaminante sea transportado a l agua subterránea.

Considera la recarga anual, se puede determinar por métodos convencionales de balance y en general se puede emplear la documentación existente cuando las áreas estudiadas afectan a Unidades Hidrogeológicas o acuíferos definidos.

La recarga es el volumen de agua por unidad de área que ingresa al acuífero durante un período de tiempo, para lo cual debe atravesar la superficie y la zona no saturada. En su camino el agua arrastra consigo muchas sustancias, siendo así el principal vehículo para la lixiviación y el transporte de contaminantes líquidos y sólidos (De los Santos, 1998).

Por esto, cuanto más grande sea la recarga mayor oportunidad tendrán los contaminantes de llegar al acuífero. Además, será menor el tiempo de recorrido en la zona no saturada, sufriendo las sustancias los procesos de atenuación por un período más corto.

De esta manera, DRASTIC asigna mayores puntajes cuanto mayor es el valor de la recarga neta, como se puede ver en el cuadro 2.2.

Cuadro 2.2. Valores para la recarga neta (Aller et al. 1987)

<i>Recarga neta (mm/año)</i>	
Rango	Clasificación R_r
0 – 50	1
50 – 103	3
103 – 178	6
178 – 254	8
> 254	9

2.6.3. Tipo de acuífero (Acuifer media)

De los Santos J. (1998) menciona que el tipo de material que compone el acuífero afecta directamente al flujo dentro del mismo. A la vez, la velocidad y el camino que sigue un contaminante están gobernados por el flujo. La velocidad determina el tiempo disponible para que los contaminantes desarrollen los procesos de atenuación y el camino se relaciona con el área de material con que entra en contacto.

En un medio granular, a mayor tamaño de grano se tiene mayor permeabilidad. Por lo tanto la capacidad de atenuación es menor cuanto mayor sea la granulometría. En un medio fracturado, la vulnerabilidad es función del grado de fracturación.

Al ser este parámetro difícilmente cuantificable, DRASTIC asocia rangos de puntajes a los distintos tipos de acuífero y sugiere un puntaje típico para cada uno (Cuadro 2.3.).

Cuadro 2.3. Valores para el medio acuífero (Aller et al. 1987)

Tipo de acuífero	Rango de clasificación A_r	Valor típico A_r
Lutita masiva	1 – 3	2
Metamórfica/Ígnea	2 – 5	3
Metamórfica/Ígnea meteorizada	3 – 5	4
Till glacial	4 – 6	5
Secuencias de arenisca, caliza y lutitas	5 – 9	6
Arenisca masiva	4 – 9	6
Caliza masiva	4 – 9	6
Arena, grava y conglomerados	4 – 9	8
Basaltos	2 – 10	9
Caliza karstica	9 – 10	10

2.6.4. Tipo de suelo (Soil media)

De los Santos J. (1998) menciona que el suelo es la porción más superficial de la zona no saturada y está caracterizada por una significativa actividad biológica. Tiene mayor contenido de materiales finos (limos y arcillas) por lo que es el primero en restringir la migración de contaminantes. La mayor cantidad de materia orgánica está contenida en la primera capa y decrece con la profundidad, y es también un importante factor en la atenuación de los mismos.

Como resultado de su mayor contenido de arcilla y materia orgánica y de su población bacteriana mucho más grande, la mayoría de los procesos que protegen a las aguas subterráneas son mucho más activos en el suelo.

Dentro de los suelos, son los suelos arcillosos los que dan mayor protección al acuífero. Sin embargo, esto no es verdadero cuando se trata de arcillas expansivas que se contraen y expanden alternadamente en función de la humedad. Cuando el suelo se seca, se forman fisuras que luego se cierran al hidratarse, pero al inicio de la hidratación los contaminantes pueden moverse a través de las fisuras que aún no se cerraron.

Entonces, si las arcillas son expansivas no son una protección para el acuífero, ya que la permeabilidad secundaria creada por las fisuras de desecación hace que el mismo resulte accesible para los contaminantes.

El suelo es importante en la función de atenuación, sobre todo cuando la fuente de contaminación es difusa (aplicación de fertilizantes y pesticidas o deposición ácida). Sin embargo, el suelo es muy vulnerable en sí mismo ya que puede ser fácilmente dañado en su función de retardador y degradador de los contaminantes cuando no está en condiciones naturales. El Cuadro 2.4 muestra los valores asignados por DRASTIC a los distintos tipos de suelos.

Cuadro 2.4. Valores correspondientes al tipo de suelo (Aller et al. 1987)

<i>Naturaleza del Suelo</i>	
Tipo de Suelo	Clasificación Sr
Delgado o ausente	10
Grava	10
Arena	9
Turba	8
Agregado arcilloso o compactado	7
Arenisca margosa	6
Marga	5
Limo margoso	4
Arcilla margosa	3
Suelo orgánico	2
Arcilla no compactada y no agregada	1

2.6.5. Topografía, % de Pendiente (Topography)

El agua que llega a la superficie del suelo y no se evapora, tiene principalmente dos caminos: escurrir o infiltrarse. El comportamiento que tenga depende en gran medida de la pendiente del terreno (De los Santos, 1998).

Si la pendiente es grande, el agua escurre superficialmente llevándose consigo parte de las sustancias contaminantes. En cambio, si es pequeña, el agua tiende a encharcarse permaneciendo en la superficie lo suficiente para infiltrar y llevar con ella sustancias al acuífero.

Los valores asociados por DRASTIC, aparecen en el Cuadro 2.5.

Cuadro 2.5. Valores asociados a la topografía de suelo (Aller et al. 1987)

<i>Pendiente (%)</i>	
Rango	Clasificación T_r
0 – 2	10
2 – 6	9
6 – 12	5
12 – 18	3
>18	1

2.6.6. Impacto de la zona vadosa (Impact of the Vadose Zone Media)

La zona no saturada sobre el agua subterránea es conocida como zona vadosa. La textura de la zona vadosa determina que tiempo el contaminante viajará a través de él, la zona no saturada o vadosa influye en los procesos de atenuación en la trayectoria del agua hacia la zona saturada, ya que es la zona por encima del nivel piezométrico donde los poros del suelo no están totalmente llenos de agua y depende mucho del material del cual estén formados. Un material de forma muy compacta impide grandemente a que un manto acuífero se contamine, por otro lado si es demasiado frágil aumenta este riesgo.

Este parámetro contempla la existencia de acuíferos libres, confinados y semiconfinados al valorar el tipo de materiales existentes en la zona no saturada. Si el acuífero es libre corresponde a la propia litología del acuífero y para los otros dos casos corresponde a los materiales suprayacentes confinantes.

Al igual que con el tipo de acuífero, se asignan rangos a los distintos tipos de material y se dan valores típicos (Cuadro 2.6).

Cuadro 2.6. Valores para el impacto en la zona no saturada (Aller et al. 1987)

Tipo de Medio	Rango de clasificación I_r	Valor típico I_r
Arcilla, limo, Margas	1 – 2	1
Esquistos Pizarras	2 – 5	3
Caliza	2 – 7	6
Arenisca	4 – 8	6
Secuencias de arenisca, caliza y lutitas	4 – 8	6
Arena o grava con contenido de arcilla significativo	4 – 8	6
Metamórfica, Ígneas	2 – 8	4
Arenas y gravas	6 – 9	8
Basaltos	2 – 10	9
Caliza karstica	9 – 10	10

2.6.7. Conductividad hidráulica (Conductivity of the aquifer)

La conductividad hidráulica o permeabilidad se refiere a la capacidad de los materiales del acuífero para transmitir agua, lo cual controla el flujo y la velocidad a la que se mueven los contaminantes desde que ingresan al acuífero. Determina la cantidad de agua que percola al agua subterránea a través del acuífero. Para suelos altamente permeables el tiempo de viaje del contaminante crecerá dentro del acuífero. El tipo de acuífero y las características de la zona no saturada marcan una cierta relación con la conductividad hidráulica y esto tiene importancia porque indica la rapidez con la que se mueve el agua en el suelo.

La valoración de este parámetro es compleja si no se dispone de ensayos de bombeo que hayan determinado parámetros hidráulicos, por ello se pueden emplear los valores teóricos relativos estimados para las diferentes litologías, estableciendo rangos en función de la propia litología, número de captaciones existentes, caudal explotado y otras observaciones realizadas en el campo.

Según De Wiest (1965), las grabas gruesas limpias y bien calibradas pueden tener permeabilidades de hasta 1, 000,000 m/día aunque lo normal es no sobrepasar unos pocos miles de m/día; las arenas finas y las arenas limosas pueden bajar hasta 0.001 m/día.

Para las calizas y dolomias compactas, la permeabilidad es del orden de 10^{-3} m/día, pudiendo llegar a 1 en las mas porosas. Las dolomias compuestas pueden llegar a dar valores de hasta 10 m/día, aun que lo normal es que sea baja, quizás menos de 10^{-1} m/día, aun considerando que su porosidad sea algo elevada.

La mayoría de las rocas volcánica tienen en si permeabilidades muy bajas entre 10^{-2} y 10^{-5} m/día, incluyendo algunos materiales muy porosos.

En las areniscas, la permeabilidad disminuye muy acentuadamente al disminuir ligeramente la porosidad; puede variar frecuentemente entre 3 y 0.01 m/día aunque los valores extremos sean mucho más dispersos, pudiendo llegar a valores menores que 10^{-4} (Custodio, 1983).

Por ello, DRASTIC asocia valores de alta vulnerabilidad a conductividades altas. El Cuadro 2.7. muestra los puntajes relativos asignados.

Cuadro 2.7. Valores para la conductividad hidráulica (Aller et al. 1987)

<i>Conductividad hidráulica (m/día)</i>	
Rango	Valor C_r
0 – 4	1
4 – 12	2
12 – 28	4
28 – 41	6
41 – 82	8
>82	10

A continuación se presentan los multiplicadores de cada parámetro los cuales tienen valores entre uno y cinco (peso ponderado según su importancia) recomendado por los autores del método para expresar generalidades propias del agua del subsuelo.

Cuadro 2.8. Índices de ponderación (Aller et al. 1987)

<i>Peso atribuido a cada uno de los factores</i>		
Parámetros	Índice de ponderación (w)	Índice de ponderación por Plaguicidas
D profundidad del nivel del agua Dw	5	5
R Recarga Rw	4	4
A naturaleza del acuífero Aw	3	3
S tipo de suelo Sw	2	5
T topografía Tw	1	3
I impacto en la zona no saturada Iw	5	4
C conductividad hidráulica Cw	3	2

III. MATERIALES Y METODOS

3.1. Descripción del Acuífero Región Manzanera -Zapalinamé

3.1.1. Localización

El Acuífero Región Manzanera -Zapalinamé, se localiza en la parte sureste del Estado de Coahuila al oriente de la Ciudad de Saltillo, cuenta con una superficie aproximada de 1,463 km² que cubre una serie de valles y sierras, estrechos paralelos entre sí. El polígono que delimita al acuífero cubre casi en su totalidad al Municipio de Arteaga, Coahuila.

Al noreste limita con el Acuífero Saltillo -Ramos Arizpe, al poniente con el Acuífero Cañón de Derramadero y al oriente con el Estado de Nuevo León.

Las poblaciones más importantes dentro del área que ocupa el acuífero son: Arteaga, San Antonio de las Alazanas, Huachichil, Los Lirios, Jamé y El Tunal. La población urbana de Arteaga es de aproximadamente 7,544 habitantes.

3.1.2. Situación Administrativa del Acuífero

Distritos y unidades de riego

De acuerdo con información proporcionada por SAGAR del Estado de Coahuila, en la zona existen registradas 37 unidades de riego pertenecientes al Distrito de Riego 4 Saltillo. Estas unidades contabilizan 64 aprovechamientos de agua subterránea (58 pozos y 6 manantiales) y 744 has cultivadas. El Registro Público de Derechos de Agua de esta Gerencia Estatal, reporta 6 de estas unidades de riego con aprovechamientos regularizados con un volumen total concesionado de 2.735 Mm³/año.

Decretos de veda

El Acuífero en su gran parte se encuentra en zona de libre alumbramiento de conformidad con el párrafo V del artículo 27 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos. En su porción poniente comprende parte de la zona de veda publicada en el Diario Oficial de la Federación el jueves 7 de abril de 1979. Esta veda es de tipo rígido y su decreto correspondiente dice textualmente “Decreto por el que establece veda por tiempo indefinido para el alumbramiento de aguas subterráneas, de la zona no vedada por el diverso publicado el 7 de febrero de 1952, en el área que ocupa el Municipio de Saltillo, Coah., y se decreta de interés público la conservación de los mantos acuíferos de dicha zona”.

Zonas de disponibilidad

El Municipio de Arteaga que en gran parte es ocupado por el acuífero se clasifica con una zona de disponibilidad 5, de acuerdo a la Ley Federal de Derechos (1996).

Usuarios mayores de agua subterránea

De acuerdo con la información proporcionada por el RPEDA a la Comisión Nacional del Agua a la Gerencia Estatal en Coahuila, los usuarios mayores de agua subterránea del Acuífero Región Manzanera - Zapalinamé son: La Unidad de Riego de Usuarios de San Antonio de las Alazanas, Sociedad Frutícola Predio Las Flores, Ma. del Carmen López Sada, Ma. Eugenia López Villareal, Vikingo 90 SPR de RL, Unidad de Riego Victor M. Valdés V., Julián J. Dávila López, Javier L. Cabell o Siller, Ignacio A. González Cepeda, El Bayonero, URDERAL El Tunal, Fernando Cepeda Flores, Pedro Vega Ramos, Angélica Padilla Dávila, Unidad de Riego San Juan de los Dolores y Arturo Mendel. Cada uno de estos usuarios tienen titulado un volumen mayor que 6 500,000 m³/año y en total concentran un 30% del volumen total concesionado de un universo de 604 usuarios con aprovechamientos regularizados.

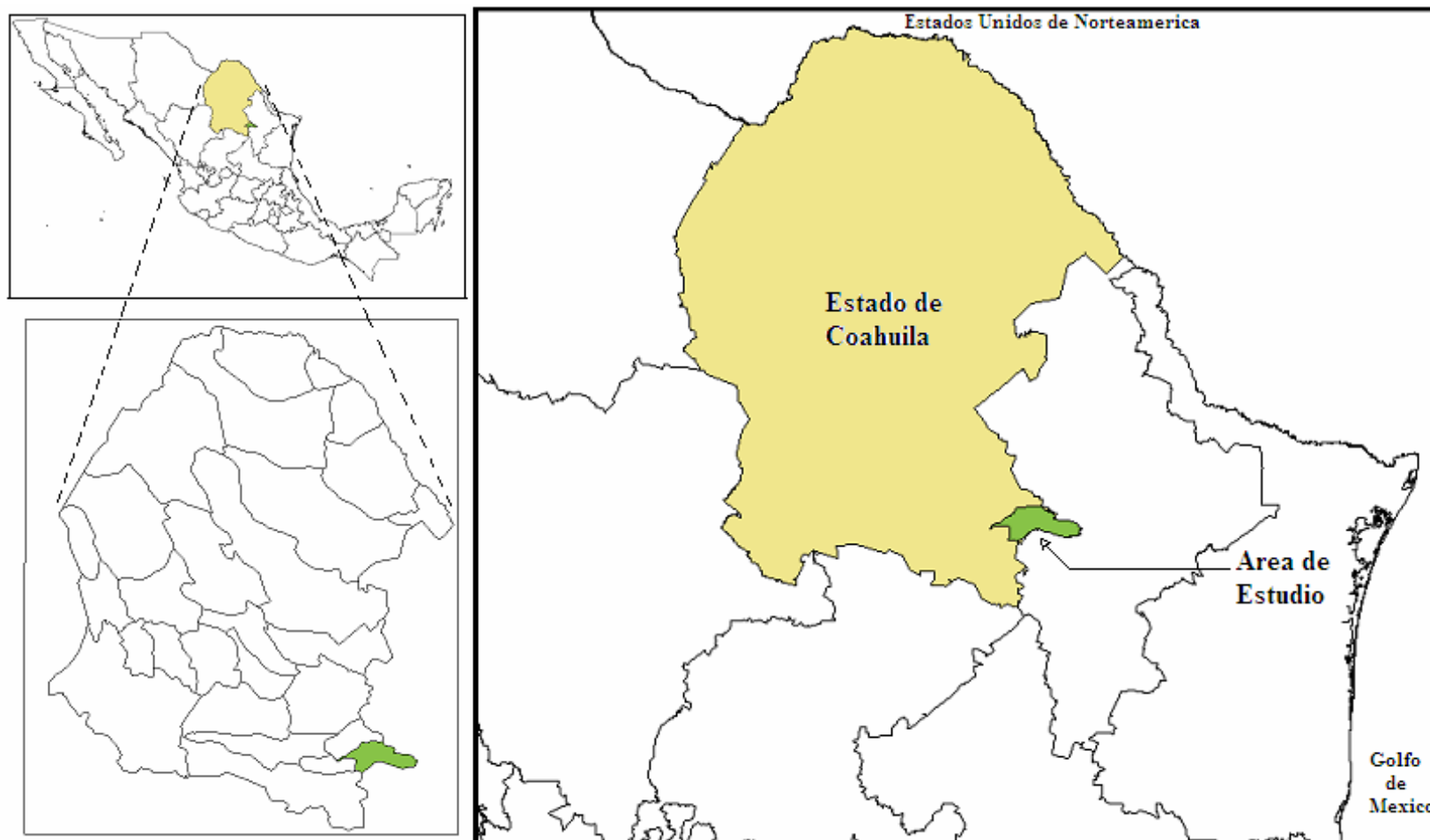


Figura 3.1. Localización del Área de Estudio. Cuadrángulo Región Manzanera Zapalinamé, Coahuila, México.

3.1.3. Fisiografía

Provincias fisiográficas

El Acuífero Región Manzanera-Zapalinamé se ubica en la provincia fisiográfica de la Sierra Madre Oriental, formando parte de la provincia estructural conocida como “Curvatura de Monterrey”.

La Sierra Madre Oriental en esta parte en donde existe un paquete de rocas sedimentarias marinas plegadas de edad entre el Jurásico Superior y Cretácico Inferior, se caracteriza por estructuras de pliegues anticlinales y sinclinales, con orientación regional Este-Oeste.

Datos climáticos de la región

Las características del clima fueron analizadas con base en la información climatológica reportada por la Comisión Nacional del Agua Gerencia Estatal de Saltillo, Coahuila para las siguientes estaciones: El Tunal, Jamé, Ciénega La Purísima, Potrero de Abrego, San Antonio de las Alazanas, Arteaga, Huachichil, Observatorio de Saltillo, Careros y Ramos Arizpe.

De acuerdo con la clasificación de climas según sistema de Köppen, modificado por E. García, en la región impera el clima semidesértico con lluvia en verano.

La temperatura promedio anual varía entre -15°C y 32°C , con un promedio anual de 15.1°C .

La precipitación promedio anual varía entre los 400 y 700 mm, las precipitaciones más altas se presentan hacia las sierras al orient e de las poblaciones El Tunal, Los Lirios, Jamé y San Antonio de las Alazanas, así como en las sierras al suroeste del Huachichil. Las más bajas se presentan hacia el Cañón La Carbonera y Valle Saltillo-Ramos Arizpe.

Los hidrogramas de la precipitación revelan varios periodos lluviosos alternando con épocas de sequías, entendiendo como años lluviosos o secos cuando la precipitación es mayor o menor que la precipitación promedio anual respectivamente. De esta manera, se identifican los siguientes periodos lluviosos: 1971 a 1973, 1975 a 1976, 1981 a 1983, 1985 a 1988, 1990 a 1992, 1994 a 1995. Los periodos de sequía son: 1969 a 1970, 1974, 1977, 1979, 1984, 1989, 1993, 1996 a 1997.

Evapotranspiración real media anual

Existen varios métodos empíricos para evaluar la evapotranspiración, de esta manera, la evapotranspiración varía entre 315 mm/año en la estación Arteaga y 544mm/año en la estación Ciénega La Purísima.

3.1.4 Hidrografía

Región hidrológica, cuenca y subcuenca

El Acuífero Región Manzanera-Zapalinamé, de acuerdo a la Carta Hidrológica de Aguas Superficiales escala 1:250,000 Hoja Monterrey G14 -7 editada por el INEGI (1981), se encuentra en la Región Hidrológica del Río Bravo (RH -24) y El Salado (RH-37). Dentro de la Cuenca del Río San Juan (B) y Cuenca Sierra Madre Oriental (A), cubriendo parte de la Subcuenca Río San Miguel (e8918) y Subcuenca San Rafael (b1979).

Los escurrimientos superficiales son intermitentes caracterizados por descargas torrenciales en época de lluvias. Los arroyos que se encuentran en las zonas de valles y cañones, se consideran vías de recarga al acuífero por estar labrados sobre los depósitos aluviales permeables que los rellenan. En este sentido, comúnmente los arroyos que descienden de las sierras desaparecen en las márgenes de los valles, como se puede observar en los valles San Antonio de las Alazanas, Emiliano Zapata y Huachichil.

Los cauces principales generalmente están orientados Este -Oeste siguiendo la orientación de los valles. El Arroyo La Carbonera y el Arroyo La Roja confluyen con el Arroyo La Boca en la parte suroriente del Valle Saltillo -Ramos Arizpe. El Arroyo Los Lirios cambia de nombre a Arroyo Los Chorros al cruzar de sur a norte la Sierra La Nieve, para posteriormente ser conocido como Arroyo Blanco, también en la porción sureste del Valle Saltillo -Ramos Arizpe. El Arroyo La Boca y el Arroyo Blanco, ambos son afluentes del Arroyo El Pueblo. Los valles San Antonio de las Alazanas-Jamé, Emiliano Zapata y Huachichil, son subcuencas hidrológicas cerradas.

Infraestructura hidráulica

Por las características propias de los escurrimientos superficiales, en la zona que ocupa el acuífero no se tiene infraestructura hidráulica construida para el almacenamiento y aprovechamiento de las aguas superficiales.

Geomorfología

Los pliegues anticlinales de la zona generalmente conforman las sierras conformadas de calizas de formaciones del Cretácico Inferior que son resistentes a la erosión.

Los valles se forman en sinclinales debido a la presencia de lutitas y limolitas de formaciones del Cretácico Superior, que son poco resistentes al intemperismo. Excepto los valles que están labrados en los núcleos de anticlinales exponiendo las lutitas y areniscas de la Formación La Casita, como sucede en los valles El Tunal, Jamé y el Carmen.

3.1.5 Geología

Estratigrafía

Sistema Jurásico

◇ Formación Zuloaga

Imlay (1938) propone formalmente el nombre de Formación Zuloaga de edad Oxfordiano probablemente Kimmeridgiano al Tithoniano, para denominar a 548 m de caliza gris oscuro de estratificación media a gruesa con nódulos de pedernal hacia la cima de esta unidad, la cual aflora fuera de la zona estudiada en el núcleo de los anticlinales Zapalinamé y Cuauhtémoc.

Esta constituida por caliza wackestone-packestone y grainstone que contienen oolitas, peletoides y nerineas, dispuestas en estratos medianos a gruesos de color gris oscuro que intemperiza a gris claro. En la porción nororiental de la zona entre los anticlinales El Chorro al norte y Potrero de Ábrego al sur, aflora en forma de ventana tectónica un gran paquete de yesos. Hacia su cima se encuentra calizas en estratos gruesos de textura packestone con oolitas, peletoides y ostrácodos.

◇ Formación La Casita

La Formación La Casita representa sedimentos de litoral de edad Kimmeridgiano - Portlandiano (Imlay, 1943). Aflora ampliamente en los núcleos de los siguientes anticlinales: Los Chorros, Jamé y San Antonio de la Alazanas.

Consiste de lutitas y areniscas calcáreas en estratos medianos y delgados con horizontes de evaporitas (yesos). Descansa franca y concordantemente sobre la Formación Zuloaga y está cubierta también concordantemente por la Formación Taraises.

Sistema Cretácico Inferior

◇ Formación Taraises

Fue definida por Imlay (1936) en el Cañón Taraises situado en la porción occidental de la Sierra de Parras en el Estado de Coahuila. Se encuentra ampliamente distribuida dentro de la zona de estudio formando parte de los flancos de los siguientes anticlinales: Arteaga-San Juan Bautista, El Chorro y San Antonio de las Alazanas.

Está compuesta esencialmente por calizas arcillosas mudstone -wackestone color gris oscuro que intemperiza a gris claro, en estratos medianos a gruesos con intercalaciones de lutitas calcáreas verdosas; comúnmente se encuentran fisuradas con fracturas rellenas de calcita.

La Formación Taraises subyace concordantemente a la Formación Cupido y por su contenido microfaunístico, se le asigna una edad que va del Berriasiano al Valanginiano, pudiendo abarcar la parte basal del Hauteriviano (GEOIDE, 1993).

◇ Formación Cupido

Imlay (1937) define como Caliza Cupido de edad Hauteriviano Superior - Barreniano, a una secuencia calcárea situada entre las formaciones Tamaulipas y La Peña. En el área de estudio presenta biofacies y litofacies de plataforma interna (laguna).

Esta constituida por estratos gruesos de calizas color gris y crema que intemperiza a gris claro con texturas packestone de bioclastos, wackestone de miliolidos y wackestone-packestone de miliolidos y lamelibranqueos. En ocasiones están recristalizadas y se le observan estratos de dolomías. También presentan estilolitas paralelas a la estratificación y fracturas selladas por calcita.

◇ Formación La Peña

Definida por Imlay (1936) en la Sierra de Parras al sureste del Estado de Coahuila con una edad del Aptiano Tardío. Se encuentra aflorando en gran parte de la zona estudiada, específicamente en los flancos de los siguientes anticlinales: Arteaga -San Juan Bautista, El Chorro, Jamé, Potrero de Ábrego, San Antonio de las Alazanas, Huachichil, Chapultepec y Cuauhtémoc.

Está constituida por calizas arcillosas de color gris que intemperiza a gris claro en estratos delgados que se interestratifican con lutitas calcáreas color rosa a pardo gris en estratos delgados y con lentes de pedernal negro. En la parte superior de esta unidad se presentan abundantes amonitas.

◇ Formación Aurora

La Caliza Aurora definida por Burrows (1935) no aflora en la zona geohidrológica evaluada, sino exclusivamente en el anticlinal de Loma Larga, situado al sureste de la Ciudad de Saltillo.

Está constituida por calizas mudstone, wackestone y packestone, en estratos de espesor variado, son de color gris oscuro que intemperiza a gris claro. La parte superior esta formada por estratos delgados de calizas con bandas de pedernal y textura mudstone a wackestone.

Sobreyace concordantemente a la Formación La Peña y está cubierta de igual manera concordantemente por la Formación Indidura. Con base en el contenido microfaunístico identificado por GEOIDE (1993), le asignaron una edad Albiano - Cenomaniano.

◇ Formación Tamaulipas Superior

Fue citada por primera vez por Stephenson (1921) cuando describe a la Caliza Tamaulipas de edad Albiano-Cenomaniano correlacionable en tiempo con la Caliza Aurora de la Plataforma y Península de Coahuila. Aflora en gran parte de la zona estudiada formando los flancos de varios anticlinales.

Consiste de caliza wackestone color gris oscuro con microfósiles planctónicos en estratos medianos a gruesos con nódulos y lentes de pedernal. Los estratos son delgados a medianos y el pedernal es más abundante en su parte superior.

Cretácico Superior

◇ Formación Agua Nueva

La Formación Agua Nueva de edad Turoniano establecida por Stephenson (1921) y correlacionable en tiempo con la Formación Indidura, aflora en numerosos sinclinales situados entre anticlinales.

En general está constituida por calizas arcillosas laminares deleznales color negro a pardo en estratos delgados con intercalaciones de lutitas calcáreas laminares color negro. En algunas partes se le observa boudinage y fracturas selladas por calcita perpendiculares a la estratificación.

◇ Formación San Felipe

La Formación San Felipe de edad Conaciano -Santoniano (Jeffreys, 1910), también aflora en zona de sinclinales sobreyaciendo transicionalmente y concordantemente a la Formación Agua Nueva.

Consiste de una alternancia de calizas arcillo-arenosas mudstone y wackestone en estratos delgados a medianos que se intercalan con lutitas deleznales y con algunos horizontes de tobas bentoníticas.

◇ Formación Parras

La Lutita Parras de edad Campaniano definida por Imlay (1936) al oriente de Parras de la Fuente, Coahuila, aflora ampliamente ocupando la parte axial de los sinclinales de la parte nororiental y suroccidental de la región estudiada.

Consiste de una secuencia homogénea y monótona de lutitas calcáreas y margas color gris oscuro que intemperiza a verde olivo. En ocasiones presenta horizontes delgados de caliza arcillosa y muestra fractura nodular, disgregándose fácilmente en forma espicular. La Lutita Parras sobreyace en forma transicional y concordante a la Formación San Felipe y subyace de la misma manera al Grupo Difunta.

◇ Grupo Difunta

El Grupo Difunta nominado por Murray et. al. (1962) con una edad Campaniano Superior-Paleoceno Inferior, ocupa gran parte de la porción norte, occidental y noroccidental de la zona geohidrológica “Región Manzanera”. Las formaciones que forman parte del Grupo Difunta en orden cronológico son: Cerro del Pueblo, Cerro Huerta, Cañón del Tule, Las Imágenes, Cerro Grande, Las Encinas y Rancho Nuevo.

Está constituido por una secuencia de areniscas de grano fino de colores que varían del café pardo a café grisáceo, alternando con lutitas arenosas calcáreas del mismo color. Se presentan en estratos delgados bien definidos y fracturados. El Grupo Difunta sobreyace en forma concordante a la Lutita Parras y está cubierto parcialmente por depósitos aluviales.

Terciario-Cuaternario

◇ Depósitos Aluviales

Se encuentran rellenando los valles en zonas de sinclinales y anticlinales erosionados en su núcleo. Los depósitos aluviales del Cuaternario, están constituidos principalmente de gravas de guijarros y bloques de calizas en una matriz arcillo-arenosa poco consolidada; también contienen arcillas y limos. Los depósitos aluviales del Terciario, están compuestos por conglomerados calizos con matriz limo-arenosa. Estos dos tipos de sedimentos aluviales, cubren discordantemente a las rocas sedimentarias marinas fracturadas subyacentes.

Geología estructural

La zona que ocupa el Acuífero Región Manzanera-Zapalinamé se encuentra en el elemento tectónico conocido como “La Curvatura de Monterrey”, que forma parte de la Sierra Madre Oriental en donde la orientación de los pliegues cambian de dirección regional sureste-noroeste a casi este-oeste a la altura de la Ciudad de Monterrey. En este elemento tectónico, las estructuras son apretadas y forman prominentes sierras alargadas que siguen la orientación de los ejes anticlinales.

Esta curvatura está limitada al norte por la falla frontal de la Sierra Madre Oriental y al poniente por el Valle de Saltillo-Ramos Arizpe y el Valle de Agua Nueva. Dentro del área de la curvatura, existen fallas inversas que afectan a pliegues anticlinales y sinclinales; entre las cuales la más importante son la Falla Escobedo -Jamé y Falla Matamoros.

Los anticlinales y sinclinales en la “Curvatura de Monterrey” tienen orientación NW-SE en la porción occidental, los cuales cambian de rumbo casi E -W en la parte oriental, formando así una curva convexa hacia el norte.

3.1.6 Hidrogeología

Tipo de acuífero

En la zona existen diferentes tipos de acuíferos identificados por la Comisión Nacional del Agua, que para el objetivo de determinar la disponibilidad de agua subterránea, se agrupan en uno sólo denominado Acuífero Región Manzanera - Zapalinamé.

Los conglomerados y brechas sedimentarias del Terciario, y los depósitos aluviales del Cuaternario, los cuales rellenan los valles y cañones de la región, forman parte uno de los acuíferos de la región. Las rocas arcillosas de las formaciones del Cretácico Superior (Parras, Agua Nueva y San Felipe) por su condición de fracturamiento en los primeros metros, también junto con los depósitos granulares de relleno forman parte de este acuífero en la zona de sinclinales (Cañón La Carbonera, Cañón Los Lirios-El Diamante, Valle Emiliano Zapata, Valle San Felipe, Valle Huachichil y Valle El Poleo). Lo mismos que la Formación la Casita en la zona de anticlinales erosionados (Valle El Carmen, Valle El Tunal, Valle Jamé y Valle San Antonio de las Alazanas).

El fracturamiento de las rocas arcillosas de las formaciones del Cretácico Superior y Formación La Casita, más a profundidad es menos desarrollado y cerrado, reduciéndose con ello la permeabilidad y por lo tanto se comportan como barrera hidráulica entre el acuífero en depósitos de relleno y los acuíferos calizos.

Las rocas calizas de las formaciones Zuloaga, Cupido, Tamaulipas Superior -Cuesta del Cura por su gran permeabilidad desarrollada por fracturamiento, planos de estratificación y diversos rasgos de disolución, constituyen otros tres tipos de acuíferos en la zona.

La Formación La Peña por su constitución de calizas arcillosas y lutitas de baja permeabilidad, separa el acuífero de la Formación Cupido del acuífero Tamaulipas Superior-Cuesta del Cura. La Formación Taraises y Formación La Casita por su

constitución de rocas arcillosas separan el acuífero de la Formación Cupido del acuífero de la Formación Zuloaga.

La ocurrencia del agua subterránea en los acuíferos calizos está controlada fundamentalmente por factores estructurales. El acuífero de la Formación Cupido se explota principalmente en la parte sur por pozos que se encuentran perforados principalmente sobre los flancos de anticlinales, los cuales en esta parte se caracterizan por capas de calizas de suave inclinación. En la parte norte el plegamiento tiende a ser más intenso en donde factores de capas verticales y pliegues recumbentes, han provocado que varios pozos hayan resultados negativos.

El acuífero de la Formación Zuloaga es explotado por unos cuantos pozos perforados sobre el Anticlinal San Antonio de las Alazanas al norte de la población del mismo nombre. Estos pozos resultaron artesianos con caudales del orden de 50 lps al atravesar el confinante de la Formación La Casita.

El acuífero en depósitos aluviales de relleno es de tipo libre, los acuíferos calizos de la Formación Cupido y formaciones Tamaulipas Superior -Cuesta del Cura son de tipo libre en las sierras conformadas por pliegues anticlinales y es de tipo confinado en los valles sinclinales. El acuífero calizo de la Formación Zuloaga es estricto confinado en la zona.

Las fronteras hidrogeológicas del Acuífero Región Manzanera -Zapalinamé se han impuesto con fines de manejo del acuífero en la parte aguas superficiales en donde teóricamente se encuentran las divisorias de aguas subterráneas. Sin embargo, no necesariamente los límites de acuíferos calizos coinciden con los límites de las cuencas hidrológicas. De esta manera, los límites laterales del acuífero son los que a continuación se describen. Al oriente, el parte-aguas superficial que separa las subcuencas San Miguel y San Rafael del Estado de Coahuila con las subcuencas Monterrey y El Pílon del Estado de Nuevo León. Al poniente el parte-aguas que pasa por los puertos Pelillos, Chapultepec y El Cedrito y que se separa las regiones hidrológicas RH-24 y RH-37. Al noroeste, los pliegues anticlinales de la Sierra

Zapalinamé. Al norte con la cresta del anticlinal de la Sierra de Arteaga y al sureste con la divisoria política entre el Estado de Coahuila y el Estado de Nuevo León.

La salida por flujo lateral que tiene el acuífero en la parte poniente del Cañón la Carbonera hacia el Acuífero Saltillo -Ramos Arizpe, constituye otro tipo de frontera del acuífero.

Recarga total media anual

La recarga total media anual, corresponde con la suma de todos volúmenes que ingresan al acuífero, en forma de recarga natural más la recarga inducida, que para el acuífero Región Manzanera -Zapalinamé es de 55.51 millones de metros cúbicos por año (Mm³/año).

3.2. Materiales Usados en el Método DRASTIC

Los materiales que se ocuparon y que fueron necesarios para la aplicación de la metodología son las que se mencionan a continuación:

- Cartografía digital de la región de estudio
- Datos de niveles estáticos de los pozos de la región
- Datos de precipitación de toda la región
- Software ArcView GIS versión 3.2
- Programa Surfer versión 8.01
- Software de diseño AutoCAD versión 2004

3.3. Metodología

Para aplicar este método se asumió que el posible contaminante tiene la misma movilidad en el medio que el agua, que se introduce por la superficie del terreno y se incorpora al agua subterránea mediante la recarga (lluvia y/o retorno de riego). Se aplica a los acuíferos libres y confinados, pero no a los semiconfinados, que deben valorarse de manera que puedan adaptarse a uno de los tipos definidos.

A cada uno de los siete parámetros considerados por este método se les asignó un valor en función de los diferentes tipos y rangos definidos en cada una de las tablas anteriores. Además, al valor de cada parámetro se aplicó un índice de ponderación entre 1-5 (tabla 2.8.) que cuantifica la importancia relativa entre ellos, y que puede modificarse en función del contaminante, en este trabajo en particular se utilizaron los índices de ponderación por contaminación en general.

El índice de vulnerabilidad obtenido es el resultado de sumar los productos de los diferentes parámetros por su índice de ponderación:

$DrDw + RrRw + ArAw + SrSw + TrTw + IrIw + CrCw = \text{Índice de vulnerabilidad}$
siendo “r” el valor obtenido para cada parámetro y “w” el índice de ponderación. El rango posible de valores del índice DRASTIC está comprendido entre 23 -226 siendo más frecuentes valores entre 50-200. Los intervalos de vulnerabilidad o riesgo se definen en función de la aplicación. En el trabajo realizado se han establecido los siguientes grados.

<100 Vulnerabilidad insignificante

101-119 Vulnerabilidad muy baja

120-139 Vulnerabilidad baja

140-159 Vulnerabilidad moderada

160-179 Vulnerabilidad alta

180-199 Vulnerabilidad muy alta

>200 Vulnerabilidad extrema

Para la obtención del mapa de Vulnerabilidad a la contaminación del acuífero Región Manzanera-Zapalinamé se siguió una metodología la cual se menciona a continuación.

3.3.1. Recolección de la Información

En la recolección de la información cartográfica para la generación de la base de datos digital. Se utilizaron 5 mapas, mapa base del Estado de Coahuila de Zaragoza, escala 1:1, 000,000 (INEGI 2002) mapa de hidrogeología escala 1:4, 000,000 (CONABIO, 2002), carta de suelo, escala 1:1000,000 (INEGI, 1981), carta topográfica escala 1:50,000, hoja G14-C33 (INEGI, 1978) y mapa de acuíferos escala 1:1000,000 (CNA, 2002).

Con la ayuda del programa ArcView GIS 3.2; de los mapas de Hidrogeología y de Edafología de la república Mexicana se hizo los recortes del estado de Coahuila de cada uno respectivamente.

3.3.2. Confección de los mapas utilizados

Teniendo los dos mapas de Hidrogeología y Edafología exclusivamente para el estado de Coahuila se recortaron cuatro mapas con el contorno de la región hidrogeológica Manzanera-Zapalinamé, se hizo tres veces el recorte del mapa de Hidrogeología de los cuales uno vendría siendo el mapa del Tipo de Acuífero, otro para el mapa de Impacto de la Zona Vadosa y el tercero para el mapa de Conductividad Hidráulica. El recorte que se hace al mapa de Edafología fue utilizado para obtener el mapa de Tipo de Suelo.

También fue necesario el recorte del mapa topográfico con el contorno de la región Manzanera-Zapalinamé. El mapa de profundidad del nivel freático se elaboro a partir de la información proporcionado por la CNA de los niveles piezométricos de los pozos de la región.

Confección del mapa de profundidad del acuífero

La profundidad al acuífero es uno de los parámetros más importantes dentro de la metodología utilizada en este trabajo. Para la obtención del mapa de Profundidad al Acuífero o Profundidad del Nivel Estático fue necesaria la información proporcionada por la CNA de los datos de niveles estáticos de los pozos de la región obtenidos en Agosto del 2004.

Cuadro 3.1. Profundidades de los niveles estáticos de la región (CNA, 2004)

Clave de Pozo	Coordenadas		Prof. Nivel Estático	Clave de Pozo	Coordenadas		Prof. Nivel Estático
	Y	X			Y	X	
850 (E-3)	25.38	-100.77	42.98	951 (I-07)	25.34	-100.58	43.42
851 (E-5)	25.38	-100.76	S/ORIF	I-08	25.34	-100.62	42.41
855 (E-10)	25.39	-100.73	37.49	890 (C-22)	25.42	-100.54	62.07
860 (E-20)	25.39	-100.71	21.72	F-07	25.43	-100.61	121.92
H-030	25.39	-100.70	21.66	F-014	25.42	-100.62	82.71
870 (H-25)	25.39	-100.68	36.59	G-001	25.43	-100.59	165.64
925 (E-30)	25.39	-100.65	83.95	892	25.43	-100.56	51.83
922 (G-42)	25.39	-100.62	NSPS	B-29	25.46	-100.66	58.44
926 (G-31)	25.39	-100.59	40.67	1035 (H-82)	25.37	-100.81	28.14
935 (F-39)	25.39	-100.58	9.48	1033 (H-86)	25.36	-100.84	79
940 (G-41)	25.39	-100.57	14.45	1031 (H-88)	25.37	-100.85	137.74
G-35	25.38	-100.53	25.16	1029 (H-91)	25.32	-100.88	SECO
417 (H-99)	25.35	-100.80	171.06	1028 (H-94)	25.31	-100.88	NSPS
E-06	25.34	-100.75	166.74	1026 (H-92)	25.31	-100.83	113.6
1021 (H-46)	25.32	-100.73	330	1025 (H-12)	25.31	-100.80	126
I-99	25.30	-100.66	91.99	H-11	25.29	-100.79	SECO
997	25.31	-100.64	28.12	1282 (H-051)	25.27	-100.79	155.95
993	25.31	-100.65	29.75	1281 (H-61)	25.26	-100.77	159.46
1012 (I-79)	25.29	-100.62	34.5	H-139	25.23	-100.78	131.4
999 (I-58)	25.31	-100.59	187.69	H-101	25.24	-100.85	NSPS
1003	25.27	-100.58	80.48	H-156	25.21	-100.83	200.75
1002 (O-006)	25.25	-100.54	92.12	D-030	25.24	-100.85	225.2
1001	25.25	-100.50	63.57	D-020	25.24	-100.85	193.05
J-002	25.25	-100.48	29.64	H-127	25.20	-100.76	147.96
J-028	25.23	-100.40	15.37	B-29	25.49	-100.64	56.85
2-14.	25.23	-100.44	5.97	G-012	25.46	-100.59	10.56
J-015	25.25	-100.41	12.77	B-54	25.46	-100.63	61.82
J-016	25.25	-100.42	13.1	B-37	25.46	-100.66	94.72
H-022	25.36	-100.72	TAP A 115M	B-40 (3-22)	25.43	-100.65	94.36
984 (H032)	25.39	-100.70	82.78	B-8	25.45	-100.85	71.72
I-17	25.37	-100.63	62.26				

A partir de las coordenadas de los pozos y la profundidad del nivel estático de los mismos se diseñó un mapa de freametria (Figura 3.2.) con la ayuda del programa SURFER 8.01; posteriormente se clasificó el mapa por zonas y se asignó el puntaje correspondiente a cada rango de profundidad indicado por la metodología DRASTIC, donde a menor profundidad, mayor es el peligro de contaminación que existe. La Figura 4.1 que se muestra en la parte de los resultados permite observar el mapa temático correspondiente.

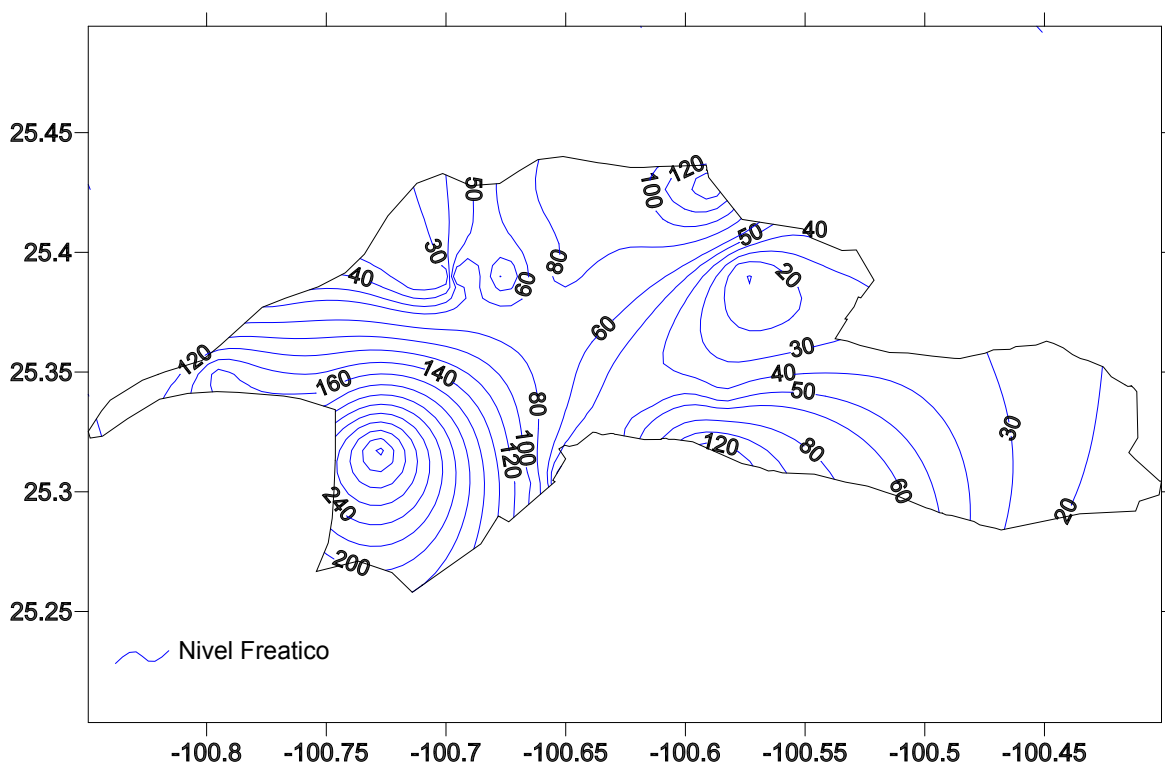


Figura 3.2. Mapa de profundidad del nivel freático

Confección del mapa de recarga

El mapa de recarga se obtuvo con la ayuda de los datos tomados de la base de datos del ERIC II elaborado por el IMTA (2000) de las precipitaciones anuales registradas por las estaciones meteorológicas de la región; además se utilizó el método Knisel para estimar la recarga natural. Knisel (1972) diseñó un método para estimar la recarga para acuíferos en rocas calizas en función de la precipitación que obedece a una función gamma doble paramétrica:

$$y = \frac{abx}{a^2}$$

Donde ***a*** es el parámetro de forma y ***b*** el de escala, representando la altura media a la cual se inicia el escurrimiento y su desviación estándar respectivamente.

Si se sustituye ***y*** por la recarga y ***x*** por la precipitación ***p***, la ecuación puede expresarse como sigue:

$$r = \frac{abp}{a^2 + p^2}$$

La evaluación de ***a*** y ***b*** depende únicamente de la forma de operar, para el presente caso se tomaron los valores propuestos por Tinajero et. al. (1986), que son 76.44 para ***a*** y 1.604 para ***b***. Tomando en cuenta lo anterior, la ecuación de ***r*** sería:

$$r(\%) = \frac{122.61p}{5843 + p^2}$$

Donde ***r*** es un porcentaje de la precipitación ***p***.

Para obtener la lámina total de recarga, se multiplican ambos miembros de la ecuación por la precipitación ***p***, por lo que:

$$R(mm) = \frac{122.61p^2}{5843 + p^2}$$

Aplicando la ecuación anterior a cada dato de precipitación registrada se obtuvo la recarga neta (Cuadro 3.2) en el área de influencia de cada estación representada por polígonos de Tisen (Figura 4.2).

Consecuentemente se asignó el puntaje correspondiente a cada valor de recarga indicado por la metodología DRASTIC.

Cuadro 3.2. Recarga neta para las estaciones meteorológicas de la región.

Est.	Nombre	Ppt. Anual (mm)	Recarga Neta (mm)
5049	SAN A. LAS ALAZANAS SMN	353.1083	117.1214
5176	JAME, ARTEAGA	399.0063	118.2694
5174	EL TUNAL ARTEAGA	349.8375	117.0230
5145	SAN JUAN DE LA V.	415.85	118.6026
5146	HUACHICHIL, ARTEAGA	621.2105	120.7812
5035	SAN A. LAS ALAZANAS DGE	492.0026	119.7202
5144	SANTA TERESA DE SOFIA	187.63	105.1568
5148	POTRERO DE ABREGO	338.0842	116.6470
5003	ARTEAGA, ARTEAGA	493.9262	119.7421

Confección del mapa de tipo de Acuífero

Para este parámetro se utilizaron los escenarios hidrogeológicos existentes en la región de estudio, asignando el número de clase apropiado para la zona según la metodología de DRASTIC.

De acuerdo con los mapas y fuentes consultados para el tipo de acuífero, el material existente va desde lutitas hasta calizas, siendo estas últimas el medio más deseable para la extracción de agua, pero en contraste son las más vulnerables a la contaminación.

Para dar una clasificación a los diferentes materiales que componen al sistema acuífero, fue necesario puntualizar a que se refieren los depósitos aluviales y lacustres (INEGI, 1989).

Aluvión (al) es un suelo formado por depósitos de materiales sueltos (gravas y arenas) provenientes de rocas preexistentes que han sido transportado por corrientes superficiales de agua. Incluyen los depósitos que ocurren en las llanuras de inundación, los valles de los ríos y las fajas de pie de monte.

Lacustre (la) es un suelo integrado por depósitos recientes del material derivado de la destrucción de rocas preexistentes por agentes químicos y climáticos que ocurren en lagos y lagunas. Generalmente están formados por arcillas y sales.

A si mismo precisar en relación las rocas sedimentarias calcáricas las características de las rocas calizas y areniscas (INEGI, 1989).

Calizas (ca): Roca química constituida por la precipitación de carbonato de calcio, se denominan calizas aquellas rocas sedimentarias en las cuales la porción carbonosa esta compuesto principalmente de mineral de calcita.

Areniscas (ar): Roca clástica de grano medio con abundantes granos de arena y limo grueso (0.05 a 2mm), constituida principalmente por minerales de cuarzo y feldespastos.

Lutitas (lu): Roca clástica de grano fino del tamaño de la arcilla (menos de 0.005mm) compuesto principalmente por minerales de arcillas.

Limonitas (lm): Roca clástica del tamaño del limo (0.05 a 0.005mm) compuesto principalmente por minerales de arcilla.

Sabiendo esta información y comparando a los distintos tipos de acuífero que sugiere DRASTIC (Cuadro 2.3.); se pudo dar una un puntaje típico para cada uno .

Confección del mapa de Suelo

Los intervalos y clases empleados en este parámetro se determinaron dependiendo de las características de cada tipo de suelo de la región. Es notable la influencia de material calcáreo en toda la región, para este parámetro fue necesario definir claramente los tipos de suelo que influyen en el acuífero y al ser contrastados con los tipos de suelo empleados en el método DRASTIC (Cuadro 2.4.); se logró dar un valor a cada uno de los 21 polígonos que forman el mapa de tipo de suelo el cual se presenta en los resultados (Figura 4.4.).

Confección del mapa de Topografía

La elaboración del mapa que representa el % de Pendiente fue obtenido de la siguiente manera: Se elaboró una malla de 5X5 km. en el programa de diseño AutoCAD 2004 el cual se importó al programa ArcView GIS 3.2; posteriormente la malla se sobrepuso al mapa topográfico, esto se hizo de manera georeferenciada, para que coincidiera la cuadrícula en el mapa con las coordenadas. En el acuífero se obtuvieron 59 nodos, los cuales se evaluaron calculando la pendiente promedio en cada uno de los puntos por medio de la siguiente formula:

$$(\%) \text{Pendiente} = \frac{\Delta h}{DH} * 100$$

De donde: Δh = Diferencia de cotas

DH = Distancia Horizontal

El paso siguiente fue interpolar los datos, teniendo las coordenadas de cada punto y su pendiente promedio, se realizó un mapa nuevamente con la ayuda del programa SURFER 8.01 el cual se exportó al ArcView 3.2.; se clasificó el mapa por zonas y se asignó el puntaje correspondiente a cada rango de pendiente indicado por la metodología DRASTIC (Cuadro 2.5.).

Confección del mapa de Conductividad hidráulica

La obtención del mapa para este parámetro tan importante fue un poco complicado ya que los conceptos de elevada, buena, baja permeabilidad que se utiliza en la cartografía de hidrogeología son con frecuencia origen de confusión ya que son subjetivos y dependen mucho del campo de trabajo del que los expresa.

Para dar una valoración a las clases de permeabilidad que se mencionan en la cartografía fue preciso conocer los rangos a los que hace referencia cada clasificación y sabiendo esto poder contrastar con los rangos de permeabilidad que el método de DRASTIC utiliza y poder dar un puntaje.

Cuadro 3.3. Clasificación de los rangos de permeabilidad (Custodio, 1983)

Permeabilidad Según Hazen (cm/seg)	m/día	Clase	Clase por Rango	Rango de permeabilidad (m/día)	Clasificación según Cartografía
3	2,592	Muy Alta	Muy Alta	604.8 – 2,592	Muy Alta
0.7	604.8	Muy Alta			
0.1	86.4	Alta	Alta	86.4 – 604.8	Alta
0.05	43.2	Media	Media	43.2 – 86.4	Media a Alta
9×10^{-3}	7.776	Pequeña	Pequeña	4.32 – 43.2	Media
5×10^{-3}	4.32	Pequeña			
2×10^{-3}	1.728	Muy pequeña	Muy pequeña	0.6048 – 4.32	Baja a Media
7×10^{-4}	0.6048	Muy pequeña			
7×10^{-5}	0.06048	Prácticamente Impermeable	Prácticamente Impermeable	0.00864 – 0.6048	Baja
1×10^{-5}	0.00864	Prácticamente Impermeable			
$< 10^{-5}$	< 0.00864	Prácticamente Impermeable	Prácticamente Impermeable	< 0.00864	Muy Baja
$\ll 10^{-5}$	$\ll 0.00864$	Prácticamente Impermeable			

Confección del mapa de Impacto en la zona no saturada

Al igual que para la elaboración del mapa del tipo de acuífero, para este parámetro se tuvieron que utilizar los escenarios hidrogeológicos existentes, asignando el número de clase apropiado para la zona según la metodología de DRASTIC.

3.3.3. Confección del mapa de Vulnerabilidad

Para la elaboración del mapa definitivo y determinar el índice de vulnerabilidad se aplico la ecuación presentada anteriormente:

$$D_{r_w} + R_{r_w} + A_{r_w} + S_{r_w} + T_{r_w} + I_{r_w} + C_{r_w} = \text{Contaminación Potencial}$$

Donde:

D = Profundidad

R = Recarga

A = Acuífero

S = Suelo

T = Topografía

I = Impacto en la zona no saturada

C = Conductividad hidráulica

r = Puntaje

w = peso de ponderación

Esta formula se aplicó secuencialmente a los mapas con la ayuda del programa ArcView GIS 3.2, donde se fueron sumando o uniendo mapa por mapa; primero se unieron dos, el resultado de la unión de esa dos capas o mapas se le agregó la siguiente y así sucesivamente hasta unir los siete mapas. En la (Figura 4.8) podemos observar el mapa temático obtenido de la suma de los siete mapas en el cual cada polígono posee un determinado valor; posteriormente se tuvo que clasificar el mapa por zonas de acuerdo a los rangos de vulnerabilidad establecidos previamente.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Profundidad

Para el área de estudio se presentan los datos de las profundidades de nivel estático los cuales no están muy diferenciados, esto no permite definir con claridad las condiciones para la región. En la mayor parte de esta región, aproximadamente en el 82.47 por ciento, el manto acuífero se encuentra arriba de los 30 m (Figura 4.1). Las profundidades menores de 30 m ocupan un área mínima del acuífero con solamente el 17.53 por ciento.

Los valores de profundidad obtenidos se describen en el cuadro 4.1, en el cual se obtuvieron 9 polígonos o áreas de influencia, mientras la profundidad del nivel estático indica que el manto acuífero es muy profundo es menos vulnerable.

Cuadro 4.1. Valores obtenidos para la profundidad del acuífero

Rango de Profundidad (m)	Clasificación Dr	Ponderación Dw	Valor (Dr.Dw)
> 30.5	1	5	5
22.9 - 30.5	2	5	10
22.9 - 30.5	2	5	10
22.9 - 30.5	2	5	10
15.2 - 22.9	3	5	15
15.2 - 22.9	3	5	15
15.2 - 22.9	3	5	15
15.2 - 22.9	3	5	15
9.1 - 15.2	5	5	25

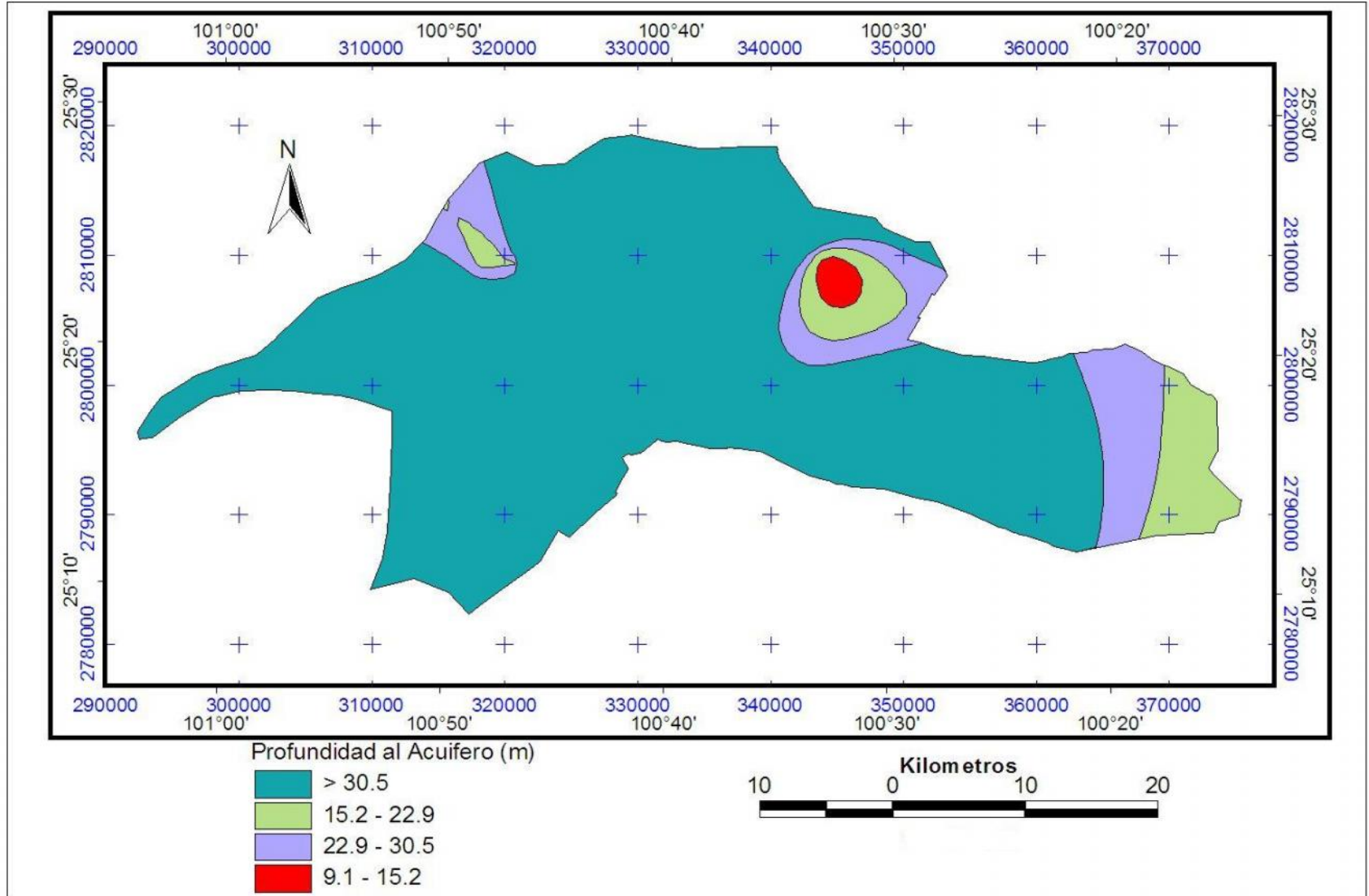


Figura 4.1. Mapa de profundidad del nivel estático en el acuífero

4.2. Recarga

La precipitación pluvial es un factor importante para que se de la recarga, debido a que la precipitación es muy indistinta en toda la región; es decir, prácticamente sólo se obtuvo una categoría para la recarga neta, ya que todas las tasas de recarga en la región de estudio son menores a 120 mm, el valor fue de 24 para todo el acuífero. El cuadro 4.2 muestra los resultados.

Cuadro 4.2. Valores obtenidos para la recarga.

Nombre_Est	Recarga Neta	Clasificación Rr	Ponderación Rw	Valor
SAN A. LAS ALAZANAS SMN	117.1214	6	4	24
JAME, ARTEAGA	118.2694	6	4	24
EL TUNAL ARTEAGA	117.0230	6	4	24
SAN JUAN DE LA V.	118.6026	6	4	24
HUACHICHIL, ARTEAGA	120.7812	6	4	24
SAN A. LAS ALAZANAS DGE	119.7202	6	4	24
SANTA TERESA DE SOFIA	105.1568	6	4	24
POTRERO DE ABREGO	116.6470	6	4	24
ARTEAGA, ARTEAGA	119.7421	6	4	24

La figura 4.2 muestra las diferentes recargas que se obtuvieron para cada estación meteorológica, pero debido a que la mayoría de los valores no sobrepasan los 120mm esto trae como consecuencia que todos caigan en una misma clasificación y proporcionen un solo valor para el parámetro de recarga.

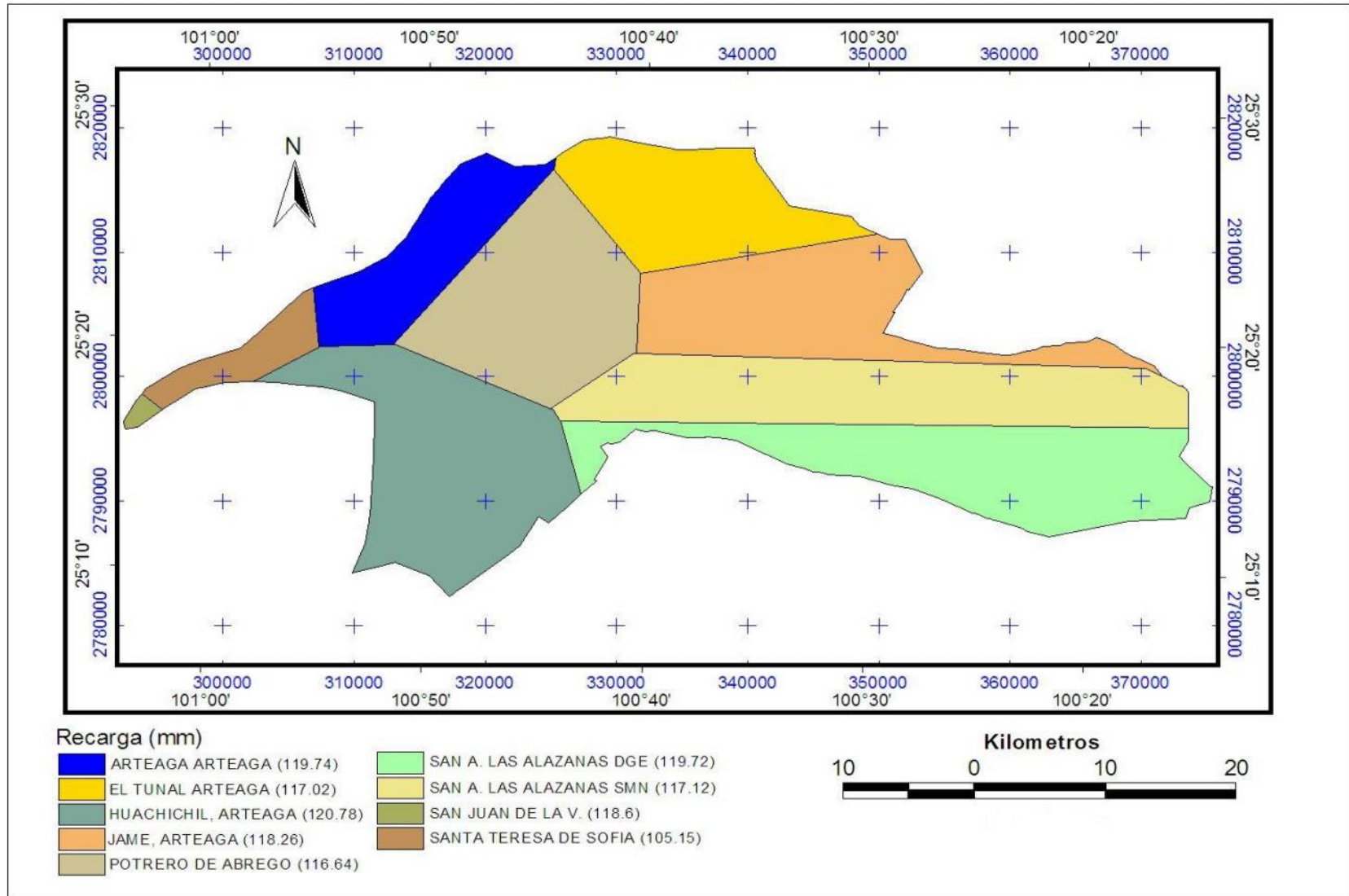


Figura 4.2. Mapa de recarga por estación meteorológica

4.3. Acuífero

De acuerdo con los mapas consultados para el tipo de acuífero, se reportan diferencias en las características de toda la región, en la cual se obtuvieron 8 polígonos o áreas, predominando las siguientes clasificaciones (Cuadro 4.3).

Cuadro 4.3. Valores obtenidos para el tipo de acuífero.

Descripción	Rango	Clasificación Ar	Ponderación Aw	Valor
Pleistoceno y reciente. Terrazas marinas, gravas, arenas y limos. Depósitos aluviales y lacustres. permeabilidad media a alta (generalizada)	4-9	8	3	24
Pleistoceno y reciente. Terrazas marinas, gravas, arenas y limos. Depósitos aluviales y lacustres. permeabilidad media a alta (generalizada)	4-9	8	3	24
Pleistoceno y reciente. Terrazas marinas, gravas, arenas y limos. Depósitos aluviales y lacustres. permeabilidad media a alta (generalizada)	4-9	8	3	24
Cretácico medio e inferior. Terciario (península de Yucatán). Rocas sedimentarias marinas predominantemente calcáreas (calizas y areniscas). Permeabilidad alta (localizada).	5-9	6	3	18
Cretácico medio e inferior. Terciario (península de Yucatán). Rocas sedimentarias marinas predominantemente calcáreas (calizas y areniscas). Permeabilidad alta (localizada).	5-9	6	3	18
Cretácico medio e inferior. Terciario (península de Yucatán). Rocas sedimentarias marinas predominantemente calcáreas (calizas y areniscas). Permeabilidad alta (localizada).	5-9	6	3	18
Jurasico lutitas, limolitas, areniscas y calizas limo arcillosas. Permeabilidad baja a media (localizada).	5-9	6	3	18
Jurasico lutitas, limolitas, areniscas y calizas limo arcillosas. Permeabilidad baja a media (localizada).	5-9	6	3	18

En la figura 4.3 se muestran los materiales y su época de formación que presentan cada tipo de acuífero, en la cual el cretácico representa el 75.62 por ciento del total de la superficie, el jurasico representa el 1.69 por ciento y el pleistoceno representa el 22.68 por ciento de la superficie total de la región.

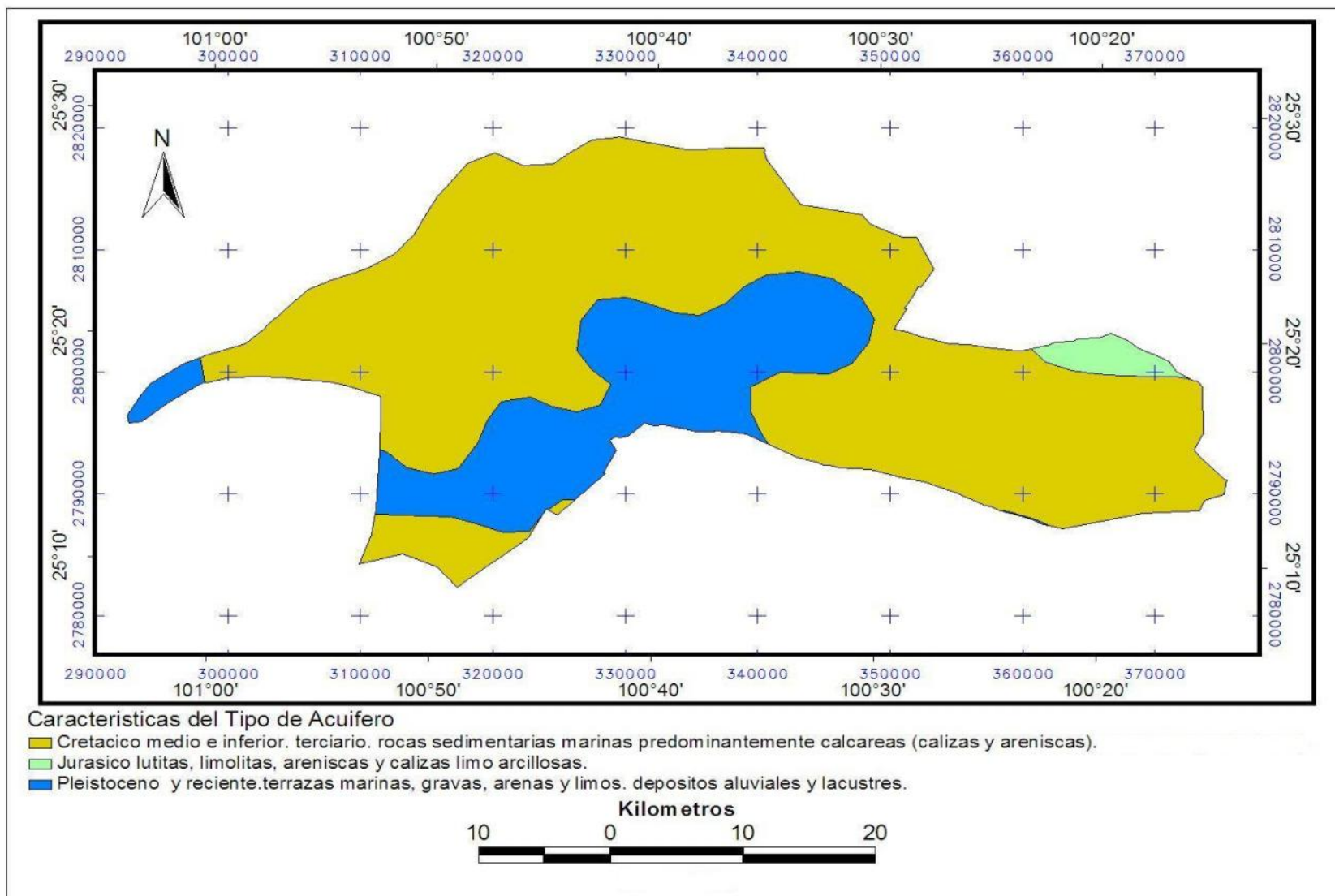


Figura 4.3. Mapa de tipo de acuífero.

4.4. Suelo

Los valores obtenidos para este parámetro fueron de cuatro, 18 y 20 como se muestra en el cuadro 4.4. La figura 4.4, muestra los diferentes tipos de suelo que existe en la región, donde el 75.75 por ciento de la superficie esta constituida por suelos de Litosol, se distinguen por tener una profundidad menor de 10 cm y pueden ser fértiles o infértiles, arenosos o arcillosos; el 10.75 por ciento esta constituido por suelos Feozem calcáricos, los cuales se distinguen por su capa superficial oscura, presentan cal en todos sus horizontes, son los Feozem más fértiles en la agricultura; y el resto de la región esta constituido por los demás tipos de suelo.

Cuadro 4.4. Valores obtenidos para el tipo de suelo.

Clave	Descripción	Clasificación Sr	Ponderación Sw	Valor
I	LITOSOL	10	2	20
I	LITOSOL	10	2	20
Xh	XEROSOL HAPLICO	10	2	20
Hc	FEZEM CALCARICO	2	2	4
Xk	XEROSOL CALCICO	9	2	18
Xk	XEROSOL CALCICO	9	2	18
Xk	XEROSOL CALCICO	9	2	18
Hc	FEZEM CALCARICO	2	2	4
Xh	XEROSOL HAPLICO	10	2	20
Rc	REGOSOL CALCARICO	10	2	20
Hc	FEZEM CALCARICO	2	2	4
Kh	CASTAÑOSEM HAPLICO	10	2	20
Kh	CASTAÑOSEM HAPLICO	10	2	20
I	LITOSOL	10	2	20
Hc	FEZEM CALCARICO	2	2	4
Xk	XEROSOL CALCICO	9	2	18
Hc	FEZEM CALCARICO	2	2	4
Hc	FEZEM CALCARICO	2	2	4
Hc	FEZEM CALCARICO	2	2	4
Xh	XEROSOL HAPLICO	10	2	20
Xh	XEROSOL HAPLICO	10	2	20

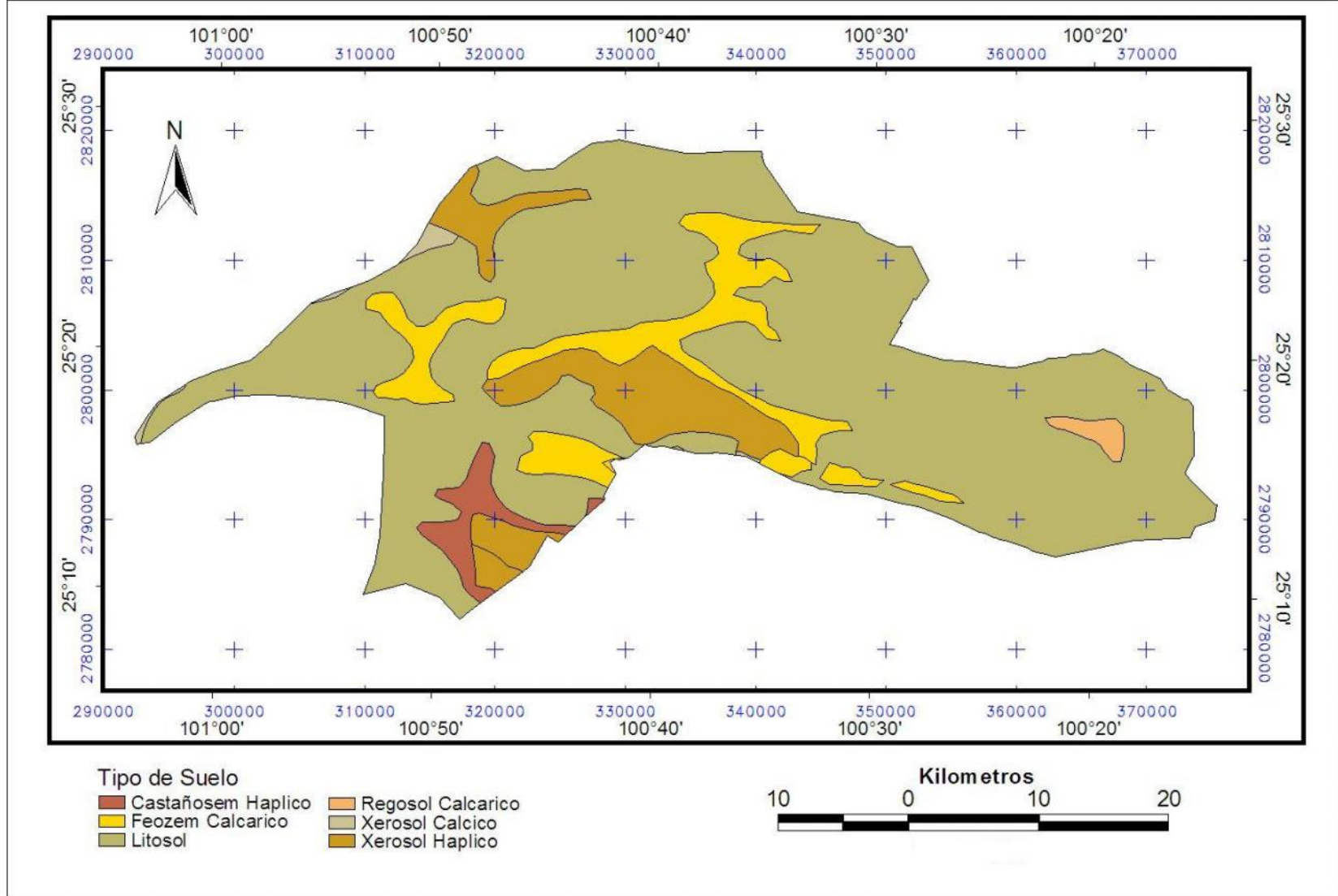


Figura 4.4. Mapa de tipo de suelo

4.5. Topografía

El cuadro 4.5 muestra los valores obtenidos los cuales fueron diez, nueve, cinco, tres y uno; esto de acuerdo a la clasificación de cada área con respecto al rango de pendientes que predomina.

En la figura 4.5, podemos observar que en el 47.78 por ciento de la superficie total de la región predomina el rango de 12 a 18 por ciento de pendiente; en el 25 por ciento de la superficie predomina el rango de seis a 12 por ciento, ubicados tanto en el norte como en el sur de la región; y las demás pendientes ocupan áreas menores que se reparten el 27.22 por ciento de la superficie, ubicados tanto en el centro, este y oeste.

Cuadro 4.5. Valores obtenidos para la pendiente.

Rango de Pendiente (%)	Clasificación T_r	Ponderación T_w	Valor
6 – 12	5	1	5
6 – 12	5	1	5
12 – 18	3	1	3
12 – 18	3	1	3
12 – 18	3	1	3
> 18	1	1	1
> 18	1	1	1
> 18	1	1	1
0 – 2	10	1	10
0 – 2	10	1	10
0 – 2	10	1	10
0 – 2	10	1	10
0 – 2	10	1	10
2 – 6	9	1	9
2 – 6	9	1	9
2 – 6	9	1	9
2 – 6	9	1	9
2 – 6	9	1	9

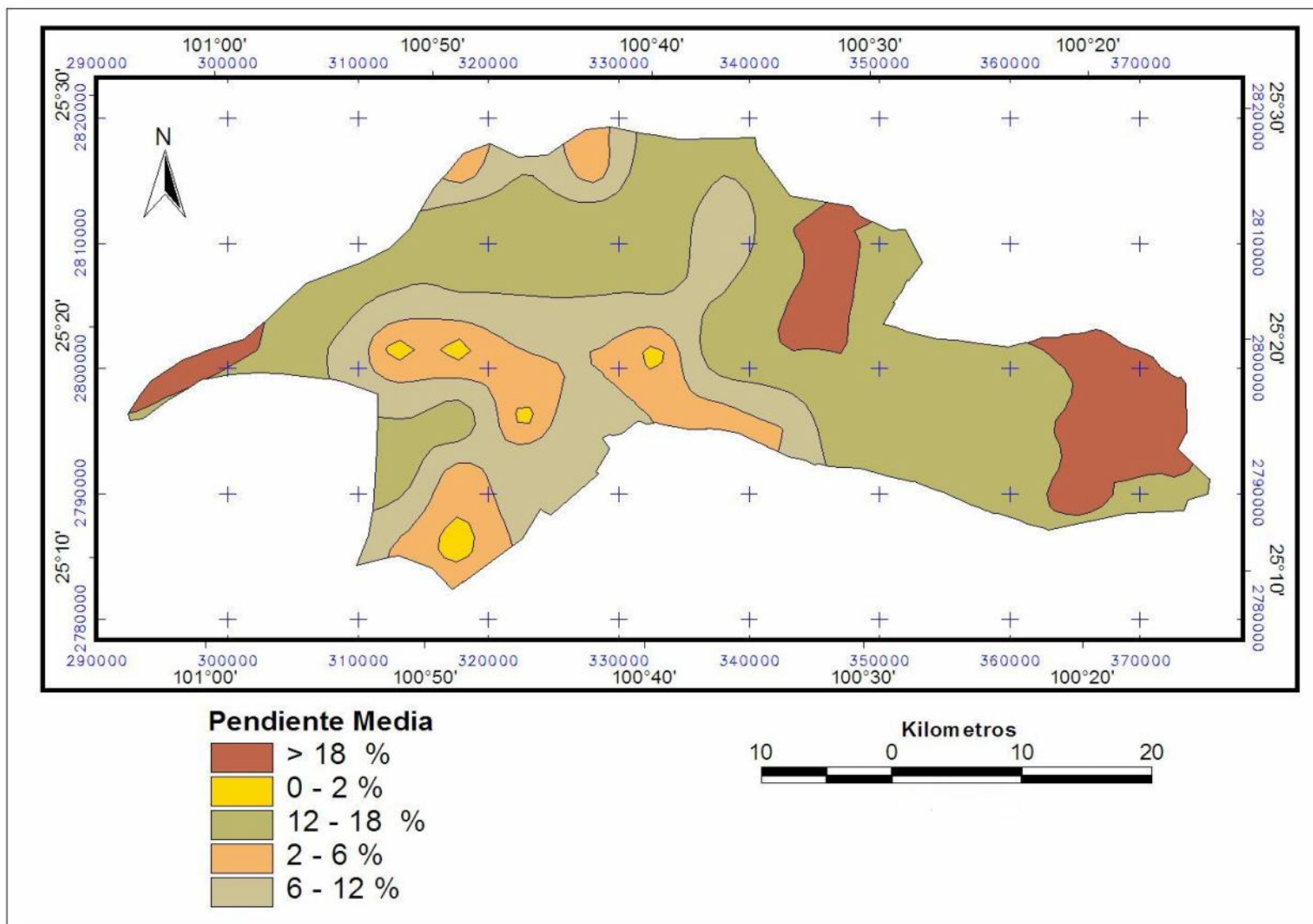


Figura 4.5. Mapa de topografía (Pendiente media).

4.6. Impacto en la Zona no Saturada

La zona no saturada al igual que la profundidad del acuífero y la recarga es de los parámetros más importantes denominados así por los autores (Aller et al. 1987) de DRASTIC. Un material de forma muy compacta impide grandemente a que un manto acuífero se contamine, por otro lado si es demasiado frágil aumenta este riesgo. El cuadro 4.6 muestra los valores obtenidos con respecto a la clasificación dada por la metodología.

Cuadro 4.6. Valores obtenidos para el Impacto en la zona no saturada.

Descripción	Rango	Clasificación I _r	Ponderación I _w	Valor
Pleistoceno y reciente. Terrazas marinas, gravas, arenas y limos. Depósitos aluviales y lacustres. permeabilidad media a alta (generalizada)	6 – 9	8	5	40
Pleistoceno y reciente. Terrazas marinas, gravas, arenas y limos. Depósitos aluviales y lacustres. permeabilidad media a alta (generalizada)	6 – 9	8	5	40
Pleistoceno y reciente. Terrazas marinas, gravas, arenas y limos. Depósitos aluviales y lacustres. permeabilidad media a alta (generalizada)	6 – 9	8	5	40
Cretácico medio e inferior, terciario. Rocas sedimentarias marinas predominantemente calcáreas (calizas y areniscas). Permeabilidad alta (localizada).	4 – 8	6	5	30
Cretácico medio e inferior, terciario. Rocas sedimentarias marinas predominantemente calcáreas (calizas y areniscas). Permeabilidad alta (localizada).	4 – 8	6	5	30
Cretácico medio e inferior, terciario. Rocas sedimentarias marinas predominantemente calcáreas (calizas y areniscas). Permeabilidad alta (localizada).	4 – 8	6	5	30
Jurásico lutitas, limolitas, areniscas y calizas limo arcillosas. Permeabilidad baja a media (localizada).	4 – 8	6	5	30
Jurásico lutitas, limolitas, areniscas y calizas limo arcillosas. Permeabilidad baja a media (localizada).	4 – 8	6	5	30

En la figura 4.6 se muestran las diferentes características que presenta la zona no saturada, en la cual el cretácico representa el 75.62 por ciento de la superficie, el jurásico representa el 1.69 por ciento y el pleistoceno representa el 22.68 por ciento de la superficie total de la región.

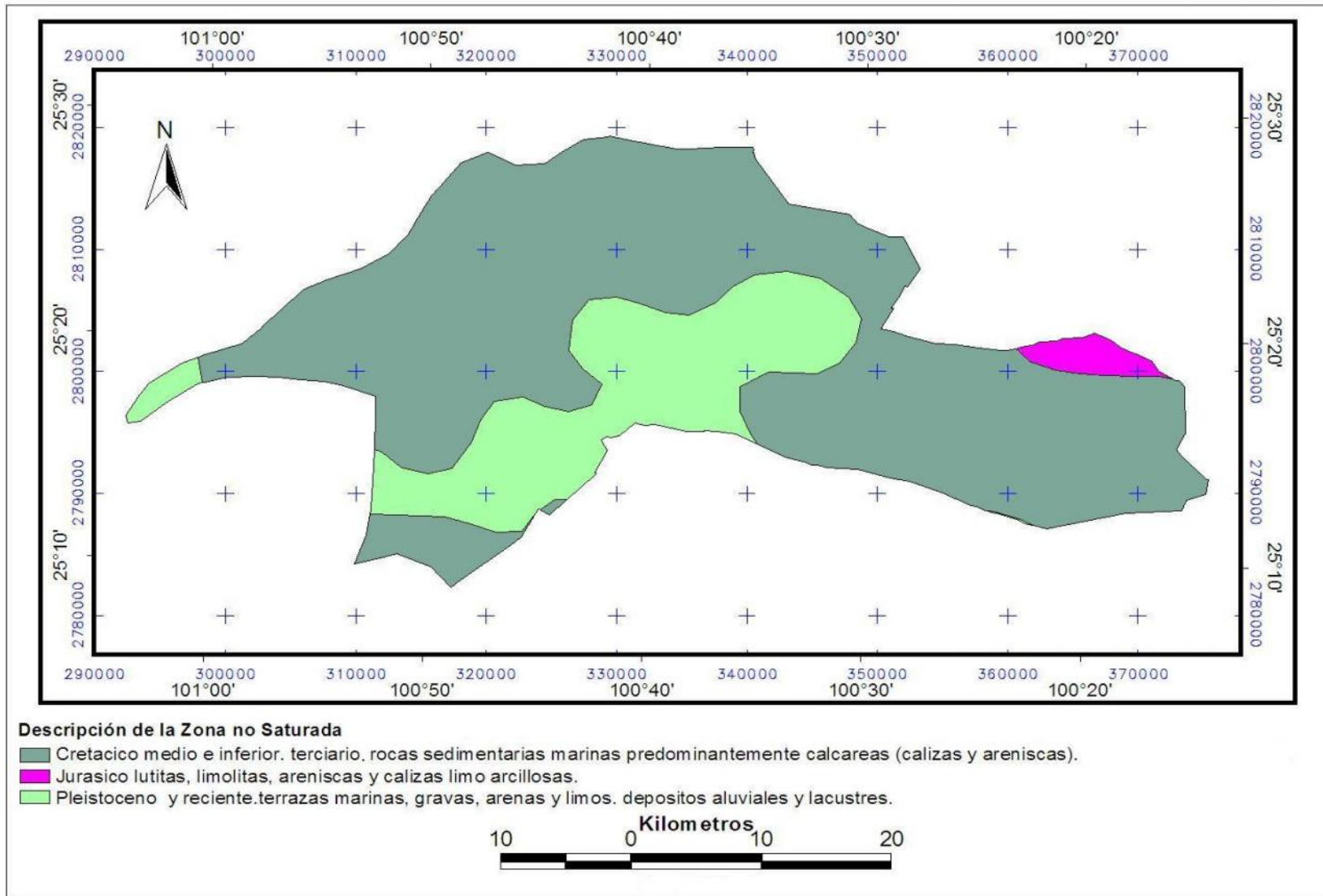


Figura 4.6. Mapa de impacto en la zona no saturada.

4.7. Conductividad Hidráulica

La valoración de este parámetro es complejo si no se dispone de información confiable y contundente, por ello se pueden emplear los valores teóricos relativos estimados para las diferentes litologías, estableciendo rangos en función de la propia litología. El cuadro 4.7 muestra los valores asociados de acuerdo a la clasificación hecha por la metodología con respecto a los valores de conductividad hidráulica. En la figura 4.6 se muestran las diferentes áreas donde la permeabilidad alta representa el 75.62 por ciento de la superficie, la permeabilidad baja a media representa el 1.69 por ciento y la permeabilidad media a alta representa el 22.68 por ciento de la superficie total de la región.

Cuadro 4.7. Valores obtenidos para la conductividad hidráulica.

Descripción	Clasificación Cr	Ponderación Cw	Valor
Pleistoceno y reciente, terrazas marinas, gravas, arenas y limos. Depósitos aluviales y lacustres. permeabilidad media a alta (generalizada)	8	3	24
Pleistoceno y reciente, terrazas marinas, gravas, arenas y limos. Depósitos aluviales y lacustres. permeabilidad media a alta (generalizada)	8	3	24
Pleistoceno y reciente, terrazas marinas, gravas, arenas y limos. Depósitos aluviales y lacustres. permeabilidad media a alta (generalizada)	8	3	24
Cretácico medio e inferior, Terciario (península de Yucatán). Rocas sedimentarias marinas predominantemente calcáreas (calizas y areniscas). Permeabilidad alta (localizada).	10	3	30
Cretácico medio e inferior, Terciario (península de Yucatán). Rocas sedimentarias marinas predominantemente calcáreas (calizas y areniscas). Permeabilidad alta (localizada).	10	3	30
Cretácico medio e inferior, Terciario (península de Yucatán). Rocas sedimentarias marinas predominantemente calcáreas (calizas y areniscas). Permeabilidad alta (localizada).	10	3	30
Jurasico lutitas, limolitas, areniscas y calizas limo arcillosas. Permeabilidad baja a media (localizada).	1	3	3
Jurasico lutitas, limolitas, areniscas y calizas limo arcillosas. Permeabilidad baja a media (localizada).	1	3	3

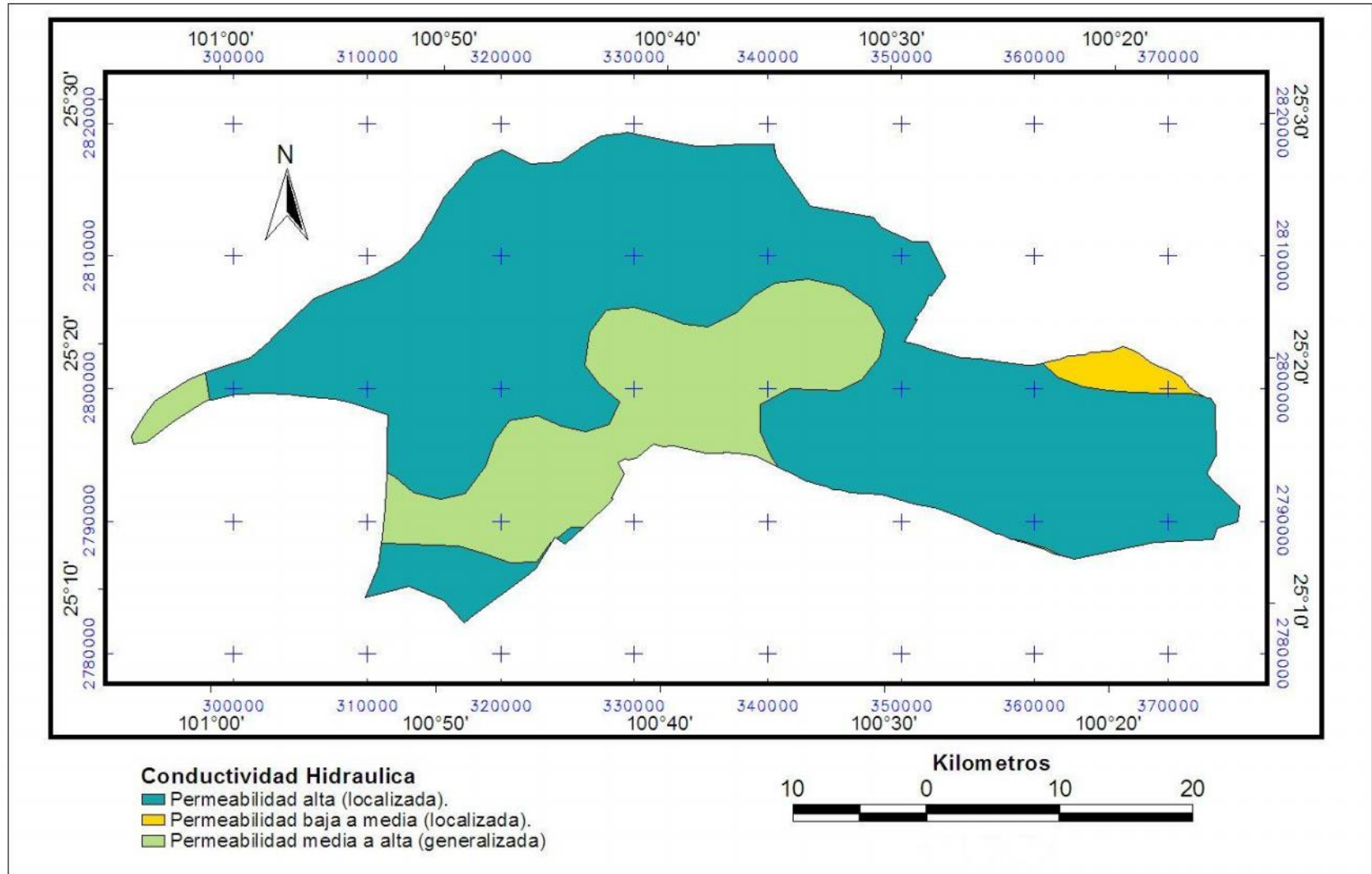


Figura 4.7. Mapa de conductividad hidráulica.

4.8. Índices Encontrados

Los índices de vulnerabilidad encontrados en este trabajo una vez aplicada la fórmula de DRASTIC se muestran en la figura 4.8 donde se presenta un mapa que consta de 240 polígonos o áreas; de los cuales cada uno tiene un valor de vulnerabilidad que va desde 101 que es el valor más bajo a 160 valor más alto.

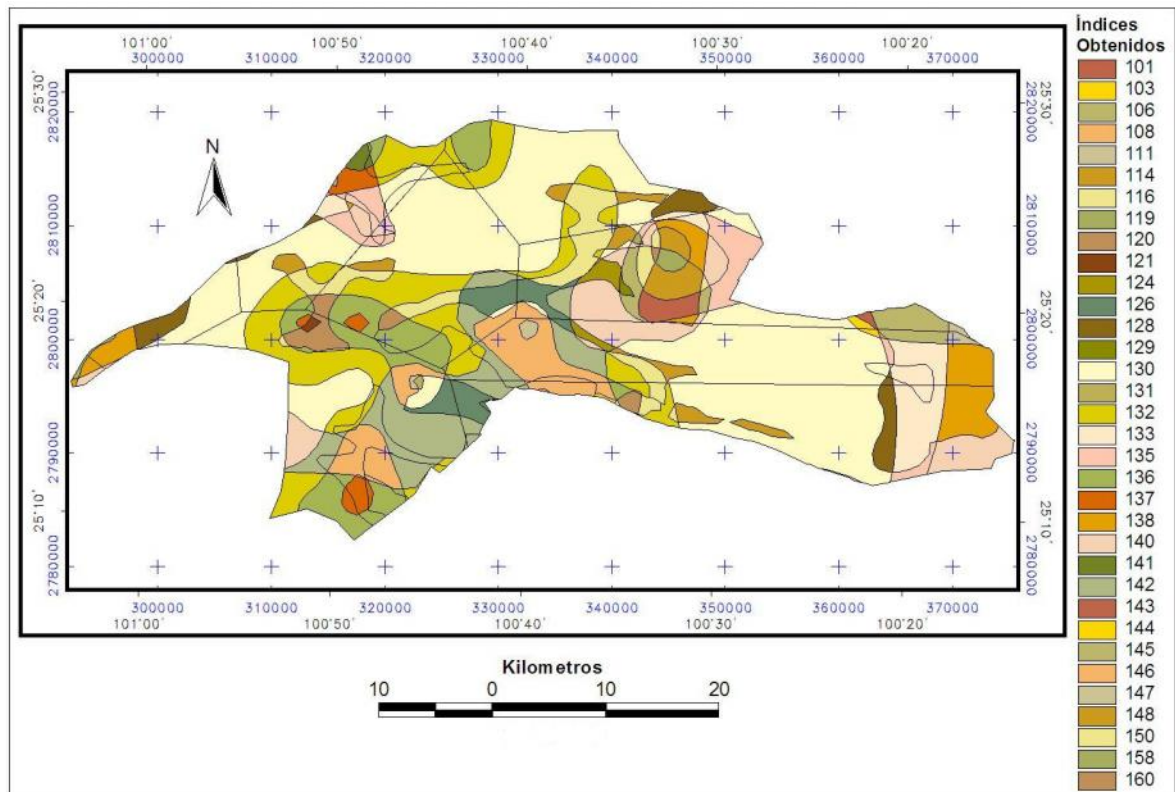


Figura 4.8. Resultado de la unión de mapas de los parámetros

Posteriormente a la clasificación del mapa por grados de vulnerabilidad de acuerdo al rango que comprende cada grado, se obtuvo un mapa (Figura 4.9) que muestra que la mayor parte de la región asume una condición de vulnerabilidad baja (valores de 120 – 139), en segundo término esta la vulnerabilidad moderada (valores de 140 – 159); un área menor pero considerable se encuentra en condiciones de

vulnerabilidad muy baja (valores de 101 – 119) y con una área apenas apreciable se encuentra una vulnerabilidad alta (valor de 160).

En la figura 4.9 se muestra el mapa de vulnerabilidad obtenida, en donde la mayor parte de la región, el 70.96 por ciento (1010.52 km²) se obtuvo una vulnerabilidad baja; esto se debe a que en la totalidad de esa zona el manto acuífero se encuentra a profundidades mayores de 30 m, esto aunado a que se trata de un tipo de acuífero constituido por rocas sedimentarias marinas predominantemente calcarias a cual se le asigno un valor de 30 y un tipo de suelo Litosol que es muy delgado o ausente, aunque en esta parte de la región se asume una permeabilidad alta no influye tanto ya que la profundidad del acuífero es un factor determinante.

En el 21.51 por ciento de la superficie (306.36 km²) se obtuvo una vulnerabilidad moderada, debido a que aunque el manto acuífero se encuentra a profundidades mayores de 30m la permeabilidad es baja a media por estar constituidos por materiales del Jurásico como lutitas, limolitas, areniscas y calizas limo arcillosas a los cuales se les asigno un valor de tres.

En el 7.475 por ciento de la superficie total (106.44 km²) se obtuvo una vulnerabilidad muy baja esto debido al tipo de suelo que predomina en esa área como son del tipo Feozem calacrico que se le asigno un valor de 4 por ser una capa superficial oscura, suave, rica en materia orgánica y en nutrientes y por presentar una permeabilidad baja a media.

Por ultimo en el 0.046 por ciento la superficie (0.65 km²) se encontró una vulnerabilidad alta esto es debido más que a nada a que en la zona existe una profundidad del acuífero muy somera menor a 15 m y este es un factor determinante de la vulnerabilidad en la metodología utilizada.

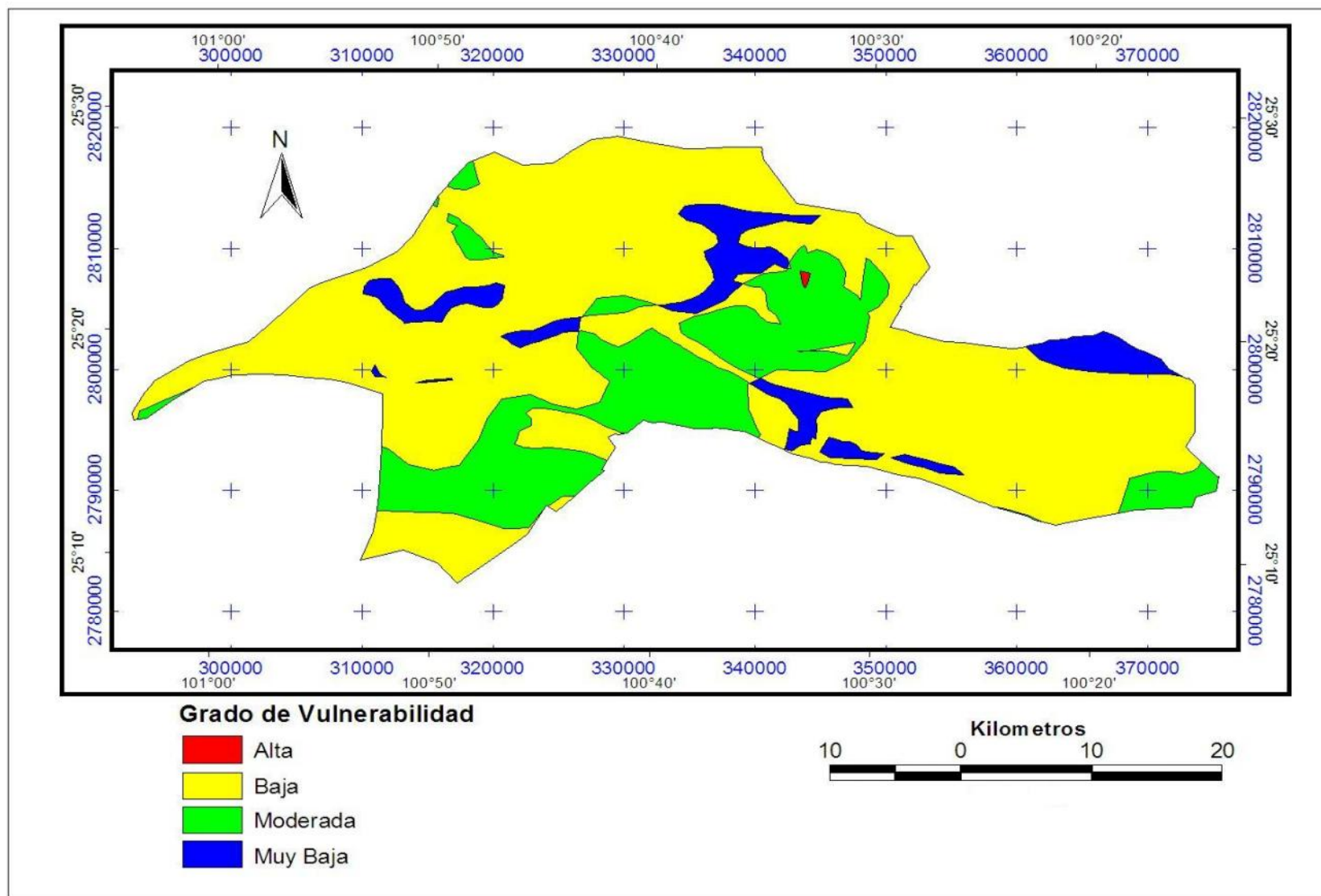


Figura 4.9. Mapa de vulnerabilidad basado en los índices DRASTIC.

V. CONCLUSIONES

La estimación de la vulnerabilidad de acuíferos mediante métodos paramétricos, como es DRASTIC, permite tener una muy buena aproximación para conocer el riesgo de contaminación de los acuíferos. Y aunque es un método más exigente que otros, dado que emplea mayor cantidad de variables (siete), esto puede transformarse en un inconveniente, cuando no se dispone de los valores de algunos parámetros.

El uso de herramientas como los sistemas de información geográfica (SIG) es muy útil en la obtención de índices de vulnerabilidad, ya que permiten que se manejen los datos con mayor facilidad y precisión.

El acuífero de la Región Manzanera–Zapalinamé presenta una vulnerabilidad baja representa 1010.52 km^2 y es el 70.964 por ciento; una vulnerabilidad moderada con un área de 306.36 km^2 y representa el 21.514 por ciento; una vulnerabilidad muy baja comprende 106.44 km^2 y representa el 7.475 por ciento de la superficie total y una vulnerabilidad alta el cual comprende 0.65 km^2 y representa el 0.046 por ciento por ciento de la superficie total.

Los parámetros más influyentes en la variación de la vulnerabilidad son la profundidad del nivel freático y el impacto en la zona no saturada, ya que en el área donde se presenta una vulnerabilidad alta es debido a que la profundidad del nivel freático en ese lugar es muy somera.

VI. RECOMENDACIONES

Para la realización de un buen trabajo, serio y fidedigno; de cualquier área que sea se debe de contar con elementos categóricos para poder aseverar su confiabilidad.

En la determinación del grado de vulnerabilidad de un acuífero uno de estos elementos es la información precisa, detallada y actualizada de la cartografía de la región en observación, así como a una escala adecuada para hacer un estudio más particular y no tan generalizada. La información geohidrológica debe estar de forma disponible, para realizar estudios más detallados que hagan referencia a la contaminación a las aguas subterráneas, así como datos de niveles estáticos, información para determinar la conductividad hidráulica como ensayos de bombeo.

Es recomendable hacer una adecuación a cualquiera que sea la metodología que se use en un estudio de vulnerabilidad de acuíferos a regiones desérticas con baja precipitación de lluvia y con escaso o nulo espesor de suelo; ya que estos factores hacen al medio sensible a la contaminación. También se debe considerar las adecuaciones cuando se hagan estudios de vulnerabilidad específica cuando se traten de plaguicidas y cargas contaminantes al subsuelo como los nitratos.

Es necesario que se sigan haciendo más estudios de vulnerabilidad en regiones donde la principal fuente de agua es la subterránea como es en el norte del país y en las zonas áridas en las cuales aun no se ha llevado a cabo.

Aunque la estimación de la vulnerabilidad mediante índices es un método más o menos justo, la atribución de valores dentro de unos rangos está determinada a consideración del que elabora el trabajo y que realiza su estimación de acuerdo a su conocimiento del medio.

VII. RESUMEN

Se propone una metodología para la caracterización hidrogeológica y valoración de la posible afección a las aguas subterráneas por obras lineales, a tener en cuenta para la realización de estudios de impacto ambiental. La vulnerabilidad es una propiedad intrínseca de los sistemas de agua subterránea. El Mapa de Vulnerabilidad del acuífero de la Región Manzanera-Zapalinamé se construyó utilizando la metodología DRASTIC, un sistema paramétrico que incluye siete características del acuífero y con la ayuda de un Sistema de Información Geográfica.

El índice DRASTIC, permite establecer zonas con distinto grado de vulnerabilidad y realizar mapas de vulnerabilidad. Para la realización del estudio se confeccionaron mapas temáticos (topografía, freametría, suelos, geología), que comienza a partir de un mapa base del Estado de Coahuila, para tales efectos se procede con la georeferenciación de cada mapa y se van obteniendo zonas de influencia de cada parámetro en los cuales se concentra la información que la metodología requiere y con esto generar un mapa de Vulnerabilidad a la contaminación del agua subterránea.

En el acuífero Manzanera-Zapalinamé se obtuvieron grados de vulnerabilidad que van desde baja (valores de 120 – 139), con superficie de 1010.52 km²; vulnerabilidad moderada (valores de 140 – 159), con una superficie de 306.36 km²; una vulnerabilidad muy baja (valores de 101 – 119), con un área de 106.44 km²; y una vulnerabilidad alta (valor de 160), con un área de 0.65 km².

VIII. LITERATURA CITADA

- Aller, L., Bennet, T., Lher, J., Petty, R.J. and G. Hackett. 1987. (DRASTIC). A standardized system for evaluating groundwater pollution potencial using hydrogeologic setting. U.S Environmental Protection Agency, Ada, Oklahoma, EPA Report 600/2 -87-035.
- Auge, M. 2003. Vulnerabilidad de Acuíferos. Universidad de Buenos Aires, E -book. (<http://www.tierra.rediris.es/hidrored/ebooks/vulnerabilidad.htm>).
- Carbonell, A. 1993. Groundwater vulnerability assessment: predicting relative contamination potential under conditions of uncertainty. National Research Council. National Academy Press: 1 -204. Washington DC.
- Comisión Nacional del Agua (CNA). 1997. Informe de los trabajos de actualización en la zona geohidrológica “Región Manzanera”, Municipio de Arteaga, Coahuila. Integrado por la Gerencia Estatal en Coahuila.
- Comisión Nacional del Agua. (CNA). 2002. Determinación de la Disponibilidad de Agua en el Acuífero Región Manzanera-Zapalinamé, Realizado por la Gerencia Estatal de Aguas Subterráneas en Coahuila. <http://www.cna.gob.mx>
- Comisión Nacional para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad (CONABIO). 2002. Geoinformación, metadatos y cartografía en línea. <http://www.conabio.gob.mx>
- Custodio, E. y M. R. Llamas. 1983. Hidrología Subterránea. (Tomos I y II). Ediciones Omega, Barcelona, España, 2350 p.
- Custodio E. 1995. Consideraciones sobre el concepto de vulnerabilidad de los acuíferos a la polución. II Seminario Hispano – Argentino sobre Temas

Actuales de Hidrología Subterránea. Serie Correlación Geológica # 11: 99 - 122. San Miguel de Tucumán.

De los Santos, J. et al. 1998. Modelación Numérica del Acuífero Raigón. Proyecto CONICYT – BID 71/94. IMFIA, UdelaR. Uruguay.

De los Santos, J. et al. 1999. Carta de Vulnerabilidad del Acuífero Raigón. Informe Final. Convenio DINAMA -IMFIA. IMFIA, UdelaR. Uruguay.

Environmental Protection Agency (EPA). 1991. A review of methods for assessing the sensitivity of aquifers to pesticide contamination. Preliminary document: 1-21. Washington DC.

Estudios Geológicos y Obras Civiles S. A. (EGEOISA). 1974. Estudio geohidrológico Zona Manzanera de Coahuila. Realizado para la DGZA.

Foster, S. y R, Hirata. 1988. Determinación del riesgo de contaminación de aguas subterráneas, una metodología basada en datos existentes, Organización Panamericana de la Salud, (OMS), 74 pp.

Foster, S. y R. Hirata. 1991. Determinación del Riesgo Ambiental de Aguas subterráneas, una metodología basada en los datos existentes. En el marco de las Terceras Jornadas de Actualización en Hidrología Subterránea. Huerta Grande, Córdoba, marzo de 1994. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS).

Foster, S., B. Adams, M. Morales y S. Tenjo. 1992. Estrategias para la Protección de Aguas Subterráneas, guía para su implementación. pp.1 -91. Terceras Jornadas de Actualización en Hidrología Subterránea. Huerta Grande, Córdoba, marzo de 1994. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS).

Geoexploraciones y Construcciones, S. A. 1983. Estudio Geohidrológico Regional del Área San Juanito - Zapalinamé, Coahuila. Realizado para la SARH.

- GEOIDE, S. A. 1995. Geología Estructural y de Evaluación Geohidrológica Preliminar en la Zona Sur de Saltillo, Coahuila. Realizado para CNA.
- Imlay, R. W. 1936. Evolution of the Coahuila Peninsula, México. IV. Geology of the western part of the Sierra de Parras. Bull. Geol. Soc. Amer., 47: 1091-1152, 10 Pls.
- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI). 2002. Información geográfica. <http://www.inegi.gob.mx>
- Lobo-Ferreira, J. P. and M. M. Oliveira. 1997. DRASTIC Groundwater vulnerability mapping of Portugal in «Groundwater: An Endangered Resource», Proceeding of Theme C (pp. 132-137) of the 27th Congress of the International Association for Hydraulic Research, held in San Francisco, USA, Aug. 10-15-97.
- Margat J. 1968. Vulnérabilité des nappes d'eau souterraines à la pollution. Bases de la cartographie. BRGM # 68. SLG 198 HYD. Orléans.
- Martínez, M., P. Delgado y V. Fabregat. 1998. Aplicación del Método DRASTIC para la evaluación del riesgo de afección a las aguas subterráneas por una obra lineal. Jornadas sobre la contaminación de aguas subterráneas: un problema pendiente. pp. 413-420. Valencia IH-GE.
- Murray, G. E. Weidie, A.E. Jr., Boyd, D.R., Forde, R.H., Lewis, P.D. Jr., 1962 Formational divisions of difunta Group, Parras Basin, Coahuila and Nuevo León México: American Association of Petroleum Geologists, Bulletin, 46, 374-383
- Piscopo, G. 2001. Groundwater vulnerability map explanatory notes -MacIntyre Catchment. NSW Department of Land and water Conservation. ISBN 0 7347 5193 1. 13 p.
- Rading, S. 1994. North Dakota Geographic Targeting System for Groundwater Monitoring, North Dakota Health Department Division of Water Quality.

- Secunda, S., M. L. Collin and A. J. Molloul. 1998. Groundwater vulnerability assessment using a composite model combining DRASTIC with extensive agricultural land use in Israel's Sharon region. *Journal of Environmental Management* 54, 39-57 Article N° ev980221.
- Sharadghah S. 2001. Evaluación del riesgo de contaminación de las aguas subterráneas en Jordania. Aplicación del modelo DRASTIC. Trabajo de Investigación, Universitat Politècnica de Valencia.
- Thirumalaivasan, D., M. Karmegam and K. Venugopal. 2003. AHP -DRASTIC: software for specific aquifer vulnerability assessment using DRASTIC model and GIS. *Environmental Modelling & Software* 18: 645 -656.
- USDA-Soil Conservation Service. 1992. Agricultural Waste Management Field Handbook. (210-AWMFH, 4/92) (651-0108) Agricultural Impacts on the use of water.
- USEPA 1993. A Review of Methods for Assessing Aquifer Sensivity and Ground Water Vulnerability to pesticide Contaminati on. Office of Water (4602) 813-R-93-002.
- Vrba, J., and A. Zaporozec. 1994. Guidebook on Mapping Groundwater Vulnerability. *International Contributions to Hidrogeology*. Vol 16. Heise. Alemania.