

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

CENTRO INTERAMERICANO DE RECURSOS DEL AGUA



**ADECUACIÓN DEL MÉTODO DE EVALUACIÓN DE
VULNERABILIDAD DE ACUÍFEROS (DRASTIC), MEDIANTE
EL USO DEL TRAZADO DE PARTÍCULAS EN EL ACUÍFERO
DEL CURSO ALTO DEL RÍO LERMA, ESTADO DE MÉXICO**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS DEL AGUA**

**PRESENTA
ROBERTO FRANCO PLATA**

**DIRECTOR DE TESIS:
DR. JAIME MAX GÁRFIAS SOLIZ**

DEDICATORIAS

A **DIOS**, por haberme permitido llegar a la culminación de una etapa más en mi vida.

A MI ESPOSA E HIJA

Mary, te agradezco todo tu apoyo que me brindaste, siempre incondicional, en los malos y buenos momentos. Te amaré hasta que la muerte nos separe. Tuyo para siempre.

Mary Jose, gracias por todo tu amor y apoyo que me brindaste en el desarrollo de la maestría, ya que cada esfuerzo emprendido es por ti, ya que tú eres la luz de mi vida y el regalo máspreciado que Dios me ha dado.

A MI MADRE Y HERMANOS

Gracias Madre por la vida y la educación que me diste, te quiero mucho.

A mis hermanos, como un ejemplo de que todo en la vida se puede conseguir, pero hay que trabajar y ser siempre persistentes.

A toda mi familia, amigos y amigas, que de una u otra forma siempre me brindaron su apoyo durante los estudios y culminación del presente trabajo.

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Jaime Max Gárfias Soliz, por su paciencia y apoyo incondicional mostrado, además, por su preocupación infinita, porque día tras día seamos cada vez mejores y por sus conocimientos aportados para la culminación de esta tesis. Gracias.

A la M. en C. Patricia Mireles Lezama, por su invaluable apoyo en la actualización y elaboración en todo lo correspondiente a suelos.

Al Dr. Carlos Arriaga Jordán, por todo el apoyo brindado para la culminación de esta tesis.

A mi compañero José Luis Expósito Castillo, por toda la asesoría y tiempo dedicado durante la elaboración de esta tesis.

A los H.H. Consejos Académico y de Gobierno de la Facultad de Geografía, por su apoyo en la obtención de permisos para los estudios de esta maestría, la cual beneficiará a la propia Facultad y a nuestra Universidad.

A los sinodales, por sus acertadas recomendaciones, para el mejoramiento de esta tesis.

A las siguientes instituciones:

Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología

Universidad Autónoma del Estado de México

Centro Interamericano de Recursos del Agua

Facultad de Geografía

Waterloo Hidrogeologic Inc.

Comisión Nacional del Agua

RESUMEN

Para llevar a cabo una administración segura de los recursos hídricos, la mejor forma es protegerlos contra la contaminación; para este fin, uno de los métodos más utilizados es, sin lugar a duda el estudio de la vulnerabilidad de acuíferos.

En este sentido, considerando el incremento acelerado de fuentes potencialmente contaminantes en el valle de Toluca, así como la ausencia total de herramientas de protección del acuífero, se definió el objetivo de este trabajo, el cual consistió en evaluar el estado de vulnerabilidad del Curso Alto del Río Lerma, perteneciente al Estado de México, mediante la aplicación combinada del método de análisis de vulnerabilidad DRASTIC y la modelación numérica con VisualMODFLOW.

En primera instancia, y tras el análisis de la información disponible (geología, edafología e hidrogeología), se confecciono un mapa de vulnerabilidad mediante la metodología DRASTIC, con el apoyo de los sistemas de información geográfica en formato vectorial, mediante la superposición de polígonos, permitiendo incorporarle atributos a cada elemento de los diferentes parámetros que utiliza dicha metodología, sin embargo, diferentes autores siguen desarrollando la metodología en formato raster (mallas).

El mapa de vulnerabilidad original fue adecuado mediante el uso de la modelación numérica, la cual consistió en delimitar nuevas áreas a proteger, considerando la contaminación que en ellas podrían generarse ya que de alcanzar el acuífero podrán, en un plazo igual o menor a 50 años, deteriorar la calidad de importantes fuentes de abastecimiento de agua subterránea del territorio.

Finalmente, se obtuvieron dos mapas de vulnerabilidad, uno generado por la metodología DRASTIC, que de manera general permitirá el ordenamiento adecuado de las actividades potencialmente contaminantes del territorio, así como, el análisis de riesgos de dichas actividades, así como otro mapa que permite, además, realizar una protección complementaria de áreas específicas, las cuales se seleccionaron de acuerdo al interés socioeconómico que tienen en la zona de estudio.

ABSTRACT

To commit to an environmentally safe management of hydraulic resources, the best method to protect them from pollution, to achieve this goal one of the most widely used methods is, beyond doubt, studying aquifer vulnerability.

In this manner, considering the accelerating increment of potentially polluting sources in the plains of Toluca, as the total absence of aquifer protecting tools, the objective of this research was defined, evaluating aquifer vulnerability in the High Course of Lerma River, belonging to Estado de México through the combined utilization of the vulnerability analysis method DRASTIC and modeling through VisualMODFLOW.

In the first instance, and after analyzing all available information (geology, edafology and hydrogeology), a vulnerability map was crafted through the DRASTIC methodology, with the support of geographic information systems in vector format, through polygon overlapping, allowing the incorporation of attributes to each element of the different parameters that uses such methodology, even though other authors still develop this method using raster format (wireframe).

The original vulnerability map was made adequate through the use of numeric modeling, which consisted in outlining new areas to protect, considering pollution which in those might be generated so that if they reach the aquifer they could, in a period of 50 or more years, deteriorate water quality in the underground deposits in the area.

Finally, two vulnerability maps were developed, one by the DRASTIC method, which will overly allow proper placement of potentially polluting activities in the area, as risk analysis of those activities; as the other map allows a complementary protection of specific areas, which were selected according to the economic and social interest they possess in the research zone.

M. en C. Roberto Franco Plata

Dr. Jaime Max Gárfias Soliz

CONTENIDO

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

1.1. ANTECEDENTES	1
1.2. OBJETIVOS	5
1.2.1. Objetivo principal	5
1.2.2. Objetivos intermedios	6
1.3. METODOLOGÍA	6

CAPÍTULO 2 CARACTERÍSTICAS DE LA ZONA DE ESTUDIO

2.1. LOCALIZACIÓN Y EXTENSIÓN	8
2.2. HIDROGRAFÍA	11
2.3. CLIMA	12
2.4. EDAFOLOGÍA	13
2.5. GEOLOGÍA	16
2.5.1. Marco geológico regional	16
2.5.2. Estratigrafía	16
2.6. HIDROGEOLOGÍA	21
2.6.1. Hidroestratigrafía	21
2.6.2. Definición del sistema acuífero	22
2.7. SELECCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	26

CAPÍTULO 3 LA CARTOGRAFÍA DE VULNERABILIDAD COMO HERRAMIENTA DE PROTECCIÓN DE ACUÍFEROS

3.1. ANTECEDENTES	32
3.2. CONCEPTUALIZACIÓN DE LA VULNERABILIDAD	34
3.3. MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE VULNERABILIDAD DE ACUÍFEROS	37
3.4. SELECCIÓN DEL MÉTODO	47
3.5. CARTOGRAFÍA DE VULNERABILIDAD	49
3.6. LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG) COMO UNA HERRAMIENTA PARA LA GENERACIÓN DE MAPAS DE VULNERABILIDAD ..	52

CAPÍTULO 4

APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA DRASTIC

4.1. INTRODUCCIÓN	60
4.2. OBTENCIÓN DE LOS PARÁMETROS DE LA METODOLOGÍA DRASTIC	62
4.2.1. Profundidad al nivel freático.....	62
4.2.2. Recarga neta.....	67
4.2.3. Litología del acuífero.....	69
4.2.4. Tipo de suelo.....	74
4.2.5. Topografía	77
4.2.6. Litología de la zona no saturada	80
4.2.7. Conductividad hidráulica.....	83
4.2.8. Interacción entre parámetros.....	85
4.2.9. Evaluación de la vulnerabilidad.....	86

CAPÍTULO 5

GENERACIÓN DEL MAPA DE VULNERABILIDAD PARA ÁREAS ESPECÍFICAS EN EL CURSO ALTO DEL RÍO LERMA, MEDIANTE LA MODELACIÓN NUMÉRICA

5.1. INTRODUCCIÓN	95
5.2. SELECCIÓN DE ESCENARIOS	96
5.3. DELIMITACIÓN DE LAS ÁREAS A PROTEGER, MEDIANTE EL USO DE LA MODELACIÓN NUMÉRICA	99
5.3.1. Características principales del modelo numérico original	102
5.3.1.1. Modelo conceptual del sistema	102
5.3.1.2. Discretización espacial.....	104
5.3.1.3. Discretización temporal	104
5.3.1.4. Condiciones de frontera	109
5.3.1.5. Calibración.....	110
5.3.1.6. Análisis de sensibilidad.....	110
5.3.2. Características principales del modelo numérico adecuado	111
5.3.2.1. Conversión de estado transitorio a estacionario.....	111
5.3.2.2. Discretización espacial.....	111
5.3.2.3. Discretización temporal	111
5.3.3. Delimitación de áreas a proteger mediante el trazado de partículas para la adecuación del mapa de vulnerabilidad DRASTIC	113

CAPÍTULO 6

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

6.1. INTRODUCCIÓN	121
6.2. MAPA DE VULNERABILIDAD SEGÚN LA METODOLOGÍA DRASTIC.....	121
6.3. MAPA DE VULNERABILIDAD ADECUADO	124
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	127
BIBLIOGRAFÍA	131

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Situación geográfica. Límites del Estado de México y ubicación del Curso Alto del Río Lerma.....	9
Figura 2.2. Imagen del Curso Alto del Río Lerma.....	10
Figura 2.3. Mapa Edafológico del Curso Alto del Río Lerma.....	14
Figura 2.4. Mapa Geológico del Curso Alto del Río Lerma.....	18
Figura 2.5. Mapa Hidrogeológico esquemático del Curso Alto del Río Lerma.	23
Figura 2.6. Esquema tridimensional del Curso Alto del Río Lerma, basado en cortes geológicos A A' y A' A'' (modificado de Ariel Consultores, 1996).....	24
Figura 3.1. Representación de los conceptos de vulnerabilidad utilizados en la presente investigación.....	36
Figura 3.2. Sistema GOD para la evaluación del índice de vulnerabilidad del acuífero (Foster, 1987).....	42
Figura 3.3. Elementos básicos de la representación vectorial.....	56
Figura 3.4. Ilustración del procedimiento de la conversión vectorial a raster.	57
Figura 4.1. Superposición de los parámetros del método DRASTIC, para obtener el índice de vulnerabilidad.....	61
Figura 4.2. Profundidad del nivel freático del Curso Alto del Río Lerma, para el periodo octubre-diciembre de 1997.	66
Figura 4.3. Tabla creada en “Access” de la profundidad del nivel freático.....	67
Figura 4.4. Tabla creada en “Access” para la recarga neta.....	69
Figura 4.5. Recarga neta del Curso Alto del Río Lerma, de acuerdo a la aplicación de la metodología DRASTIC.	71
Figura 4.6. Litología del acuífero del Curso Alto del Río Lerma, de acuerdo a la aplicación de la metodología DRASTIC.	73
Figura 4.7. Tabla creada en “Access” para la litología del acuífero.....	74
Figura 4.8. Tipo de suelo del Curso Alto del Río Lerma, de acuerdo a la aplicación de la metodología DRASTIC.	76
Figura 4.9. Tabla creada en “Access” para el tipo de suelo.....	77
Figura 4.10. Pendientes del Curso Alto del Río Lerma, de acuerdo a la aplicación de la metodología DRASTIC.	79
Figura 4.11. Tabla creada en “Access” para la topografía (pendiente).....	80

Figura 4.12. Litología de la zona no saturada del Curso Alto del Río Lerma, de acuerdo a la aplicación de la metodología DRASTIC.	82
Figura 4.13. Tabla creada en “Access” para el impacto de la zona vadosa.....	83
Figura 4.14. Conductividad hidráulica del Curso Alto del Río Lerma, de acuerdo a la aplicación de la metodología DRASTIC.....	84
Figura 4.15. Tabla creada en “Access” para la conductividad hidráulica.....	85
Figura 4.16. Superposición de polígonos para cada uno de los siete parámetros y aplicación de la fórmula en ArcView, para la obtención del mapa de vulnerabilidad del Curso Alto del Río Lerma.	88
Figura 4.17. Mapa de Vulnerabilidad del Curso Alto del Río Lerma, mediante la aplicación de la metodología DRASTIC.....	89
Figura 5.1. Distribución y localización de pozos para el primer escenario.	97
Figura 5.2. Distribución y localización de pozos para el segundo escenario.....	98
Figura 5.3. Distribución y localización de pozos para el tercer escenario.....	100
Figura 5.4. Distribución y localización de pozos para el cuarto escenario.....	101
Figura 5.5. Diagrama esquemático del modelo conceptual del Curso Alto del Río Lerma..	105
Figura 5.6. Características de la capa 1 del modelo numérico original.	106
Figura 5.7. Características de la capa 2 del modelo numérico original.	107
Figura 5.8. Refinamiento de la malla del modelo numérico adecuado.....	112
Figura 5.9. Calibración del modelo numérico adecuado	114
Figura 5.10. Trayectoria de las partículas y áreas generadas en el primer escenario.	116
Figura 5.11. Trayectoria de las partículas y áreas generadas en el segundo escenario.....	117
Figura 5.12. Trayectoria de las partículas y áreas generadas en el tercer escenario.....	118
Figura 5.13. Trayectoria de las partículas y áreas generadas en el cuarto escenario.....	119
Figura 5.14. Adecuación del mapa de vulnerabilidad para sitios específicos del Curso Alto del Río Lerma.	120

LISTA DE CUADROS

Cuadro 2.1.	Valores de K_h y K_v asociados a las formaciones geológicas.....	25
Cuadro 2.2.	Población total de los municipios pertenecientes al Curso Alto del Río Lerma del año 1980 al 2000.....	27
Cuadro 2.3.	Cantidad de industrias por municipio del Curso Alto del Río Lerma del año 1800 a 1986.....	28
Cuadro 2.4.	Resumen de estudios previos realizados en la zona de estudio.....	29
Cuadro 3.1.	Principales métodos para la determinación de la vulnerabilidad de acuíferos...	38
Cuadro 3.2.	Pesos asignados a los parámetros de la metodología DRASTIC.....	44
Cuadro 3.3.	Clasificación del índice de vulnerabilidad del método SINTACS.....	45
Cuadro 3.4.	Principales ventajas y desventajas de la representación vectorial y raster.....	59
Cuadro 4.1.	Rangos y puntajes para la profundidad del nivel freático de acuerdo a la metodología DRASTIC.....	63
Cuadro 4.2.	Elevación del nivel freático en msnm registrada en el periodo octubre-diciembre de 1997.....	64
Cuadro 4.3.	Rangos y puntajes para la recarga neta de acuerdo a la metodología DRASTIC.....	68
Cuadro 4.4.	Estaciones climatológicas utilizadas para la generación de los polígonos de Thiessen.....	70
Cuadro 4.5.	Rangos y puntajes para la litología del acuífero de acuerdo a la metodología DRASTIC.....	70
Cuadro 4.6.	Rangos y puntajes para el tipo de suelo, asignados por DRASTIC.....	75
Cuadro 4.7.	Rangos y puntajes creados para el tipo de suelo, a partir de las características del tipo de suelo.....	75
Cuadro 4.8.	Rangos y puntajes para la topografía de acuerdo a la metodología DRASTIC.....	78
Cuadro 4.9.	Rangos y puntajes para la composición de la litología de la zona no saturada de acuerdo a la metodología DRASTIC.....	81
Cuadro 4.10.	Rangos y puntajes para la conductividad hidráulica.....	83
Cuadro 4.11.	Colores utilizados para los rangos del índice DRASTIC.....	90
Cuadro 5.1.	Valores de K_h y K_v asociados a las formaciones geológicas y las capas modeladas.....	108
Cuadro 5.2.	Valores de S_s y S_y asociados a las formaciones geológicas.....	109
Cuadro 6.1.	Comparación de áreas de vulnerabilidad de los dos mapas de vulnerabilidad desarrollados.....	126

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1. ANTECEDENTES

El desarrollo socioeconómico de cualquier país lleva involucrado, de forma inmediata, una mayor demanda de agua, que se traduce no sólo en acusados descensos piezométricos en acuíferos sobreexplotados, sino también, y con carácter más general, una variación en la composición de las aguas naturales, consecuencia directa del vertido de productos que alteran su calidad. Las extracciones incontroladas de agua y el vertido de productos contaminantes en zonas de recarga, constituyen una agresión contra el medio ambiente, por desgracia, frecuente en estos días, que pueden conducir, en algún caso, al total deterioro de las reservas de agua y, en cualquiera de ellos, a su degradación.

En la actualidad es muy común la alteración de las características naturales del agua, ya sea ésta superficial o subterránea, lo cual pone en riesgo a muchas actividades humanas y trae consigo una pérdida de calidad de vida, incluyendo peligros sanitarios importantes. En algunas áreas, principalmente dentro de los grandes centros urbanos o en las áreas circundantes, ya se ha producido la contaminación de las aguas subterráneas, creando riesgos potenciales para la salud pública y causando el abandono de las fuentes de suministro de agua existentes, con la consiguiente pérdida de inversión financiera y de recursos naturales.

La contaminación en aguas subterráneas tiende a aparecer lentamente, pero es muy persistente y, en muchos casos, la purificación es técnicamente problemática, excesivamente costosa y con frecuencia poco práctica. Aunque el ciclo natural del agua tiene una gran capacidad de purificación, nos hace pensar que esta misma facilidad de regeneración del agua, y su aparente abundancia, hace que sea el vertedero habitual en el que arrojamos los residuos producidos por nuestras actividades como suelen ser: pesticidas, desechos químicos, metales pesados y residuos radiactivos, entre otros, los cuales suelen encontrarse en cantidades mayores o menores, al analizar las aguas de los más remotos lugares del mundo (Llamas, 1999).

Además, las aguas subterráneas suelen ser más difíciles de contaminar que las superficiales, pero cuando esta contaminación se produce, es más difícil de eliminar, lo que es debido a que las aguas del subsuelo tienen un ritmo de renovación muy lento. Se calcula que mientras el tiempo de permanencia medio del agua en los ríos es de días, en un acuífero es de cientos de años, lo que hace muy difícil su purificación.

Por otro lado, 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 y, 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, compuestos orgánicos, organismos patógenos, entre otras) (Echeverri, 1998).

De acuerdo a lo anterior, queda claro que la única forma viable de alcanzar un uso sustentable de los recursos hídricos de una determinada región, es mediante su protección, es decir, las medidas contra la contaminación de las aguas subterráneas deben ser preferentemente protectoras: regulando, ordenando o prohibiendo determinadas actividades en diferentes zonas, o bien, estableciendo ciertas medidas de seguridad sobre actividades posteriormente nocivas. Ello es especialmente importante en acuíferos y captaciones que sirven para el abastecimiento público, a fin de evitar que diferentes agentes contaminantes alcancen el agua extraída (Expósito, 2001).

En tal sentido, surge la necesidad de implementar o consolidar políticas para proteger los acuíferos contra la explotación excesiva o irracional y contra el deterioro de su calidad debido a la contaminación. Este es especialmente el caso que ocurre dentro y alrededor de las áreas urbanas, donde las captaciones de aguas subterráneas se encuentran bajo una presión ambiental causada por el rápido desarrollo urbano.

Los programas de protección de la calidad de las aguas subterráneas, en varios países, revelan dos líneas básicas y casi siempre independientes de conducta: la primera está dirigida a los pozos de captación, estableciendo alrededor de la obra perímetros de protección, definidos a partir de los tiempos de tránsito específico, distancia de la fuente o el comportamiento hidráulico del acuífero; y la segunda dirigida al acuífero, donde se definen las restricciones de uso de la tierra frente a la vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos y a la importancia del recurso como fuente de abastecimiento público (Alvarado, 2000; Hirata y Rebuocas, 1999 y 2001).

La independencia de la vulnerabilidad de atributos ajenos a las propiedades de los acuíferos, es decir, de características permanentes del medio, establece la diferencia con el concepto de protección (captaciones, manantiales, zonas húmedas, etc.); el primero hace alusión a acuíferos, en tanto que el segundo depende de propiedades que no son del medio (ubicación de la actividad contaminante, intensidad de la actividad, etc.). Ambos conceptos, sin duda ligados, constituyen la base de dos de las principales herramientas en la lucha contra la contaminación: los perímetros de protección, reservados para ámbitos y situaciones concretas y los mapas de vulnerabilidad, que sólo deben ser aplicados a escala regional.

Es precisamente con esta última herramienta, y con su uso conjunto con la modelación numérica, en la que se basa el presente trabajo, por ser consideradas las herramientas más modernas para la evaluación de la vulnerabilidad, y específicamente en el desarrollo de uno de sus más reconocidos métodos de cartografía de vulnerabilidad, la metodología DRASTIC desarrollada por Aller et al. (1987), con el objetivo de identificar qué áreas dentro de un acuífero son más propensas a contaminarse desde la superficie del terreno. La metodología DRASTIC, debido a sus características, es considerada la más usada en el mundo.

Sin embargo, a pesar de la reconocida importancia que presentan las herramientas de protección de acuíferos para la conservación de las aguas subterráneas, poco se ha hecho al respecto en muchos países para su desarrollo e implementación, lo que unido a una creciente demanda de agua y proliferación de focos potenciales de contaminación, hace que los administradores, en muchos de los casos, se vean enfrentados a una mayor inseguridad y a la perspectiva de que sus decisiones no serán capaces de brindar agua en cantidad y calidad suficiente, ni protección contra eventos contaminantes y enfermedades transmitidas por el agua, entre otras.

México, por su parte, no escapa a la problemática planteada anteriormente, por lo que actualmente enfrenta grandes problemas en este sentido. Entre ellos destacan no sólo la ausencia generalizada de herramientas de protección sino, además, la disminución acelerada de la disponibilidad de agua en las zonas más pobladas y la creciente contaminación de los cuerpos de agua susceptibles de servir como fuentes de abastecimiento. México no ha podido sustraerse de las consecuencias de un desarrollo acelerado que ha propiciado el aumento en la extracción y el consumo de agua. Esto se traduce, consecuentemente, en una mayor generación de aguas residuales que, al ser descargadas sin tratamiento en los cuerpos receptores, perjudican sus usos legítimos y disminuyen su potencial aprovechamiento.

En México hay abundancia de agua en el sureste, donde la densidad poblacional e industrial es baja, pero escasea en el norte, noroeste y centro, donde está la mayor concentración poblacional e industrial y se genera la mayor actividad agropecuaria. Éste es el caso del Estado de México, que como consecuencia de las actividades sísmicas de la ciudad de México en 1985, se constituye actualmente como uno de los centros industriales más importantes del país.

En este sentido, uno de los factores primordiales que sustentan el desarrollo del Estado de México es el agua subterránea, de donde la mayor parte de las zonas industriales se abastecen mediante pozos profundos. Sin embargo, en algunas áreas, la intensidad del bombeo, unido al crecimiento poblacional y a la alta concentración industrial, está ocasionando efectos nocivos, como el descenso progresivo de los niveles, el agrietamiento del terreno y la infiltración de contaminantes (Sultan, 2001).

El que todavía en el acuífero del Curso Alto del Río Lerma no se hayan identificado claramente casos de contaminación generalizada de las aguas subterráneas con productos tóxicos (GEM, 2000) se debe, sin lugar a duda, a la lentitud del flujo de los contaminantes tanto en la zona saturada como en la no saturada, aumentados por los procesos de adsorción e intercambio iónico, por la pequeña dimensión de las plumas de contaminación y por la ausencia casi total de estudios detallados de contaminación, sobre todo en las zonas del acuífero más cercanas a la superficie, donde no hay una explotación intensiva.

Finalmente, conscientes de la importancia que presenta el análisis de la vulnerabilidad de acuíferos para la protección de las aguas subterráneas a la contaminación y para el ordenamiento territorial, y conociendo que tal evaluación no se ha llevado a cabo en el acuífero del Curso Alto del Río Lerma, el presente trabajo pretende, a través de la metodología DRASTIC y el trazado de partículas, elaborar un mapa de vulnerabilidad a la contaminación de mayor confiabilidad, el cual sirva a las autoridades como una herramienta, para tomar decisiones en la planeación urbana e industrial.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo principal

Evaluar el estado de vulnerabilidad del acuífero del Curso Alto del Río Lerma, perteneciente a la Cuenca Alta del Río Lerma en el Estado de México, mediante la aplicación combinada del método de análisis de vulnerabilidad DRASTIC y la modelación numérica. Esto permitirá generar mapas de vulnerabilidad de mayor confiabilidad, los cuales podrán ser utilizados como herramientas para el manejo sustentable de los recursos hídricos subterráneos y el ordenamiento territorial del área de estudio.

1.2.2. Objetivos intermedios

El objetivo principal se desglosa en los siguientes objetivos intermedios:

- a) Establecimiento de la hidrodinámica del acuífero del Curso Alto del Río Lerma a partir de:
 - La recopilación de la información bibliográfica, cartográfica y de datos climatológicos, hidrológicos e hidrogeológicos de la zona de estudio.
 - La definición de las características geométricas, geológicas, hidrológicas e hidrogeológicas del acuífero.
- b) Aplicación de la metodología de análisis de vulnerabilidad (DRASTIC) para conocer la vulnerabilidad a la contaminación del acuífero del Curso Alto del Río Lerma, mediante el uso de los Sistemas de Información Geográfica.
- c) Aplicación del método de Trazado de Partículas utilizando la modelación numérica mediante VisualMODFLOW, para optimizar la cartografía de vulnerabilidad del acuífero del Curso Alto del Río Lerma.
- d) Análisis de los resultados obtenidos en la aplicación del DRASTIC y del trazado de partículas, generando un mapa definitivo de vulnerabilidad del acuífero.

1.3. METODOLOGÍA

Para conseguir los objetivos presentados en el apartado anterior se estableció la siguiente metodología:

- i).- Realizar una profunda investigación bibliográfica y cartográfica de los estudios que se han elaborado del Curso Alto del Río Lerma, para poder estimar los parámetros básicos que se utilizan en la metodología de evaluación de vulnerabilidad de acuíferos (DRASTIC), y en la construcción del modelo conceptual para la posterior aplicación de la modelación numérica de flujo con Visual MODFLOW.

- ii).- Construir el modelo conceptual del Curso Alto del Río Lerma, a partir de la formulación definitiva de sus elementos constitutivos, tales como: fronteras físicas y de modelado, estratigrafía, distribución de los valores de la conductividad hidráulica, transmisividad, almacenamiento específico, discretización de la malla del modelado, discretización del paso de tiempo, definición de los elementos de recarga y bombeo, así como el establecimiento de las condiciones iniciales y de frontera.
- iii).- Obtener el mapa de vulnerabilidad del Curso Alto del Río Lerma mediante la aplicación de la metodología DRASTIC. En esta fase se utilizan los resultados del análisis de los mapas geológico, edafológico, hidrogeológico y topográfico del área de estudio, para obtener los valores de puntaje adecuados de cada uno de los parámetros analizados por la metodología DRASTIC; D (profundidad del nivel piezométrico), R (recarga neta), A (litología del acuífero), S (tipo de suelo), T (pendiente del terreno), I (litología de la zona no saturada) y C (conductividad hidráulica).
- iv).- Aplicar la modelación numérica con la ayuda del programa VisualMODFLOW, como punto de partida para la aplicación posterior del método de trazado de partículas. Esta fase consiste en establecer la modelación de flujo subterráneo en régimen estacionario, con el objeto de reproducir la situación del acuífero en condiciones básicas e iniciales y, posteriormente, una vez calibrados los diferentes parámetros hidráulicos que intervienen en el proceso, se utilizó el método de trazado de partículas para llevar a cabo la delimitación de las áreas a proteger.
- v).- Obtener el mapa de vulnerabilidad del Curso Alto del Río Lerma, mediante la aplicación combinada de la metodología DRASTIC y el método de trazado de partículas. En esta fase se utilizan los resultados de la aplicación del método de trazado de partículas para validar y, de ser necesario, ajustar los resultados obtenidos previamente por la metodología DRASTIC.
- vi).- Comparar el mapa de vulnerabilidad generado por la metodología DRASTIC y por la combinación de dicha metodología con la modelación numérica, con base en las superficies caracterizadas por los diferentes grados de vulnerabilidad.

CAPÍTULO 2

CARACTERÍSTICAS DE LA ZONA DE ESTUDIO

2.1. LOCALIZACIÓN Y EXTENSIÓN

La zona de estudio se localiza en el Curso Alto del Río Lerma, en la porción central del Estado de México, entre los paralelos 19°03' y 19°31' de latitud norte y los meridianos 99°18' y 99°52' de longitud oeste, ocupando una superficie aproximada de 2116.76 km² (figura 2.1).

Se localiza dentro de la Provincia Fisiográfica Eje Neovolcánico (Raisz, 1964), la cual se caracteriza por una serie de manifestaciones volcánicas, las más importantes del país, que dieron origen, entre otros aparatos volcánicos, al Popocatepetl, Iztaccíhuatl y Nevado de Toluca, en cuyos pies tiene asiento la ciudad de Toluca, capital del Estado de México.

Como se puede apreciar en la figura 2.2. la zona de estudio, comprende un extenso valle con elevaciones del orden de 2,600 msnm y ocupa una superficie de alrededor de 700 km², dicho valle está rodeado hacia el oriente, sur y poniente por elevaciones topográficas como la sierra de Las Cruces, con elevaciones entre 3,600 y 3,800 msnm, y el Nevado de Toluca a más de 4,000 msnm. Hacia el NW de la ciudad de Toluca colinda con el valle de Ixtlahuaca, a donde tiene continuidad el acuífero.

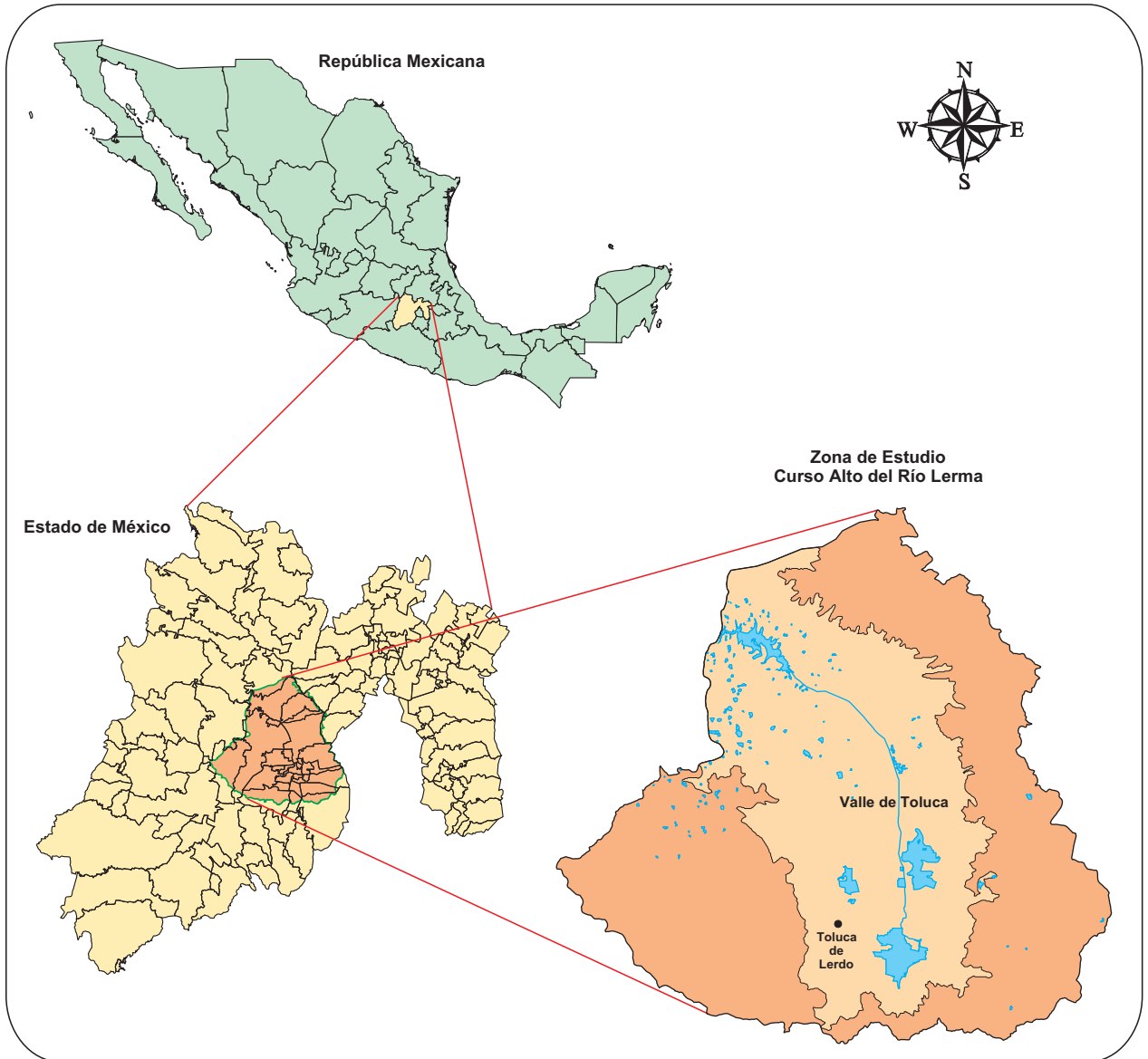


Figura 2.1. Situación geográfica. Límites del Estado de México y ubicación del Curso Alto del Río Lerma.

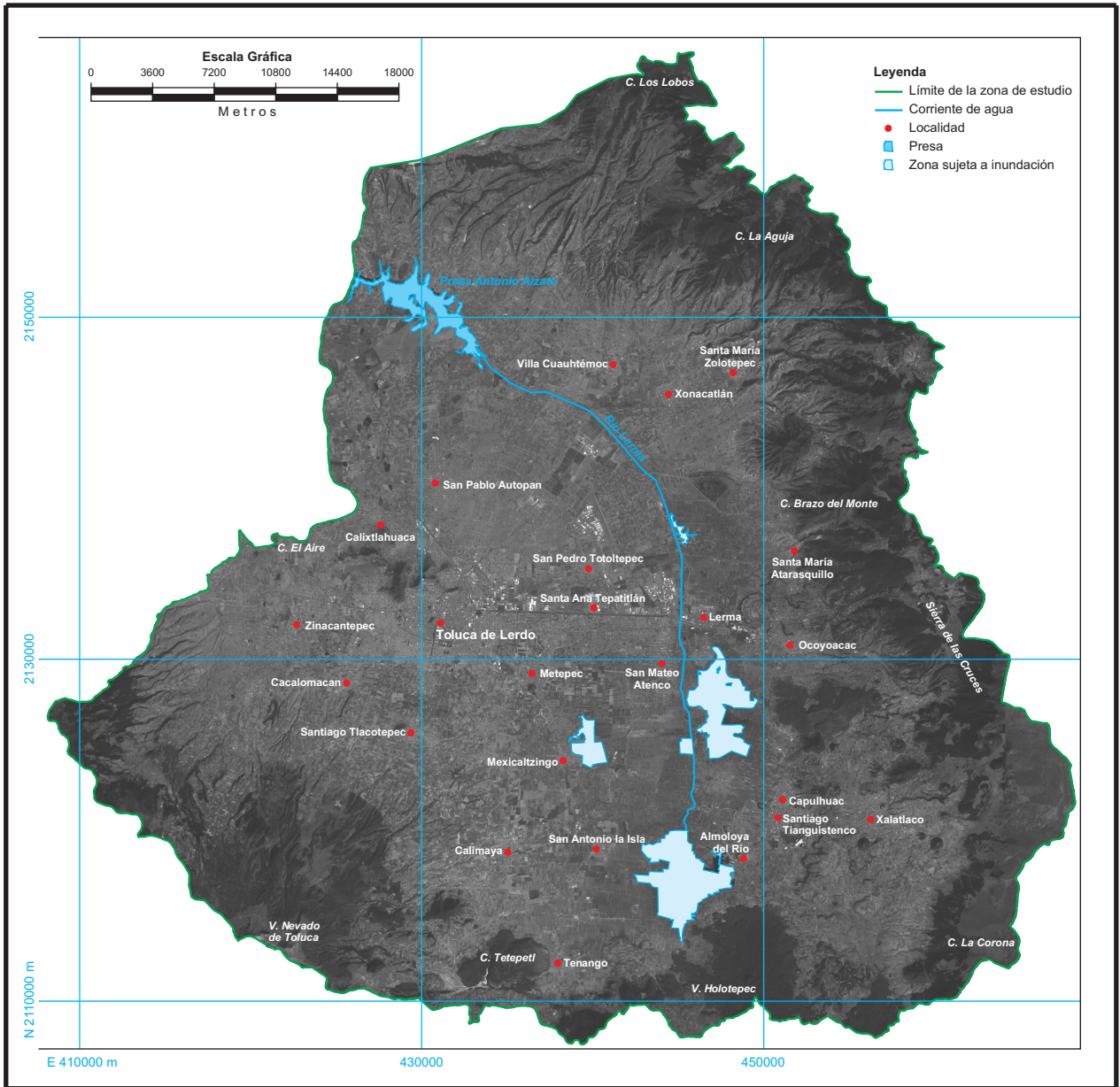


Figura 2.2. Imagen del Curso Alto del Río Lerma.

2.2. HIDROGRAFÍA

En relación con la hidrografía superficial, la zona estudiada queda comprendida dentro de la Región Hidrológica No. 12, Río Lerma. En relación con otras cuencas, limita al norte y este con los orígenes de la cuenca del río Pánuco y el valle de México, al sur con la cuenca del río Balsas-Mezcala y al oeste con la continuación de la cuenca del río Lerma.

Inicialmente, el nacimiento del río Lerma en el valle, se originaba en los manantiales que alimentaban a la laguna de Almoloya del Río, cuyo extremo sur llegaba hasta las poblaciones de San Pedro Techochulco y Almoloya del Río, en las estribaciones del cerro La Ladera y el volcán Tezontle en la región de Tenango del Valle (SRH, 1970). Con el paso de los años, y la explotación excesiva de los acuíferos, han desaparecido los manantiales y las lagunas pero, en cambio, ahora el cauce del río Lerma recibe aportaciones de las aguas residuales de Toluca y poblaciones vecinas, así como del corredor industrial Toluca-Lerma, representando actualmente una de las cuencas más contaminadas del país en su tramo Lerma-Atlacomulco. A partir del poblado de Lerma el cauce del río sigue una dirección más o menos franca hacia el norte, atravesando el valle de Ixtlahuaca hasta arribar a la ciudad de Atlacomulco (GEM, 1993).

Del Nevado de Toluca desciende el río Ojo de Agua con dirección oriente hacia San Antonio la Isla, desembocando en la laguna Almoloya del Río, nacimiento antiguo del río Lerma, donde también se concentran escurrimientos provenientes de la vertiente de la sierra Las Cruces.

También del Nevado descienden en forma radial los siguientes escurrimientos: el río Verdiguél, que atraviesa Toluca y descarga finalmente en el Lerma junto con aguas residuales de la ciudad, poco antes del embalse de la presa J. Antonio Alzate; el río San Luis, y otros pequeños formadores del río Tejalpa, principal aportador de la presa J. Antonio Alzate, además de los ríos y arroyos que, provenientes de la vertiente occidental de las serranías, descargan también en el vaso de la misma presa. Provenientes de las sierras Monte Alto y su prolongación hacia el norte, descienden los ríos Mayorazgo, Oztolotepec y el arroyo Zarco que aportan al Lerma por su margen izquierda.

La presa Ignacio Ramírez, localizada en la porción noroccidental del Curso Alto del Río Lerma, con 20.5 Mm³ de capacidad, se alimenta de los ríos Almoloya de Juárez, El Rosario y La Gavia, así como de los arroyos San Cristóbal y San Diego.

Las descargas de la presa Ignacio Ramírez prosiguen por la prolongación del cauce del río La Gavia hasta entroncar con el río Lerma, que con dirección norte pasa por el valle de Ixtlahuaca hasta Atlacomulco.

2.3. CLIMA

En relación con el clima imperante, según Köppen y García, (1981), el valle de Toluca se clasifica como templado, subhúmedo, con lluvias en verano y un porcentaje de precipitación invernal menor de 5. Hacia las estribaciones del Nevado de Toluca se torna a semifrío, subhúmedo y con lluvias en verano, con un porcentaje de precipitación invernal entre 5 y 10.2.

Respecto a la precipitación pluvial, la media anual está entre los 800 y 1,000 mm para el valle de Toluca, mientras que hacia las faldas del Nevado la precipitación se incrementa a 1,200 y 1,400 mm anuales. La temporada de lluvias se presenta de mayo a octubre, siendo más intensa en los meses de junio a septiembre, con valores cercanos a unos 140 mm mensuales. El estiaje tiene lugar entre noviembre y abril, con precipitaciones del orden de 12 mm/a.

La evaporación potencial en el período 1972-1991 resulta de 1,700 mm anuales en la porción noroeste del valle, disminuyendo hacia el sureste con valores del orden de 1,500 mm/a; mientras que hacia el Nevado se presentan valores menores a 800 mm/a.

La evaporación potencial, estacionalmente, manifiesta las siguientes características: los valores menores, de unos 90 mm mensuales, se presentan de octubre a enero, para después incrementarse progresivamente hasta alcanzar máximos de unos 150 mm/m entre marzo y abril, para nuevamente ir disminuyendo hasta septiembre (GEM, 1997).

2.4. EDAFOLOGÍA

Los tipos de suelos presentes en el área, en relación con sus características, fueron actualizados de acuerdo a la FAO/UNESCO de 1988, para su utilización en el presente trabajo (Míreles y Franco, 2001).

Los tipos de suelo presentes, así como su localización espacial, se representan en la figura 2.3 y se describen a continuación:

Andosoles (AN).- Se desarrollan a partir de ceniza volcánica, el (ANu) úmbrico y (ANm) mólico, presentando un horizonte superior rico en materia orgánica mayor a 6%, con profundidad mínima de 35 cm, y un horizonte B (ANc) cámbico con textura arenosa, densidad aparente inferior a 1, con alto contenido de alófono lo que le da consistencia tixotrópica. Estos suelos tienen Alta Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) pero baja fertilidad debido a la capacidad de retención de fósforo. Este tipo de suelo se localiza al NE, SE y SW del Curso Alto del Río Lerma, donde se localizan la sierra de Las Cruces y el Nevado de Toluca, las cuales son consideradas como las zonas de recarga del acuífero.

Cambisoles (CM).- Tienen un horizonte B cámbico con menos del 50% de saturación de bases y textura arenosa. Los (CMe) eútricos tienen un horizonte A ócrico y saturación de bases del 50% o más entre los 20 y 50 cm. Este tipo de suelos se localiza una parte al NE de la ciudad de Toluca, en las estribaciones con la sierra de Las Cruces, y otra parte al SE, por el municipio de Calimaya.

Feozem (PH).- Son suelos que tienen un horizonte A (PHh) háplico profundo, no acumulan agua dentro de los primeros 50 cm y presentan textura franca, rica en materia orgánica. Este tipo de suelos se localiza en la parte centro, SE y NE del Curso Alto del Río Lerma.

Fluvisol (FL).- Son suelos jóvenes provenientes de depósitos aluviales recientes. Tienen una distribución de tamaño de partículas muy variable y a menudo están estratificadas, algunas veces con horizontes superficiales enterrados. La mayoría de estos suelos muestran propiedades gleycas, con texturas de limo – arenosa. Se encuentran como suelos secundarios.

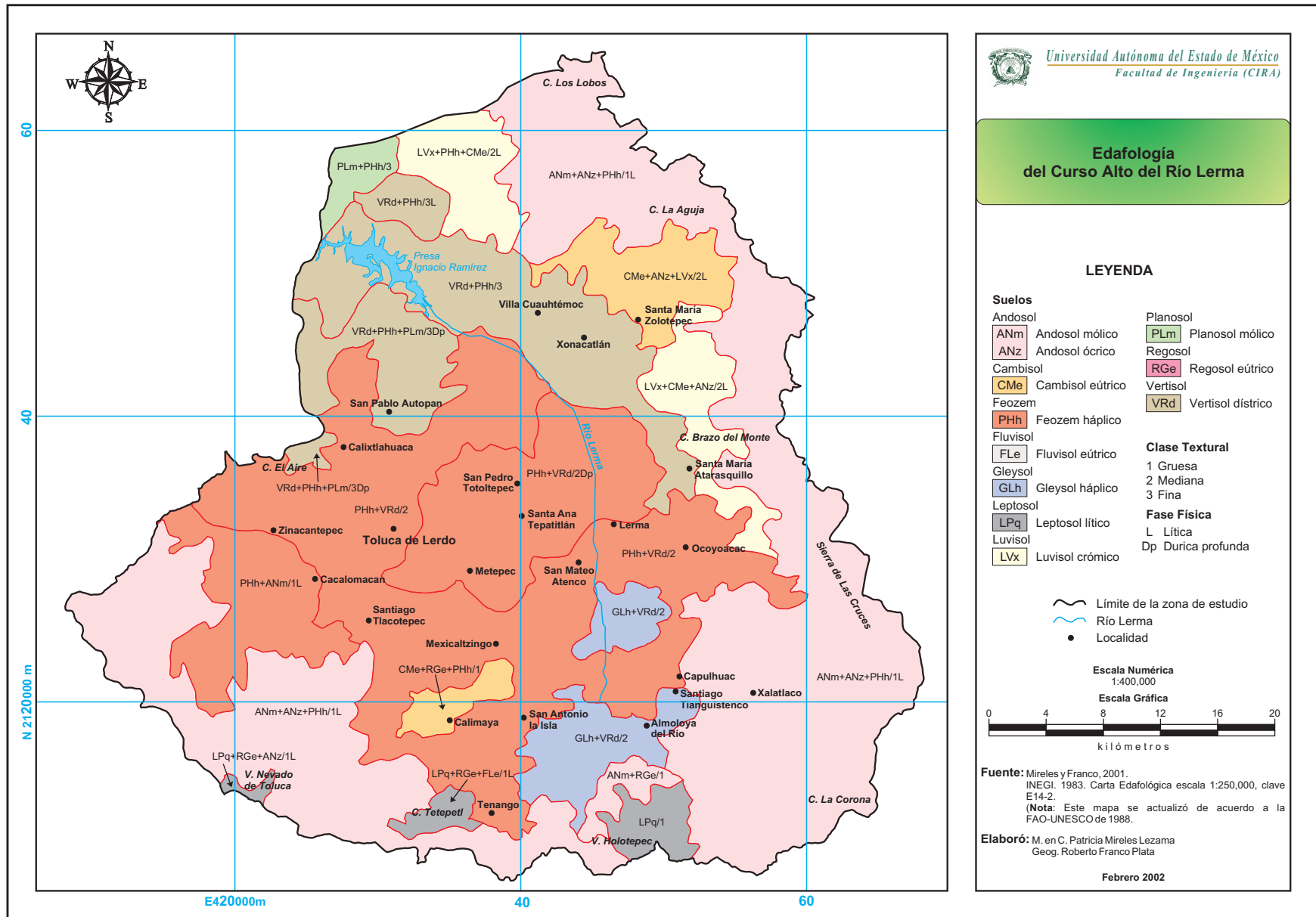


Figura 2.3. Mapa Edafológico del Curso Alto del Río Lerma.

Gleysol (GL).- Estos suelos están formados a partir de materiales no consolidados, excluyendo materiales de textura gruesa y depósitos aluviales con propiedades flúvicas. Poseen propiedades gleyicas y, dentro de los primeros 50 cm de profundidad, son suelos pobremente drenados. El GL es rico en materia orgánica, arriba del 6 %. Se encuentran al SE de la ciudad de Toluca.

Leptosol (LP) .- Son suelos someros de áreas montañosas, con menos de 10 cm de profundidad y descansan sobre roca. Se localizan en las estribaciones del Nevado de Toluca, en el cerro Tetepétl y en el cerro Holotepec.

Luvisol (LV).- Tienen un horizonte argílico B con saturación de bases mayor del 50 %, con textura de franco a arcillosa y pueden presentar características verticas o hidromórficas. Se localizan al NE del Curso Alto del Río Lerma, en las estribaciones de la Sierra de las Cruces.

Planosol (PL).- Son suelos localizados en áreas planas, que presentan un horizonte poco permeable dentro de los primeros 125 cm de profundidad, tienen un horizonte E con propiedades hidromórficas y una unión abrupta con un horizonte subyacente poco permeable, el cual, puede ser un nivel argílico, un lecho de arcilla o un fragipan. Se localiza al NW del Curso Alto del Río Lerma, dentro del valle.

Vertisol (VR).- Son suelos muy arcillosos (mayor a 30 %), compuesta normalmente por montmorillonita, que causan compactación y fractura del suelo durante la época de sequía y su hinchamiento durante la temporada de lluvias. El proceso de compactación-expansión crea presiones que rompen el suelo y forman espejos de falla al deslizarse una superficie sobre otra. Los VRd dísticos son oscuros y se anegan en la temporada de lluvias, siendo suelos profundos. Se localizan en el valle al NE y NW de la ciudad de Toluca.

2.5. GEOLOGÍA

2.5.1. Marco geológico regional

La zona de estudio se ubica en la denominada región del Curso Alto del Río Lerma, perteneciente al Curso Alto del Río Lerma, dentro del marco que impone el Eje Neovolcánico, lo que implica una importante actividad volcánica reciente que se manifiesta por la presencia de complejos volcánicos, conos cineríticos, derrames lávicos, como la formación Chichinautzin, lahares y algunos domos andesíticos.

El valle de Toluca es una planicie constituida por materiales lacustres, producto de los diferentes lagos que se asentaban en la cuenca, así como por depósitos aluviales interdigitados con materiales piroclásticos.

El Terciario contribuyó con una gran cantidad de rocas volcánicas de composición ácida a intermedia, como las andesitas Xochitepec y la formación Las Cruces, en forma de serranías bordeando los valles, los cuales constituían antiguamente cuencas endorreicas, en donde se depositaron importantes volúmenes de materiales granulares y piroclásticos de la formación Tarango, como relleno de una topografía preexistente (figura 2.4).

2.5.2. Estratigrafía

La descripción de las unidades litológicas se basó en el estudio realizado por Ariel Consultores (1996); por tal razón, se respetó la simbología adoptada, y la descripción de las unidades litológicas. A continuación se describen, en orden cronológico, desde la más antigua a la más reciente.

COMPLEJO VOLCÁNICO, ANDESITAS XOCHITEPEC Y BASALTOS ANTIGUOS (Tomv)

Las andesitas Xochitepec corresponden a una formación geológica constituida por corrientes de lavas, aglomerados, brechas, piroclastos y tobas de composición riódacítica, dacita y andesítica. Se les asigna una edad correspondiente al Terciario Medio (Oligoceno al Mioceno). Mooser (1962) propuso el nombre a este complejo volcánico.

En general las lavas, aglomerados y brechas están poco fracturadas, y los piroclastos y tobas presentan consolidación media a alta en las zonas afectadas por los sistemas de fallas regionales donde el fracturamiento es de alto grado. Sus afloramientos se localizan dispersos en las partes sur y poniente de la cuenca, constituyendo parte de las elevaciones que la limitan.

Los basaltos antiguos agrupados con las andesitas Xochitepec, son basaltos alterados, compactos y masivos, con escaso fracturamiento y un denso drenaje dendrítico. Se les asigna una edad del Mioceno.

ANDESITAS (Tpv)

Con este nombre se agrupan los derrames de lavas, aglomerados, brechas y tobas de composición andesítica y dacítica principalmente. En general las lavas y aglomerados se hallan pobremente fracturados, excepto en algunas pequeñas áreas de la porción norte, donde si están densamente fracturadas; las brechas y tobas manifiestan consolidación media a alta.

Sus afloramientos principales se observan en la porción SE, aunque también aparecen al NW y norte, más bien hacia el valle de Ixtlahuaca (figura 2.4). Su edad corresponde del Plioceno Inferior al Medio.

FORMACIÓN LAS CRUCES (Tomc)

Es un conjunto de rocas volcánicas constituidas por lavas, aglomerados, brechas, piroclastos y tobas de composición andesítica, dacítica y andesítica-basáltica, cuyos afloramientos constituyen la cadena montañosa que limita a la cuenca por el oriente, sierras Monte Alto-Las Cruces (figura 2.4).

La edad que se les asigna corresponde del Mioceno al Plioceno. Los materiales del Plioceno-Cuaternario, los más recientes, manifiestan innumerables fracturas de enfriamiento, en tanto que los más antiguos son más compactos, a excepción de las zonas afectadas por fallas, donde el fracturamiento es mayor.

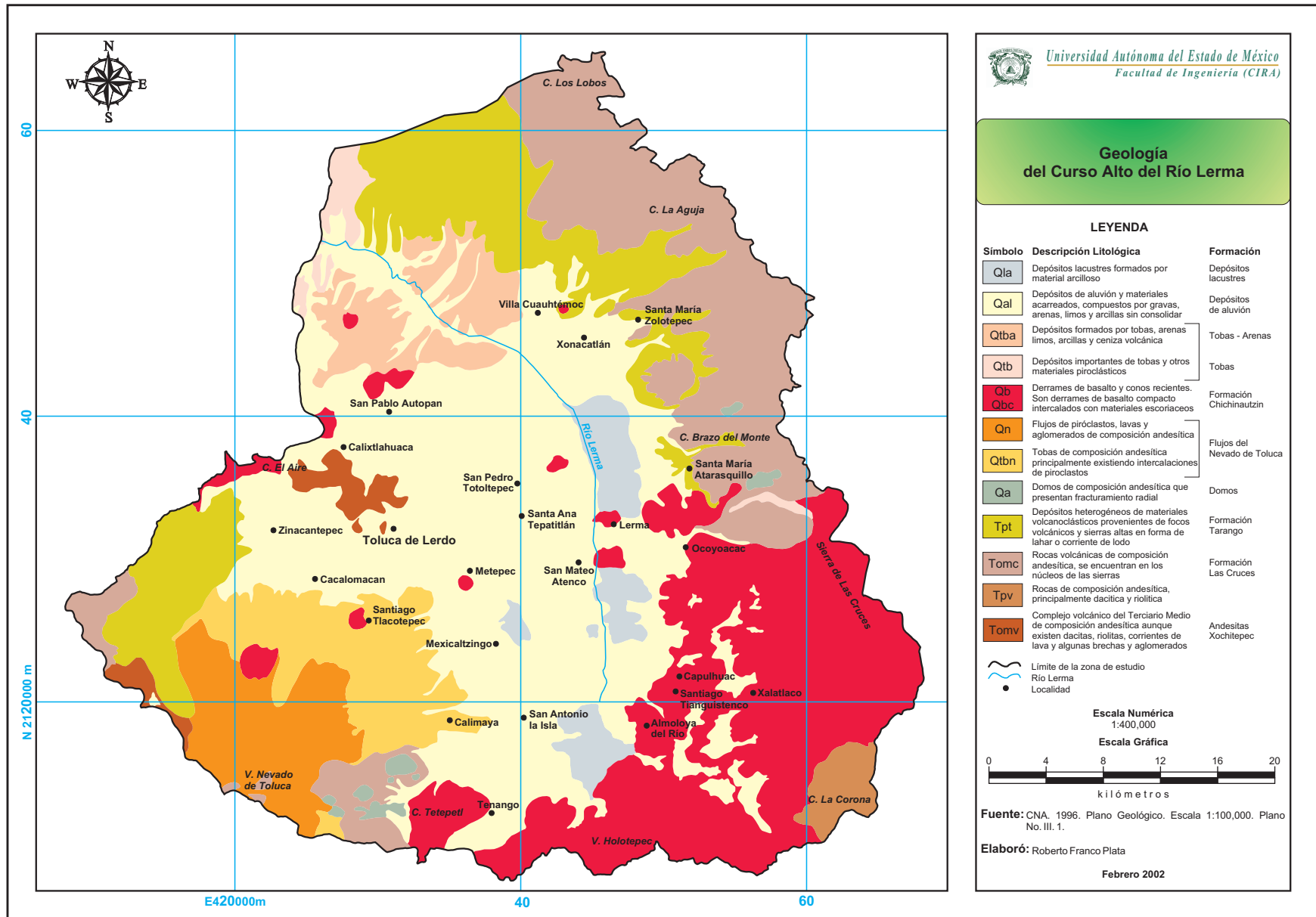


Figura 2.4. Mapa Geológico del Curso Alto del Río Lerma.

FORMACIÓN TARANGO (Tpt)

Está compuesta por tobas, flujos de piroclastos, aglomerados, gravas volcánicas y capas delgadas de pómez, lavas de composición principalmente andesítica y aluviones antiguos constituidos por gravas, arenas y limos, que Bryan (1948) llamó precisamente formación Tarango, por la localidad donde fue identificada, en una de las barrancas al poniente del valle de México (figura 2.4). Aflora en la serranía al oriente del Curso Alto del Río Lerma , y se le asigna una edad Plioceno Superior.

En general las lavas y aglomerados presentan escaso fracturamiento, y los piroclastos y tobas manifiestan mediana consolidación, mientras que en los horizontes de pómez y aluviones la consolidación varía de nula a media. Sus afloramientos se hallan ampliamente distribuidos en la porción septentrional de la cuenca en donde están constituidos por rocas ígneas. Los aluviones antiguos se localizan en el subsuelo, en la periferia del valle en su porción meridional. Aflora en las porciones nororiental y suroriental, ocupando estos últimos extensiones reducidas (figura 2.4).

DOMOS ANDESÍTICOS (Qa)

Con esta unidad se inicia el Cuaternario. Son aparatos volcánicos tipo domo, que afloran en forma aislada en el valle de Toluca (figura 2.4), como producto del vulcanismo reciente originado por el intenso fracturamiento regional. Son de composición andesítica y andesítico-basáltica.

FLUJOS DEL NEVADO DE TOLUCA (Qn) (Qtbn)

El vulcanismo del Nevado de Toluca fue intermitente, alternando emisiones con períodos de reposo, entre los cuales se presentaron períodos de erosión, terminando con expulsiones de material que forman la cubierta baja del volcán y se extienden al norte y oriente, cubriendo a la formación Las Cruces, a la vez que forman las faldas y cuerpo del volcán (figura 2.4).

Esta unidad está compuesta por tobas, piroclásticos, lavas y aglomerados de composición andesítica y andesítica-basáltica. En general las tobas y los flujos de piroclastos se observan

sueltos o medianamente consolidados, mientras que las lavas y aglomerados están afectados por sistemas de fracturas espaciadas.

Los flujos de piroclastos, lavas y aglomerados (Qn), se reportan en forma separada de las tobas andesíticas (Qtbn), pero al mismo tiempo agrupadas como “Flujos del Nevado de Toluca”, respetando el criterio del levantamiento original. Se les asigna una edad Plioceno Tardío - Pleistoceno.

FORMACIÓN CHICHINAUTZIN (Qbc), DERRAMES DE BASALTO Y CONOS RECIENTES (Qb)

La formación Chichinautzin (Fries, 1960), puede correlacionarse con los derrames de basalto y conos cineríticos. Los primeros afloran por Santiago Tianguistenco, Xalatlaco y Tenango (figura 2.4), donde consisten en basaltos compactos y negros intercalados con materiales escoriaceos y fracturados. Los conos volcánicos se identifican con mucha facilidad por su morfología, sus laderas poco erosionadas y la presencia de bosque denso. Las tobas y cenizas están sin consolidar.

TOBAS Y ARENAS (Qtb) (Qtba)

Los depósitos de tobas lacustres afloran por todas las partes bajas del valle (figura 2.4) formando terrazas. Fueron depositadas en medio arenoso y presentan intercalaciones de capas con diferentes granulometrías. Su edad corresponde al Cuaternario.

DEPÓSITOS LACUSTRES (Qla)

Estos depósitos del Cuaternario son sedimentos lacustres con predominancia arcillosa en su composición; están dispuestos en capas laminares muy delgadas. Afloran en las áreas que ocuparon las lagunas de Almoloya del Río y Mexicaltzingo (figura 2.4).

DEPÓSITOS DE ALUVIÓN (Qal)

Ocupan las partes planas del Curso Alto del Río Lerma (figura 2.4) y están constituidos por los materiales de acarreo fluviales de diferentes tamaños, desde limos a boleos de composición andesítica-basáltica, andesítica y basáltica.

2.6. HIDROGEOLOGÍA

2.6.1. Hidroestratigrafía

Las unidades estratigráficas antes descritas para el Curso Alto del Río Lerma, se han agrupado atendiendo a su funcionamiento geohidrológico en unidades acuíferas, acuífugos y acuitardos (Ariel Consultores, 1996).

Las unidades acuíferas son las siguientes: Tarango (Tpt), flujos piroclásticos del Nevado de Toluca (Qn) (Qtbn), formación Chichinautzin (Qbc) y conos recientes (Qb), tobas y arenas (Qtb) (Qtba), depósitos lacustres (Qla) y depósitos aluviales (Qal). Estas unidades en su conjunto constituyen el acuífero del Curso Alto del Río Lerma.

Cabe aclarar que los flujos del Nevado, la formación Chichinautzin y los conos recientes funcionan más bien como zonas de recarga, dado su nivel topográfico generalmente por arriba del de saturación, propiciando la infiltración del agua de lluvia y los escurrimientos superficiales.

La unidad Tarango también propicia infiltración en sus partes topográficamente más altas y que están por arriba del nivel freático; asimismo funciona como un buen acuífero en general, de permeabilidad variable, de media a alta, pero se distingue por presentar una mayor permeabilidad en el valle de Toluca que en el valle de México.

Se han considerado unidades acuífugas las siguientes: domos andesíticos (Qa), complejo volcánico de andesitas Xochitepec y basaltos antiguos (Tomv), formación Las Cruces (Tomc) y andesitas (Tpv), por su muy baja permeabilidad, y que para fines prácticos en general se consideran impermeables. Representan fronteras de los acuíferos, sin embargo, en algunas partes presentan fracturación, lo que les confiere permeabilidad secundaria que propicia infiltración del agua de lluvia, pero no se sabe hasta qué profundidad funcionan de esta manera.

Como acuitardos se ha considerado a las tobas lacustres que no afloran pero que están presentes en el subsuelo, intercaladas en los depósitos lacustres y de aluvión, algunos

materiales finos del Nevado y lahares de la Tarango, así como algunas áreas con arcillas lacustres.

La disposición de las unidades estratigráficas donde se ha constituido el acuífero, integra el sistema que controla el almacenamiento y movimiento del agua subterránea. En el valle de Toluca estas unidades tienen una continuidad hidráulica, que permite el desarrollo de sistemas de flujo regional interdependientes, característica que se prolonga al valle de Ixtlahuaca a través del estrechamiento topográfico de Perales; en otras palabras, aunque topográficamente sean dos valles separados, desde un punto de vista geohidrológico no dejan de tener cierta interdependencia, criterio compartido desde la óptica de la hidrología superficial, pues se establece comunicación entre ambos valles a través del cauce labrado por los escurrimientos del río Lerma.

Las conductividades hidráulicas promedio para cada una de las formaciones geológicas que están representadas en el área de estudio, se muestran en el cuadro 2.1.

2.6.2. Definición del sistema acuífero

Atendiendo a las propiedades de porosidad y fracturamiento de las unidades litológicas, el Curso Alto del Río Lerma, está integrado por dos medios, poroso y fracturado (figura 2.5 y 2.6) (Ariel Consultores, 1996).

El medio poroso está representado por los depósitos de clásticos no consolidados que rellenan la cuenca del valle de Toluca; su permeabilidad está principalmente en función de la granulometría y forma de sus granos, y está representado por las siguientes unidades estratigráficas: tobas y arenas (Qtb) (Qtb-a), depósitos aluviales (Qal), lacustres (Qla) y la formación Tarango (Tpt). Otras unidades estratigráficas que constituyen un medio poroso son los flujos del Nevado de Toluca (Qn) (Qtn) y conos volcánicos recientes (Qbc), aunque más bien se consideran zonas de recarga a los acuíferos.

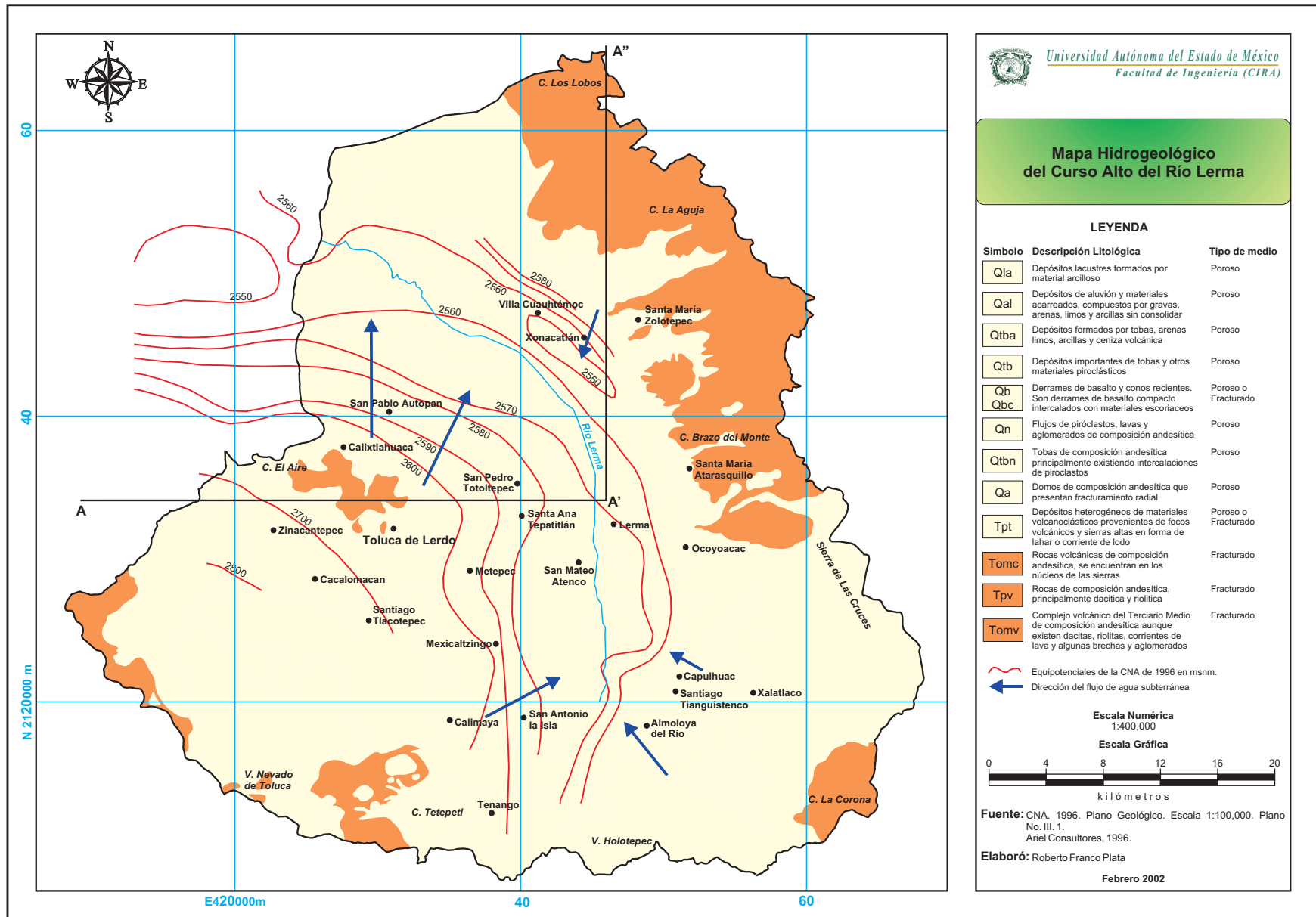


Figura 2.5. Mapa Hidrogeológico esquemático del Curso Alto del Río Lerma.

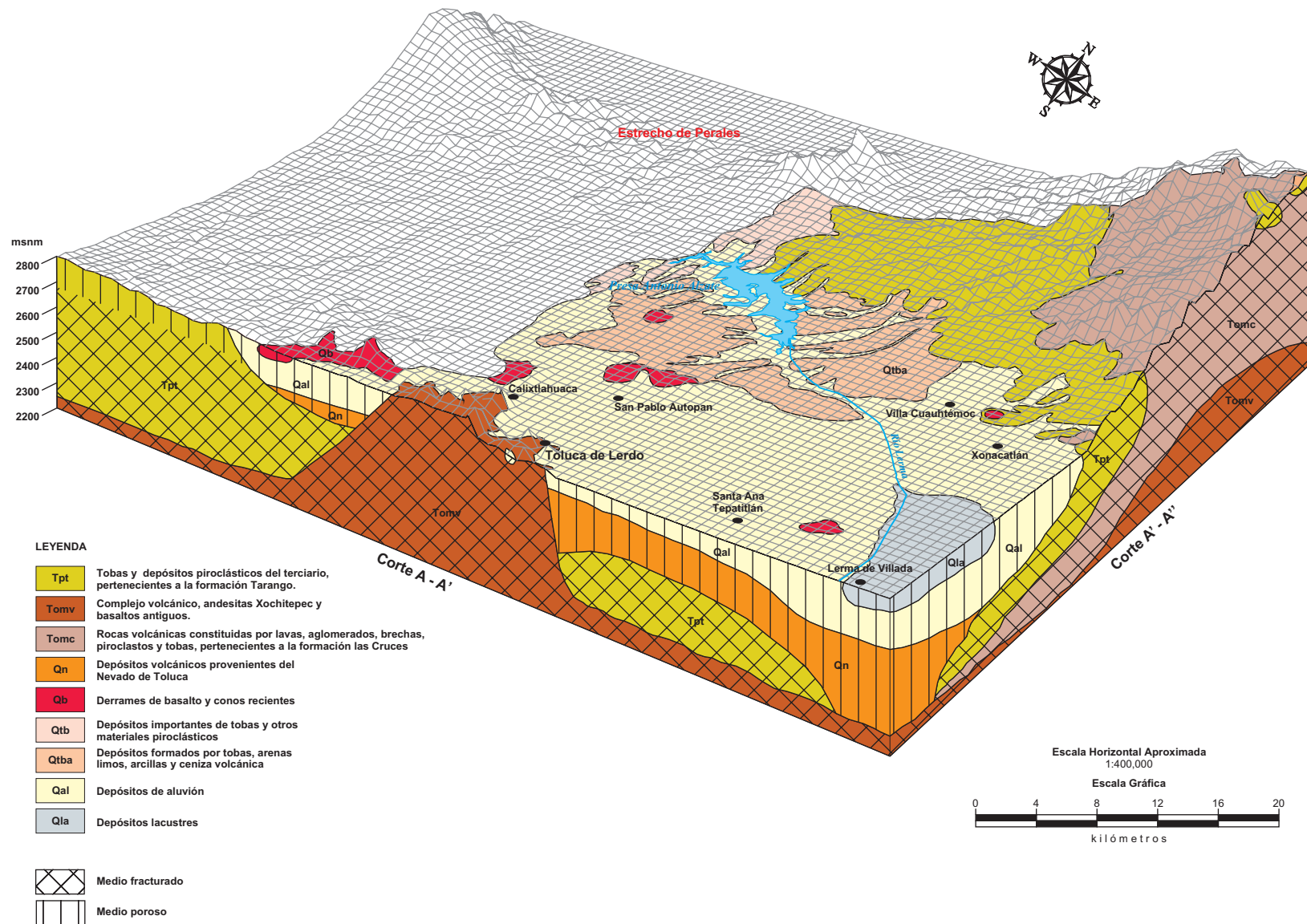


Figura 2.6. Esquema tridimensional del acuífero del Curso Alto del Río Lerma, basado en cortes geológicos AA' y A'A'' (modificado de Ariel Consultores, 1996)

Cuadro 2.1. Valores de K_h y K_v asociados a las formaciones geológicas.

No.	K_h (m/s)	K_v (m/s)	MATERIAL	CAPA
1	2.0×10^{-5}	2.0×10^{-5}	Qal	1
2	5.0×10^{-5}	5.0×10^{-5}	Qtba	1
3	7.0×10^{-6}	7.0×10^{-6}	Tpt	1 y 2
4	2.0×10^{-8}	2.0×10^{-8}	Tpv y Tomc	1 y 2
5	2.0×10^{-5}	2.0×10^{-5}	Qtbn y Qn	1 y 2
6	5.0×10^{-4}	5.0×10^{-4}	Qbc y Qb	1 y 2
7	2.0×10^{-7}	2.0×10^{-7}	Qla	1

Fuente: Ariel Consultores, 1996.

El medio fracturado está representado por las unidades estratigráficas siguientes: Tarango (Tpt), andesitas (Tpv), formación Las Cruces (Tomc) y andesitas Xochitepec (Tomv), estas tres últimas unidades a pesar que se consideran de forma general acuífugos, contienen suficiente agua en alguna de sus áreas afectadas por fracturas. La formación Chichinautzin (Qbc) presenta un fracturamiento más amplio y definido por lo que se considera como área de recarga. Las rocas volcánicas afectadas por tectonismo, y que manifiestan permeabilidad secundaria por fracturamiento, representan zonas de recarga importantes para los acuíferos de la planicie, o bien propiamente acuíferos constituidos en medio fracturado.

A los efectos del funcionamiento hidráulico del acuífero, el medio poroso se consideró como una primera capa (superior), mientras el medio fracturado se consideró como una segunda capa (inferior). Ambas capas, a pesar de estar divididas en ocasiones por materiales impermeables, se consideran como pertenecientes a un mismo acuífero.

El Curso Alto del Río Lerma, se caracteriza por un gradiente hidráulico (Δ) que oscila entre 0.0167 al NW y de 0.0011 al SE (figura 2.5). Por su parte, la dirección principal del flujo subterráneo es de sur a norte, flujo al cual se unen aportaciones radiales de las sierras circundantes. La salida natural se localiza en el estrecho de Perales, coincidente con el cauce del río Lerma (figura 2.5).

2.7. SELECCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

La selección de la región del Curso Alto del Río Lerma, como área de estudio para la presente investigación, se basó en tres cuestiones fundamentales, las cuales se comentan a continuación.

- i. En primer lugar, al crecimiento acelerado en el área de aquellos elementos que aumentan el riesgo de contaminación de la cuenca, tales como el aumento de la población del año 1980 al 2000 (cuadro 2.2) y el desarrollo acelerado de los parques industriales (cuadros 2.3); ambos elementos sin lugar a duda, provocan el aumento de focos potenciales de contaminación en el área de estudio. En las décadas de los años 40 y 50 se dio un proceso de industrialización en el Estado de México, concentrándose la industria en el valle de Toluca (corredor Lerma-Toluca). Con este proceso se inicia la presión sobre uno de los principales recursos de la cuenca, el agua. Esta presión no sólo fue externa, por parte del Distrito Federal, sino también interna por parte de la incipiente industria y por las concentraciones urbanas que se generaron a su alrededor (Sultan, 2001).
- ii. En segundo lugar, el poder contar con la información necesaria para elaborar la cartografía de vulnerabilidad a la escala que el presente trabajo propone. Esta información es producto de numerosas investigaciones que se han realizado en el área en los últimos años; en el cuadro 2.4 se resumen los trabajos desarrollados.
- iii. Y en tercer lugar, y no menos importante, el hecho de la inexistencia de mapas de vulnerabilidad para la protección del Curso Alto del Río Lerma.

Cuadro 2.2. Población total de los municipios pertenecientes al Curso Alto del Río Lerma del año 1980 al 2000.

Municipio	Población en 1980	Población en 1990	Población en 1995	Población en 2000	Incremento de población de 1980 al 2000
Almoloya del Río	6,193	6,777	7,729	8,823	2,630
Atizapán	5,072	5,339	7,147	8,134	3,062
Calimaya	21,876	24,906	31,902	35,166	13,290
Capulhuac	18,257	21,258	25,900	28,700	10,443
Chapultepec	3,675	3,863	5,163	5,727	2,052
Xalatlaco	12,097	14,047	17,601	19,196	7,099
Joquicingo	7,211	7,769	10,223	10,723	3,512
Lerma	57,219	66,912	81,192	99,714	42,495
Metepec	83,030	140,268	178,096	194,265	111,235
Mexicaltzingo	6,079	7,248	8,662	9,217	3,138
Ocoyoacac	33,952	37,395	43,670	49,615	15,663
Otzolotepec	29,112	40,407	49,264	57,534	28,422
Rayón	5,688	7,026	8,300	11,056	5,368
San Antonio la Isla	9,504	7,321	9,118	10,320	816
San Mateo Atenco	33,719	41,926	54,089	59,601	25,882
Temoaya	34,120	49,427	60,851	69,186	35,066
Tenango del Valle	38,381	45,952	54,789	65,147	26,766
Texcalyacac	2,381	2,961	3,744	4,006	1,625
Tianguistenco	37,017	42,448	51,149	57,940	20,923
Toluca	357,071	487,612	564,476	665,617	308,546
Xonacatlán	19,546	28,837	36,141	41,255	21,709
Zinacantepec	60,232	83,197	105,566	121,715	61,483
Total	881,432	1,172,896	1,414,722	1,632,657	751,225

Fuente: INEGI, X Censo General de Población y Vivienda 1980; INEGI, XI Censo General de Población y Vivienda 1990; INEGI, Conteo de Población y Vivienda 1995; INEGI, XII Censo General de Población y Vivienda 2000

Cuadro 2.3. Cantidad de industrias por municipio del Curso Alto del Río Lerma del año 1800 a 1986.

Municipio	Número de industrias de 1800 a 1875	Número de industrias de 1876 a 1911	Número de industrias de 1912 a 1930	Número de industrias en 1970	Número de industrias en 1986
Almoloya del Río	0	5	0	9	13
Calimaya	0	1	0	34	33
Capulhuac	0	2	0	20	41
Chapultepec	0	0	0	5	6
Jalatlaco	0	0	0	0	30
Joquicingo	0	0	0	0	6
Lerma	1	4	0	84	131
Metepec	0	0	0	90	88
Mexicalzingo	0	0	0	49	5
Ocoyoacac	0	4	2	59	38
Otzolotepec	0	1	1	69	19
Rayón	0	0	0	11	5
San Antonio la Isla	0	0	0	3	8
San Mateo Atenco	0	0	0	45	60
Temoaya	0	1	0	62	7
Tenango del Valle	0	14	0	144	62
Texcalyacac	0	0	0	3	5
Tianguistenco	0	3	1	69	106
Toluca	10	41	30	21	711
Xonacatlán	0	0	0	52	23
Zinacantepec	0	5	1	66	81
Total*	11	81	35	895	1,478

Fuente: GEM, 2000.

* Para el año de 1998, el área de estudio contaba con 3,438 empresas manufactureras y de exportación.

Cuadro 2.4. Resumen de estudios previos realizados en la zona de estudio.

Título	Año	Autor (es)	Objetivo	Resultados
Estimación preliminar de los recursos de agua subterránea en la cuenca alta del río Lerma hasta el estrechamiento de Atlacomulco	1966	Servicios Geológicos, S.A. para la DGHCOH	Incrementar hasta donde fuera posible, las captaciones actuales en el Alto Lerma y construir nuevas obras para cubrir las demandas de agua potable de la ciudad de México.	Limita la recarga a los acuíferos en $5.48 \text{ m}^3/\text{s}$ al aplicar el coeficiente empírico de infiltración
Los Acuíferos del Alto Lerma.	1970	Oficina de Estudios Especiales de la CHCVM	Contribuir al abastecimiento de agua a la ciudad de México.	Establece la recarga a los acuíferos en todo el Alto Lerma, incluyendo los valles de Toluca e Ixtlahuaca, en $11 \text{ m}^3/\text{seg.}$ y calibra un modelo matemático representativo del comportamiento de los acuíferos.
Estudios sobre el comportamiento de grietas y su medición en el valle del Alto Lerma.	1978	Consultec, Ingenieros Asociados, S.C.	Estudiar las causas y efectos de los agrietamientos, así como la instrumentación de 15 estaciones de medición con observaciones durante un año, de los desplazamientos, tanto horizontales como verticales.	Concluye que las grietas se deben a la explotación de agua subterránea y se localizan en formaciones lacustres compresibles, cerca de las transiciones geológicas con formaciones más compactas. Además reporta la existencia de aproximadamente 100 grietas en un área de $1,500 \text{ km}^2$.
Manual de diseño, construcción, operación y mantenimiento de pozos en las cuencas del Valle de México y del Alto Lerma.	1986	ININ, S.A	Proponer una metodología para la localización, construcción, operación y mantenimiento de pozos en ambas cuencas, según regionalización de acuíferos.	Elaboración del manual de diseño, construcción, operación y mantenimiento de pozos para la Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica del Departamento del Distrito Federal. Con criterio geohidrológico se delimitaron zonas en las cuencas de México y del Alto Lerma, atendiendo a las características, comportamiento, condiciones de explotación y calidad del agua de sus acuíferos.
Geohidrología del valle de Lerma.	1987	Lesser y Asociados, S.A. de C.V.	Medir los niveles estáticos en los pozos piloto de los valles de Toluca e Ixtlahuaca, determinar la evolución de la superficie piezométrica del acuífero y obtener datos para apoyar los numerosos dictámenes que se requerían sobre solicitudes de perforaciones nuevas, rehabilitaciones de pozos y cancelaciones.	Demuestra la extracción de abatimientos de 70 m en la zona industrial aledaña a la ciudad de Toluca, que disminuyen radialmente hasta mostrar abatimientos entre 10 y 20 m en el resto del valle; en la porción sur, los mayores abatimientos son del orden de 30 m y se presentan hacia Almoloya del Río; a la altura de la población de Lerma, el abatimiento piezométrico es del orden de 40 m hacia el oriente y disminuye a 20 m hacia el poniente; en el área de Santa María Atarasquillo los abatimientos varían entre 30 y 60 m en el período señalado, y en la parte norte del valle de Toluca se localizan los menores abatimientos, del orden de 10 m. Resume que ha habido un abatimiento piezométrico regional en el acuífero de todo el valle, siendo más notable en dos áreas: la zona industrial de la ciudad de Toluca y en una franja alargada al pie de la sierra de Las Cruces, ambas zonas caracterizadas por la extracción de abundantes volúmenes de agua subterránea por medio de pozos, los cuales corresponden al DDF.

Cuadro 2.4. Resumen de estudios previos realizados en la zona de estudio (continuación).

Título	Año	Autor (es)	Objetivo	Resultados
<p>Cuantificación del agua subterránea en el valle de Lerma, para determinar las causas de la disminución de caudales de extracción.</p>	<p>1989</p>	<p>Perforaciones Leor, S.A.</p>	<p>Objetivos muy diversos y ambiciosos, entre los cuales destacan el estudiar la evolución de niveles y gastos de extracción en cada pozo, para emitir un dictamen sobre su comportamiento y vida útil; además de investigar posibilidades de un agotamiento de los horizontes acuíferos como causa del detrimento en los caudales de producción de los pozos y establecer una relación abatimiento-agrietamiento-afectación de pozos, para los valles de Toluca e Ixtlahuaca.</p>	<p>Se concluye que el agua que ingresa a la ciudad de México proveniente del Alto Lerma ha registrado disminuciones a través del tiempo; en 1974 se estimaba en 14.6 m³/s, en 1985 de 6.24 m³/s y en 1989 de 4.32 m³/s. Asimismo, se hicieron 16 pruebas de bombeo en el valle de Toluca y se asienta que las causas principales de la disminución del bombeo son: pozos suspendidos para no afectar la estabilidad de las presas Alzate y Ramírez; pozos suspendidos por mala calidad del agua subterránea y, tibiamente señalado, un posible aumento del agua destinada al riego local en detrimento del volumen conducido a la ciudad de México.</p>
<p>Estudio para el diagnóstico del acuífero del valle de Toluca, para implementar la reglamentación de la extracción de agua subterránea.</p>	<p>1992</p>	<p>Lesser y Asociados, S.A. de C.V.</p>	<p>Determinar las condiciones del acuífero, implementar un modelo simplificado y plantear alternativas de aprovechamiento de agua en zonas conflictivas.</p>	<p>Resultó un estudio muy completo desde el punto de vista de la hidrología subterránea, pues después de abordar aspectos geológicos, piezométricos, determinar volúmenes de extracción, características hidrodinámicas y balance de las aguas subterráneas, se aplicó el modelo PLASM, derivado del Prickett y Lonquist, adaptado por el Consultivo de la CNA, con el cual se investigaron distintas alternativas de reordenación y manejo que teóricamente permiten recuperaciones piezométricas en el área urbana de Toluca y la zona industrial.</p>
<p>Estudio hidrogeológico regional de los valles de Toluca e Ixtlahuaca.</p>	<p>1992</p>	<p>Grupo Herram de México, S.A. de C.V</p>	<p>Evaluar las características y condiciones hidrogeológicas en los valles señalados, a fin de corroborar y estructurar los modelos conceptual y de funcionamiento de los acuíferos; establecer los efectos generados por las extracciones de agua subterránea, especialmente en las áreas donde operan los pozos de la DGCOH; delimitar las estructuras y unidades del subsuelo aprovechables como acuíferos y realizar un balance de aguas subterráneas de la zona.</p>	<p>Buenos resultados en todos los aspectos planteados como objetivos. Consideran el estudio geohidrológico más completo de la zona, ya que aporta una climatología, un censo de aprovechamientos y sus extracciones, con buena amplitud los aspectos piezométricos, calidad del agua y caracterización hidrogeoquímica, un modelo conceptual del funcionamiento del acuífero y un balance hídrico que integra la evaporación calculada por varios métodos.</p>

Cuadro 2.4. Resumen de estudios previos realizados en la zona de estudio (continuación).

Título	Año	Autor (es)	Objetivo	Resultados
Actualización de la información de los acuíferos del Alto Lerma (valles Toluca e Ixtlahuaca, Estado de México), y la adaptación de su modelo DAS al lenguaje BASIC.	1993	M.I. Germán E. Figueroa Vega.	Actualizar el censo de aprovechamientos del agua subterránea y las correspondientes extracciones por usos	Cumple con los objetivos planteados, llegando a un total anual de extracciones de 332 Mm ³ .
Estudio de simulación hidrodinámica y diseño óptimo de las redes de observación de los acuíferos de Calera, San Luis Potosí y Toluca (3. Acuífero de Toluca)	1996	Ariel Consultores, S. A.	Utilizar el modelo tridimensional de simulación y predicción VisualMODFLOW, así como la aplicación geoestadística para definir una red óptima de pozos de observación, minimizando el número de sitios de medida con un error de varianza mínimo de los registros, con base en la correlación espacial de las cargas hidráulicas.	Obtienen una red óptima de monitoreo para el valle de Toluca, a partir de la profundidad de los niveles estáticos, ésta queda reducida a 142 pozos, 32 menos que los 178 que integran la red actual, lo que representa una disminución del costo de las observaciones en un poco más del 20 %. El balance de aguas subterráneas derivado del modelo, manifiesta para 1996 que la sobreexplotación de los acuíferos es del orden de 47.9 Mm ³ anuales, déficit que se cubre a costa del almacenamiento subterráneo; este valor resulta un poco mayor al obtenido en el presente trabajo, de 19.4 Mm ³ anuales, también para 1966, y muy similar a los 41 Mm ³ anuales obtenido en estudios previos.
Estudio para el diseño de redes de monitoreo de los acuíferos de los valles de Toluca y Atlacomulco-Ixtlahuaca, en el Estado de México.	1996	UNITECNIA S. A. de C.V.	Efectuar la primera campaña de mediciones de los niveles estáticos en los puntos disponibles de la red, procesando dicha información hasta obtener la configuración de elevaciones correspondientes. Proponer y caracterizar las obras o acciones para complementar la red de monitoreo existente.	Logran verificar en campo 93 puntos en total para ambos valles, que representan piezómetros actualmente instalados, pozos en operación (pozos piloto), o sitios para la construcción de las nuevas estaciones que se proponen.
Actualización de mediciones piezométricas de los acuíferos reactivados en los valles de Toluca y Atlacomulco-Ixtlahuaca, en el Estado de México.	1997	UNITECNIA S. A. de C.V.	Efectuar una segunda campaña de mediciones de los niveles estáticos en los pozos piloto y piezómetros de la red de monitoreo establecida en 1996, procesando dicha información hasta obtener la configuración de elevaciones correspondientes.	Logran verificar en campo el nivel estático en 6 pozos piloto, 57 piezómetros de la red de 1996 y 2 piezómetros recientes construidos por la GRAVM.

CAPÍTULO 3

LA CARTOGRAFÍA DE VULNERABILIDAD COMO HERRAMIENTA DE PROTECCIÓN DE ACUÍFEROS

3.1. ANTECEDENTES

Las primeras investigaciones tuvieron lugar en Europa, a mediados de los años sesenta, y se desarrollaron, con carácter extensivo, en los años setenta en los países europeos (principalmente en Francia, Alemania y Checoslovaquia) y en Estados Unidos, si bien se trataba inicialmente de grandes coberturas territoriales a escala regional, en general de cobertura nacional.

La siguiente generación de mapas de vulnerabilidad se abordó con el fin de dar cobertura a las escalas medias a grandes que requieren las visiones regionales y comarcales. Así, desde principios de los ochenta se ha publicado en todo el mundo un considerable número de mapas de vulnerabilidad de las aguas subterráneas frente a la contaminación procedente de diversas fuentes.

Algunos de los mejores y más representativos ejemplos de la primera generación de mapas de vulnerabilidad son los recopilados en un documento de síntesis realizado por Vrána (1984), que incluye ejemplos franceses, checoslovacos, polacos, rusos, búlgaros, alemanes y españoles (IGME, 1976 y 1981).

Pero quizá la mejor síntesis sobre la generación de mapas de vulnerabilidad sea la proporcionada por Vrba y Zaporozec (1994), en una publicación de la Asociación Internacional de Hidrogeólogos, que resume las principales realizaciones en la materia, sus objetivos, resultados, aptitudes y limitaciones de aplicación de este tipo de cartografía.

A grandes rasgos, los antecedentes más significativos de este tipo de cartografía quedan recogidos en los siguientes párrafos.

El mapa de vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos en Francia, a escala 1:1,000,000, elaborado por Albinet (1970) es considerado la primera aportación a la denominación "mapa de vulnerabilidad". Basado en criterios de composición litológica de rocas y depósitos, define seis categorías primarias y nueve secundarias de acuerdo con el riesgo potencial creciente de contaminación. Tiene un carácter orientativo previsor, a escala nacional, de localización de las regiones más sensibles del país al riesgo potencial de contaminación derivado de acciones humanas.

La siguiente fase, en este tipo de cartografía, estuvo orientada a cubrir el territorio nacional, desde las zonas más sensibles a las menos vulnerables, pero a escalas de medias a grandes, con objeto de preservar las aguas subterráneas de abastecimiento público de la contaminación producida por cualquier causa. Entre estos cabe resaltar, por su consistencia y carácter sistemático, los mapas de vulnerabilidad realizados en Francia por el Bureau de Recherches Geologiques et Minières (BRGM), a escalas 1:50,000 y 1:100,000; a partir de 1973 a razón de cuatro hojas por año.

En Checoslovaquia se inicia, en 1970, un programa de cartografía en serie de la vulnerabilidad a la contaminación de las aguas subterráneas del país a escala 1:200,000. Desde entonces y hasta mediados de los ochenta tiene lugar un extenso desarrollo de este tipo de cartografía a escala nacional y regional, siendo esta temática objeto de celebración de varios congresos: uno en Holanda en 1987 sobre metodologías y avances en la aplicación práctica de éstas y otro en 1989, celebrado en Alemania sobre clasificación y metodologías temáticas de elaboración de mapas de vulnerabilidad.

La mayor parte de estos mapas de vulnerabilidad están basados en criterios litológicos y edafológicos de las zonas no saturadas, así como en criterios hidrogeológicos de las características del flujo en las zonas saturadas de los acuíferos. Suelen tener un carácter orientativo para prevenir la ubicación de actividades contaminantes concretas y están enfocados a aportar información a los procesos de toma de decisiones que afectan a niveles de planeación.

La siguiente generación de mapas de vulnerabilidad, que se inicia en la segunda mitad de los ochenta, está orientada a escalas más detalladas, propias del ámbito local, no sólo enriquecidas con el mayor detalle cartográfico, sino también, y lo que es más importante, a través de la incorporación de mayor información hidrogeológica sintética en cada una de las categorías de vulnerabilidad. Supone el paso de la cartografía cualitativa de interpretación e integración de mapas temáticos, a la cartografía semicuantitativa de escala detallada que integra además información cuantitativa medible de variables hidrogeológicas significativas (p. ej. espesor de zona no saturada, variaciones de la superficie piezométrica, recarga neta, parámetros cualitativos del agua y parámetros hidráulicos, entre otros) que permiten subdividir el territorio en recintos más pequeños de características de vulnerabilidad más concretas (EVREN, 1998).

3.2. CONCEPTUALIZACIÓN DE LA VULNERABILIDAD

El concepto de vulnerabilidad de acuíferos ha sido utilizado en hidrogeología por Margat (1968); Albinet y Margat (1970), y más ampliamente en los años 80 y 90 por varios autores como Foster (1987); NRC (1993) y Vrba y Zaporozec (1994).

El término "vulnerabilidad a la contaminación de las aguas subterráneas" fue introducido a finales de la década de los años sesenta por el hidrogeólogo francés Margat y el concepto se basa en la hipótesis de que el medio geológico y la cubierta edafológica proporcionan un cierto grado de protección a las aguas subterráneas, frente a contaminantes de origen tanto natural como derivados de actividades humanas (Margat, 1968).

Albinet y Margat (1970), definen la vulnerabilidad de acuíferos como la posibilidad de introducción y propagación de contaminantes, bajo condiciones naturales, desde la superficie del terreno hasta el acuífero.

Por su parte, Foster (1987) retoma el concepto de Albinet y Margat (1970), el cual menciona que la vulnerabilidad de los acuíferos frente a la contaminación es una propiedad intrínseca del medio que determina la sensibilidad a ser afectados negativamente por un contaminante externo.

El concepto original de vulnerabilidad, definido por los investigadores comentados, evolucionó a lo largo del tiempo, pasando a incluir factores como grado de protección contra contaminantes por la capa sobreyacente al acuífero, el potencial de purificación del agua contaminada en el acuífero, condiciones de flujo subterráneo, condiciones climáticas, riesgos de contaminación por el tipo de uso y ocupación del suelo.

Un ejemplo de definiciones de vulnerabilidad, en el cual se han introducido algunos elementos nuevos, es el establecido en 1993 por el Committee on Techniques for Assessing Groundwater Vulnerability of the National Research Council (USA), el cual definió el término vulnerabilidad de acuíferos a contaminantes de una forma diferente a otras investigaciones, ya que señala que es “la tendencia o la probabilidad de que contaminantes alcancen una posición específica en el sistema de aguas subterráneas, después de su introducción en algún lugar de la superficie” (NRC, 1993).

En el año de 1994, con el ánimo de unificar criterios en cuanto a la definición de vulnerabilidad, la Asociación Internacional de Hidrogeólogos, a través de Vrba y Zaporozec (1994), emplean y recomiendan el uso del término vulnerabilidad como una propiedad intrínseca de un sistema hidrogeológico que depende de la sensibilidad del sistema a impactos de origen natural y humano. Dentro de este concepto se definen dos términos:

- **Vulnerabilidad intrínseca o natural:** es una función de las características hidrogeológicas del acuífero, de los suelos y materiales geológicos que lo cubren.

- **Vulnerabilidad específica o integrada:** incluye tanto características hidrogeológicas del acuífero como algunos factores de carácter externo (tipo climático, tipo de carga contaminante).

De los conceptos comentados en los párrafos anteriores, sólo dos se utilizarán como base conceptual para el desarrollo del presente trabajo, en primer lugar se empleará la definición de vulnerabilidad intrínseca de Vrba y Zaporozec (1994) caracterizado por la mayor o menor probabilidad de que un contaminante proveniente de la superficie llegue al acuífero (figura 3.1), y en segundo lugar, el de la NRC (1993), el cual se explica como la tendencia o probabilidad de que contaminantes alcancen una posición específica en el sistema de aguas subterráneas, después de la introducción en algún lugar de la superficie (figura 3.1); y específicamente se trabajó con la vulnerabilidad intrínseca (o natural), la cual es función únicamente de factores hidrogeológicos, esto es, de las características del acuífero, del suelo y de los materiales geológicos.

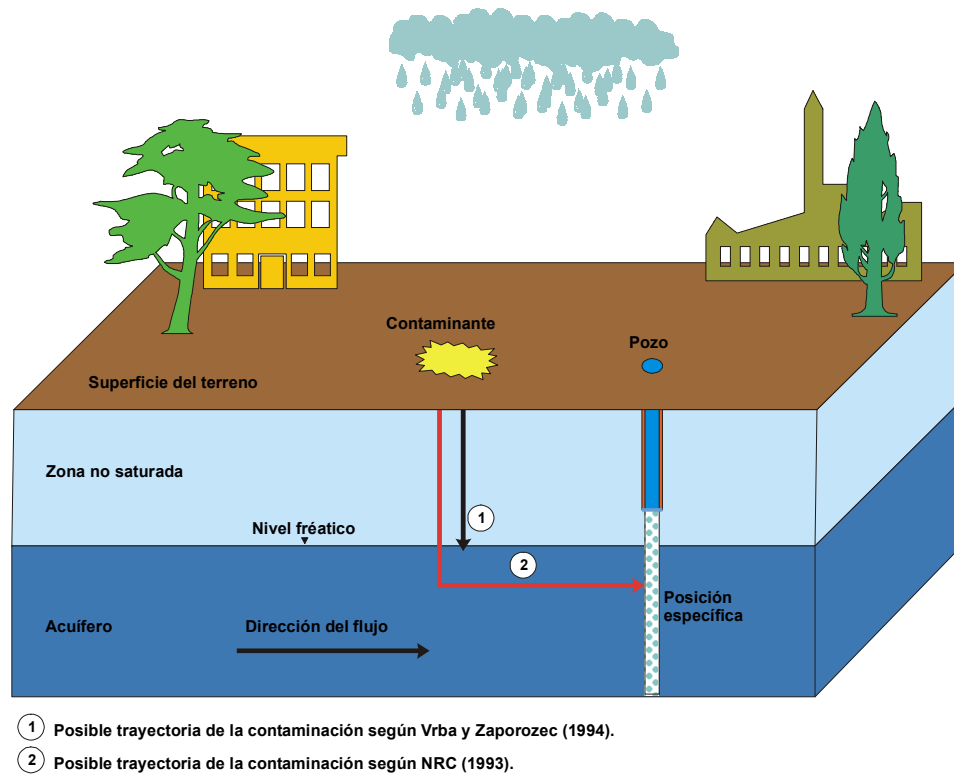


Figura 3.1. Representación de los conceptos de vulnerabilidad utilizados en la presente investigación.

3.3. MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE VULNERABILIDAD DE ACUÍFEROS

Los métodos para la evaluación de la vulnerabilidad son diversos, cada uno con sus propias limitaciones, exigencias de datos muy diferentes y adecuados a objetivos concretos (cuadro 3.1). Ello aconseja que la selección de la metodología se haga atendiendo a los objetivos de la evaluación y tipo, cantidad y calidad de los datos requeridos.

En el cuadro 3.1 se muestran los diferentes métodos de cartografía de la vulnerabilidad de acuíferos, describiendo sus objetivos principales y los parámetros a determinar. Para representar la posible complejidad, algunos autores han incluido varios parámetros en sus métodos (Hagerty et al., 1973; Phillips et al., 1977; Kulf et al., 1980, entre otros), que reunidos muchas veces bajo la forma de multiplicación o de adición, pierden su significado físico. La utilización de muchos factores, sumando o multiplicando la incertidumbre en la información, hacen que la posibilidad de errar sea elevada. En otras ocasiones, los métodos requieren informaciones detalladas de pocos puntos, olvidándose que la variación espacial de los parámetros es mucho más importante.

A pesar de la gran cantidad de métodos que existen para determinar la vulnerabilidad (cuadro 3.1) sólo algunos han sido utilizados reiteradamente, entre los que destacan el GOD, DRASTIC, SINTACS y AVI.

A continuación se presentan las características principales de los métodos más utilizados:

Cuadro 3.1. Principales métodos para la determinación de la vulnerabilidad de acuíferos.

MÉTODO	EVALUACIÓN DE:	FACTORES	REFERENCIA
Surface Impoundment Assessment	Sistemas de disposición de aguas servidas	Zona no saturada Importancia del recurso Calidad del agua subterránea Peligrosidad del material	Le Grant (1964)
Albinet y Margat	Vulnerabilidad general	Conexión del acuífero con el agua superficial Características de la zona saturada Profundidad del agua subterránea Características hidrogeológicas Conductividad hidráulica del acuífero	Albinet y Margat, (1970)
Poluicao dos lencois acuíferos	Vulnerabilidad general	Geología (litología y estructura)	Taltasse (1972)
Site Ranking System	Disposición de productos químicos nuevos y en operación	Suelos, características hídricas, sorción y taponamiento químico Hidrodinámica del acuífero Contaminación próxima	Hagerty et al. (1973)
Waste-Soil Interaction Matrix	Disposición de residuos sólidos y líquidos y nuevas industrias	Efectos en la salud Características productos químicos Comportamiento del producto Capacidad del suelo de atenuación Hidrogeología Característica del lugar	Philips et al. (1977)
Mapas de vulnerabilidad	Vulnerabilidad general	Características litológicas Área de recarga y descarga	Duarte (1980)
Site Ranking Methodology	Disposición de residuos sólidos y líquidos y nuevas industrias	Receptor - población / uso del agua / uso local / degradación ambiental Caminos – nivel y tipo de contaminación / profundidad del nivel del agua / pluviometría / permeabilidad del suelo Características del residuo – toxicidad / persistencia Práctica de manejo – aspectos operacionales y constructivos	Kulfs et al. (1980)
TPE	Áreas de riesgo de contaminación	Velocidad del agua subterránea Porcentaje de arcilla Actividad potencialmente contaminante Exploración de acuíferos	Silva et al. (1981)
Hazard Ranking System	Áreas prioritarias para limpieza de acuíferos	Migración - características del medio y residuo / cantidad de productos / población próxima Explosión y fuego Contacto directo	Caldwell et al. (1981)

Cuadro 3.1. Principales métodos para la determinación de la vulnerabilidad de acuíferos. (Continuación)

MÉTODO	EVALUACIÓN DE	FACTORES	REFERENCIA
Metodología de disposición de salmueras	Agua de formación en campos de petróleo y gas	Método de disposición Volumen Geología Densidad de pozos de petróleo Proximidad de pozos de agua	Western Michigan University (1981)
Landfill Site Ranting (Método Le Grand-Brown)	Rellenos sanitarios nuevos y en operación	Distancia del relleno y pozos productores Profundidad del nivel del agua Gradiente del acuífero Permeabilidad y capacidad de atenuación	Le Grant (1983)
Índice de pesticidas	Pesticidas, uso normal	Características físico- químicas del pesticida Clima Perfil del suelo Cosecha	Rao et al. (1985)
GOD	Vulnerabilidad general	G litología del acuífero O litología zona vadosa D profundidad del agua	Foster (1987)
DRASTIC	Vulnerabilidad general	D profundidad del agua subterránea R recarga neta A medio acuífero S suelo T topografía I impacto del acuífero C conductividad hidráulica	Aller et al. (1987)
Goossens y Van Damme	Vulnerabilidad general	Espesor, textura y minerología Propiedades físicas y químicas Profundidad del agua subterránea Características hidrogeológicas	Goossens y Van Damme (1987)
Carter y Palmer	Vulnerabilidad general	Conexión del acuífero con el agua superficial Profundidad del agua subterránea Características hidrogeológicas Conductividad hidráulica del acuífero	Carter y Palmer (1987)
Mapas de vulnerabilidad de aguas subterráneas para nitratos	Vulnerabilidad al nitrato en la actividad agrícola	Tipo de suelo Características litológicas del acuífero	Palmer (1988)
Riesgo Asociado a Sistema de Saneamiento In Situ	Evaluar áreas de mayor riesgo por sistemas de saneamiento <i>In Situ</i>	Vulnerabilidad (GOD) Densidad de población Análisis indicadores físico-químicos (conductividad eléctrica)	Ferreira & Hirata (1993)

Cuadro 3.1. Principales métodos para la determinación de la vulnerabilidad de acuíferos. (Continuación)

MÉTODO	EVALUACIÓN DE	FACTORES	REFERENCIA
SINTACS	Vulnerabilidad general	Igual que el DRASTIC, pero con pesos e intervalos diferentes	Civita et al. (1994)
AVI	Vulnerabilidad general	Espesor, textura y mineralogía Permeabilidad Características de la zona saturada Profundidad del agua subterránea	Van Stempvoort et al. (1993)
ISIS	Vulnerabilidad general	Topografía (pendiente) Espesor, textura y mineralogía Propiedades físicas y químicas Recarga neta Características de la zona saturada Profundidad del agua subterránea Características hidrogeológicas Espesor del acuífero Tipo de uso del suelo	Civita y De Regibus (1995)
EPIK	Vulnerabilidad general para acuíferos kársticos	Topografía (pendiente) Espesor, textura y mineralogía Conexión del acuífero con el agua superficial Recarga neta Características de la zona saturada Características hidrogeológicas Tipo de uso del suelo	Doerfliger y Zwanlen (1997)

Fuente: Modificado de Hirata y Reboucas, (1999).

Método GOD

El método GOD se utiliza para evaluación de vulnerabilidad intrínseca de acuíferos, es un método práctico y simple donde el grado de vulnerabilidad es resultado del producto de los valores atribuidos a los tres factores considerados por Foster y Hirata, (1988), y descritos a continuación:

- Tipo de ocurrencia del agua subterránea (o la condición del acuífero);
- Caracterización de los estratos encima de la zona saturada, en términos de grado de consolidación y tipo litológico.
- Profundidad del nivel del agua subterránea.

Los valores atribuidos a esos parámetros varían de 0 a 1. El producto de esos tres factores da la medida relativa de la vulnerabilidad del acuífero, como se muestra en la figura 3.2.

En este método, la vulnerabilidad del acuífero varía de 0 a 1, El menor valor de vulnerabilidad es 0.0016 si existe un acuífero y 0 si no existe. El valor 1 representa la vulnerabilidad más elevada. Son adicionados sufijos cualitativos a los índices numéricos para indicar el grado de fracturamiento y capacidad de atenuación de las rocas y suelo sobrepuestos al acuífero.

El método GOD ha sido ampliamente usado en muchas partes del mundo (González et al., 1997; Mejuto et al., 2000; Gogu y Dassargues, 2000a; Valcarce et al., 2001; entre otros), este uso, ha sido facilitado por el hecho de que este método sólo considera tres parámetros del medio, característica que permite su empleo en aquellas áreas donde no se cuenta con una gran cantidad de datos.

Los resultados obtenidos por este método son más efectivos cuando las áreas evaluadas presentan altos contrastes en el índice de vulnerabilidad, es decir, en las áreas donde estos contrastes son pequeños, el GOD tiende a dar una distribución homogénea de los valores (Corniello et al, 1997).

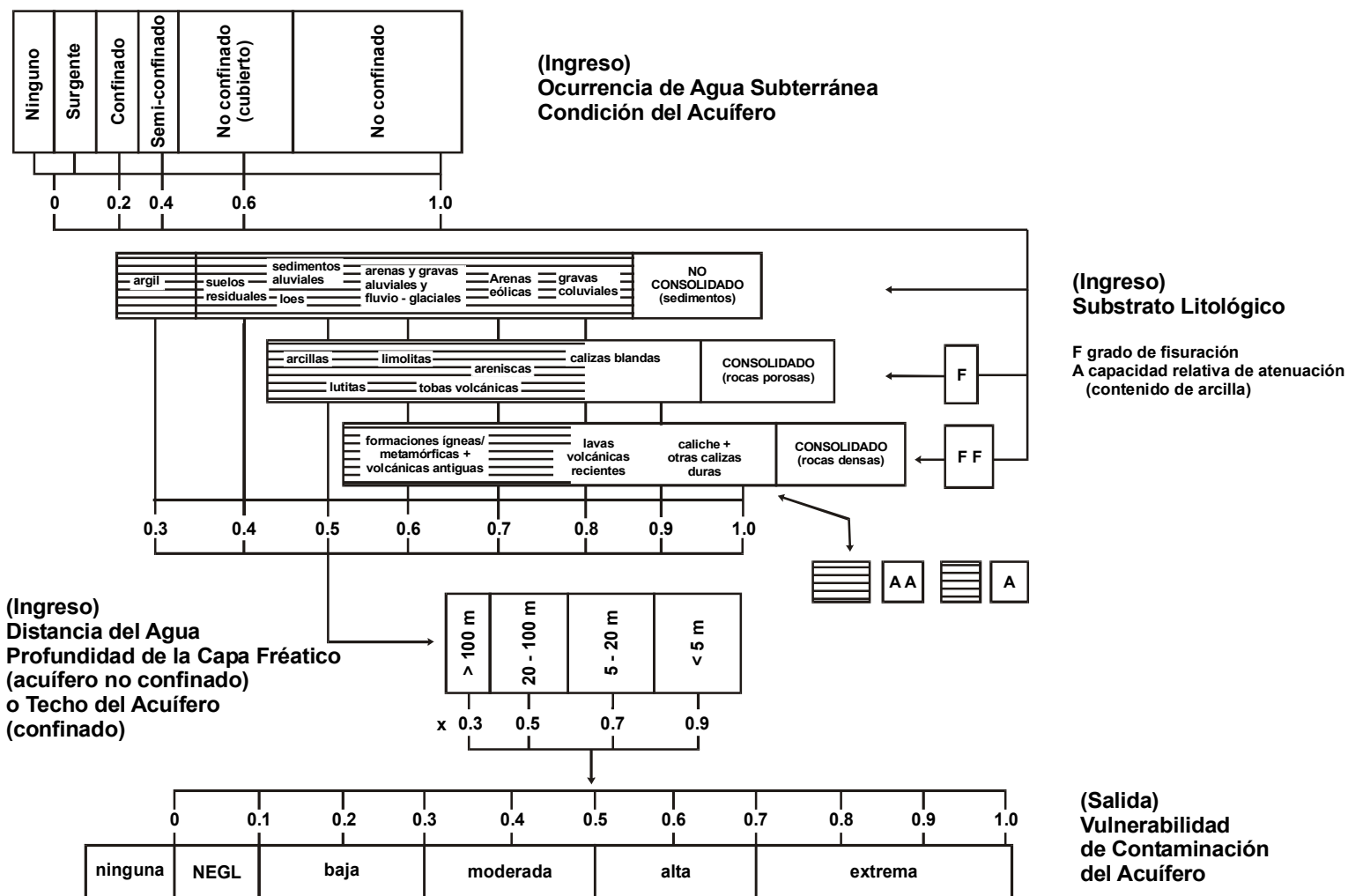


Figura 3.2. Sistema GOD para la evaluación del índice de vulnerabilidad del acuífero (Foster, 1987).

Método DRASTIC

El método DRASTIC (Aller et al., 1987) es probablemente el método más utilizado en los Estados Unidos y Canadá, para evaluación de vulnerabilidad regional de acuíferos. Este método se basa en la identificación de los ambientes hidrogeológicos y en el establecimiento de la vulnerabilidad del acuífero con base a un esquema jerárquico numérico de los elementos que componen el acrónimo de las siglas en inglés: profundidad al acuífero (Depth water table); recarga neta (Net Recharge); litología del acuífero (Aquifer media); tipo de suelo (Media Soil); topografía (Topography); litología de la zona no saturada o vadosa (Impact) y conductividad hidráulica (Hydraulic Conductivity). La sigla DRASTIC corresponde a las iniciales de los parámetros usados para evaluar la vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos.

La capacidad de protegerse que tiene un acuífero es el resultado de la conjunción de muchos factores. Estos factores difieren en la importancia relativa que tienen a la hora de evaluar la vulnerabilidad, por lo que cada parámetro tiene un ponderador predeterminado y fijo, que refleja la importancia relativa de ese parámetro en el cálculo de vulnerabilidad. Los parámetros asumen valores que varían de 1 a 10 y los pesos varían de 1 a 5 (cuadro 3.2).

El índice de vulnerabilidad final (D_i) es la suma de los siete parámetros, permitiendo encontrar un valor numérico para cada punto usando la siguiente fórmula:

$$D_i = \sum_{j=1}^7 (W_j \times R_j) \quad (1)$$

donde D_i es el índice DRASTIC para cada unidad del mapa, W_j es el factor de peso para el parámetro j y R_j es el puntaje para el parámetro j respectivamente.

Los índices DRASTIC varían en el intervalo de 23 a 230 para el índice general. La vulnerabilidad aumenta a medida que aumenta el valor del índice. Este índice no encierra un concepto en sí mismo, pero permite comparar vulnerabilidades de distintas zonas.

Cuadro 3.2. Pesos asignados a los parámetros de la metodología DRASTIC

Parámetro	Peso para índice general
(D) Profundidad del nivel freático	5
(R) Recarga neta	4
(A) Litología del acuífero	3
(S) Tipo de suelo	2
(T) Topografía (pendiente)	1
(I) Litología de la zona no saturada	5
(C) Conductividad hidráulica del acuífero	3

Fuente: Aller et al., (1987).

Para ser aplicada, esta metodología debe reunirse una serie de características:

- Que el contaminante sea introducido en la superficie del terreno,
- Que el contaminante penetre con el agua de recarga,
- Que el contaminante tenga la movilidad del agua,
- Que el área evaluada sea mayor o igual a 45 ha.

Cuando no se cumplen estas condiciones, la evaluación del potencial de contaminación del agua subterránea mediante este método no es confiable.

De acuerdo a los parámetros propuestos, el método DRASTIC toma en cuenta diferentes aspectos que condicionan el transporte del contaminante en el medio subterránea y los procesos de atenuación. Una vez implementada esta metodología, es posible identificar áreas de mayor o menor susceptibilidad a la contaminación del agua subterránea.

Método SINTACS

Es un método derivado del DRASTIC, fue elaborado por el hidrogeólogo italiano Civita (1994). Este método usa los siete parámetros del DRASTIC, pero considera diferentes pesos y puntajes, por lo que tiene la posibilidad de usar clasificaciones diferentes. El resultado final se muestra en seis clases de vulnerabilidad (cuadro 3.3).

Para calcular el índice de vulnerabilidad SINTACS se utiliza la siguiente fórmula:

$$I_v = \sum P_{(1,7)} \times W_{(1,n)} \quad (2)$$

donde:

I_v = índice de vulnerabilidad del método SINTACS

$P_{(1,7)}$ = puntaje de cada uno de los siete parámetros

$W_{(1,n)}$ = peso asociado

n = número de peso asignado a cada parámetro

Las características que distinguen este método del DRASTIC, es que incluyen en su análisis el uso del suelo y la interrelación de las aguas subterráneas con las superficiales, según Gogu et al., (1996), estas características hacen que por este método se obtengan con mayor facilidad áreas con alta vulnerabilidad.

Cuadro 3.3. Clasificación del índice de vulnerabilidad del método SINTACS

Rango del índice	Clase de vulnerabilidad
< 80	Muy baja
80 - 105	Baja
106 - 140	Media
141 - 186	Alta
187 - 210	Muy alta
> 210	Extremadamente alta

Fuente: Sanhoury, (1998).

Método AVI

El AVI (Van Stempvoort et al., 1993) es uno de los métodos más sencillos, fáciles y rápidos para cuantificar la vulnerabilidad, tan sólo utiliza la conductividad hidráulica (K) y el espesor de las capas de diferente material (d) que se encuentran sobre el nivel del agua.

Es un índice para cuantificar la vulnerabilidad de un acuífero por medio de la resistencia hidráulica “ c ” al flujo vertical del agua al pasar por los diferentes materiales sobre el acuífero.

La resistencia hidráulica “ c ” se calcula con la siguiente fórmula:

$$c = \sum_{i=1}^n d_i / K_i \quad (3)$$

donde:

c = Resistencia hidráulica total (inverso de la conductividad hidráulica, tiene dimensiones de tiempo) indica el tiempo aproximado de flujo por unidad de gradiente de carga, que atraviesa las capas de sedimentos de la zona no saturada. A mayor resistencia hidráulica c , menor vulnerabilidad.

d_i = Espesor de cada capa sobre el acuífero.

K_i = Conductividad hidráulica de cada capa.

Para construir el mapa de vulnerabilidad se necesitan las coordenadas del pozo en cuestión y se utiliza el $\log c$ para cada pozo; para posteriormente interpolar los valores de $\log c$. Esto da como resultado una zonificación de resistencias hidráulicas, las cuales están directamente relacionadas con la vulnerabilidad.

De los cuatro métodos comentados, este ha sido el menos utilizado, sin embargo, cuando se han comparado sus resultados con los obtenidos por el DRASTIC o SINTACS, se ha observado por lo general buena correlación (Civita y Regibus, 1995).

3.4. SELECCIÓN DEL MÉTODO

Para poder llevar a cabo la selección del método adecuado de cartografía de vulnerabilidad de acuíferos, para ser aplicado en la presente investigación, fue necesario analizar diferentes estudios, en los cuales se utilizaron varios métodos de forma simultánea, con la finalidad de conocer las ventajas y desventajas de cada uno de los métodos de vulnerabilidad.

Uno de los pocos estudios de comparación de métodos de vulnerabilidad, fue realizado por un equipo de investigadores italianos (Corniello et al., 1997), para evaluar la vulnerabilidad del acuífero en la región de “Piana Campana” en Italia del Sur; donde probaron los modelos DRASTIC, SINTACS, GOD y AVI, para llevar a cabo una comparación cualitativa, especificando los aspectos de las clases de vulnerabilidad que fueron considerados. Se pudo mostrar que el método SINTACS, comparado con los otros tres, genera zonas de vulnerabilidad muy altas en las áreas que tienen relación con las interacciones entre las aguas subterráneas y las del acuífero. Este resultado está fuertemente influenciado por la clasificación de diferentes pesos usados para el área afectada por la interrelación aguas superficiales – acuífero. Un resultado similar se obtuvo en un estudio de valoración de vulnerabilidad que se realizó en el cono aluvial de Prahova - Teleajen (Gogu et al., 1996), aplicando localmente el método SINTACS junto con un método de sistema de matriz, desarrollado localmente por un equipo de investigadores Rumanos.

Por otro lado, en la comparación realizada en “Piana Campana”, se pudo observar que mediante el modelo DRASTIC se obtenían áreas de baja vulnerabilidad mayores que en el SINTACS. Al mismo tiempo, el modelo SINTACS parece darle más importancia al parámetro de uso de suelo, debido a que usa diferentes intervalos de clasificación de peso, en áreas donde el grado de vulnerabilidad tiene variaciones moderadas, por su parte, el método GOD proporcionó una distribución homogénea del valor, por lo que este método puede usarse sólo en áreas con una alta vulnerabilidad contrastada. Por su parte, los resultados obtenidos por el AVI, muestran como este método a pesar de realizar su análisis con pocos parámetros, proporciona resultados similares a los del DRASTIC y SINTACS. Finalmente, una comparación estadística de todos los mapas de vulnerabilidad, mostró una mayor semejanza

entre el DRASTIC y el método SINTACS, así como una correlación buena entre estos dos y el método de AVI.

Por su parte, Civita y De Regibus (1995) realizaron otro interesante estudio comparativo de cinco métodos de análisis de vulnerabilidad de las aguas subterráneas, con el objetivo de cubrir diferentes situaciones hidrogeológicas, el estudio se llevo a cabo en tres áreas específicas en el norte de Italia (regiones llanas, onduladas y montañosas). Los métodos considerados fueron el DRASTIC, SINTACS, GOD, el Método Flemish (Goossens y Van Damme 1987) y el ISIS. Aplicando los diferentes métodos en la misma zona y usando los mismos datos, se pudo demostrar que los métodos relativamente simples pudieron proporcionar resultados semejantes a los complejos. Además, pudo confirmarse que estos métodos (por ejemplo el GOD) tienden a adaptarse mejor para representar áreas grandes. Por otro lado, los métodos DRASTIC y SINTACS tienen una mejor precisión y flexibilidad, lo que los hace más efectivos en estudios detallados. Los demás métodos (ISIS y Flemish) no fueron capaces de ofrecer buenos resultados para todas las áreas de estudio.

Otro estudio interesante, fue el realizado en la misma región de “Piana Campana” por Napolitano y Fabbri (1996), con el objetivo de realizar un análisis de sensibilidad para evaluar la influencia de un solo parámetro, los métodos comparados fueron el DRASTIC y el SINTACS. Los resultados mostraron que quitando cada uno de los siete parámetros uno por uno, provocan cambios significativos y relevantes en los mapas de vulnerabilidad. Concluyen que todos los parámetros utilizados por el DRASTIC son importantes para el análisis de la vulnerabilidad de acuíferos.

Comparar los métodos de vulnerabilidad cambiando los diferentes parámetros, no es una operación fácil, sin embargo, es la única manera de estimar la eficiencia de estos métodos para un caso concreto de estudio.

El análisis de estos estudios de comparación, más otros elementos obtenidos de diversas fuentes (Kumar y Engel, 1994; Anders y Maidment, 1995; Kimura, 1997; Gómez, 1998; Osborn et al., 1998; Martínez et al., 1998; Bessouat et al., 1999 y 2001; Stensom y Strachotta, 1999; Shamsuddim, 2000; Martínez et al., 2001; entre otros) permitió seleccionar a la metodología DRASTIC como la más adecuada para la realización del presente trabajo. Los

aspectos fundamentales en los que se baso la selección de dicho método, se resume a continuación:

- Por la popularidad que ha alcanzado este método, producto de sus numerosas aplicaciones por diversos autores, ya que su aplicación se encuentra estandarizada y largamente avalada en trabajos reportados en el mundo entero.
- Los parámetros que utiliza cubren los aspectos más importantes que influyen tanto en la inaccesibilidad al acuífero, como en los fenómenos de atenuación sobre los contaminantes.
- La facilidad de adaptarse a los Sistemas de Información Geográfica
- La Utilización simplificada en los parámetros de análisis
- La Adaptabilidad a las más variadas condiciones hidrogeológicas
- Por considerar más factores físicos y variables características de los medios subterráneos y permitir una cuantificación consistente.

3.5. CARTOGRAFÍA DE VULNERABILIDAD

La cartografía de vulnerabilidad es la representación en mapas de los varios grados de vulnerabilidad en función de las condiciones hidrogeológicas del acuífero (Albinet y Margat, 1970).

Como resultado de la evaluación de la vulnerabilidad pueden obtenerse mapas, mostrando zonas con mayor o menor sensibilidad a la contaminación, que generalmente se construyen para el acuífero superior o freático.

Los mapas de vulnerabilidad juegan un papel importante en la información y educación del medio ambiental de organismos y ciudadanos. Sin embargo, se ha de prestar especial interés en lograr un equilibrio entre la escala de representación, la densidad de puntos de observación disponibles y la calidad de los mismos, esto es una sobrecarga puede confundir o llevar al error, y una excesiva simplificación puede limitar drásticamente su utilidad. En todo caso, la

toma de decisiones con base en estos documentos no debe ser efectuada por personas profanas en la materia (López y Fernández, 1992).

En general, los mapas de vulnerabilidad tienen múltiples propósitos y son útiles, sobre todo, a nivel gubernamental. Su principal cometido es servir de guía en la planificación de actividades relacionadas con el medio ambiente y el ordenamiento territorial, siendo una herramienta fundamental para definir qué utilización pueden tener determinadas zonas, y en el desarrollo de políticas de protección para las aguas subterráneas subyacentes a la superficie de asentamiento de actividades existentes, por lo que la finalidad última de los mapas de vulnerabilidad es la división del territorio en áreas de diferente aptitud potencial para un propósito o uso específico, es decir, son mapas orientados a usos u objetivos concretos (Bessouat et al., 1999).

En la actualidad las limitaciones principales en la generación de los mapas de vulnerabilidad son las siguientes (Valcarce et al., 2001):

1. Ausencia de datos representativos, en calidad y cantidad, lo que puede impedir la construcción de los mapas a la escala necesaria.
2. Descripción incompleta o incorrecta de las características geológicas e hidrogeológicas del acuífero, lo cual es punto de partida para la construcción de los mapas de vulnerabilidad.
3. Ausencia de una metodología general para la construcción de estos mapas. Muchos investigadores coinciden en cuáles son los parámetros a tener en cuenta para evaluar la vulnerabilidad de un acuífero, pero no en la metodología a aplicar para esto, lo que provoca que diferentes autores, partiendo de los mismos datos, puedan arribar a conclusiones diferentes.
4. Escasa experiencia en la validación y verificación de los mapas de vulnerabilidad a nivel mundial.

Según Gogu y Dassargues (2000a) las tendencias de las investigaciones futuras relacionadas con la vulnerabilidad de acuíferos a la contaminación, se relacionan con los siguientes aspectos:

1. Determinar las circunstancias, en las cuales, las propiedades de la zona no saturada son fundamentales para el análisis de vulnerabilidad, así como, el desarrollo de métodos para la caracterización más exacta de esta zona. La mejor cuantificación de los procesos físicos y químicos que ocurren en dicha zona, tanto como su relación con otros factores importantes para el análisis de vulnerabilidad llevará a mejores resultados en estas metodologías.
2. Desarrollar métodos para cuantificar las diversas preferencias de flujo (por ejemplo: del suelo, diferentes grietas, etc.) que pueden afectar severamente la vulnerabilidad.
3. Obtener más información de los parámetros que crean incertidumbres asociadas con el análisis de vulnerabilidad, así como, desarrollar metodologías que permitan visualizar este aspecto.
4. Desarrollar y utilizar modelos que integren las características del suelo y la geología, con el objetivo de lograr una mejor interrelación entre estos parámetros tan importantes en el análisis de vulnerabilidad.
5. Implementar herramientas analíticas mediante el uso de los sistemas de información geográfica, para lograr una efectiva integración de los métodos de análisis con sus atributos espaciales, así como estadísticos y procesos basados en las tendencias de modelación.
6. Crear herramientas para la conversión de datos obtenidos en diferentes escalas espaciales y temporales, dentro de una escala común para el análisis de sensibilidad.
7. Desarrollar técnicas y metodologías que permitan la verificación de los resultados obtenidos en los análisis de vulnerabilidad.

3.6. LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG) COMO UNA HERRAMIENTA PARA LA GENERACIÓN DE MAPAS DE VULNERABILIDAD

Los SIG son una nueva tecnología surgida en el contexto de la sociedad de la información; que permiten gestionar y analizar información de tipo espacial con suficiente rapidez y flexibilidad. Además, el SIG permite centralizar una importante cantidad de información, muchas veces dispersa, descrita y almacenada en distintos formatos (algo que dificulta su empleo en el proceso de gestión de los recursos).

Un SIG es el programa o conjunto de programas diseñados para representar y gestionar grandes volúmenes de datos localizados por sus coordenadas espaciales o geográficas. Al incluir las coordenadas de estos datos se consigue añadir la localización espacial de los elementos y es precisamente esta capacidad para trabajar con información espacial lo que le diferencia de otros Sistemas de Información Geográfica, haciéndolo realmente útil a la hora de modelizar de manera fiel ciertos aspectos del mundo real. Con frecuencia, los SIG están orientados a facilitar información en el proceso de toma de decisiones, y su objetivo último es la resolución de problemas complejos de planificación y gestión (Sunday et al., 1996).

La manera en que se almacena esta información es doble: por una parte existe un archivo con información cartográfica (el mapa digital o gráfica) y otro con información alfanumérica (la base de datos asociada). Ambos archivos se encuentran interrelacionados, de tal manera que cada objeto espacial del mapa se corresponde con un registro de la base de datos; la existencia de un identificador común, o clave, es lo que permite esta conexión. Realmente se puede considerar un SIG como una extensión de una base de datos tradicional, que además de información alfanumérica contiene información cartográfica.

Existe una gran cantidad de software de SIG en el mercado (Arc/Info, MapInfo, Idrisi, ErMapper, Ilwis, entre otros), sin embargo, para el presente trabajo se seleccionó el software ArcView, ya que es el SIG más popular, con alrededor de 500,000 copias en uso en todo el mundo; es de tipo vectorial, fue diseñado para presentar de mejor manera los proyectos realizados en Arc/Info, y con el tiempo se han ido mejorando módulos hasta ser casi completamente independiente (Esri, 1998).

De acuerdo a lo anterior, el software ArcView permitirá realizar uniones con tablas de correspondencia, que contendrán las características y atributos a partir de los cuales se podrá actualizar el mapa generado a partir de la metodología DRASTIC; así mismo, se podrán conocer las propiedades o atributos que contendrá cada uno de los rodales, lo cual facilitará comprender el comportamiento de cada una de las unidades creadas.

Un SIG se aleja de lo que sería una base de datos tradicional por su habilidad para representar no sólo selecciones lógicas basadas en los atributos de los datos, sino que también es capaz de llevar a cabo selecciones fundamentadas en la localización espacial y la proximidad, es decir análisis espacial (Scarborough, 1999)

El potencial real de los SIG reside en la integración de la información y el análisis espacial (el conjunto de técnicas estadísticas que permiten explorar y entender los datos y su estructura, así como las relaciones espaciales y temporales existentes entre los datos). Un SIG organiza los datos de tal manera que es posible llevar a cabo su descripción geométrica y numérica, y la presenta a la persona encargada de hacer un análisis o una toma de decisiones de una manera visual, autoexplicativa e intuitiva (mapas).

La modelización cartográfica es la manera de denominar el tratamiento y combinación de las distintas capas de información georreferenciadas. Se trata de la automatización de un proceso de superposición de mapas que tradicionalmente se ha llevado a cabo de manera artesanal, mediante técnicas manuales de superposición de mapas tremendamente laboriosas. Obviamente, los SIG permiten que se agilice el proceso y se mejoren los resultados (en precisión y presentación), aparte de poder guardar la información de manera digital y lograr recrearla cuantas veces se desee (López y Granados, 2000).

Los modelos digitales del terreno se construyen para conocer o predecir propiedades del objeto real representado; esto es una modelización. Su empleo permite representar y estudiar, de manera sencilla y comprensible, una porción de la realidad empírica. Representan numéricamente la distribución espacial de una variable cuantitativa y continua medible sobre el terreno.

Es posible desarrollar aplicaciones basadas en un SIG, diseñadas en función de nuestros requerimientos, que hagan uso de diversas bases de datos, con el objetivo de llevar a cabo una gestión más eficaz de los recursos hídricos.

Un SIG puede ser considerado como un sistema de apoyo realista y eficiente para la monitorización de la calidad de las aguas, la medición y control de la toxicidad de los efluentes, el estudio de la dispersión espacial de plumas contaminantes, o la estimación del impacto que dicha contaminación tiene sobre los distintos ecosistemas. Con un SIG pueden considerarse las interacciones entre las distintas sustancias químicas y el medio, de forma que se posibilita el desarrollo de aproximaciones integradas para la evaluación del riesgo de contaminación a diversas escalas. Los ejemplos y muestras de aplicaciones desarrollados siguiendo estas pautas son numerosos (López y Granados, 2000), y en todos ellos queda constancia de las ventajas derivadas de su utilización.

Para la elaboración de estudios de vulnerabilidad intrínseca de un acuífero el uso de un SIG resulta especialmente interesante. Se aplica alguno de los métodos paramétricos de valoración (DRASTIC o EPIK) (Gogu y Dessargues, 2000b), cartografiándose los valores determinados en el campo y elaborándose índices de vulnerabilidad. Posteriormente estos índices son evaluados e interpretados. Además de agilizar los cálculos, el empleo de un SIG permite la visualización de los resultados y la generación de cartografía temática, por lo que la inclusión de los resultados en labores de planificación es directa, como puede ser la identificación de áreas especialmente sensibles o la posible ubicación de nuevas actividades en el entorno.

Habrán situaciones en las que haya que modificar estos índices para adecuarlos a situaciones concretas, como en el ejemplo de Lee et al. (1998), donde se consideraron las direcciones preferentes de las fracturas cuya incidencia sobre la difusión de los contaminantes en el medio es evidente.

Por lo tanto, a partir de la simulación de los flujos subterráneos y de la modelización del funcionamiento de un acuífero, es posible evaluar la evolución de la contaminación de las aguas subterráneas. En el mapa se pueden mostrar las direcciones de flujo del agua en el acuífero, así como la posible evolución de una pluma de contaminación. Una presentación de

este tipo permite disponer de forma intuitiva de nociones acerca del sistema bajo estudio, lo que facilita sobremanera las tareas de gestión y planificación de los recursos.

Sistemas de Información Geográfica Vectorial y Raster (matricial)

Un SIG vectorial está basado en la representación vectorial de la componente espacial de los datos geográficos. De acuerdo con las características de este modelo de datos, los objetos espaciales están representados de modo explícito y, junto a la descripción digital de sus características espaciales, llevan asociados un conjunto de aspectos temáticos (Bosque, 1997).

La representación vectorial de un objeto es un intento de representar lo más exacto posible, procurando definir de manera precisa todas las posiciones, longitudes y dimensiones de las entidades geográficas. Este formato es, en general, resultado de la digitalización de mapas. Consiste normalmente en listas de coordenadas 2D que delimitan regiones temáticas, o representan redes que pueden tener asociada a ella una tercera grandeza. La representación vectorial utiliza los siguientes elementos básicos: línea, punto y área:

- Un punto es definido por toda entidad geográfica que puede ser localizada por un par de coordenadas (x, y) . Se utilizan puntos para representar la localización de un fenómeno geográfico en un lugar, o para representar un determinado rasgo del mapa que es muy pequeño para ser mostrado como un área o línea. Ejemplos: localización de una ciudad, una pista de aterrizaje, el pico de una montaña o un punto de cota (además de las coordenadas $X Y$, posee un atributo Z , que puede ser la cota altimétrica u otro parámetro cualquiera). La figura 3.3 muestra un punto P definido por un sistema cartesiano.

- Una línea es una entidad definida por un mínimo de dos pares de coordenadas (x,y) , o sea, dos puntos. Se utilizan líneas para representar rasgos del mapa que son muy estrechos para ser mostrados como un área o que teóricamente no tienen grosor. Ejemplos: un río, una carretera, una línea de costa, una línea de contorno o un límite administrativo. Cuando una línea pasa a tener un atributo Z cualquiera, además de las coordenadas $X Y$ de los puntos que la forman, es llamada de isolínea. A lo largo de una isolínea todos los puntos tienen el mismo valor de Z (figura 3.3).

- Las áreas son definidas como una serie de coordenadas (x, y), formando segmentos de líneas que cierran un área. Frecuentemente, en sistemas de información geográfica, se representan elementos de área por polígonos. Ejemplos: extensión geográfica de una ciudad, un lago, un área deforestada, entre otros (figura 3.3).

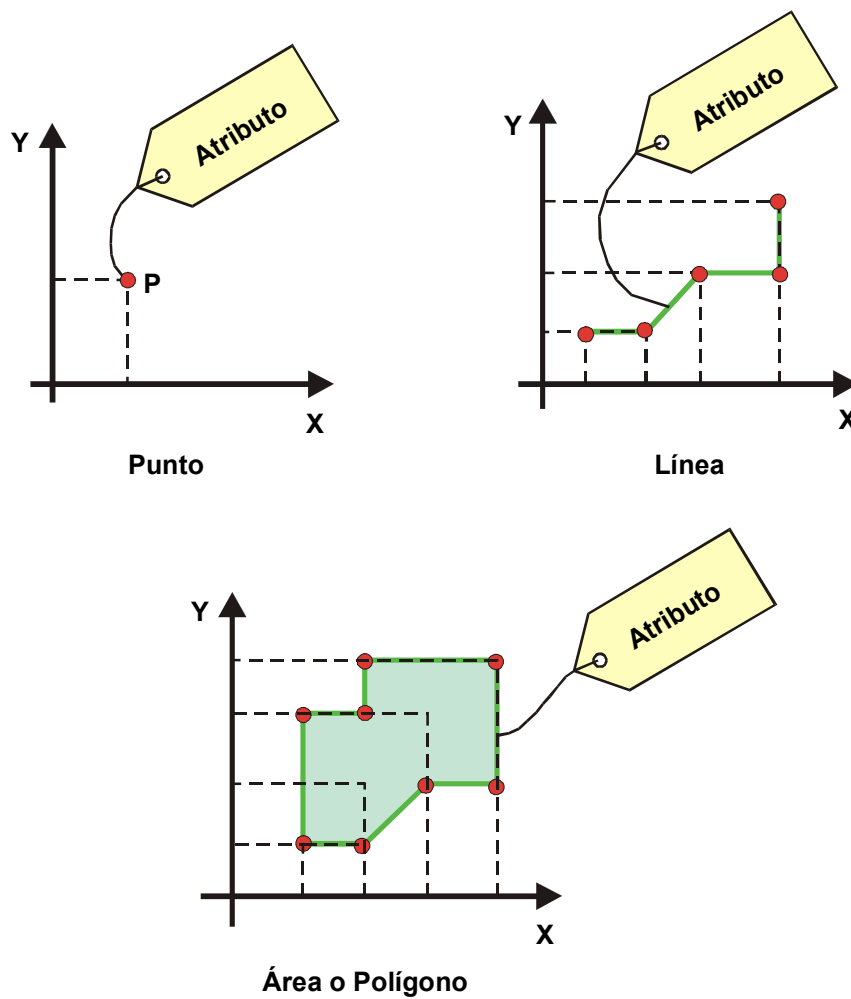


Figura 3.3. Elementos básicos de la representación vectorial.

La conversión Vectorial-Raster (figura 3.4) origina una imagen en formato raster a partir de datos representados vectorialmente. Hay dos casos a ser analizados: el elemento lineal y el polígono. Para un elemento lineal la conversión puede ser esquematizada sobreponiéndose el vector o elemento lineal, a una matriz raster. Esa conversión identifica cuales elementos de la matriz están cruzando la línea y los codifica con atributos o valores de la clase asociada a la línea. Para elementos poligonales se define inicialmente el área a ser convertida (el rectángulo que abarca el conjunto de polígonos) y el tamaño del "pixel". Estas informaciones definen una retícula la cual es sobrepuesta al mapa de polígonos original. A cada "pixel" debe ser asociada una clase (o valor de algún atributo). Existen varias soluciones para este problema. La más común consiste en calcular el centro del "pixel" y verificar dentro de cual polígono se encuentra, asociando al "pixel", el valor de la clase definida para el polígono.

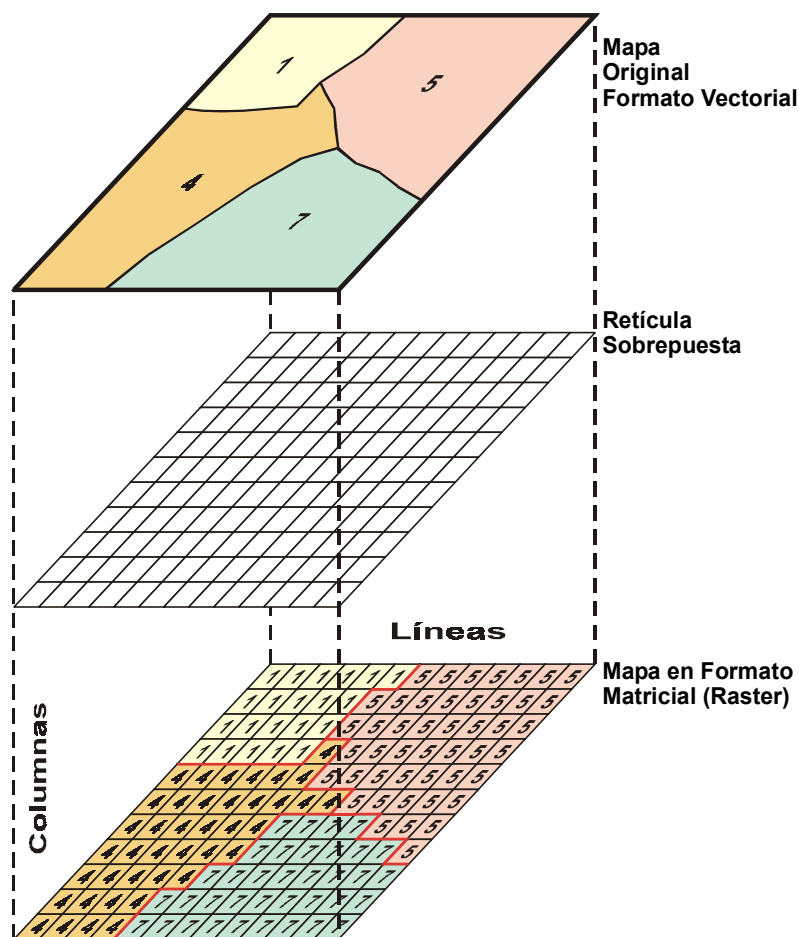


Figura 3.4. Ilustración del procedimiento de la conversión vectorial a raster.

La conversión de la representación vectorial para raster introduce distorsiones en la geometría original de los datos. Estas distorsiones aumentan con el tamaño del "pixel" y con la complejidad de las fronteras entre polígonos. "Pixels" localizados sobre una frontera ("pixels" mixtos) serán mapeados para la clase del polígono más próximo. A menor tamaño de rejilla ("pixel"), mayor es la fidelidad de la imagen convertida, sin embargo también requiere más espacio para almacenar la imagen temática.

Por lo tanto, la representación vectorial es más adecuada para la realización de gráficos y mapas precisos y, sobre todo, está más de acuerdo con la cartografía tradicional y, por esto, resulta más intuitiva. Es más compacta en cuanto al volumen de almacenamiento que necesita y más exhaustiva la información disponible, ya que la topología está descrita más completa y explícitamente. Ciertas operaciones de análisis espacial son más sencillas y rápidas de realizar con la organización vectorial de tipo "arco/nodo".

Por su parte, un SIG raster consiste en un conjunto de mapas individuales, todos referidos a la misma zona del espacio, y todos ellos representados digitalmente en forma raster, es decir utilizando una rejilla de rectángulos y de igual tamaño. En cada uno de estos rectángulos o posiciones un número codifica el valor que alcanza en ese punto (píxel) del espacio la variable cartográfica en el mapa. Con esta representación no se consideran explícitamente los objetos geográficos (sus fronteras no aparecen de manera manifiesta), sino que éstos surgen, de forma implícita, de la ordenación espacial de los valores en la rejilla o cuadrícula (Bosque, 1997).

Las representaciones matricial (o raster) y vectorial no son exactamente equivalentes para una misma información. Normalmente hay una pérdida de precisión al transformar del formato vectorial para el formato raster, ya que los bordes continuos son discretizados de acuerdo con la resolución de la imagen de salida. Esta pérdida puede ser compensada por el hecho de que las operaciones de análisis geográfico en el dominio matricial son más eficientes.

La representación vectorial es la más adecuada para identificar objetos, que puedan ser individualizados en el terreno, donde se requiere precisión. La representación raster a su vez, es más adecuada para fenómenos y grandezas que varían continuamente en el espacio.

La conversión de la representación raster para la vectorial es un proceso más complejo que la conversión vectorial - raster, ya que además de extraer los contornos de los objetos, se deben crear también las relaciones espaciales entre ellos, como por ejemplo las relaciones de vecindad y pertenencia entre polígonos, y la conectividad entre arcos.

La comparación entre los dos modelos de datos mencionados se refiere sobre todo al volumen de almacenamiento, calidad de la representación gráfica y facilidad de proceso, algunas de las ventajas y desventajas se pueden apreciar en el cuadro 3.5.

Cuadro 3.4 Principales ventajas y desventajas de la representación vectorial y raster.

Representación vectorial	Representación raster
Ventajas	Ventajas
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Mapa representado en la resolución original ➤ Asociar atributos a elementos gráficos ➤ Relaciones topológicas ➤ Adecuado para escalas grandes (1:25,000 y mayores) 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Representa fenómenos variantes en el espacio ➤ La simulación y el modelaje son más fáciles ➤ Análisis geográfico rápido ➤ Adecuación para escalas pequeñas (1:50,000 y menores)
Desventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> ➤ No representa fenómenos con variación continua en el espacio ➤ La simulación y el modelaje son más difíciles 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Utiliza demasiado espacio de almacenamiento ➤ Posible pérdida de resolución ➤ Difícil de asociar atributos

CAPÍTULO 4

APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA DRASTIC

4.1. INTRODUCCIÓN

Como ya se trató en el capítulo anterior, existen metodologías que permiten aplicar modelos para definir la vulnerabilidad de los acuíferos. El modelo regional DRASTIC es el que se desarrolla a continuación para conocer la vulnerabilidad del acuífero del Curso Alto del Río Lerma.

La metodología DRASTIC es un sistema paramétrico de evaluación e incluye, como ya se explicó, 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 water), **R** - Recarga neta (Net Recharge), **A** - Litología del acuífero (Aquifer media), **S** - Tipo de suelo (Soil media), **T** - Topografía, Pendiente (Topography), **I** - Litología de la zona no saturada (Impact of the Vadose Zone Media) y **C** - Conductividad hidráulica (Conductivity of the aquifer).

El resultado de la metodología DRASTIC se denomina índice de vulnerabilidad DRASTIC y tiene la factibilidad de ser la superposición de polígonos de los siete parámetros, permitiendo encontrar un valor numérico para cada punto mediante la fórmula (1) del apartado 3.3. Cada parámetro tiene un ponderador predeterminado y fijo, que refleja la importancia relativa de ese parámetro en el cálculo de vulnerabilidad (Aller et al., 1987). Los parámetros asumen pesos que varían de 1 a 5 (cuadro 3.2).

La operación de superposición de polígonos tiene dos fases. En primer lugar la “geométrica-topológica”, en la cual se determinan los nuevos polígonos generados por la intersección de los existentes en los dos mapas que se superponen. Igualmente, en esta fase, se debe asignar un identificador a cada nuevo polígono, el cual en alguna medida puede responder a los identificadores de los polígonos que lo han generado. Finalmente, también se debe reconstruir la topología del nuevo polígono. La segunda fase es la de carácter temático y en ella se atribuyen los valores pertinentes a las variables temáticas asociadas al nuevo polígono. Por supuesto, estos nuevos valores dependen, en alguna manera, de las cifras que estas variables adoptan en los polígonos “padres” (figura 4.1) (Bosque, 1997).

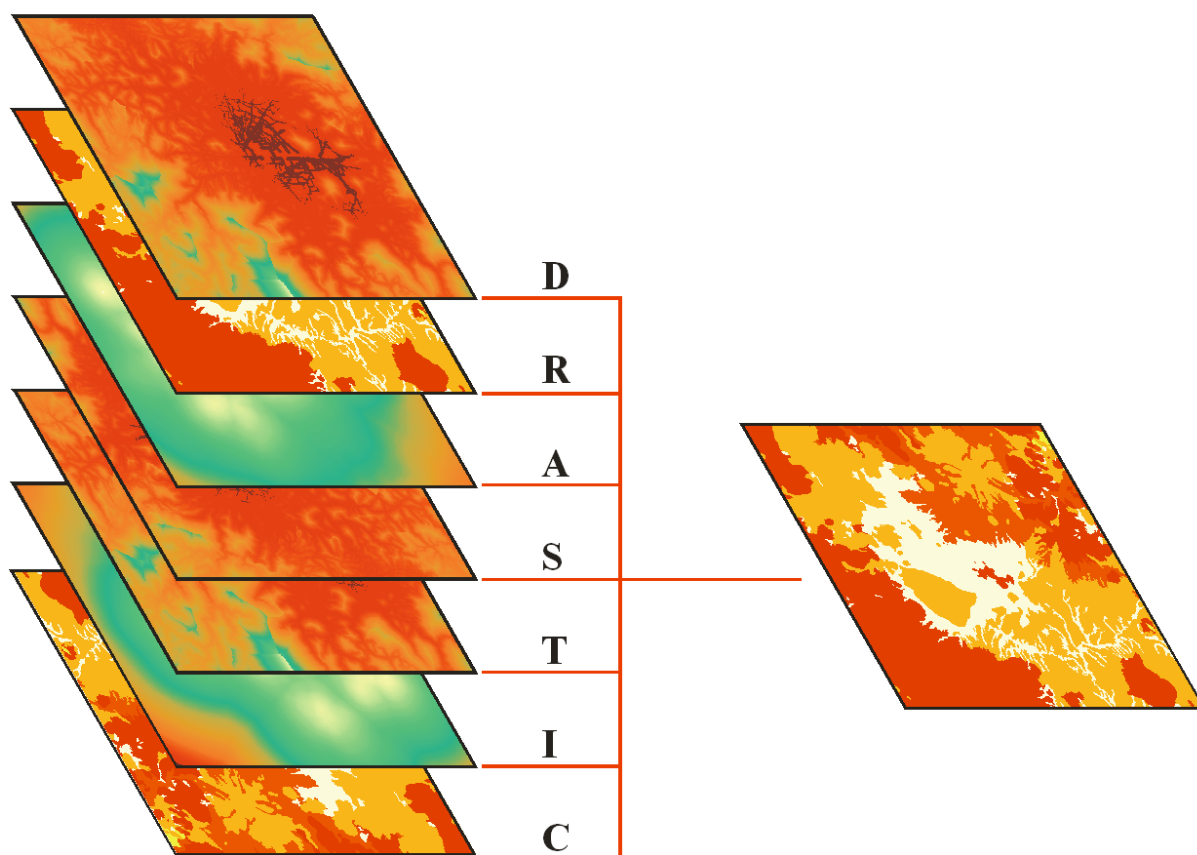


Figura 4.1. Superposición de los parámetros del método DRASTIC, para obtener el índice de vulnerabilidad.

Para llevar a cabo la superposición de polígonos de cada uno de los parámetros de la metodología DRASTIC, se utilizó el SIG ArcView, siendo la información utilizada en formato vectorial; así mismo, se desarrolló una tabla de correspondencia en Access para cada parámetro, a partir de la cual se le asignarán los atributos correspondientes a cada uno de los parámetros de DRASTIC.

Cabe hacer mención que los trabajos consultados sobre la aplicación de la metodología DRASTIC, todos se han desarrollado en formato raster (matricial), lo cual, les ha permitido obtener el índice de vulnerabilidad sólo como valores numéricos, ya que este tipo de formato raster, no permite asociar atributos a cada uno de los elementos gráficos, además de utilizar demasiado espacio para el almacenamiento de la información; sin embargo, una de las principales ventajas (apartado 3.6) del formato vectorial, es la de permitir la asociación de atributos a cada uno de los elementos gráficos, lo que permitirá conocer cada uno de los diferentes parámetros que intervienen en la construcción del índice de vulnerabilidad, mediante la superposición de cada uno de los parámetros de la metodología DRASTIC en el SIG ArcView.

4.2. OBTENCIÓN DE LOS PARÁMETROS DE LA METODOLOGÍA DRASTIC

A continuación se describen los pasos que se siguieron para generar cada uno de los parámetros de la metodología DRASTIC, mediante la utilización del SIG ArcView.

4.2.1. Profundidad al nivel freático

La zona no saturada es aquella donde el contenido de agua es menor que la porosidad. Su espesor se obtiene como la diferencia entre el nivel topográfico y el nivel al que se encuentra el material saturado, que coincide con el piezométrico cuando el acuífero es libre o con el del techo del acuífero cuando es confinado.

La zona no saturada es de gran importancia ya que es la primera defensa natural del acuífero contra los contaminantes, además es un medio donde el flujo es más lento y generalmente aerobio y alcalino, lo cual hace mayor el potencial para intercepción, sorción y eliminación de

bacterias y virus, atenuación de metales pesados y otros químicos a través de precipitación, sorción o intercambio de cationes, sorción y biodegradación de muchos hidrocarburos y compuestos orgánicos sintéticos (Bessouat et al., 1999).

Cuanto mayor es el espesor de la zona vadosa, los contaminantes tienen más tiempo de contacto con el medio, sometiéndose a los procesos de atenuación por un lapso más prolongado, además tienen mayor oportunidad de oxidarse con el oxígeno atmosférico que está presente en toda esta zona. Por lo tanto, un acuífero presenta mayor vulnerabilidad en los puntos en que la zona no saturada tiene menor espesor y menor donde tiene mayor espesor.

La metodología asigna puntajes crecientes para rangos de profundidad cada vez menores, los cuales están asociados a grados de vulnerabilidad (Aller et al., 1987). Esto se muestra en el cuadro 4.1.

La profundidad del nivel freático se generó a partir de información de la elevación del nivel freático en msnm en el período octubre–diciembre de 1997, en los pozos piloto y piezométricos del Curso Alto del Río Lerma (UNITECNIA, 1997).

Cuadro 4.1. Rangos y puntajes para la profundidad del nivel freático de acuerdo a la metodología DRASTIC

Rango en (m)	Puntaje
Menos de 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
Más de 30.5	1

Se tomaron 43 pozos, los cuales presentan datos de coordenadas UTM (Universal Transversa de Mercator) en X y Y, la elevación del brocal en msnm, la elevación del nivel freático en el período octubre-diciembre de 1997 en msnm y la profundidad al nivel freático en m (cuadro 4.2). Sin embargo, la información disponible no fue suficiente para conocer exactamente la profundidad del nivel freático en las serranías que rodean al valle, por tal motivo, se asumió que en esas áreas, dichas profundidades superan los 30.5 m. Esta suposición se basa en las tendencias de la profundidad del nivel freático observadas en el valle, es decir las menores profundidades se localizan al centro del mismo.

En tal sentido, a partir de la información disponible tanto para el valle como la asumida para las serranías, se llevo a cabo una interpolación utilizando el método de kriging (componente lineal) en el programa de Surfer, posteriormente se exportó la información al programa de ArcView y se le asignó su identificador a cada polígono (figura 4.2).

En la figura 4.2 se puede apreciar claramente que la menor profundidad al nivel freático se localiza al este de Mexicaltzingo con una profundidad que varía de 4.6 a 9.1 metros de profundidad, lo cual podría definir a esta zona como la de mayor vulnerabilidad dentro de este parámetro, y a partir de ahí se va incrementando la profundidad del nivel freático, y por lo tanto la vulnerabilidad va disminuyendo.

Cuadro 4.2. Elevación del nivel freático en msnm registrada en el periodo octubre-diciembre de 1997

No.	Coordenada UTM* X	Coordenada UTM* Y	Elevación del Brocal msnm	Elevación del nivel freático en el periodo octubre-diciembre de 1997 en msnm	Profundidad al nivel freático en (m)
1	443863.74	2111842.24	2565.00	2537.08	27.92
2	438306.29	2111917.11	2599.87	2560.91	38.96
3	445336.51	2113637.61	2573.33	2542.47	30.86
4	433774.08	2114802.45	2710.00	2571.81	138.19
7	435813.00	2119390.85	2669.18	2605.68	63.50
8	447623.36	2119458.45	2572.27	2550.31	21.96
11	443642.70	2122083.45	2573.58	2566.52	7.06
12	448441.38	2122438.11	2574.88	2548.72	26.16
14	438251.16	2123672.06	2604.15	2595.35	8.80
15	433978.32	2124324.98	2694.01	2612.15	81.86

Cuadro 4.2. Elevación del nivel freático en msnm registrada en el periodo octubre-diciembre de 1997 (continuación)

No.	Coordenada UTM* X	Coordenada UTM* Y	Elevación del Brocal msnm	Elevación del nivel freático en el periodo octubre-diciembre de 1997 en msnm	Profundidad al nivel freático en (m)
17	443234.45	2126586.26	2573.87	2563.31	10.56
19	449785.86	2127741.85	2571.57	2533.34	38.23
20	435920.01	2128419.59	2628.09	2592.13	35.96
21	430489.45	2129239.80	2705.95	2614.69	91.26
24	449309.77	2130396.86	2573.24	2534.14	39.10
25	442533.22	2130346.91	2575.00	2554.21	20.79
27-1	435875.02	2132574.71	2612.00	2556.98	55.02
29	432616.24	2133126.79	2642.93	2578.04	64.89
32	423105.19	2136028.63	2690.72	2595.30	95.42
33-1	442661.67	2136100.34	2575.00	2549.34	25.66
35	435564.79	2137459.22	2600.97	2564.06	36.91
36	415795.12	2139107.71	2639.97	2615.71	24.26
38	443013.93	2140658.06	2569.87	2553.33	16.54
39	429461.68	2141105.79	2608.78	2574.13	34.65
40	448156.21	2141079.71	2575.10	2540.64	34.46
41	420580.40	2141647.85	2603.13	2585.68	17.45
42	423513.25	2142267.87	2626.39	2585.14	41.25
44	432392.22	2143995.64	2585.82	2560.63	25.19
46	447767.41	2144651.09	2579.82	2543.44	36.38
47	425471.17	2145074.01	2600.55	2562.77	37.78
48	442655.04	2145070.43	2572.33	2539.73	32.60
49	410622.43	2145301.66	2588.21	2578.27	9.94
51	448696.99	2146608.83	2605.00	2552.69	52.31
52	416569.32	2146805.89	2595.5	2558.36	37.14
56	409718.58	2148640.65	2589.06	2559.66	29.40
57	404671.10	2148803.12	2575.60	2566.75	8.85
58	441561.47	2150538.39	2617.03	2549.80	67.23
60	421690.82	2151517.24	2563.52	2533.30	30.22
61	424981.87	2151584.48	2573.56	2530.30	43.26
63	415949.02	2153783.89	2555.02	2529.34	25.68
64	429345.71	2153975.40	2571.57	2529.64	41.93
65	422815.727	2156408.97	2571.19	2523.78	47.41
66	422022.911	2158712.29	2564.52	2518.75	45.77

Fuente: UNITECNIA S.A. de C.V. 1997.

* UTM (Universal Transversa de Mercator)

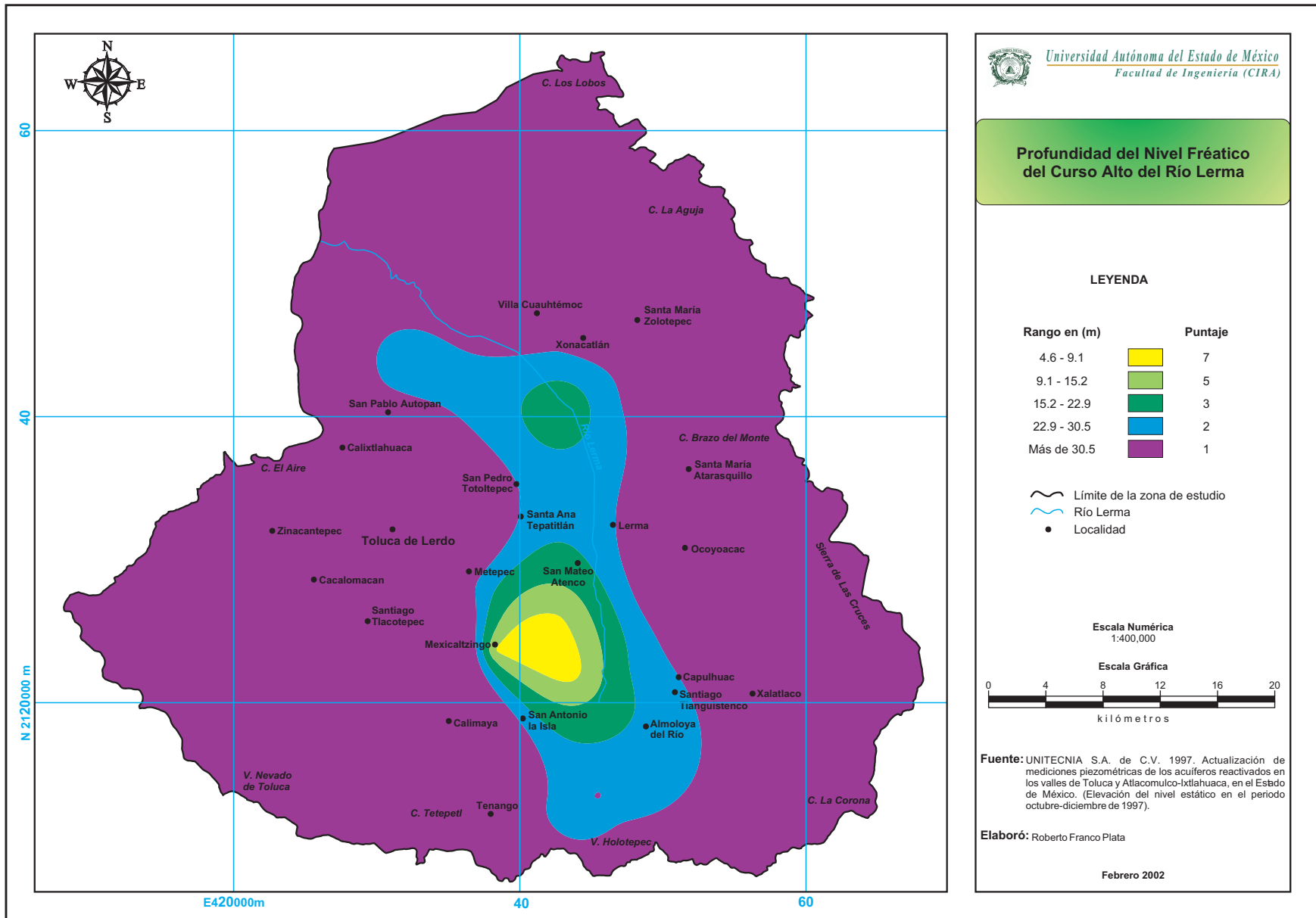


Figura 4.2. Profundidad del nivel frático del Curso Alto del Río Lerma, para el periodo octubre-diciembre de 1997.

Asimismo, se creó la tabla de correspondencia en el programa de Access, la cual contiene cinco campos: el primero corresponde a la clave del parámetro de profundidad al acuífero (Cve_D_1), el segundo a los rangos (Rango_D_1), el tercero al puntaje asignado por la metodología DRASTIC (Puntaje_D_1), el cuarto corresponde al peso asignado en el cuadro 4.1 (Peso_D_1), y en el quinto campo se realiza la multiplicación del puntaje por el peso (DrDw_D_1) (figura 4.3); este último campo junto con el primero se utilizaron para realizar la unión de la tabla de Access con la de ArcView, después de llevar a cabo la superposición de polígonos de los siete parámetros.

4.2.2. Recarga neta

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 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.

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 4.3.

cve_D_1	Rango_D_1	Puntaje_D_1	Peso_D_1	DrDw_D_1
1	menos de 1.5	10	5	50
2	1.5 - 4.6	9	5	45
3	4.6 - 9.1	7	5	35
4	9.1 - 15.2	5	5	25
5	15.2 - 22.9	3	5	15
6	22.9 - 30.5	2	5	10
7	más de 30.5	1	5	5
0		0	0	0

Figura 4.3. Tabla creada en “Access” de la profundidad del nivel freático

Cuadro 4.3. Rangos y puntajes para la recarga neta de acuerdo a la metodología DRASTIC

Rango en (mm/año)	Puntaje
Menos de 50.8	1
50.8 – 101.6	3
101.6 – 177.8	6
177.8 - 254	8
Más de 254	9

Para generar este parámetro se tomó como fuente a Ariel Consultores (1996); en la cual indica como recarga vertical en el valle un valor de 55 mm/a, valor resultante de la calibración del modelo, siendo la lluvia total de 770 mm/a, lo cual indica que existe aproximadamente un 7.15 por ciento de infiltración.

La recarga en las montañas se tomo a partir de la información obtenida de Arreguín (1998) quien señala que el coeficiente de infiltración medio es de 26.6 por ciento, además para las formaciones Tomc, Tomv y Tpv, se consideró incluirlas en el primer intervalo de recarga, ya que se definen como unidades casi impermeables.

Se creó la tabla de correspondencia de la recarga neta en el programa Access, la cual contiene cinco campos: el primero corresponde la clave del parámetro (Cve_R_2), el segundo a los rangos (Rango_R_2), el tercero al puntaje asignado por la metodología DRASTIC (Puntaje_R_2), el cuarto corresponde al peso asignado en el cuadro 3.2 (Peso_R_2) y en el quinto campo se realizó la multiplicación del puntaje por el peso (RrRw_R_2) (figura 4.4); este último campo junto con el primero se utilizaron para realizar la unión de la tabla de Access con la de ArcView, después de llevar a cabo la superposición de polígonos de los siete parámetros.

A partir de la precipitación media anual, obtenida de las estaciones climatológicas, (cuadro 4.4), se procedió a generar los polígonos de Thiessen y, posteriormente, se dividió el área de estudio en el valle (se aplicó el 7.5%) y las zonas montañosas (se aplicó el 26.6%); se superpusieron los polígonos de estos dos temas y después de combinar la precipitación media anual, con los coeficientes de infiltración que caracterizan el área, se obtuvieron diferentes valores de recarga (figura 4.5).

cve_R_2	Rango_R_2	Puntaje_R_2	Peso_R_2	TrTw_R_2
1	menos de 50.8 mm/año	1	4	4
2	50.8 - 101.6 mm/año	3	4	12
3	101.6 - 177.8 mm/año	6	4	24
4	177.8 - 254 mm/año	8	4	32
5	más de 254 mm/año	9	4	36
0		0	0	0

Figura 4.4. Tabla creada en “Access” para la recarga neta

4.2.3. Litología del acuífero

El tipo de material que compone el acuífero afecta directamente al flujo dentro del mismo. A la vez, la velocidad y la trayectoria que sigue un contaminante está gobernado por el flujo. La velocidad determina el tiempo disponible para que los contaminantes se vean afectados por los procesos de atenuación y el la trayectoria 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 está en función del grado de fracturación.

Al ser este parámetro difícilmente cuantificable, DRASTIC asocia rangos de puntajes a los distintos tipos de formaciones geológicas que conforman el acuífero (cuadro 4.5).

Cuadro 4.4. Estaciones climatológicas utilizadas para la generación de los polígonos de Thiessen

Clave de la estación	Nombre de la estación climatológica	Coordenada UTM X	Coordenada UTM Y	Altitud en msnm	Precipitación media anual en mm
15004	Almoloya del Río	448298.78961	2117986.02599	2610	938.40
15011	Atarasquillo	450829.75574	2135897.51101	2600	894.71
15014	Capulhuac	444258.08693	2152790.82119	2770	857.51
15030	Hacienda de la Y	439451.47031	2145399.20315	2570	876.69
15037	Jiquipilco	438373.07056	2162584.05172	2750	934.28
15049	Lerma	447464.60625	2132525.45358	2570	873.97
15056	Mexicaltzingo	438038.47695	2124195.38386	2595	803.74
15057	Mimiapan	452648.87759	2150615.79080	2880	1067.61
15062	Nevado de Toluca	421547.52928	2112394.37760	4140	1207.07
15063	Nueva Santa Elena (Viv. Colón)	428109.45945	2146270.58901	2611	858.31
15258	San Antonio Buenavista	425356.73106	2129467.75972	2755	968.79
15232	San Bartolo del Progreso	456844.65637	2112523.46032	2756	818.83
MX05	San Bernabé	426091.40877	2152179.99026	2571	828.62
15240	San Francisco Putla	433330.82998	2114590.82345	2710	1318.79
15293	San Juan de las Huertas E-24	419685.47825	2127740.16479	2882	893.56
15149	San Lorenzo Huitzililapan	452925.41044	2144743.95162	2790	1099.68
15242	San Pedro Atlapulco	458778.32475	2127641.12572	2950	939.32
15105	San pedro Techuchulco	445218.87260	2113445.09556	2569	877.18
15113	Santiago Tianguistenco	450933.45040	2120129.78298	2620	937.79
15119	Temoaya	437990.50941	2152934.10091	2670	1281.59
15122	Tenango del Valle	438437.04377	2112636.66640	2603	1187.06
15175	Toluca (viveros colón)	430618.31780	2131260.60086	2677	747.85
15373	Villa Verde	433286.71337	2118371.91445	2740	1262.42
15304	Xonacatlán	444903.18729	2144398.10470	2570	633.25
15168	Villa Cuauhtémoc	440506.40992	2146901.68565	2580	628.10

Fuente: IMTA, 1996.

Cuadro 4.5. Rangos y puntajes para la litología del acuífero de acuerdo a la metodología DRASTIC

Rango	Puntaje
Esquisto macizo	1 - 3
Metamórfico / Ígneo	2 - 5
Metamórfico / Ígneo, meteorizado	3 - 5
Conglomerado glaciar	4 - 6
Arenisca estratificada, caliza y secuencias esquistosas	5 - 9
Arenisca masiva / consolidada	4 - 9
Caliza masiva	4 - 9
Arena y grava	4 - 9
Basalto	2 - 10
Caliza kárstica	9 - 10

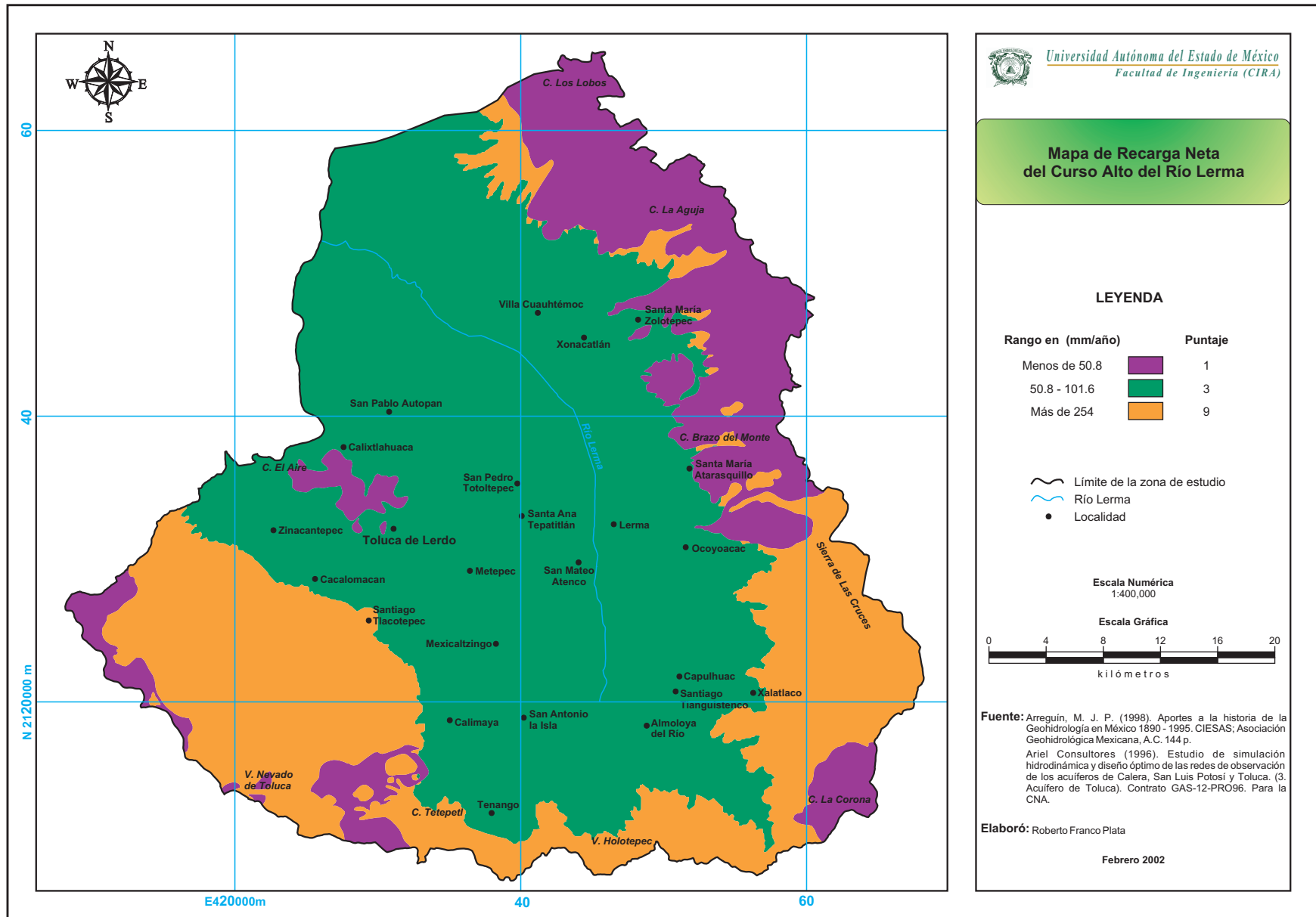


Figura 4.5. Recarga neta del Curso Alto del Río Lerma, de acuerdo a la aplicación de la metodología DRASTIC.

Para elaborar este parámetro se tomaron en cuenta los tres cortes estratigráficos generados por Ariel Consultores (1996), a partir de los cuales se delimitan las áreas de cada uno de los diferentes materiales que componen al acuífero (figura 4.6). Por tal motivo, a la hora de utilizar la metodología DRASTIC, se necesita seleccionar un parámetro específico dentro de los intervalos que caracteriza a una determinada formación geológica. En nuestro caso, tal selección se llevo a cabo de la siguiente forma:

- Se localizan por tablas los rangos de variabilidad de las conductividades hidráulicas de las formaciones geológicas que conforman el acuífero.
- Se dividen los rangos de variabilidad de la conductividad hidráulica de las formaciones geológicas que conforman el acuífero, entre la cantidad de puntajes que maneja el DRASTIC para cada una de las formaciones.
- Se le asigna el puntaje final, considerando que el intervalo de los obtenidos en el punto anterior, coincida con la conductividad hidráulica real para cada tipo de formación.

Se creó la tabla correspondiente a la litología del acuífero en Access, la cual contiene 6 campos: el primer campo contiene el tipo de material (Tipo_A3), el segundo corresponde a la clave que se le asignó a cada tipo de material (Cve_A3), al tercero se le asignó el rango en el que se encuentra cada tipo de material (Rango_A3), en el cuarto campo se le asigna el puntaje que le corresponde a cada tipo de material (Puntaje_A3), el quinto campo contiene el peso que le asigna DRASTIC al parámetro (Peso_A3) y el sexto campo contiene la multiplicación del puntaje por el peso (ArAw_A3) (figura 4.7); este último campo junto con el segundo se utilizaron para realizar la unión de la tabla de Access con la de ArcView, después de llevar a cabo la superposición de polígonos de los siete parámetros.

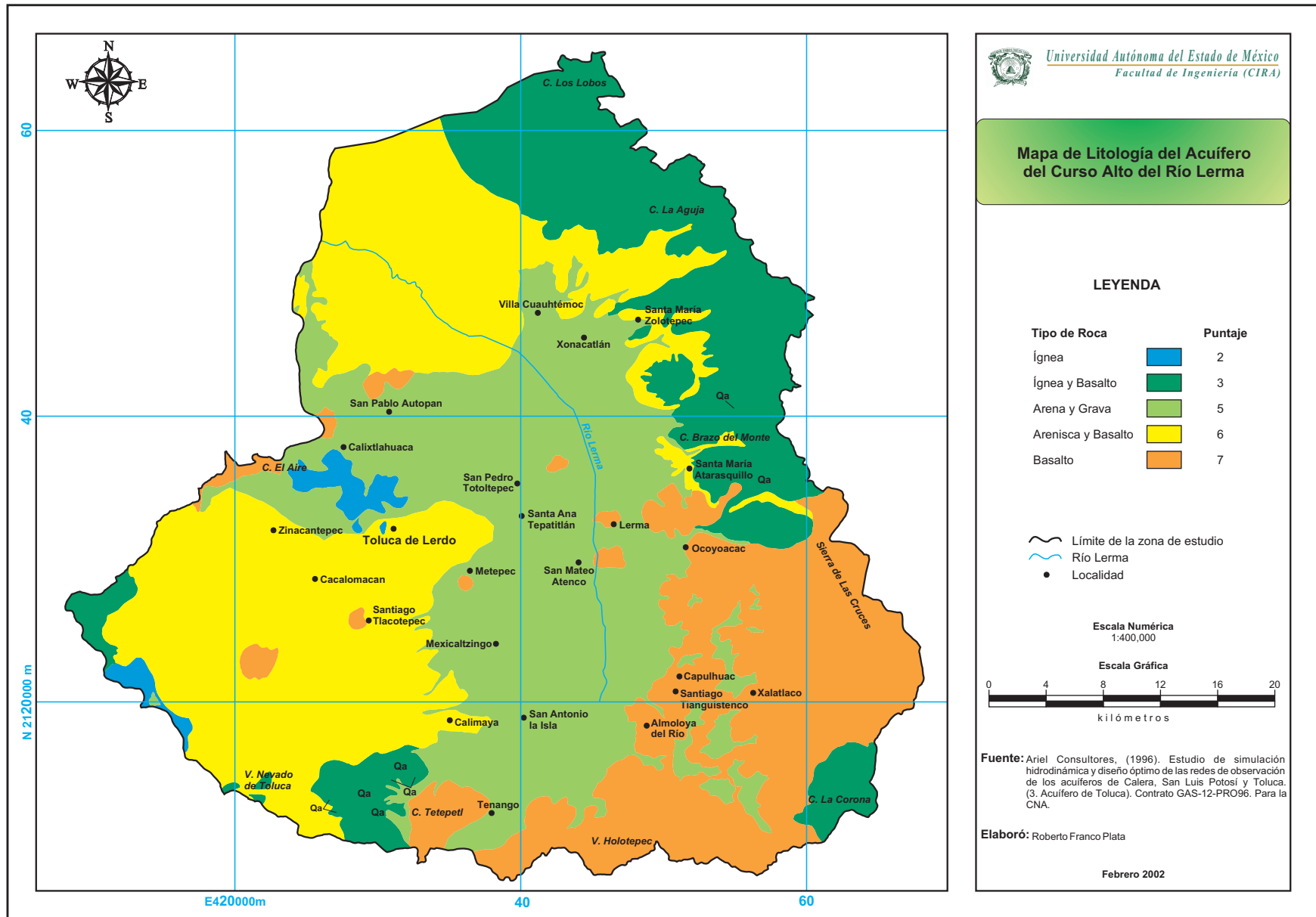


Figura 4.6. Litología del acuífero del Curso Alto del Río Lerma, de acuerdo a la aplicación de la metodología DRASTIC.

Tipo_A3	cve_A3	Rango_A3	Puntaje_A3	Peso_A3	ArAw_A3
Tomv	1	Ígnea	2	3	6
Tomc	10	Basalto	3	3	9
Tpt	11	Arenisca	6	3	18
Qtb-a	12	Basalto	6	3	27
Qtb	13	Basalto	6	3	27
Tpv	2	Ígnea	3	3	6
Qal	3	Arena y Grava	5	3	15
Qb	5	Basalto	7	3	27
Qa	6	Ígnea	3	3	9
Qtb-n	7	Basalto	6	3	27
Qn	8	Basalto	6	3	27
Qbc	9	Basalto	7	3	27
			0	0	0

Figura 4.7. Tabla creada en “Access” para la litología del acuífero.

4.2.4. Tipo de suelo

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 materia orgánica también es considerada como 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, los suelos arcillosos son 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 han cerrado. 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. También hay que tener en cuenta que si la carga contaminante es aplicada por debajo del suelo, éste no contribuye en nada a reducir la vulnerabilidad del acuífero.

En el cuadro 4.6 se muestran los valores asignados por el método DRASTIC a los distintos tipos de suelos. Este parámetro se creó a partir del mapa de suelos (figura 3.3), el cual presenta 17 unidades de suelo, y a cada unidad de suelo se le asignó su puntaje, de acuerdo con las características de este. El resultado del parámetro puede verse en el cuadro 4.7, en el cual se asignó a cada unidad edáfica el puntaje correspondiente, así mismo se creó el mapa correspondiente (figura 4.8).

Cuadro 4.6. Rangos y puntajes para el tipo de suelo, asignados por DRASTIC

Rango	Puntaje
Delgado o ausente	10
Grava	10
Arena	9
Turba	8
Arcilla expansiva y/o agregada	7
Marga arenosa	6
Marga	5
Marga limosa	4
Marga arcillosa	3
Orgánico	2
Arcilla no expansiva y agregada	1

Cuadro 4.7. Rangos y puntajes creados para el tipo de suelo, a partir de las características del tipo de suelo.

Rango	Puntaje
Arena	9
Arena + Materia Orgánica	8
Migajón	7
Migajón + Materia Orgánica	6
Migajón + Materia Orgánica + Tepetate	1
Limo + Materia Orgánica	5
Arcilla + Materia Orgánica	4
Arcilla + Materia Orgánica + Tepetate	1

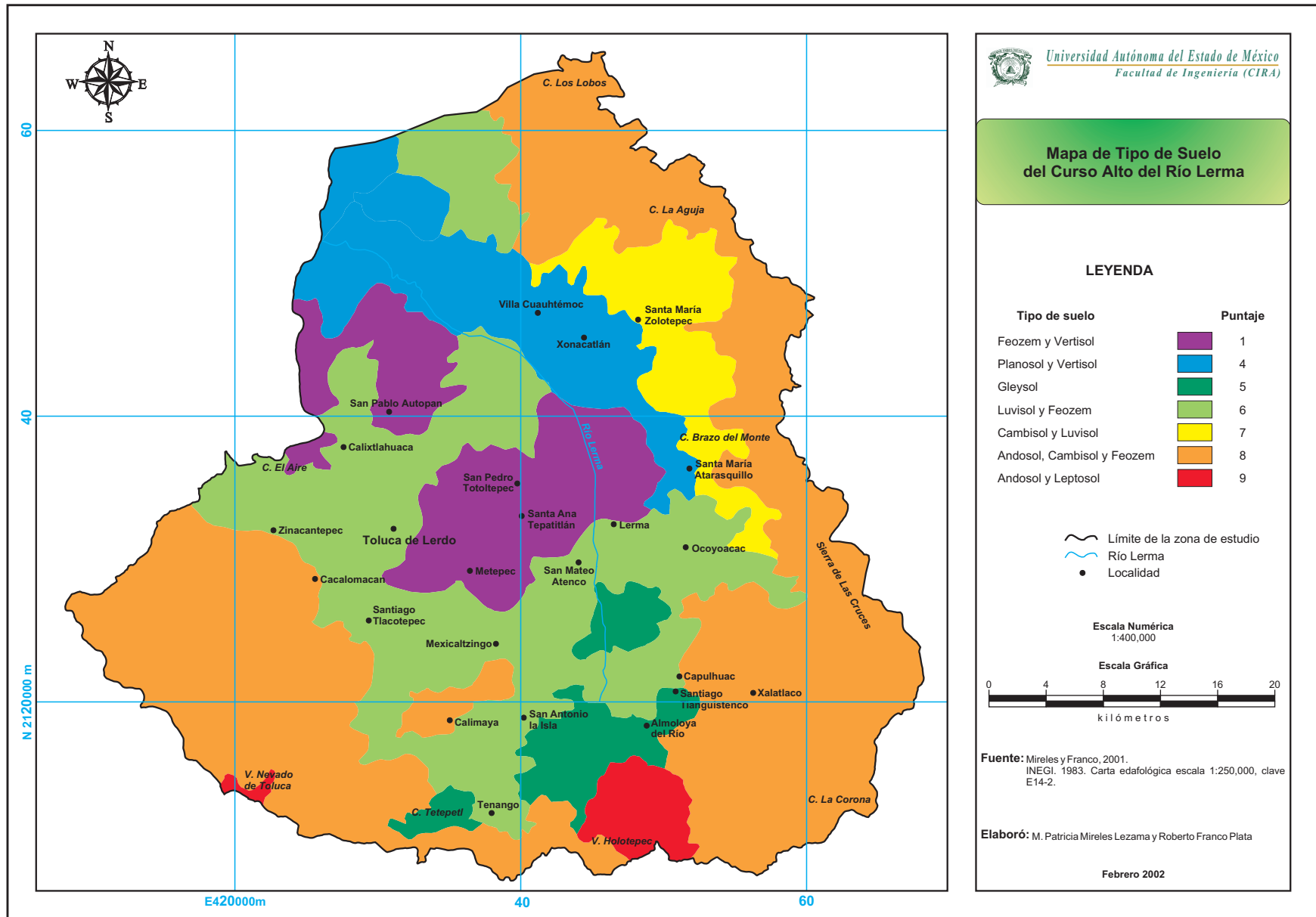


Figura 4.8. Tipo de suelo del Curso Alto del Río Lerma, de acuerdo a la aplicación de la metodología DRASTIC.

Por otra parte, se creó su tabla en Access, definiéndose seis campos, los cuales corresponden: el primero a la clave del tipo de suelo (Cve_tipo_S4), el segundo campo contiene las características de composición de cada unidad del suelo (Tipo_S4), el tercero contiene la clave de la unidad edáfica (Cve_S4), el cuarto campo corresponde al puntaje asignado para cada unidad (Puntaje_S4), el quinto campo contiene el peso que le asigna DRASTIC a este parámetro (Peso_S4), y el sexto campo contiene la multiplicación del puntaje asignado por el peso correspondiente (SrSw_S4) (figura 4.9); este último campo junto con el tercero se utilizaron para realizar la unión de la tabla de Access con la de ArcView, después de llevar a cabo la superposición de polígonos de los siete parámetros.

4.2.5. Topografía

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.

Si la pendiente es grande, el agua escurre superficialmente llevando 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. En el cuadro 4.8 se presentan los rangos y puntajes para este parámetro con base en el DRASTIC

cve_tipo_S4	Tipo_S4	cve_S4	Puntaje_S4	Peso_S4	SrSw_S4
PHh+VRd/2Dp	Migajón + Materia Orgánica + Tepetate	09	1	2	2
VRd+PHh+PLm/3Dp	Arcilla + Materia Orgánica + Tepetate	07	1	2	2
PLm+PHh/3	Arcilla + Materia Orgánica	01	4	2	8
VRd+PHh/3L	Arcilla + Materia Orgánica	02	4	2	6
VRd+PHh/3	Arcilla + Materia Orgánica	05	4	2	8
GLh+VRD/2	Limo + Materia Orgánica	12	5	2	10
LVx+PHh+CMe/2L	Migajón + Materia Orgánica	03	6	2	10
PHh+VRd/2	Migajón + Materia Orgánica	08	6	2	12
ANm+ANz+PHh /L	Arena + Materia Orgánica	04	8	2	14
PHh+ANm/1L	Arena + Materia Orgánica	11	8	2	14
CMe+ANz+LVx/2L	Migajón	06	7	2	14
LVx+Cme+Anz/2L	Migajón	10	7	2	14
ANm+RGe/1	Arena	16	9	2	16
CMe+RGe+PHh/1	Arena + Materia Orgánica	13	8	2	16
LPq+RGe+FLe/1L	Arena	15	9	2	16
LPq+RGe+ANz/1L	Arena	14	9	2	16
LPq/1	Arena	17	9	2	18
*			0	0	0

Figura 4.9. Tabla creada en “Access” para el tipo de suelo.

Este parámetro se creó a partir del modelo digital de elevación E1402MDE, escala 1:250,000 de 1998 del INEGI. Primero se procesó en el programa IDRISI para generar las pendientes a partir del modelo digital del terreno. Posteriormente se exportó al programa de ArcView y se reclasificó de acuerdo a los rangos de la metodología DRASTIC. El siguiente paso fue transferir la información de formato raster a formato vectorial, obteniéndose así el mapa de pendientes (figura 4.10).

Además, se creó la tabla de correspondencia en Access, la cual contiene cinco campos: el primero contiene la clave asignada a cada rango (Cve_T_5), el segundo contiene los rangos asignados por DRASTIC (Rango_T_5), el tercero contiene el puntaje asignado a cada rango (Puntaje_T_5), el cuarto contiene el peso asignado a este parámetro por DRASTIC (Peso_T_5) y el quinto campo contiene la multiplicación del puntaje por el peso (TrTw_T_5) (figura 4.11). Este último campo junto con el primero se utilizaron para realizar la unión de la tabla de Access con la de ArcView, después de llevar a cabo la superposición de polígonos de los siete parámetros.

Cuadro 4.8. Rangos y puntajes para la topografía de acuerdo a la metodología DRASTIC

Rango en (%)	Puntaje
Menos de 2	10
2 - 6	9
6 - 12	5
12 - 18	3
Más de 18	1

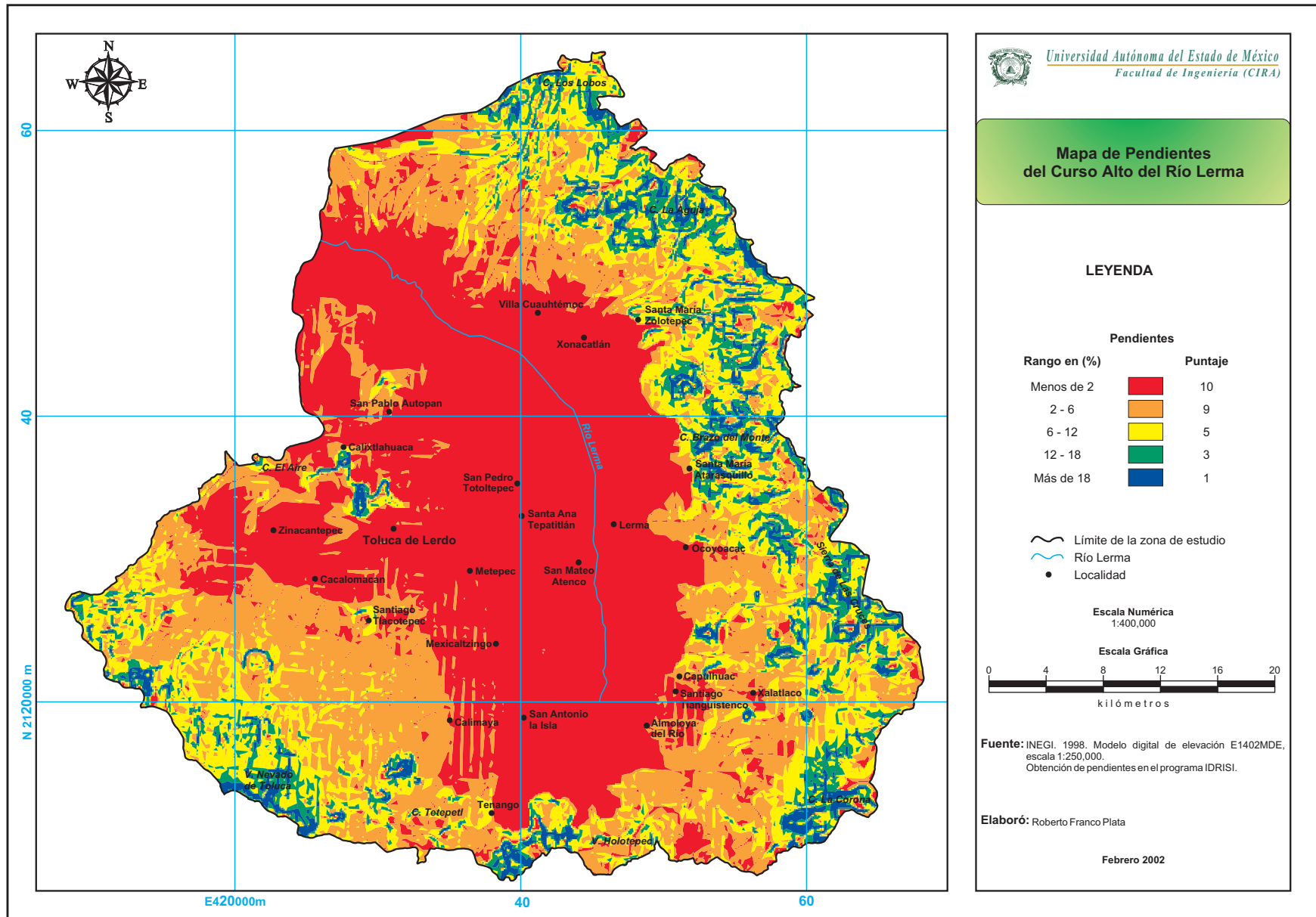


Figura 4.10. Pendientes del Curso Alto del Río Lerma, de acuerdo a la aplicación de la metodología DRASTIC.

cve_T_5	Rango_T_5	Puntaje_T_5	Peso_T_5	TrTw_T_5
1	menos de 2	10	1	10
2	2 - 6	9	1	9
3	6 - 12	5	1	5
4	12 - 18	3	1	3
5	más de 18	1	1	1
0		0	0	0

Figura 4.11. Tabla creada en “Access” para la topografía (pendiente)

4.2.6. Litología de la zona no saturada

El tiempo que demora el agua en recorrer el camino hasta la zona saturada no sólo depende del espesor de la zona no saturada, sino también del tipo de material con que se encuentra. De esta manera, el medio controla el tiempo en que los contaminantes están sometidos a los procesos de atenuación.

Por ser muchos de estos procesos de carácter superficial, la atenuación es mucho más importante si el agua encuentra material granular de pequeña granulometría, ya que el contaminante tiene mayor área efectiva de sólido con la cual entrar en contacto. Por lo tanto, cuanto mayor sea el contenido de arcilla y limo presente en la zona no saturada, mayor será el tiempo de recorrido y más tortuoso será el camino para el agua, teniendo el acuífero mayor potencial para protegerse.

Al igual que con la litología del acuífero, se asignan rangos a los distintos tipos de material y se dan valores típicos (cuadro 4.9).

Para elaborar este parámetro se tomó en cuenta el mapa geológico (figura 3.5), a partir del cual se le asignó el rango al que correspondía cada tipo de geología, así como su puntaje a cada rodal (figura 4.12). Por tal motivo, a la hora de utilizar la metodología DRASTIC, se necesita seleccionar un parámetro específico dentro de los intervalos que caracteriza a una determinada formación geológica. En nuestro caso, tal selección se llevo a cabo, siguiendo el mismo procedimiento para calcular los puntajes del parámetro litología del acuífero (apartado 4.2.3)

Cuadro 4.9. Rangos y puntajes para la composición de la litología de la zona no saturada de acuerdo a la metodología DRASTIC

Rango	Puntaje
Capa confinante	1
Limo / arcilla	2 - 6
Esquisto	2 - 5
Caliza	2 - 7
Arenisca	4 - 8
Caliza estratificada, arenisca, esquistos	4 - 8
Arena y grava con significativa arcilla y limo	4 - 8
Metamórfico / Ígneo	2 - 8
Arena y grava	6 - 9
Basalto	2 - 10
Caliza kárstica	8 - 10

Se creó la tabla de correspondencia en Access, la cual contiene seis campos: el primero contiene el tipo de geología (Tipo_I6), el segundo campo contiene la clave asignada a cada tipo de geología (Cve_I6), el tercero contiene los rangos asignados (Rango_I6), el cuarto contiene el puntaje asignado a cada rango (Puntaje_I6), el quinto contiene el peso asignado a este parámetro por DRASTIC (Peso_I6) y el sexto campo contiene la multiplicación del puntaje por el peso (IrIw_I6) (figura 4.13). Este último campo junto con el primero se utilizaron para realizar la unión de la tabla de Access con la de ArcView, después de llevar a cabo la superposición de polígonos de los siete parámetros.

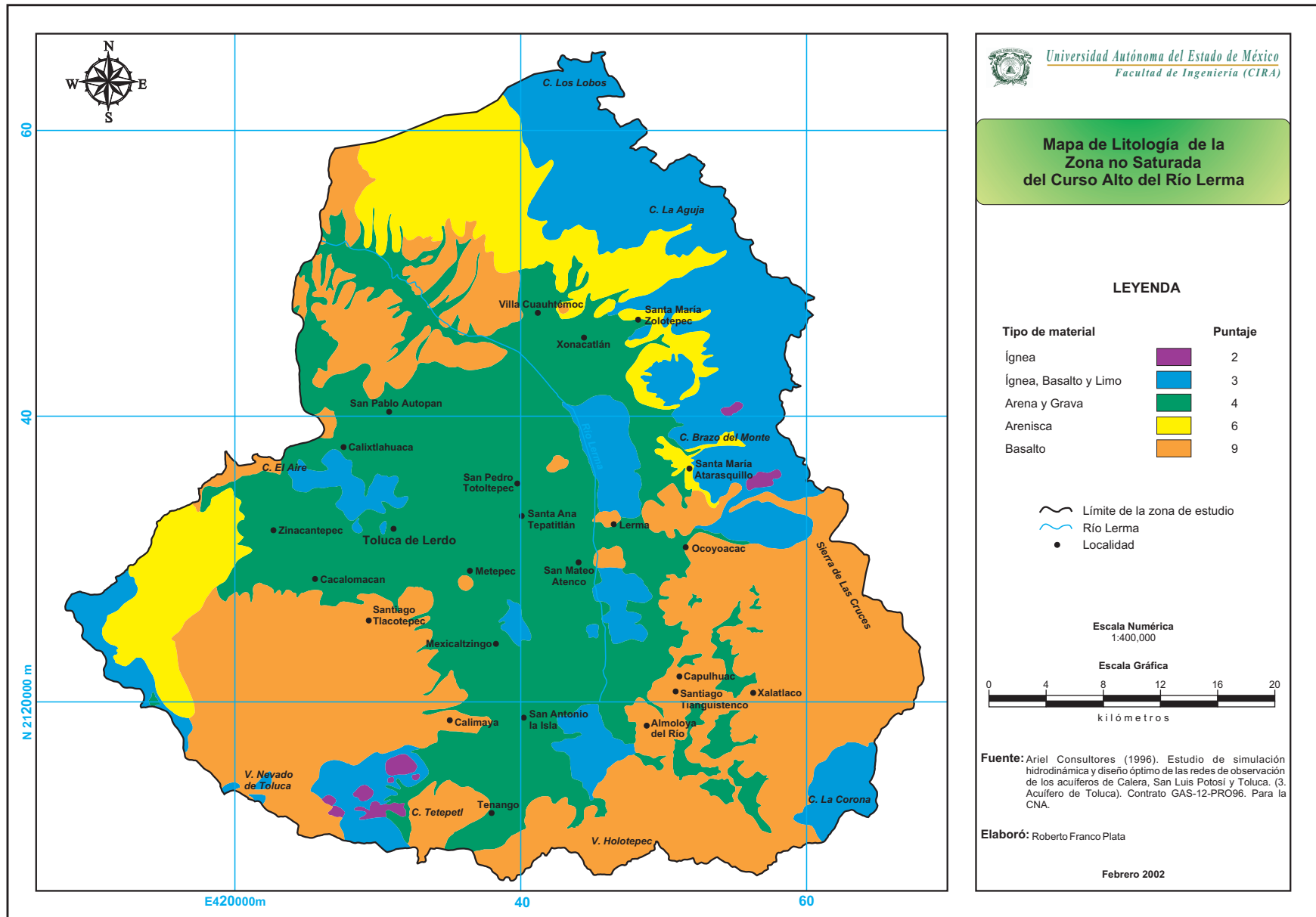


Figura 4.12. Litología de la zona no saturada del Curso Alto del Río Lerma, de acuerdo a la aplicación de la metodología DRASTIC.

	Tipo_I6	cve_I6	Rango_I6	Puntaje_I6	Peso_I6	Irlw_I6
▶	Qa	6	Ígnea	2	5	10
	Qal	3	Arena y Grava	4	5	20
	Qb	5	Basalto	9	5	45
	Qbc	9	Basalto	9	5	45
	Qla	4	Limo	3	5	15
	Qn	8	Basalto	9	5	45
	Qtb	13	Basalto	9	5	45
	Qtb-a	12	Basalto	9	5	45
	Qtb-n	7	Basalto	9	5	45
	Tomc	10	Basalto	3	5	15
	Tomv	1	Ígnea	3	5	15
	Tpt	11	Arenisca	6	5	30
	Tpv	2	Ígnea	3	5	15
*				0	0	0

Registro: 1 de 13

Figura 4.13. Tabla creada en “Access” para el impacto de la zona vadosa

4.2.7. Conductividad hidráulica

La conductividad hidráulica 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. Por ello, DRASTIC asocia valores de alta vulnerabilidad a conductividades altas. El cuadro 4.10 muestra los puntajes relativos asignados.

Para elaborar este parámetro se tomó como base la conductividad hidráulica asignada para cada unidad geológica por Ariel Consultores (1996) (figura 4.14).

Cuadro 4.10. Rangos y puntajes para la conductividad hidráulica.

Rango en (m/d)	Puntaje
Menos de 4	1
4 - 12	2
12 - 28	4
28 - 40	6
40 - 81	8
Más de 81-	10

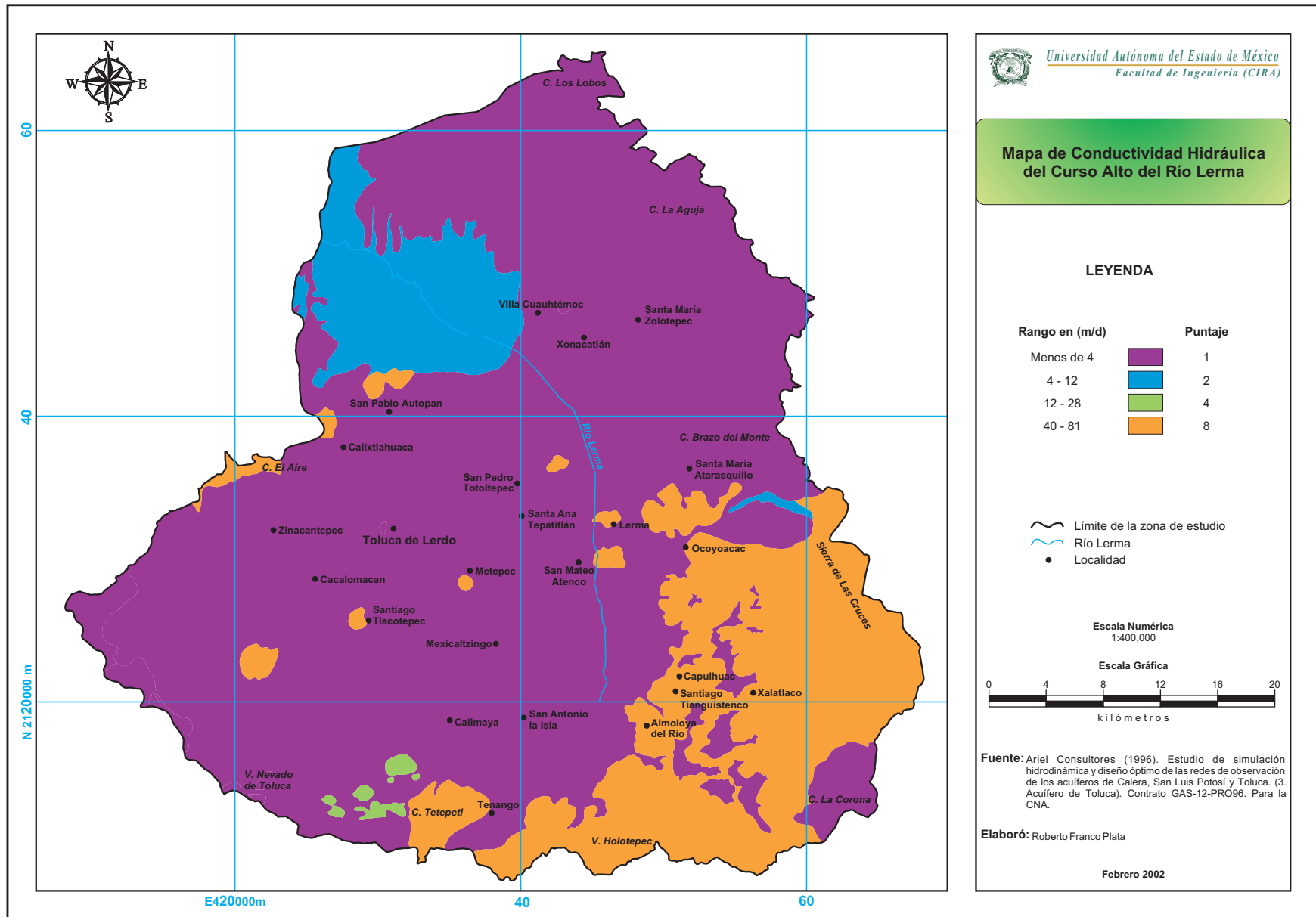


Figura 4.14. Conductividad hidráulica del Curso Alto del Río Lerma, de acuerdo a la aplicación de la metodología DRASTIC.

Para este parámetro, también se creó la tabla de correspondencia en Access, la cual contiene siete campos: el primero contiene el tipo de geología (Tipo_C7), el segundo campo contiene la clave asignada a cada tipo de geología (Cve_C7), el tercero contiene la conductividad hidráulica en unidades de m/d para cada tipo de geología asignado por Ariel Consultores (1996) (Cond_C7), el cuarto contiene los rangos asignados por DRASTIC (Rango_C7), el quinto contiene el puntaje asignado a cada rango (Puntaje_C7), el sexto contiene el peso asignado a este parámetro por DRASTIC (Peso_C7) y el séptimo campo contiene la multiplicación del puntaje por el peso (CrCw_C7) (figura 4.15). Este último campo junto con el segundo se utilizaron para realizar la unión de la tabla de Access con la de ArcView, después de llevar a cabo la superposición de polígonos de los siete parámetros.

4.2.8. Interacción entre parámetros

La profundidad al acuífero y la litología de la zona no saturada se complementan, porque uno afecta la cantidad y el otro la naturaleza del material que el contaminante tiene que atravesar. La recarga neta, que influye sobre el transporte, dispersión y dilución del líquido contaminado, comparte dicha influencia con la profundidad al acuífero y la litología de la zona no saturada.

	Tipo_C7	cve_C7	Cond_C7	Rango_C7	Puntaje_C7	Peso_C7	CrCw_C7
	Tomv	1	0.0500	12 - 28 m/d	1	3	3
	Tomc	10	0.0500	12 - 28 m/d	1	3	3
	Tpt	11	0.6048	0 - 4 m/d	1	3	3
	Qtb-a	12	4.3200	4 - 12 m/d	2	3	6
	Qtb	13	4.3200	4 - 12 m/d	2	3	6
	Tpv	2	0.0500	12 - 28 m/d	1	3	3
	Qal	3	1.7280	0 - 4 m/d	1	3	3
	Qla	4	0.0173	0 - 4 m/d	1	3	3
	Qb	5	43.2000	40 - 81 m/d	8	3	24
	Qa	6	17.2800	12 - 28 m/d	4	3	12
	Qtb-n	7	1.7280	0 - 4 m/d	1	3	3
	Qn	8	1.7280	0 - 4 m/d	1	3	3
	Qbc	9	43.2000	40 - 81 m/d	8	3	24
*			0.0000		0	0	0

Figura 4.15. Tabla creada en “Access” para la conductividad hidráulica

A la vez, la topografía y el tipo de suelo afectan a la recarga, pero además representan otros factores que son decisivos para la vulnerabilidad del acuífero. El suelo ejerce impacto en la atenuación a través de la sorción y el tiempo disponible para penetrar, en tanto que la topografía está a su vez relacionada con el espesor y desarrollo del perfil del suelo, y también puede tener relación con el gradiente hidráulico.

La porción superior de la zona no saturada influye sobre el tipo de suelo, y ambos son los responsables de los procesos biológicos.

La conductividad hidráulica, conjuntamente con el gradiente, son determinantes para la velocidad y la dirección del movimiento, y también son afectados por el tamaño de grano, la estratificación, la fracturación y la tortuosidad.

Es así que todos los factores que se toman como parámetros para este método, son variables dependientes e interactuantes.

4.2.9. Evaluación de la vulnerabilidad

DRASTIC, como ya se mencionó, permite encontrar un valor numérico para cada punto mediante la fórmula (1) del apartado 3.3.

$$\text{Índice de vulnerabilidad} = D_R D_W + R_R R_W + A_R A_W + S_R S_W + T_R T_W + I_R I_W + C_R C_W$$

Este índice no encierra un concepto en sí mismo, pero permite comparar vulnerabilidades de distintas zonas.

De acuerdo con anterior, se procedió a realizar la superposición de polígonos de cada uno de los parámetros, mediante el software ArcView; donde cada parámetro dentro del mapa sólo cuenta con su identificador. Por lo tanto, para poder obtener el mapa de vulnerabilidad, se llevaron a cabo los siguientes pasos:

- El primer paso consistió en llevar a cabo la Superposición de polígonos del mapa del parámetro profundidad del nivel freático con el de la recarga neta.

- El segundo paso, consistió en la superposición de polígonos del resultado obtenido en el primer paso, con el mapa del parámetro litología del acuífero.
- El tercer paso, consistió en la superposición de polígonos del resultado obtenido en el segundo paso, con el mapa del parámetro tipo de suelo.
- El cuarto paso, consistió en la superposición de polígonos del resultado obtenido en el tercer paso, con el mapa del parámetro topografía (pendiente).
- El quinto paso, consistió en la superposición de polígonos del resultado obtenido en el cuarto paso, con el mapa del parámetro de litología de la zona no saturada.
- El sexto paso, consistió en la superposición de polígonos del resultado obtenido en el quinto paso, con el mapa del parámetro conductividad hidráulica (figura 4.16).

Después del desarrollo de estos seis pasos, se procedió a cargar las tablas creadas en Access, cada una con su clave y el campo de la multiplicación del puntaje por el peso para, posteriormente, unir cada una de las tablas con la tabla principal del mapa obtenido mediante la superposición de polígonos.

Se creó un campo nuevo con el nombre de índice, en el cual se aplicó la siguiente ecuación, utilizando los campos creados en las tablas de Access para cada parámetro:

$$\text{Índice de vulnerabilidad} = D_R D_W D_1 + R_R R_W R_2 + A_R A_W A_3 + S_R S_W S_4 + T_R T_W T_5 + I_R I_W I_6 + C_R C_W C_7$$

Con la aplicación de la ecuación anterior se obtiene el índice de vulnerabilidad, a partir del cual se elaboró el mapa de vulnerabilidad (figura 4.17). Dicho mapa corresponde a la zonificación de la vulnerabilidad del Curso Alto del Río Lerma a la contaminación; de esta manera se pueden conocer las áreas que podrían ser más afectadas por un posible foco contaminante.

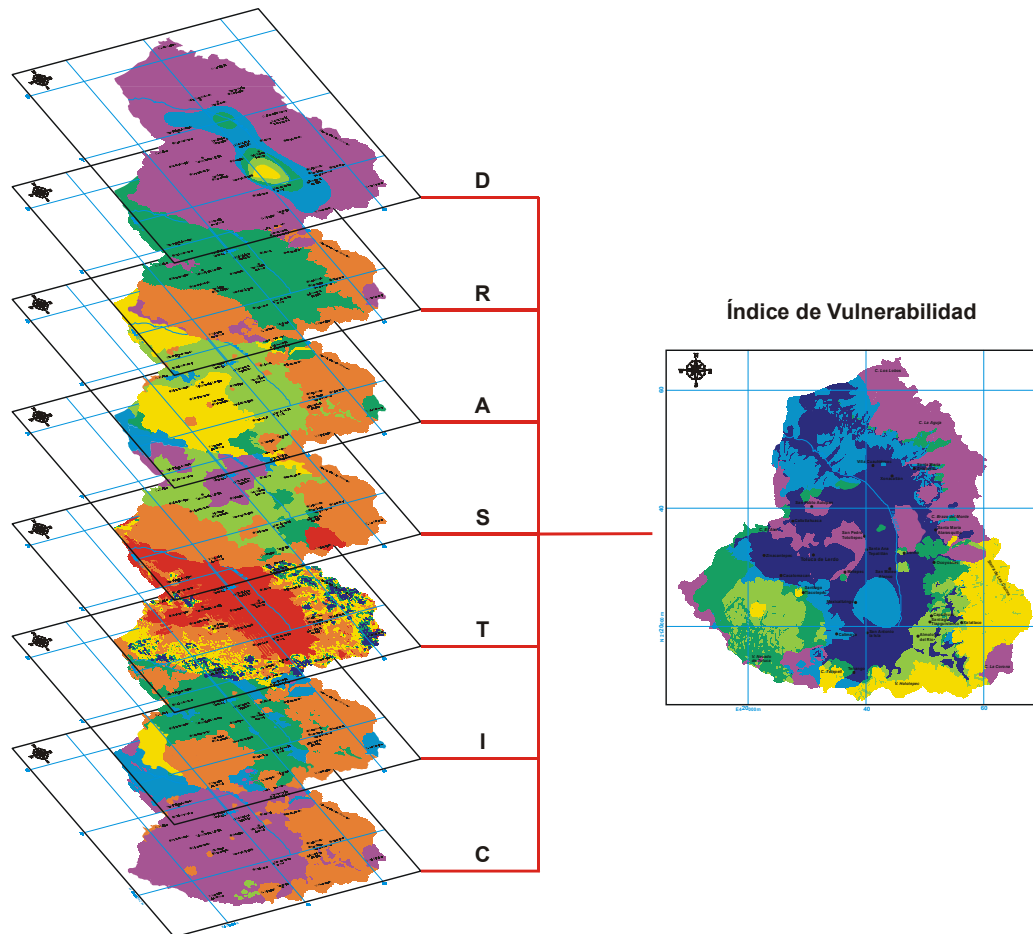


Figura 4.16. Superposición de polígonos para cada uno de los siete parámetros y aplicación de la fórmula en ArcView, para la obtención del mapa de vulnerabilidad del Curso Alto del Río Lerma.

La asignación de los colores para el índice DRASTIC se representan en el cuadro 4.11. Los colores efusivos (rojo, naranja y amarillo) se asignan a las áreas con alto potencial de contaminación. Los colores fríos (azul, índigo y violeta) se asignan a las áreas con baja vulnerabilidad de contaminación. Las tonalidades de verde indican una vulnerabilidad media.

De forma general, las áreas con baja vulnerabilidad (la cual se considera dentro del índice < 109), representan el 67.95 % del total de la superficie (2116.76 km²); mientras que las áreas con vulnerabilidad media (dentro del índice de 110 a 149), representan el 21.46 % del total y por último, las áreas que se encuentran con alta vulnerabilidad (dentro del índice de 150 a 169) representan tan sólo el 10.60 % del total del área.

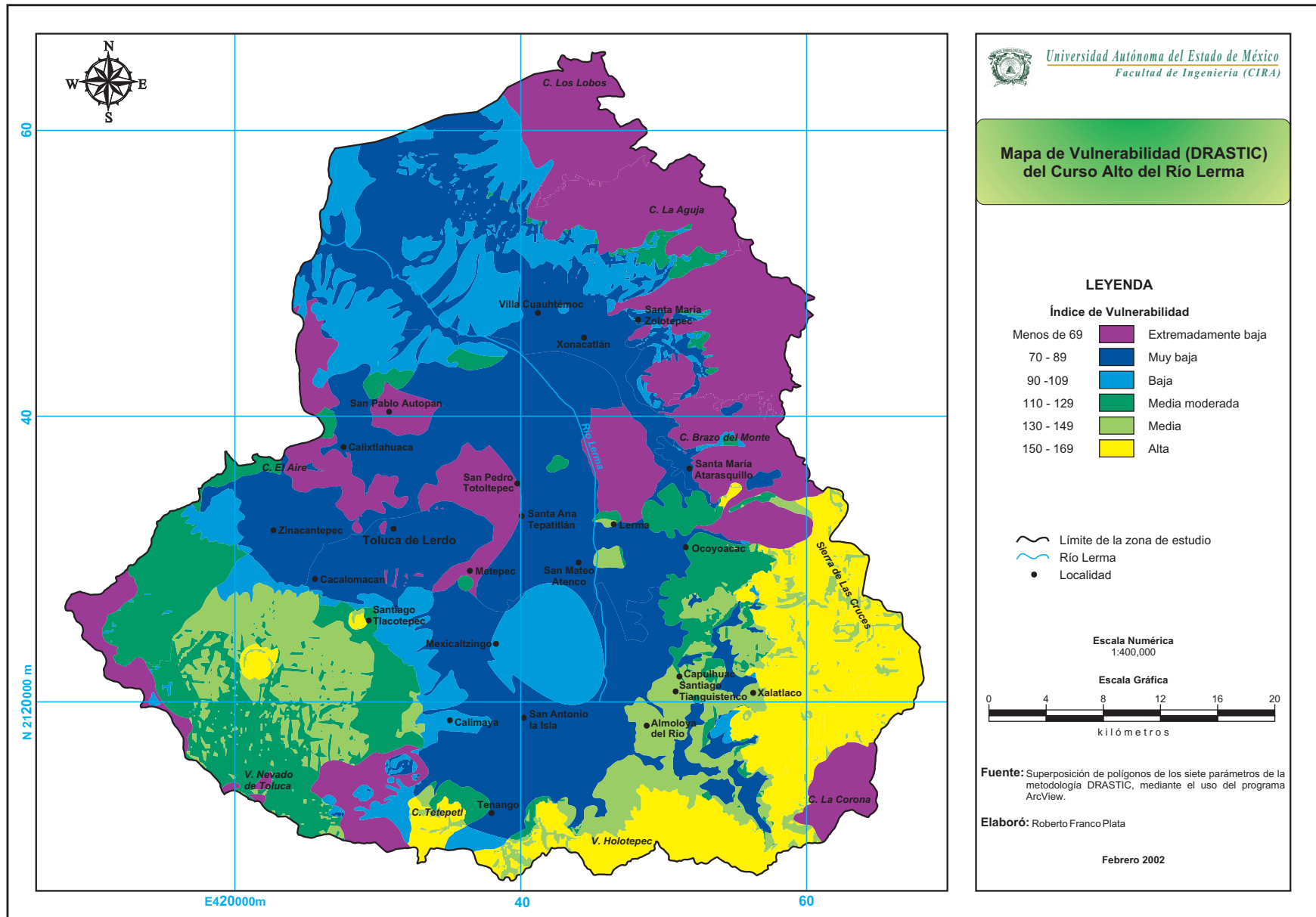


Figura 4.17. Mapa de Vulnerabilidad del Curso Alto del Río Lerma, mediante la aplicación de la metodología DRASTIC.

Cuadro 4.11. Colores utilizados para los rangos del índice DRASTIC.

Rangos del índice DRASTIC	Color	Especificaciones del color para imprenta	Tipo de vulnerabilidad
< 69	Violeta	Pantone purple C	Extremadamente baja
70 – 89	Índigo	Pantone Reflex Blue	Muy baja
90 – 109	Azul	Pantone Process Blue C	Baja
110 – 129	Verde Oscuro	Pantone 347 C	Media moderada
130 – 149	Verde Claro	Pantone 375 C	Media
150 – 169	Amarillo	Pantone Yellow C	Alta
170 – 189	Naranja	Pantone 151 C	Muy alta
> 190	Rojo	Pantone 485 C	Extremadamente alta

Fuente: modificado de Aller et al., 1987.

La metodología DRASTIC generada en formato vectorial mediante el uso de un SIG, tiene la ventaja de poder conocer las características de cada una de las áreas de los índices de vulnerabilidad, lo cual permite que los usuarios puedan tener una mejor caracterización del medio y de cada una de las áreas obtenidas, y así poder entender su comportamiento y funcionamiento. A continuación se muestran las características obtenidas a partir del SIG vectorial, de cada uno de los índices de vulnerabilidad:

Extremadamente baja (representa el 21.72 % del total de la superficie de zona de estudio)

- **Profundidad del nivel freático** en m: de 22.9 a 30.5 y más de 30.5.
- **Recarga neta** en mm/a: menos de 50.8 y de 50.8 a 101.6.
- **Litología del acuífero**: contiene las formaciones geológicas (Qal, Qa, Tomc, Tomv y Tpv).
- **Tipo de suelo**: arena, arena + materia orgánica, arena + materia orgánica + tepetate, limo + materia orgánica, migajón, migajón + materia orgánica y migajón + materia orgánica + tepetate.
- **Topografía** (pendiente en %): menos de 2 y de 2 a 6.

- **Litología de la zona no saturada:** contiene las formaciones geológicas (Qal, Qa, Tomc, Tomv y Tpv).
- **Conductividad hidráulica** en m/d: de 0.05, de 1.728 y de 17.28.

Muy baja (representa el 33.45 % del total de la superficie de zona de estudio)

- **Profundidad del nivel freático** en m: de 15.2 a 22.9, de 22.9 a 30.5 y más de 30.5.
- **Recarga neta** en mm/a: menos de 50.8 y de 50.8 a 101.6.
- **Litología del acuífero:** contiene las formaciones geológicas (Tpt, Tomc, Qtba, Qn, Qal y Qa).
- **Tipo de suelo:** arena, arena + materia orgánica, arcilla + materia orgánica, arcilla + materia orgánica + tepetate, limo + materia orgánica, migajón, migajón + materia orgánica y migajón + materia orgánica + tepetate.
- **Topografía** (pendiente en %): menos de 2, de 2 a 6, de 6 a 12, de 12 a 18 y más de 18.
- **Litología de la zona no saturada:** contiene las formaciones geológicas (Qa, Qal, Qla y Tpt).
- **Conductividad hidráulica** en m/d: de 0.0178, de 0.05, de 1.728, de 4.32 y de 17.28.

Baja (representa el 12.78 % del total de la superficie de zona de estudio)

- **Profundidad del nivel freático** en m: de 4.6 a 9.1, de 9.1 a 15.2, de 15.2 a 22.9, de 22.9 a 30.5 y más de 30.5.
- **Recarga neta** en mm/a: de 50.8 a 101.6 y más de 254.
- **Litología del acuífero:** contiene las formaciones geológicas (Qa, Qal, Qn, Qtb, Qtba, Tomc y Tpt).

- **Tipo de suelo:** arena + materia orgánica, arcilla + materia orgánica, arcilla + materia orgánica + tepetate, limo + materia orgánica, migajón, migajón + materia orgánica y migajón + materia orgánica + tepetate.
- **Topografía** (pendiente en %): menos de 2, de 2 a 6, de 6 a 12, de 12 a 18 y más de 18.
- **Litología de la zona no saturada:** contiene las formaciones geológicas (Qa, Qal, Qtb, Qtba, Qtbn y Tpt).
- **Conductividad hidráulica** en m/d: de 0.0178, de 0.05, de 0.06048, de 1.728, de 4.32 y de 17.28.

Media moderada (representa el 11.95 % del total de la superficie de zona de estudio)

- **Profundidad del nivel freático** en m: de 22.9 a 30.5 y más de 30.5.
- **Recarga neta** en mm/a: de 50.8 a 101.6 y más de 254.
- **Litología del acuífero:** contiene las formaciones geológicas (Qb, Qbc, Qn, Qtb, Qtba, Qtbn, y Tpt).
- **Tipo de suelo:** arena, arena + materia orgánica, arcilla + materia orgánica, arcilla + materia orgánica + tepetate, limo + materia orgánica, migajón, migajón + materia orgánica y migajón + materia orgánica + tepetate.
- **Topografía** (pendiente en %): menos de 2, de 2 a 6, de 6 a 12, de 12 a 18 y más de 18.
- **Litología de la zona no saturada:** contiene las formaciones geológicas (Qb, Qbc, Qn, Qtb, Qtba, Qtbn y Tpt).
- **Conductividad hidráulica** en m/d: de 0.06048, de 1.728, de 4.32 y de 43.2.

Media (representa el 9.50 % del total de la superficie de zona de estudio)

- **Profundidad del nivel freático** en m: de 15.2 a 22.9, de 22.9 a 30.5 y más de 30.5.
- **Recarga neta** en mm/a: de 50.8 a 101.6 y más de 254.
- **Litología del acuífero**: contiene las formaciones geológicas (Qn, Qtb, Qtbn, Qbc y Qb).
- **Tipo de suelo**: arena, arena + materia orgánica, limo + materia orgánica, migajón y migajón + materia orgánica.
- **Topografía** (pendiente en %): menos de 2, de 2 a 6, de 6 a 12, de 12 a 18 y más de 18.
- **Litología de la zona no saturada**: contiene las formaciones geológicas (Qb, Qbc, Qn, Qtb y Qtbn).
- **Conductividad hidráulica** en m/d: de 1.728, de 4.32 y de 43.2.

Alta (representa el 10.60 % del total de la superficie de zona de estudio)

- **Profundidad del nivel freático** en m: de 22.9 a 30.5 y más de 30.5.
- **Recarga neta** en mm/a: más de 254.
- **Litología del acuífero**: contiene las formaciones geológicas (Qbc y Qb).
- **Tipo de suelo**: arena, arena + materia orgánica, migajón y migajón + materia orgánica.
- **Topografía** (pendiente en %): menos de 2, de 2 a 6, de 6 a 12, de 12 a 18 y más de 18.
- **Litología de la zona no saturada**: contiene las formaciones geológicas (Qb y Qbc).
- **Conductividad hidráulica** en m/d: de 43.2.

De acuerdo a lo anterior, puede observarse que esta metodología DRASTIC, generada en formato vectorial mediante el uso de un SIG, a diferencia de la metodología desarrollada en formato matricial o raster (sólo se conoce un valor numérico), tiene la ventaja de poder conocer las características (atributos asociados que el usuario le agregó a cada elemento) de cada una de las áreas de los índices de vulnerabilidad.

Cabe hacer mención que siempre que se realiza este tipo de mapas de vulnerabilidad es necesario aclarar que los sitios o zonas de más baja vulnerabilidad no indican que el acuífero no pueda ser contaminado en dichas zonas, sino que la probabilidad de que se produzca una contaminación es menor.

El concepto utilizado para la generación de este mapa de vulnerabilidad fue el establecido por Vrba y Zaporozec (1994).

CAPÍTULO 5

GENERACIÓN DEL MAPA DE VULNERABILIDAD PARA ÁREAS ESPECÍFICAS EN EL CURSO ALTO DEL RÍO LERMA, MEDIANTE LA MODELACIÓN NUMÉRICA

5.1. INTRODUCCIÓN

Tal y como se ha planteado en los capítulos anteriores, la cartografía de vulnerabilidad de acuíferos, ya sea por la metodología DRASTIC u otras, no tienen la capacidad de generar resultados exactos, es decir, no son infalibles, producto, lógicamente, de la incertidumbre en la gran cantidad de parámetros que si requieren. Por tal motivo, diversos investigadores han centrado sus esfuerzos en adecuar algunos aspectos de estas metodologías, con el ánimo de aumentar la confiabilidad de estas herramientas. En este sentido, el presente trabajo pretende adecuar, con ayuda de la modelación numérica, los resultados obtenidos por la metodología DRASTIC para el Curso Alto del Río Lerma.

Es necesario destacar que para el análisis de vulnerabilidad (DRASTIC) llevado a cabo en esta investigación, se consideró sólo la protección del acuífero de forma general, por lo que se tomó en cuenta el concepto de vulnerabilidad de Vrba y Zaporozec (1994), el cual plantea que la vulnerabilidad “es una propiedad intrínseca de un sistema hidrogeológico que depende de la sensibilidad del sistema a impactos de origen natural y humano”, mientras que para realizar la adecuación propuesta, se consideró la protección de varias áreas consideradas de interés, tomando en cuenta el concepto de la NRC (1993), el cual plantea que la vulnerabilidad “es la

tendencia o la probabilidad de que contaminantes alcancen una posición específica en el sistema de aguas subterráneas, después de su introducción en algún lugar de la superficie”.

Las etapas llevadas a cabo para realizar la mencionada adecuación, se describen en los siguientes apartados.

5.2. SELECCIÓN DE ESCENARIOS

Para poder llevar a cabo la adecuación al mapa de vulnerabilidad generado a partir de la metodología DRASTIC, se seleccionaron aquellas “posiciones específicas” que por razones de diversa índole (importancia política, social, económica o de riesgo de contaminarse por estar en el interior o cerca de las zonas industriales), necesitan protección complementaria.

En el presente trabajo, tales posiciones específicas a proteger, corresponden a diferentes fuentes de agua subterránea, destinadas principalmente al abastecimiento de agua potable e industrial.

A continuación se mencionan los cuatro escenarios seleccionados:

1. Para el primer escenario se seleccionaron los pozos que abastecen de agua a la ciudad de México, por la gran extracción que estos representan en la zona de estudio. En total se seleccionaron 157 pozos distribuidos en forma de franja, bordeando las serranías de la parte oriental de la zona de estudio, de los cuales se extrae un caudal de 7,956 lps; las concentraciones que presentan estos pozos implica que si un pozo llegara a contaminarse, todos los pozos aledaños o cercanos a este, podrían llegar a presentar alteraciones en la calidad del agua (figura 5.1).
2. Para el segundo escenario se seleccionaron 53 pozos de propiedad municipal-particular destinados al abastecimiento de agua potable. La selección de estos pozos obedeció a que se ubican en el interior o cercanos aguas abajo de las zonas industriales. Su distribución se manifiesta de manera irregular en la zona de estudio (figura 5.2).

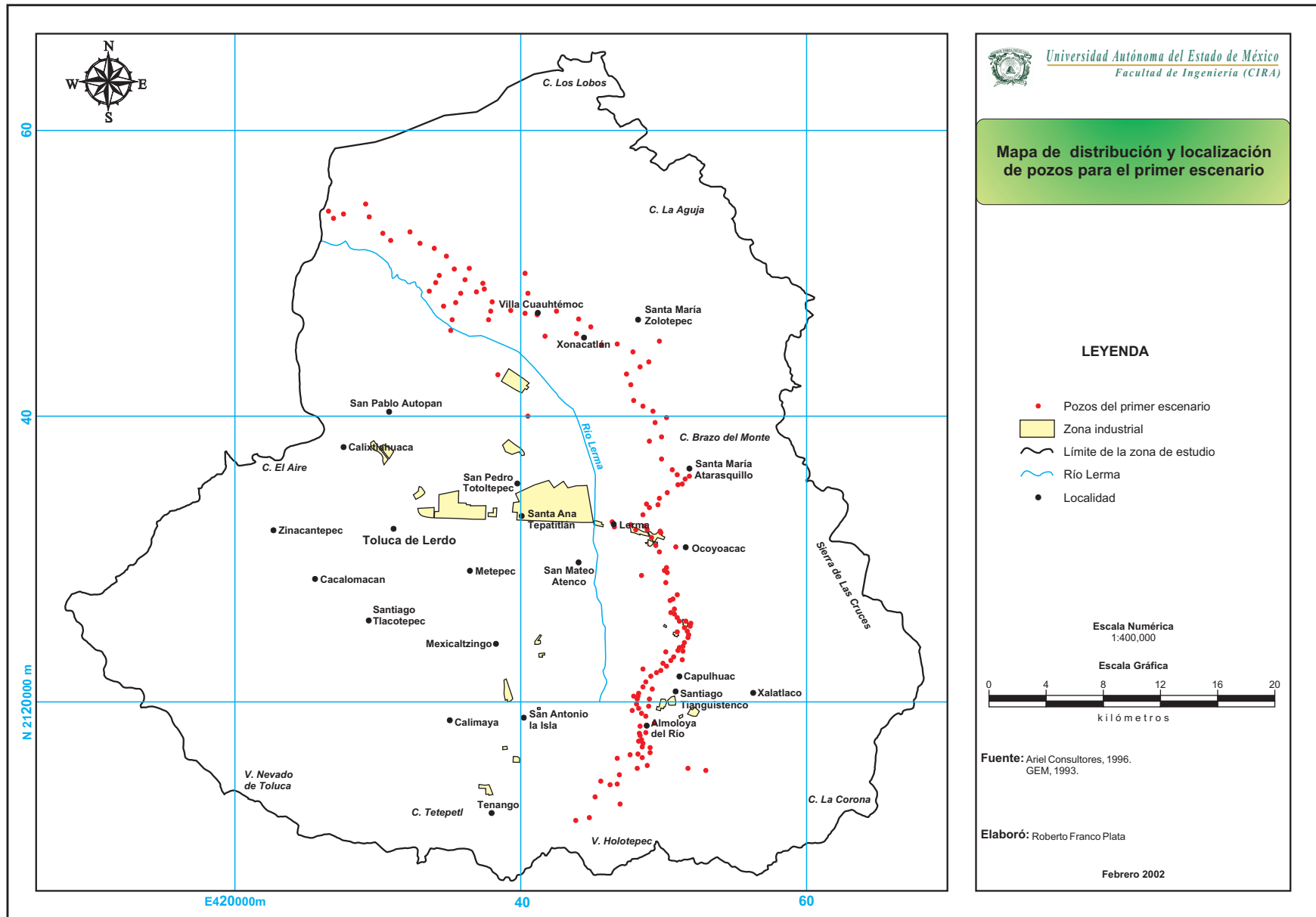


Figura 5.1. Distribución y localización de pozos para el primer escenario.

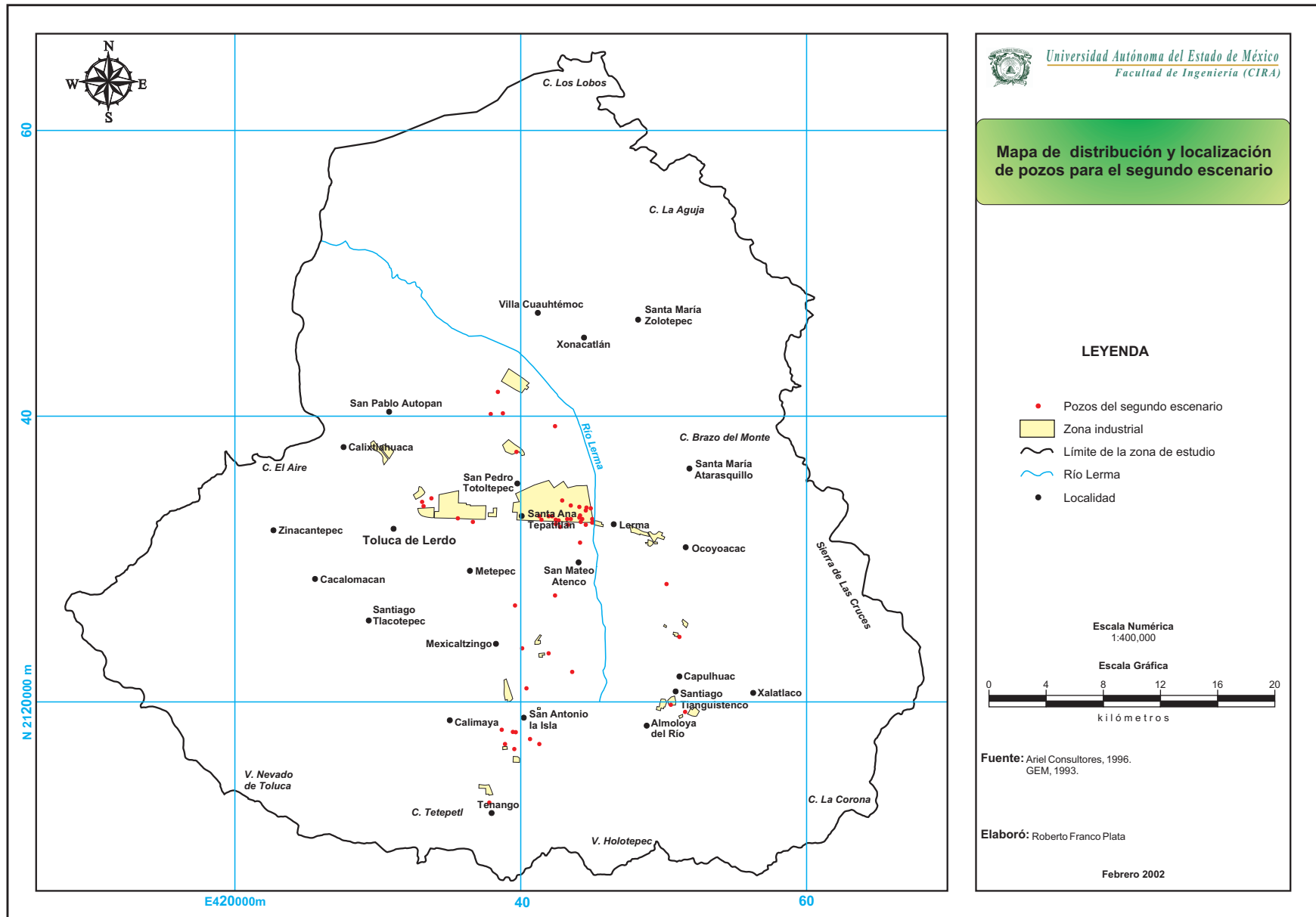


Figura 5.2. Distribución y localización de pozos para el segundo escenario.

3. Para el tercer escenario se seleccionaron 13 pozos de propiedad particular destinados al abastecimiento de agua potable. La selección de estos pozos obedeció a que se ubican en el interior o cercanos aguas abajo de las zonas industriales. Se localizan en la parte central y sur del valle de la zona de estudio (figura 5.3).
4. Para el cuarto escenario, se seleccionaron 40 pozos de propiedad particular destinados al abastecimiento de las industrias. La selección de estos pozos obedeció a los mismos criterios que se han manejado para la selección de los escenarios anteriores. Se localizan en la parte central del valle, al NE de la ciudad de Toluca (figura 5.4).

5.3. DELIMITACIÓN DE LAS ÁREAS A PROTEGER, MEDIANTE EL USO DE LA MODELACIÓN NUMÉRICA

La importancia de la modelación numérica en las cuestiones relacionadas con la protección de las aguas subterráneas, mediante la utilización de la modelación numérica en tres dimensiones y trazado de partículas, está ampliamente documentada (Bair et al., 1990; Delin y Almendinger, 1991; Bair y Roadcap, 1992; Springer y Bair, 1992; Barlow, 1994a y 1994b; Snyder et al., 1998; Baldwin et al., 2000).

Dentro de los software de modelación numérica que más han destacado en los últimos años, debido a características tales como la facilidad de manejo, versatilidad, interfase gráfica, entre otros, se encuentra el VisualMODFLOW. Es precisamente, el programa VisualMODFLOW, el que se utilizó para llevar a cabo la delimitación de las áreas a proteger (apartado 5.2).

Para este trabajo, se tomo como base el modelo numérico elaborado por Ariel Consultores en 1996 para la CNA, el cual se generó con el programa de VisualMODFLOW, de la compañía Waterloo Hydrologic, Inc, Ontario, Canadá. Las características principales de la modelación realizada, así como los datos empleados, fueron tomados directamente de Ariel Consultores (1996) y se relacionan en el apartado 5.3.1. posteriormente, se comienzan las adecuaciones al modelo numérico (apartado 5.3.2), con el objetivo de facilitar su empleo en la presente investigación.

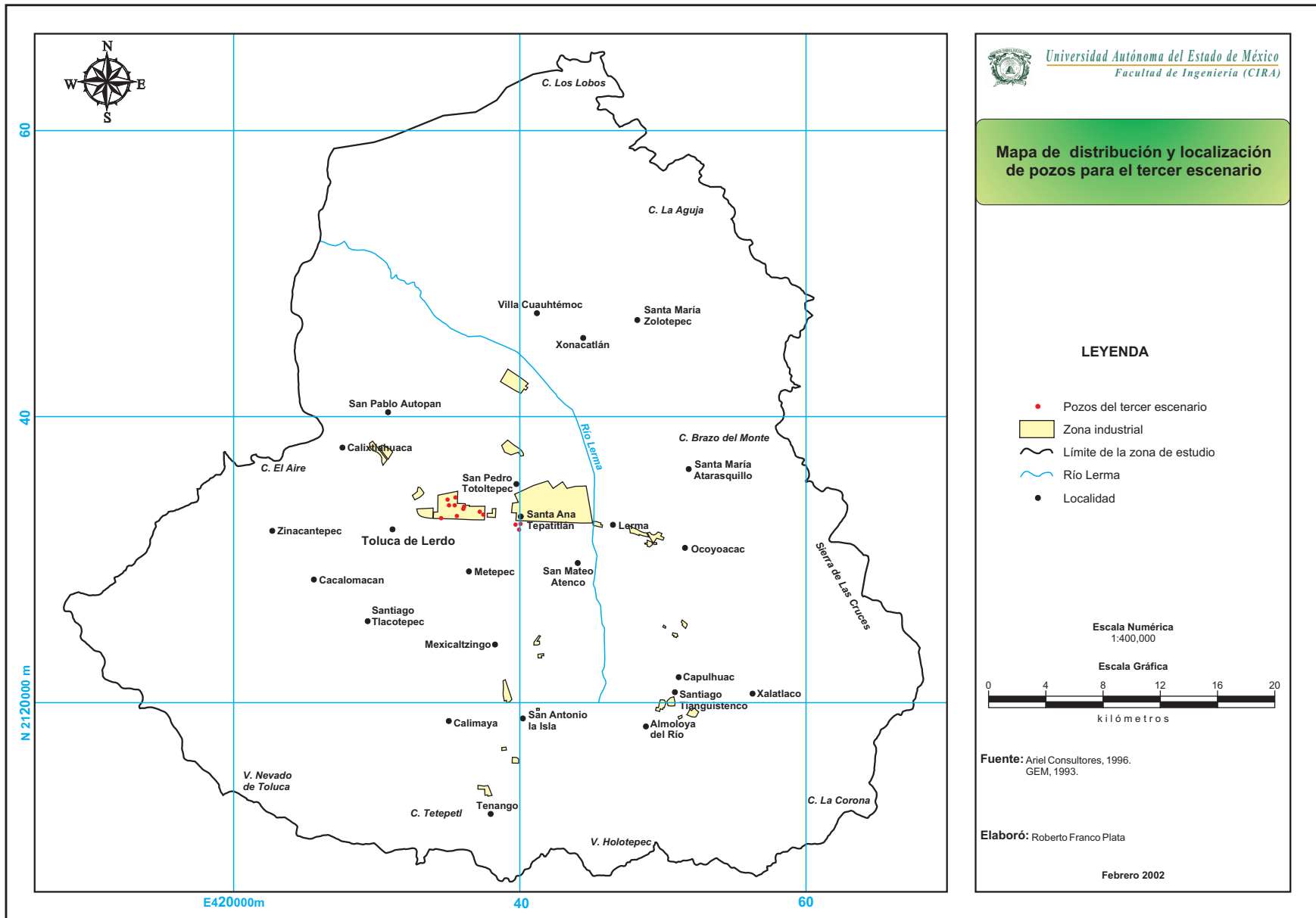


Figura 5.3. Distribución y localización de pozos para el tercer escenario.

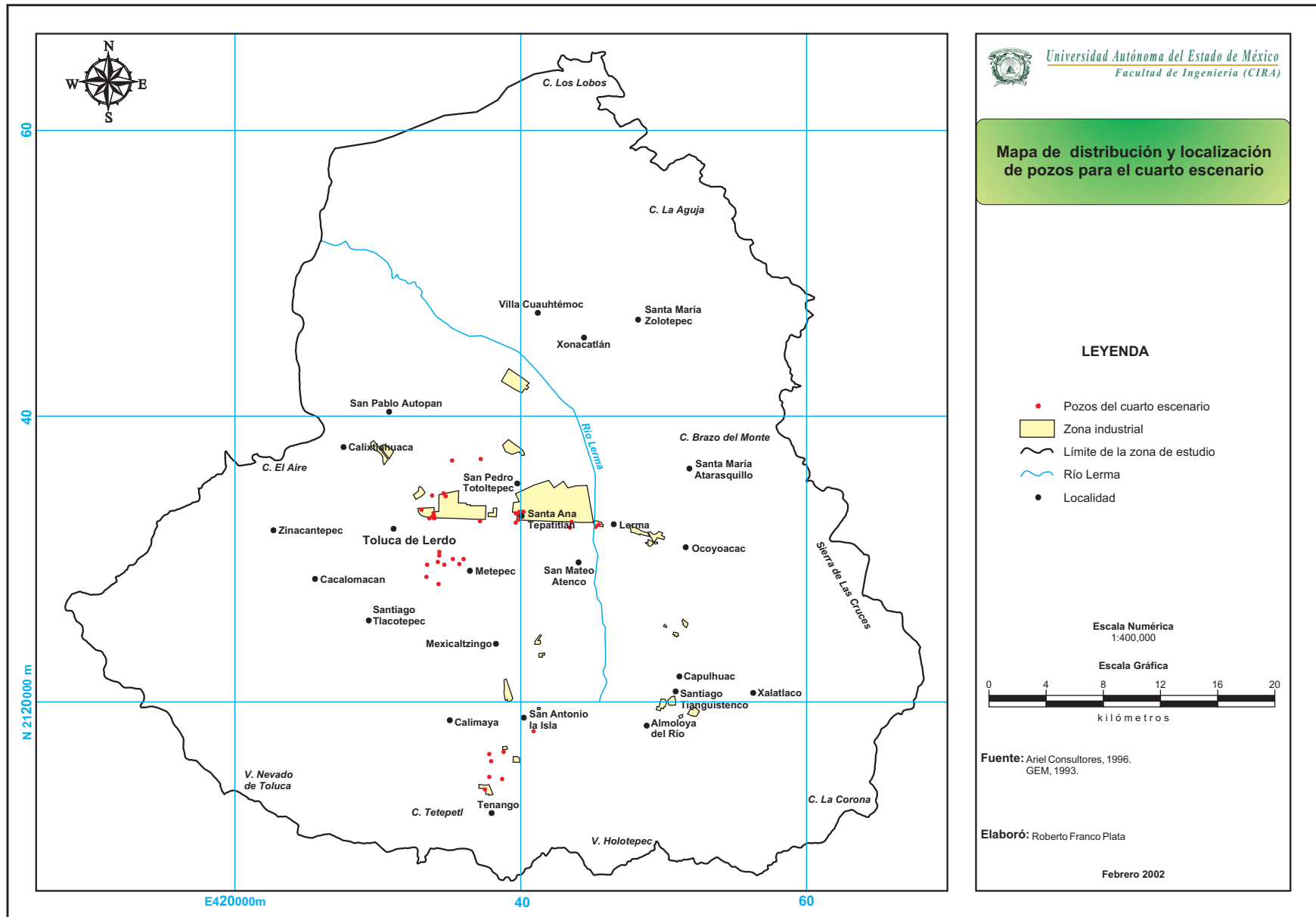


Figura 5.4. Distribución y localización de pozos para el cuarto escenario.

5.3.1. Características principales del modelo numérico original

En los siguientes apartados, se describen las características principales del modelo numérico tomado como base.

5.3.1.1. Modelo conceptual del sistema

El modelo conceptual de funcionamiento de un acuífero en una región dada, es la base y sustento de su modelación matemática; en consecuencia, es de fundamental importancia la precisión y claridad con que sea formulado. A medida en que la calidad del modelo conceptual sea mejor, será más fácil la implementación del modelo de simulación.

La abundante precipitación que tiene lugar el Curso Alto del Río Lerma, es la principal fuente de recarga para el acuífero regional, parte de la cual se infiltra a través de unidades transmisoras localizadas generalmente en el perímetro del valle y que luego, subterráneamente, recargan al acuífero. Otra parte se infiltra en la planicie.

Las sierras del oriente Monte Alto y Las Cruces, donde afloran rocas andesíticas, derrames de basalto y materiales de la Formación Tarango, por su fracturamiento, que les confiere permeabilidad secundaria en algunas áreas, propician la infiltración de una abundante precipitación pluvial y de los escurrimientos superficiales que se originan en estas alturas, atemperada por las fuertes pendientes de sus cauces. Esta recarga se agolpa al llegar a la planicie, manifestándose incluso en forma de manantiales, donde se formó el sistema de lagunas y pantanos como Almoloya del río, Lerma y San Bartolo, orígenes del río Lerma.

Las cadenas montañosas del sur, a partir de la sierra del Ajusco y hasta el Nevado de Toluca, donde afloran las mismas rocas andesíticas y derrames de basaltos que en las sierras antes señaladas, además de los depósitos identificados como flujos del Nevado, representan también zonas de recarga importantes por la infiltración del agua de lluvia. En las vertientes del Nevado ocasionalmente se forman acuíferos muy someros aprovechados por medio de norias, que llegan a secarse en los últimos y más secos meses del estiaje, abril y mayo.

La serranía del occidente, caracterizada por las rocas andesíticas y extensos depósitos de la Formación Tarango, representa por esta dirección las zonas de recarga del acuífero del valle.

En la planicie del valle afloran, en forma aislada, conos cineríticos recientes que también funcionan como modestas zonas de recarga por su reducida extensión, además de constituirse en buenos acuíferos por debajo del nivel de saturación.

Ya en la planicie del Curso Alto del Río Lerma, constituida por rellenos, en general materiales aluviales y tobas que en muchos sitios están en contacto directo con las rocas donde se origina la recarga, se propician flujos subterráneos radiales que convergen en las partes centrales del valle, de acuerdo con las características de permeabilidad, para finalmente tomar una dirección S-N semejante a la del cauce del río Lerma, dren superficial y subterráneo de la zona, pasando por el llamado estrechamiento topográfico de Perales.

También en la planicie se infiltra parte del agua de lluvia que finalmente recarga al acuífero, así como parte de los escurrimientos superficiales que actualmente han dejado de funcionar como drenes de niveles freáticos, mismos que han sido abatidos por la sobreexplotación de los acuíferos y que por lo mismo representan un riesgo de contaminación. Asimismo, los sobre riegos donde se practica agricultura de riego, inducen una infiltración de aguas claras o residuales, y que en este último caso también representan una contaminación al acuífero.

La recarga más importante al sistema del acuífero proviene del Nevado de Toluca en forma radial hacia las planicies, tal como se aprecia en las configuraciones piezométricas. Otra recarga que debe ser importante proviene de las sierras del oriente, sólo que es interceptada, cuando menos en buena parte, por las extracciones de los pozos destinados al abastecimiento del valle de México; casualmente deben ser del mismo orden de magnitud, puesto que no se registran evoluciones piezométricas en los puntos de observación localizados en la planicie.

La descarga subterránea del Curso Alto del Río Lerma, tiene lugar en forma natural hacia el estrechamiento de Perales, hacia el norte, siguiendo una dirección semejante a la traza del cauce del río Lerma, dren superficial y subterráneo de la zona estudiada. En su estado original, debió presentarse una importante descarga de aguas someras por evapotranspiración, tanto en las lagunas donde tenía origen el río Lerma, como en los alrededores del estrechamiento topográfico de Perales, pérdidas que en la actualidad han disminuido considerablemente por los abatimientos piezométricos inducidos por el bombeo de pozos. En la figura 5.5 se presenta un diagrama esquemático del modelo conceptual antes descrito.

5.3.1.2. Discretización espacial

El modelo original utiliza una malla que comprende parte del Curso Alto del Río Lerma, con las fronteras siguientes: al norte la entrada del estrecho de Perales y el parteaguas de la sierra que limita a esta porción del valle; al suroccidente de la serranía y el flujo volcánico del Nevado de Toluca y al oriente el parteaguas de la sierra de las cruces que lo limita del valle de México.

La malla comprende 47 renglones y 41 columnas, con 1,927 celdas de un kilómetro por lado cada una y para dos capas, es decir 3,854 celdas en total; la orientación de la malla coincide sensiblemente con la dirección del flujo de agua superficial y subterránea (figura 5.6 y 5.7). La modelación del sistema en dos capas, se basó en la consideración de que el acuífero está formado por dos medios, uno poroso y el otro fracturado (apartado 2.6.2), en tal sentido, la división del acuífero en dos capas, permitió realizar el análisis diferenciado del flujo de cada una de ellas,

Las celdas inactivas se localizan en la porción suroccidental del área, en el Nevado de Toluca, debido a que su altura con respecto al valle es de más de 1,000 m, así como por la alta permeabilidad de los materiales que lo componen, propiciando que la parte superior esté completamente drenada. En la porción noroccidental del valle, en la sierra Guadalupeña; en la serranía comprendida entre los cerros El Campanario y El Órgano, en la porción nororiental y en los afloramientos de andesitas Xochitepec y basaltos antiguos, al centro del valle y al norte de la ciudad de Toluca, se presentan celdas inactivas, que por su baja permeabilidad de los materiales, se consideran hidráulicamente inactivas (figura 5.6 y 5.7).

5.3.1.3. Discretización temporal

Para alimentar al modelo se consideró como condición inicial la piezometría correspondiente al año de 1970, a partir de los datos reportados en los multipiezómetros construidos por la extinta Comisión Hidrológica de la Cuenca del Valle de México. El tiempo total de simulación se dividió en dos periodos, uno de 1970 a 1984 y otro de 1984 a 1996. Los intervalos de tiempo fueron seleccionados con base en la información disponible en lo referente a los censos de aprovechamientos realizados con anterioridad.

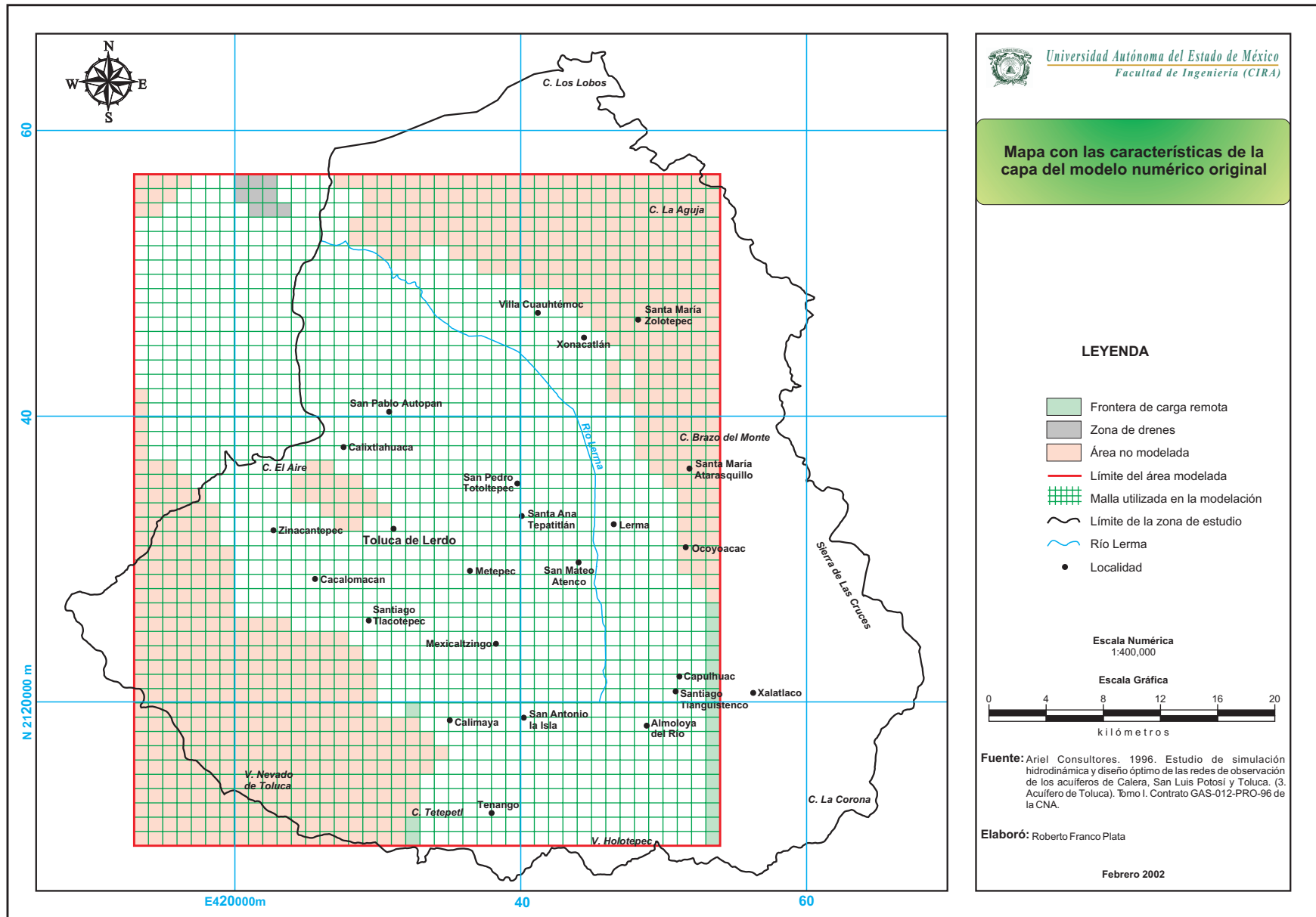


Figura 5.6. Características de la capa 1 del modelo numérico original.

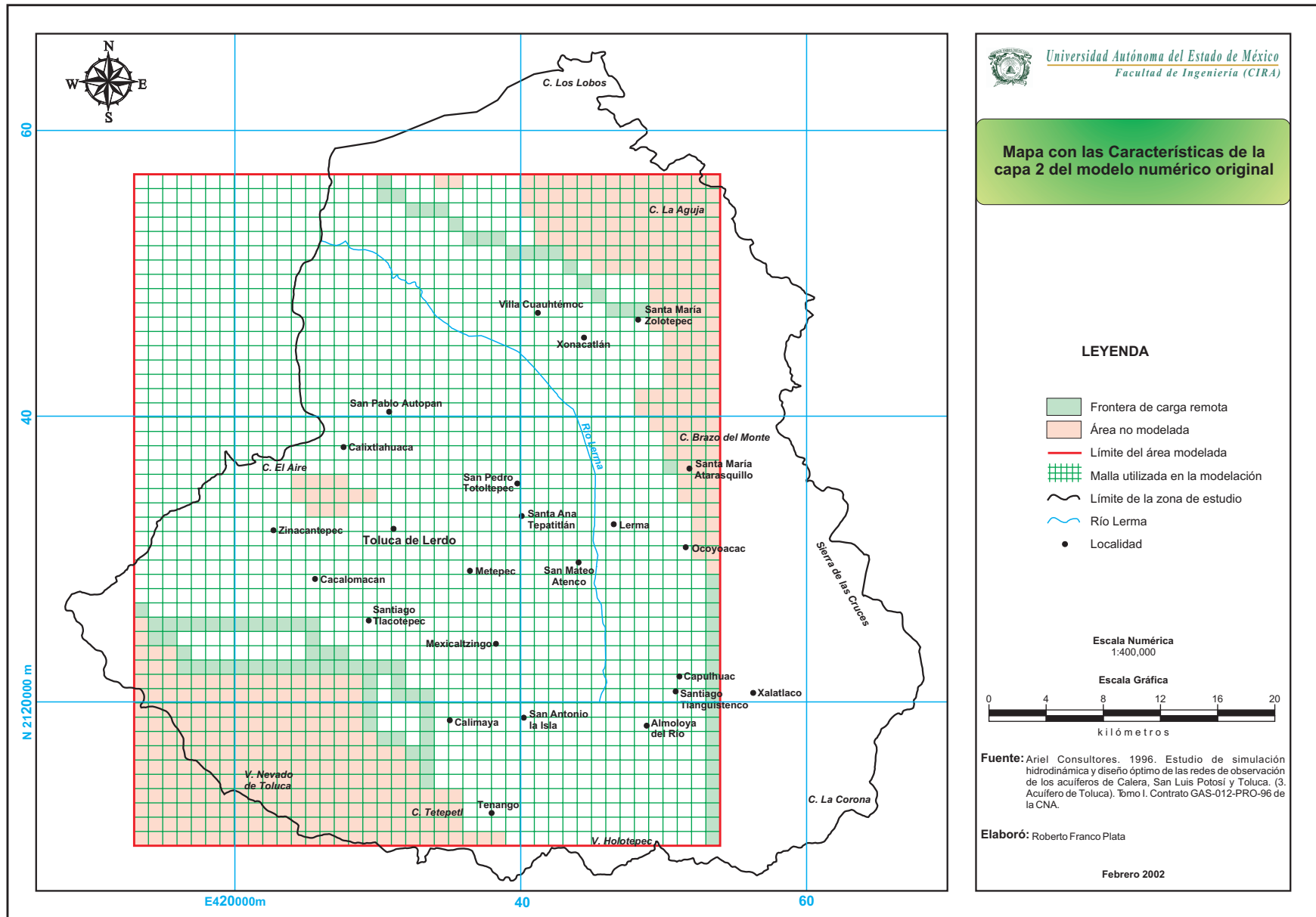


Figura 5.7. Características de la capa 2 del modelo numérico original.

Los valores de conductividad hidráulica y el almacenamiento específico, son a partir de los cuales se alimentó el modelo, fueron obtenidos de las pruebas de bombeo interpretadas por el método de Rathod y Rushton (1990). La transmisividad se obtuvo del mismo modo considerando los espesores de las capas.

En cuanto a los valores de conductividad hidráulica empleados, fueron siete en función de las unidades geológicas (figura 3.4): la K_1 corresponde al aluvión (Qal), la K_2 a basaltos del Cuaternario (Qtba), la K_3 a la Formación Tarango (Tpt), la K_4 a rocas ígneas fracturadas del Terciario (Tpv y Tome), la K_5 a rocas volcánicas del Cuaternario (Qtbn y Qn), K_6 a rocas ígneas (Qbc y Qb) y K_7 a material lacustre (Qla), tal como se reporta en cuadro 5.1; en otras palabras, se asoció una propiedad tipo a cada una de las formaciones geológicas que se presentan en la zona.

Los valores de conductividad hidráulica tomados como base se obtuvieron del modelo de flujo radial en las pruebas de bombeo, y se calibraron posteriormente. En función de las características de cada unidad se incorporaron los valores de K_y y K_z .

Para el coeficiente de almacenamiento (S_s para acuíferos confinados y S_y para acuífero libres) (cuadro 5.2) se adoptó la misma distribución de acuerdo con las formaciones geológicas.

Cuadro 5.1. Valores de K_h y K_v asociados a las formaciones geológicas y las capas modeladas.

No.	K_h (m/s)	K_v (m/s)	MATERIAL	CAPA
K_1	2.0×10^{-5}	2.0×10^{-5}	Qal	1
K_2	5.0×10^{-5}	5.0×10^{-5}	Qtba	1
K_3	7.0×10^{-6}	7.0×10^{-6}	Tpt	1 y 2
K_4	2.0×10^{-4}	2.0×10^{-4}	Tpv y Tome	1 y 2
K_5	2.0×10^{-5}	2.0×10^{-5}	Qtbn y Qn	1 y 2
K_6	5.0×10^{-4}	5.0×10^{-4}	Qbc y Qb	1 y 2
K_7	2.0×10^{-7}	2.0×10^{-7}	Qla	1

Cuadro 5.2. Valores de S_s y S_y asociados a las formaciones geológicas.

No.	S_s	S_y	MATERIAL	CAPA
1	0.00047	0.18	Qal	1
2	0.0005	0.16	Qtb-a	1
3	0.0003	0.08	Tpt	1 y 2
4	0.00007	0.05	Tpv y Tomc	1 y 2
5	0.0008	0.18	Qtbn y Qn	1 y 2
6	0.0006	0.13	Qbc y Qb	1 y 2
7	0.00007	0.05	Qla	1

5.3.1.4. Condiciones de frontera

Como fronteras de carga remota (frontera matemáticamente similar al río y dren, destinada a permitir el ingreso del flujo de agua al sistema, en dependencia de los parámetros de construcción), se considero al flujo horizontal proveniente de la infiltración que se genera en la sierra localizada al SE de la zona estudiada, porción sur de la Sierra de las Cruces, con carga remota de 2,800 msnm y conductancia de 20 m²/d, aplicado en la capa 1 (figura 5.6), y en la capa 2 una carga remota de 2,800 y una conductancia de 30 m²/d (figura 5.7). En el resto de la sierra no se consideró este efecto dada la baja permeabilidad de los materiales que la componen (Tomc). Asimismo, fue considerado el flujo horizontal que generan las infiltraciones del Nevado de Toluca, con carga remota de 3,000 msnm y conductancia de 20 m²/día, aplicado en la capa 2, y en la capa 1 una carga remota de 3,000 msnm y una conductancia de 5 m²/d.

Además se consideró una frontera tipo dren, correspondiente a la salida por flujo horizontal hacia el valle de Ixtlahuaca, donde el río Lerma se localiza encañonado y funciona como dren, a la elevación 2,530 msnm y con una conductancia de 150 m²/d (figura 5.6).

De una lluvia total de 770 mm/a, se consideró un recarga vertical de 55 mm/a, valor resultante de la calibración del modelo. Se aplicó una lámina de evapotranspiración potencial de 280 mm/a, con una variación lineal en disminución hasta 4 metros de profundidad.

5.3.1.5. Calibración

La calibración de un modelo de simulación de flujo subterráneo consiste en demostrar que el modelo es capaz de reproducir las condiciones reales del sistema, tanto de flujo como de las cargas hidráulicas medidas en campo, dentro de un rango de error razonable.

La dificultad o facilidad con que se logra calibrar un modelo, depende de la calidad de los datos de entrada para poder reproducir, lo más aproximadamente posible, la realidad. La falta de datos precisos de las propiedades del medio dificulta esta tarea, por lo que es necesario utilizar la información histórica y la generada a partir de otras simulaciones, como es el caso de modelos de flujo radial.

Como puntos de calibración se tomaron 55 estaciones piezométricas instaladas por las extintas Comisión Hidrológica de la Cuenca del Valle de México y la Comisión de Aguas del Valle de México, los cuales cuentan con registros desde 1970.

Toda la calibración se efectuó en estado transitorio, partiendo de las configuraciones de 1970 y comparándose con los datos de campo de 1996, mostrando una buena coincidencia, por lo que la calibración realizada se consideró buena.

5.3.1.6. Análisis de sensibilidad

El análisis de sensibilidad es un método práctico para evaluar la influencia de uno o varios parámetros que intervienen en un fenómeno, y consiste en cuantificar su impacto sobre el mismo, variando sus valores.

Para el presente caso se realizó un análisis de sensibilidad para 4 parámetros: recarga, evapotranspiración, conductividad hidráulica de las unidades Qal y Tpt y coeficiente de almacenamiento para las mismas unidades.

El procedimiento consistió en sustituir en el modelo los valores de los parámetros mencionados en 20, 40, 60 y 80 % en más y en menos; con estas variaciones se obtuvieron las cargas hidráulicas resultantes mediante corridas del modelo, concluyendo, que el modelo es más sensible a los cambios de conductividad hidráulica que a los demás parámetros analizados.

Para finalizar, es necesario recordar que las características descritas en este apartado 5.3, son exclusivamente del modelo numérico original generado por Ariel Consultores (1996).

5.3.2. Características principales del modelo numérico adecuado

Para poder utilizar el modelo numérico original en la delimitación de las áreas a partir de la selección de los escenarios (apartado 5.2), fue necesario realizarle algunas adecuaciones al modelo numérico original. Las adecuaciones realizadas se resumen a continuación:

5.3.2.1. Conversión de estado transitorio a estacionario

Esta conversión fue necesaria llevar a cabo, debido a que sólo en estado estacionario se puede simular el trazado de partículas. Siendo precisamente esta última técnica, una de las bases principales en el desarrollo de la presente investigación.

5.3.2.2. Discretización espacial

La malla se hizo más fina, la cual comprende 94 renglones y 82 columnas, con 7,708 celdas de 500 metros por lado cada una y para dos capas, con un total de 15,416 celdas; las demás características son similares al modelo numérico original (figura 5.8). El refinamiento de la malla se realizó para evitar se produjesen abatimientos irreales en el centro de las celdas, con dimensiones originales, en otras palabras, esto significa, que como las celdas originales son de 1 km², pudiesen en ella ubicarse más de un pozo, situación que el modelo considera como un solo pozo, situación que el modelo considera como un solo pozo, actuando en el centro de la celda, al refinarse la malla de cada pozo se puede evaluar de forma independiente

5.3.2.3. Discretización temporal

Para alimentar al modelo se consideró como condición inicial la piezometría imperante en el año de 1996, a partir de los datos reportados por Ariel Consultores (1996).

La calibración se efectuó en estado estacionario, partiendo de las configuraciones piezométricas de 1996 generadas por Ariel Consultores (1996) y las generadas por el modelo numérico a partir del programa VisualMODFLOW.

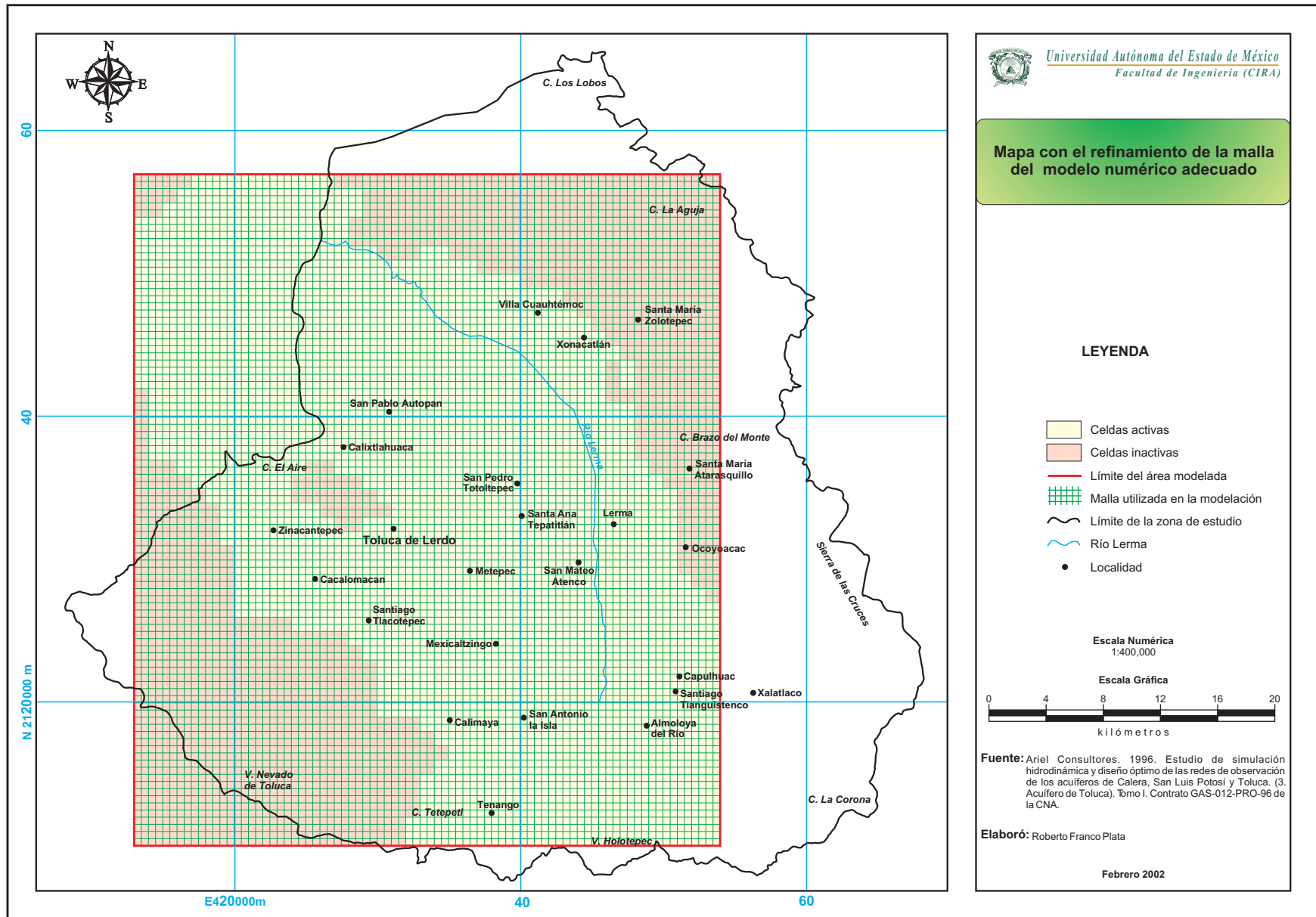


Figura 5.8. Refinamiento de la malla del modelo numérico adecuado.

Los resultados comparativos entre las dos configuraciones piezométricas muestran una buena coincidencia (figura 5.9), por lo que la calibración se consideró exitosa. Los datos empleados para el análisis fueron los mismos del modelo numérico original.

5.3.3. Delimitación de áreas a proteger mediante el trazado de partículas para la adecuación del mapa de vulnerabilidad DRASTIC

Una vez que se dispone del modelo numérico en estado estacionario y calibrado, el siguiente paso consistió en delimitar el desplazamiento advectivo de partículas hipotéticas en un tiempo de 50 años (18,250 días) determinado dentro del flujo modelado, lo que permite mostrar la trayectoria de dichas partículas. El tiempo de tránsito considerado para definir las áreas ($T=50$ años) se obtuvo a partir de trabajos consultados al respecto (Expósito, 2001; Gárfias et al., 2001), en los cuales se considera como un tiempo en el cual deben atenuarse los contaminantes más persistentes.

La herramienta utilizada para generar el desplazamiento de las partículas fue el MODPATH (módulo del VisualMODFLOW), el cual calcula el desplazamiento advectivo de partículas hipotéticas en un tiempo determinado dentro del flujo modelado, permitiendo mostrar la trayectoria de dichas partículas tanto hacia delante (en el sentido del flujo) como hacia atrás (Pollock, 1989). En esta última variante (trazado de partículas hacia atrás), se basó la delimitación de las áreas a proteger a partir de los escenarios seleccionados en la zona de estudio (apartado 5.2).

La secuencia utilizada para llevar a cabo la delimitación de las áreas a proteger de los escenarios seleccionados (apartado 5.2), se resume a continuación:

- Sobre la base del flujo modelado, se ubicaron partículas hipotéticas alrededor de cada uno de los pozos localizados en los escenarios seleccionados. Las partículas fueron ubicadas en la capa superior (medio poroso), debido a que de ella extraían agua la mayoría de los pozos analizados de la zona de estudio.
- Se utilizó el módulo MODPATH del programa VisualMODFLOW para obtener a través de la simulación, la trayectoria de dichas partículas hacia atrás considerando 50 años como tiempo de cálculo.

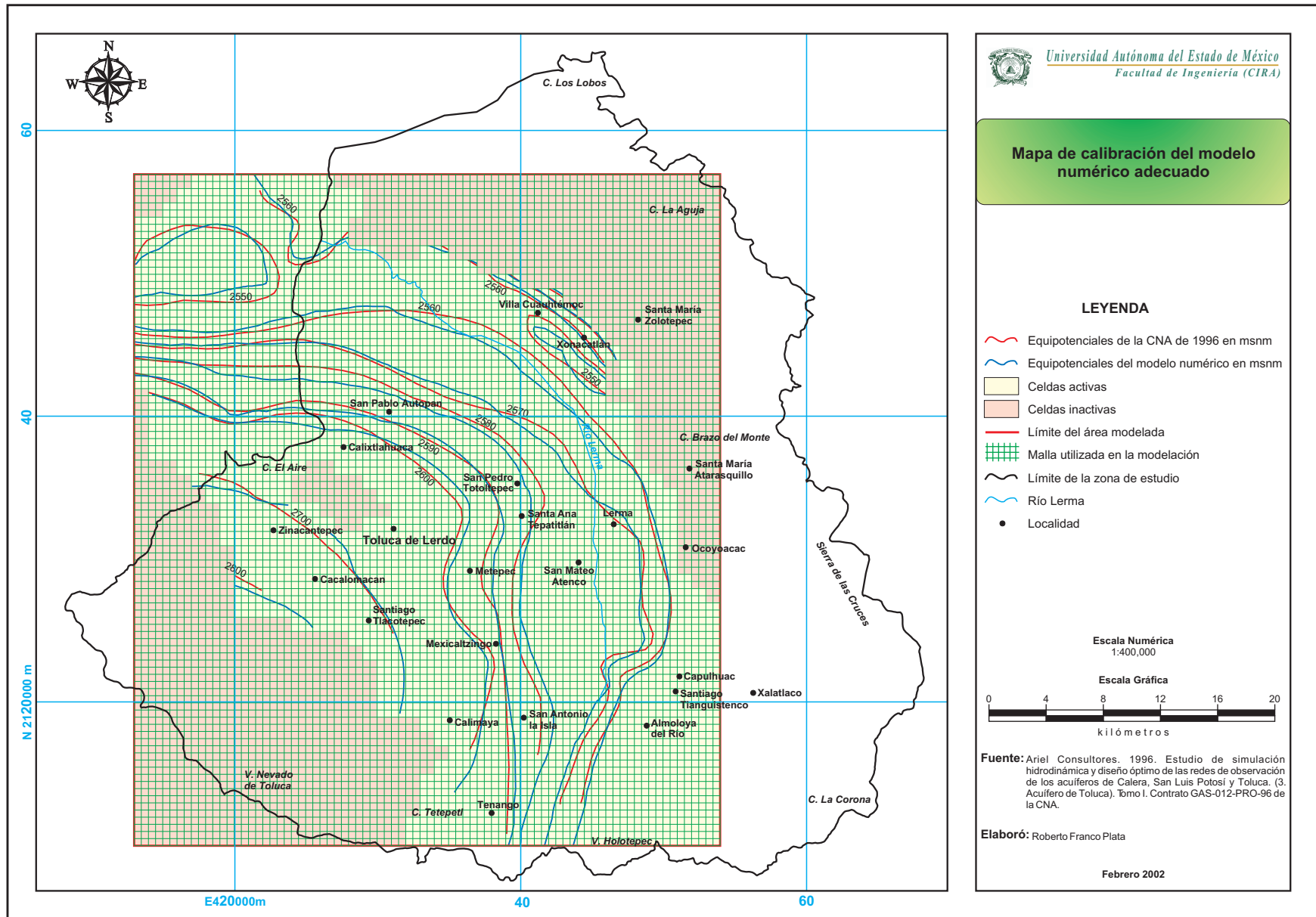


Figura 5.9. Calibración del modelo numérico adecuado.

- Se exportaron las trayectorias de las partículas obtenidas anteriormente (pathlines) a formato DXF, posteriormente, se importaron a AutoCAD, donde se procedió a definir las áreas, a partir de la trayectoria de las partículas. Las áreas definidas, se consideraron como de alta vulnerabilidad debido a que cualquier contaminación que en estas se generase y pudiese llegar al acuífero, podría deteriorar la calidad de las aguas subterráneas de los pozos objetos de la protección.
- Las áreas definidas anteriormente, se importaron a ArcView para superponerlas en la cartografía de vulnerabilidad generada por la metodología DRASTIC. Además, sólo las áreas de alta vulnerabilidad del mapa DRASTIC con las delimitadas, se consideraron como áreas de muy alta vulnerabilidad.

La metodología planteada anteriormente, se desarrolló de manera independiente para cada uno de los escenarios seleccionados. Los resultados obtenidos para cada uno de los escenarios pueden verse en los gráficos 5.10, 5.11, 5.12 y 5.13.

En el primer escenario (figura 5.10), puede observarse que no todos los pozos de interés se ubican en el área modelada, por lo que no puede generarse el trazado de partículas, en este caso se encuentran los pozos ubicados entre los poblados de Santa María Atarasquillo y Santa María Zolotepec, a los cuales, se les asignó una área de protección arbitraria, en concordancia con las obtenidas por el trazado de partículas para los pozos vecinos.

La superposición final de las áreas obtenidas en los cuatro escenarios seleccionados, permitió generar un nuevo mapa de vulnerabilidad, dirigido a la protección específica de los sitios de interés, al cual se le ha denominado mapa adecuado de vulnerabilidad del Curso Alto del Río Lerma (figura 5.14).

Es necesario destacar que el tiempo de tránsito utilizado para el trazado de partículas, solo tuvo en cuenta el trayecto del contaminante en la zona saturada, de esto se desprende que el tiempo de tránsito del contaminante en la zona no saturada, se desprecia por no contar con los datos suficientes, que permitan su determinación, esto lejos de ser un problema, asegura un mayor coeficiente de seguridad, necesario en estos casos en los que los datos utilizados encierran significantes incertidumbres.

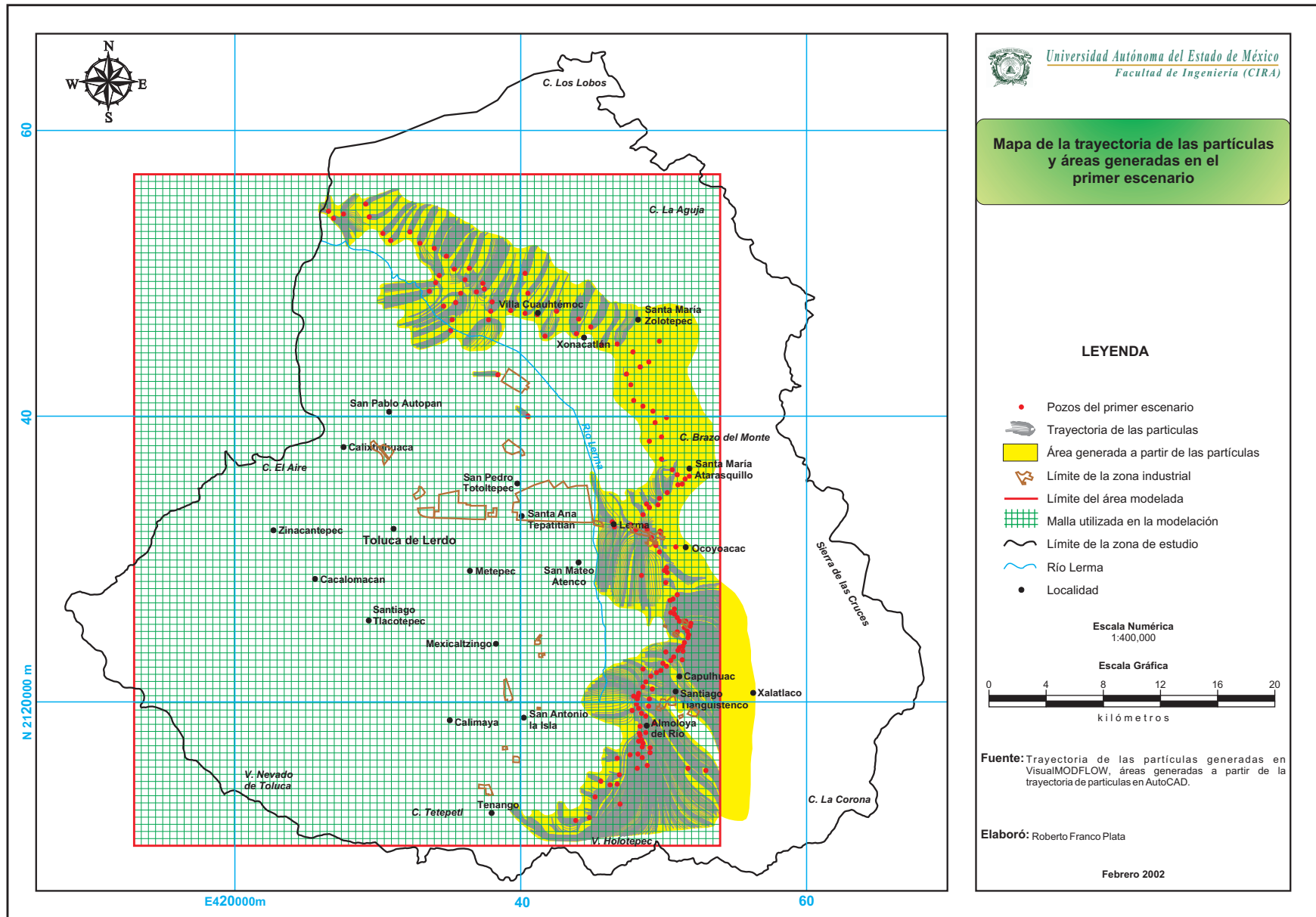


Figura 5.10. Trayectoria de las partículas y áreas generadas en el primer escenario.

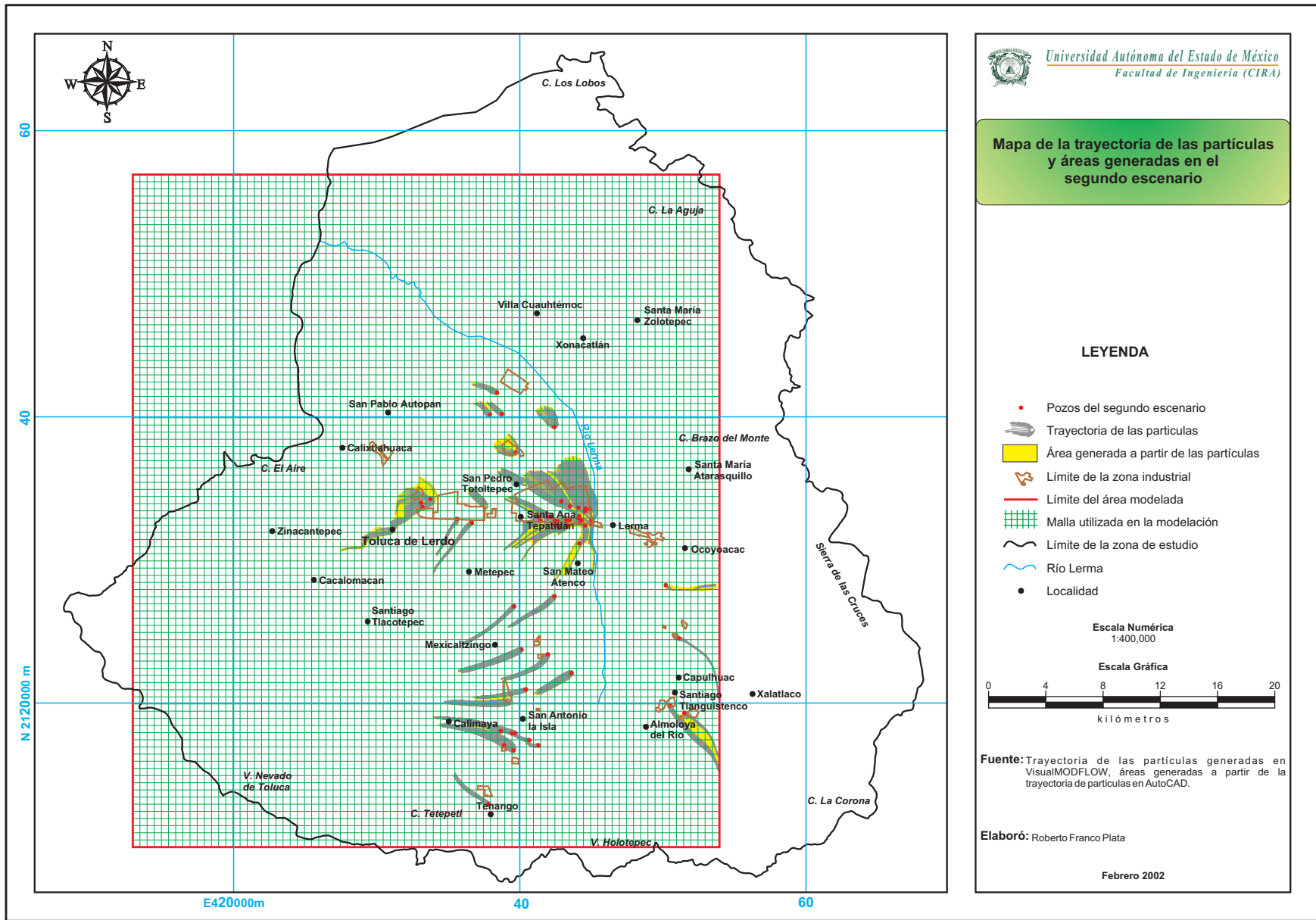


Figura 5.11. Trayectoria de las partículas y áreas generadas en el segundo escenario.

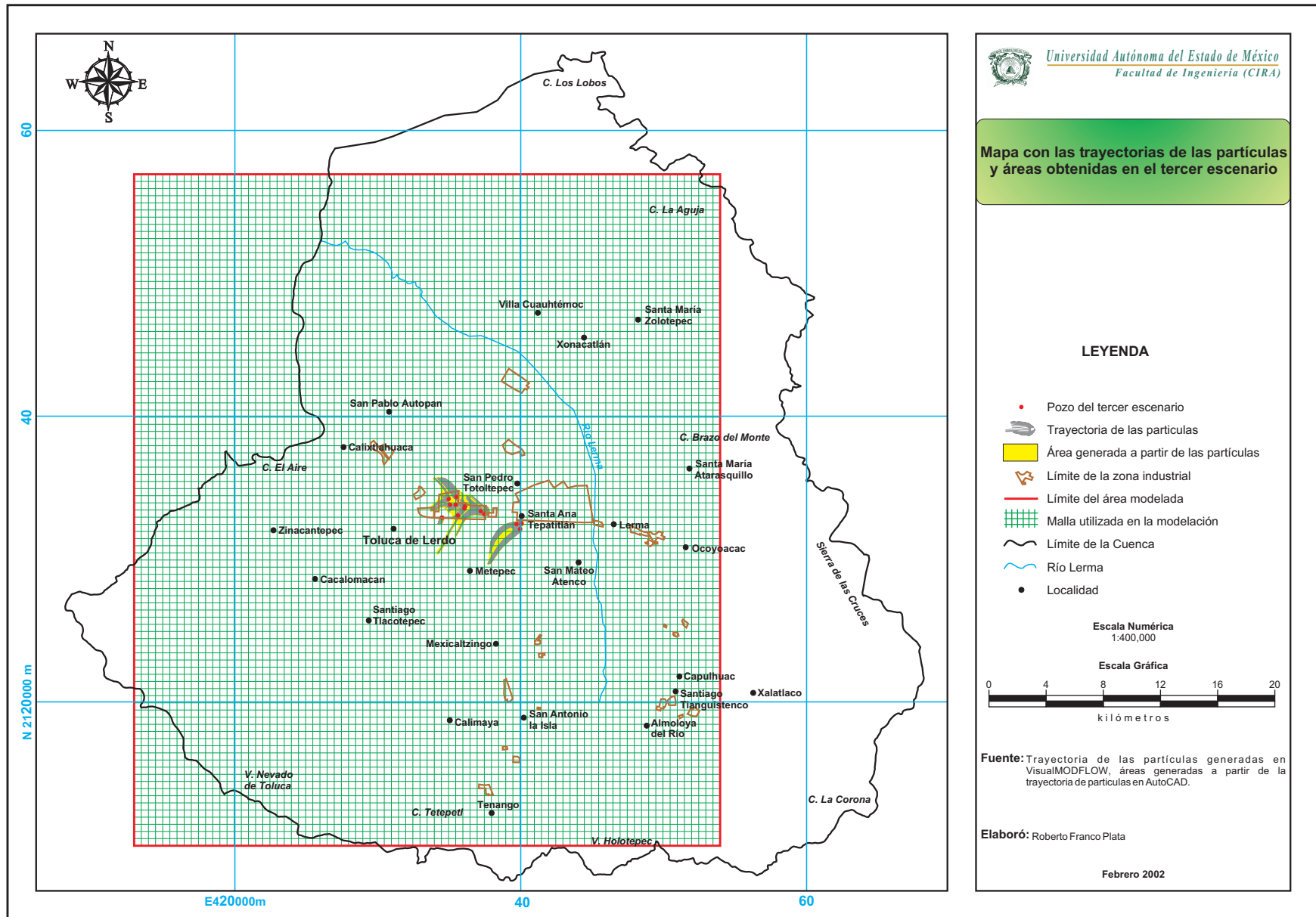


Figura 5.12. Trayectoria de las partículas y áreas obtenidas en el tercer escenario.

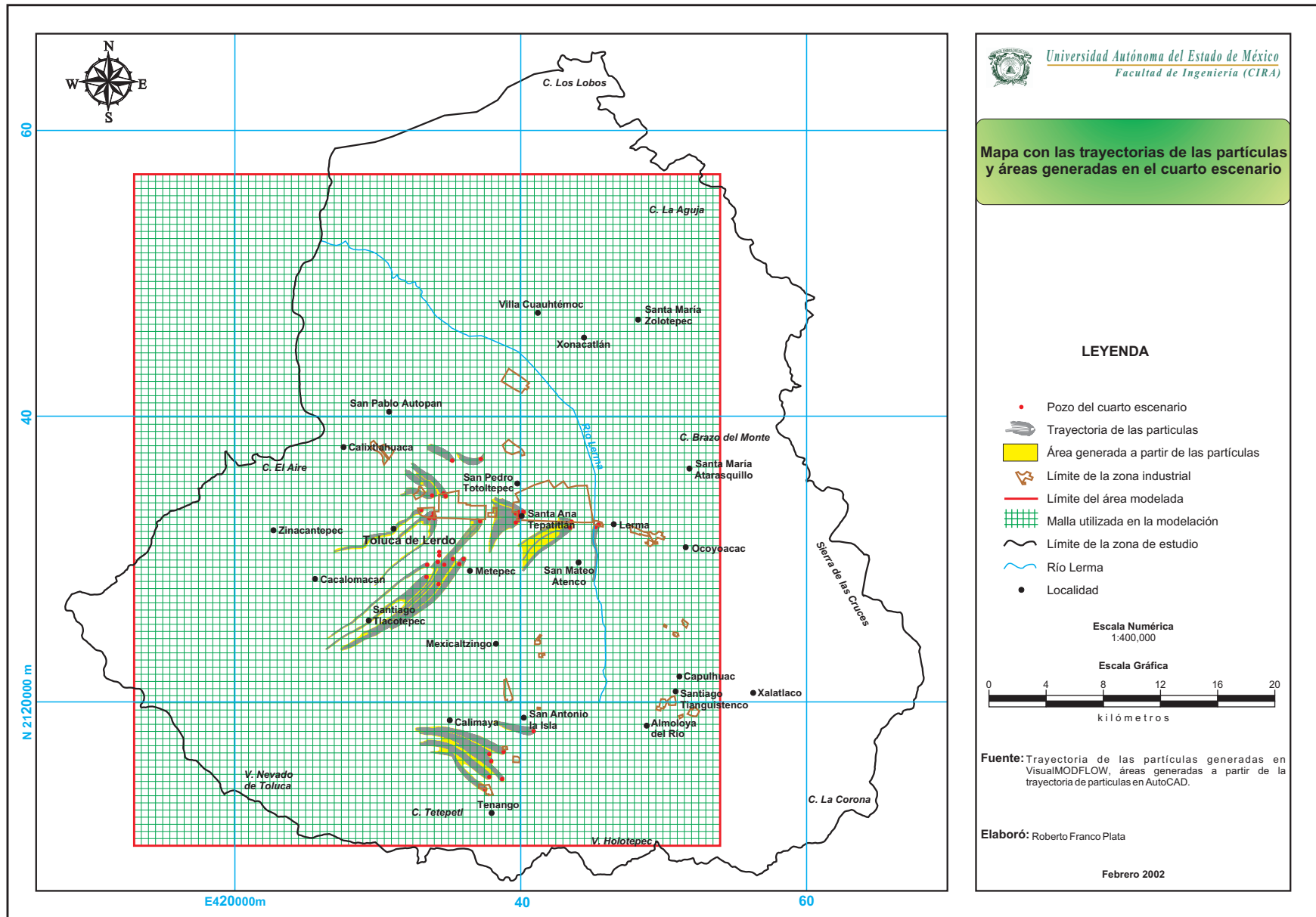


Figura 5.13. Trayectoria de las partículas y áreas generadas en el cuarto escenario.

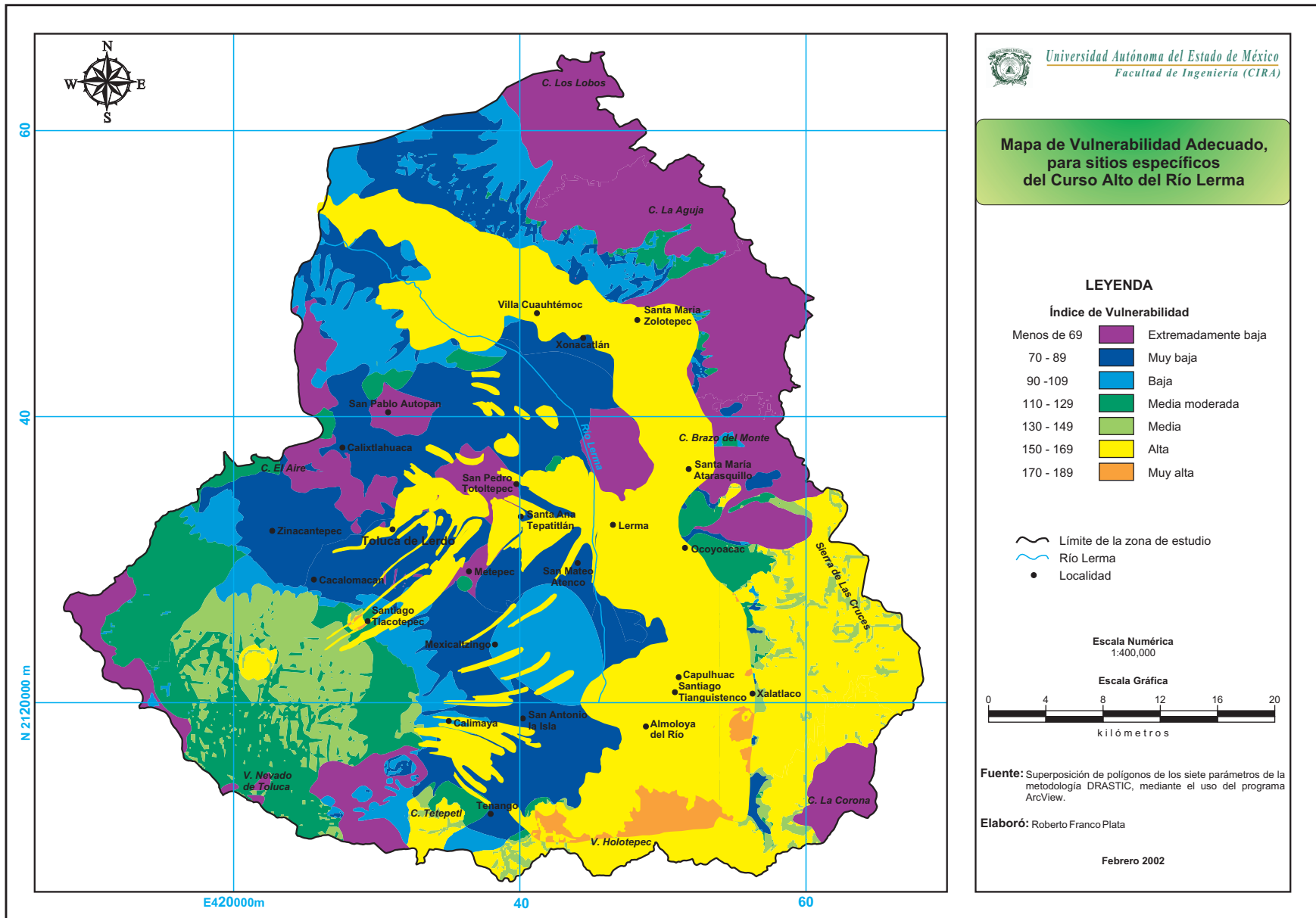


Figura 5.14. Adecuación del Mapa de Vulnerabilidad para sitios específicos del Curso Alto del Río Lerma.

CAPÍTULO 6

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

6.1. INTRODUCCIÓN

Los resultados obtenidos en la presente investigación han sido diversos y de gran importancia, pero se concretan finalmente, en la generación de dos mapas de vulnerabilidad del Curso Alto del Río Lerma, uno generado a partir de la metodología DRASTIC y otro mediante el uso combinado dicha metodología con la modelación numérica. A continuación se analizarán los resultados alcanzados, en el mismo orden que fueron obtenidos.

6.2. MAPA DE VULNERABILIDAD SEGÚN LA METODOLOGÍA DRASTIC

Este mapa se obtuvo aplicando únicamente la metodología DRASTIC, establecida por Aller et al. (1987), la cual se desarrolló sobre un sistema de información geográfica, lo que le confiere una serie de ventajas tales como:

- Centralizar una importante cantidad de información (muchas veces dispersa, descrita y almacenada en distintos formatos) lo que permite gestionar y analizar información de tipo espacial con suficiente rapidez y flexibilidad.

- Facilitar, mediante el conjunto de técnicas estadísticas, la explotación y la comprensión de los datos y su estructura, así como de las relaciones espaciales y temporales existentes entre los datos, mediante la integración de la información y el análisis espacial.
- Facilitar información en el proceso de toma de decisiones, así como en la resolución de problemas complejos de planificación y gestión; lo cual hace que el mapa de vulnerabilidad se vuelva dinámico.

El SIG utilizado en el proceso de generación de la cartografía de vulnerabilidad para el método DRASTIC, fue de tipo vectorial (polígonos) y no matricial (por celdas) como comúnmente se ha venido haciendo, lo que le confiere a la cartografía mejores características, pues permite conocer las propiedades del medio que contribuyen a obtener un índice de vulnerabilidad, el cual estará caracterizado por las variables o atributos que contenga cada parámetro.

Por lo tanto, el mapa generado por la metodología DRASTIC (figura 4.17) muestra como el área del valle, así como en las serranías de la parte noreste del área de estudio, están caracterizadas por índices de vulnerabilidad de baja a extremadamente baja. En el caso del valle, tal situación se debe principalmente a la baja tasa de recarga que lo caracteriza, producto de las características litológicas de la zona no saturada. En el caso de las serranías de la parte noreste, se debe a que las rocas que allí afloran son prácticamente impermeables.

Las zonas de media vulnerabilidad se localizan principalmente al sureste en las inmediaciones de la sierra de Las Cruces y al suroeste en las faldas del volcán Nevado de Toluca, para esta última área, las características analizadas que más influyen en el índice de vulnerabilidad obtenido, fue la recarga y las características litológicas de la zona no saturada y del acuífero, mientras que las características que más influyen en el área del sureste son las características litológicas de la zona no saturada y del acuífero.

Las zonas de alta vulnerabilidad se localizan principalmente en las elevaciones de la sierra de Las Cruces y es precisamente donde coincide una alta recarga con áreas donde se localizan

rocas fracturadas de alta permeabilidad, existen otras áreas aisladas al sur y al suroeste, las cuales presentan las mismas características.

Es necesario destacar que el mapa de vulnerabilidad obtenido, no sólo cubre el área del valle, que es por consiguiente el área que cuenta con la mayor cantidad de datos. Si no que además, se hizo un esfuerzo por cubrir la zona completa del Curso Alto del Río Lerma, es decir, se incluyó a las serranías que circundan al valle, tal situación, trajo como consecuencia que se tuviera que suponer que el nivel freático en esas áreas estuviese a una profundidad mayor de 30 m. Esta suposición hace que los índices de vulnerabilidad obtenidos para esas áreas, pudiesen en algún caso ser mayor, sin embargo, tal situación no sería dramática, pues esas áreas producto de otras decisiones gubernamentales, se encuentran vedadas al crecimiento urbano e industrial.

El mapa analizado anteriormente, si se utiliza correctamente, puede ser de gran importancia para alcanzar el uso sustentable del agua subterránea del Curso Alto del Río Lerma, y consecuentemente, podría convertirse en una herramienta imprescindible en el presente y futuro, para el ordenamiento territorial de las actividades sociales y productivas, el establecimiento de asentamientos urbanos, la ubicación de industria y el desarrollo de actividades agropecuarias, entre otros, en la zona de estudio.

Por otro parte, este mapa servirá de base a estudios más profundos sobre el tema, que sin duda se generaran en el valle en tiempos venideros, tales como, la cartografía de vulnerabilidad frente a contaminantes específicos o el análisis de riesgo de que focos potenciales de contaminación logren deteriorar la calidad de las aguas subterráneas.

6.3. MAPA DE VULNERABILIDAD ADECUADO

Por medio del análisis conceptual de lo que significa para diversos investigadores la vulnerabilidad de acuíferos (apartado 3.2) y partiendo del hecho de que los resultados obtenidos por la cartografía de vulnerabilidad no son absolutos, se decidió adecuar el mapa DRASTIC obtenido previamente mediante la utilización de la modelación numérica.

El primer paso para generar las áreas a proteger fue seleccionar los escenarios de mayor interés, tomando en cuenta la importancia de sus respectivos usos. En el presente caso, dichos escenarios corresponden a diferentes grupos de pozos, pero en otros trabajos que se desarrollen similares a este, los escenarios a proteger pueden variar totalmente, si varían las consideraciones sobre que puntos se necesitan proteger.

La herramienta que permitió obtener las dimensiones de las áreas a proteger fue el trazado de partículas sobre la base del flujo modelado, estas partículas se asignaron en la capa superior del modelo (medio poroso), debido a que la mayoría de los pozos de la zona de estudio, están abiertos en esta capa. El tiempo de tránsito asignado a cada partícula fue de 50 años, debido a que se considera un tiempo razonable para que hasta los contaminantes más persistentes se atenúen lo suficiente como para dejar de ser peligrosos. Sin embargo, el análisis de la trayectoria de partículas, sólo se realizó en la zona saturada, producto de no contar con los datos necesarios la zona no saturada, que permitan inferir el tiempo de tránsito de un contaminante desde la superficie del terreno hasta el acuífero. Esta situación nos lleva necesariamente a un ligero sobredimensionamiento de las áreas a proteger, la cual es menos dañino que considerar un tiempo de tránsito menor que el real, en tal caso, las áreas a proteger quedarían disminuidas.

En cuanto al modelo numérico utilizado, debe destacarse que ese no presenta no considera la existencia de una interrelación directa entre el río Lerma u otras corrientes superficiales del área y el acuífero, por tal motivo, no se considero ninguna de las corrientes superficiales en la modelación realizada.

Las áreas delimitadas por la modelación numérica, fueron consideradas como de alta vulnerabilidad a la hora de sobreponerlas con las áreas con índices de vulnerabilidad bajos o

medios de la metodología DRASTIC, mientras que cuando fueron sobrepuestas las áreas delimitadas con los índices de alta vulnerabilidad obtenidos por el DRASTIC, se convirtieron en zonas de muy alta vulnerabilidad. Esta conversión se basa en la consideración de que un contaminante que penetre al acuífero desde esas áreas, tiene la posibilidad de deteriorar el agua de los pozos a proteger, por tal motivo, es necesario evitar que se realicen en estas actividades potencialmente contaminantes sin las debidas medidas de protección.

Diferencias significativas en el tamaño de las áreas a proteger pueden verse en las figuras que dieron origen al mapa adecuado (5.10, 5.11, 5.12 y 5.13), esto se debe a que las trayectorias de las partículas utilizadas para el análisis presentaron una mayor longitud en aquellas áreas donde las velocidades del flujo de agua subterránea fue mayor (figura 5.10), las áreas de mayor tamaño se localizan al SE de la zona de estudio, donde se encuentran la mayor concentración de pozos, situación que ha generado fuertes abatimientos del nivel freático, lo que asociado a la alta conductividad hidráulica del área, permiten una alta velocidad del flujo subterráneo.

Obviamente, que el mapa adecuado (figura 5.14) encierra una serie de diferencias con respecto al generado originalmente por la metodología DRASTIC. Estas diferencias se sintetizan en el cuadro 6.1, en el cual se pueden apreciar los cambios sufridos entre los índice de vulnerabilidad de ambos mapas, destacándose que los mayores cambios se presentan en las zonas de alta vulnerabilidad, esto es debido a que las áreas delimitadas para su protección complementaria, mediante el uso del trazado de partículas, se consideraron como de alta y muy alta vulnerabilidad, con el objetivo de limitar al máximo las actividades potencialmente contaminantes que en ellas podrían generarse, motivo por el cual, las áreas de baja y media vulnerabilidad disminuyeron.

Concluyendo, se puede plantear que se han generado para el Curso Alto del Río Lerma dos mapas de cartografía de vulnerabilidad, mapas que sin duda, serán de gran importancia ya que podrán servir de pauta para que las autoridades correspondientes puedan definir políticas y elaborar normas para la protección del Curso Alto del Río Lerma.

Sin embargo, es necesario destacar que los mapas generados, sólo toman en cuenta las características intrínsecas del medio, es decir, representan mapas de vulnerabilidad general,

por tal motivo, no consideran la existencia de focos potenciales de contaminación en el área. El análisis de las características de estos focos potenciales de contaminación en conjunto con los mapas de vulnerabilidad obtenidos, permitirá obtener mapas de riesgo, el cual no fue objeto de la presente investigación.

Cuadro 6.1. Comparación de áreas de vulnerabilidad de los dos mapas de vulnerabilidad desarrollados

Mapa de vulnerabilidad (DRASTIC) (figura 4.17)				
Índice de vulnerabilidad	Superficie en Km²	Porcentaje	Porcentaje	Vulnerabilidad
< 69	459.77	21.72	67.95	Baja
70 – 89	708.00	33.45		
90 – 109	270.49	12.78		
110 – 129	252.96	11.95	21.45	Media
130 – 149	201.20	9.50		
150 – 169	224.36	10.60	10.60	Alta
Total	2116.76	100		
Mapa de adecuado (figura 5.14)				
Índice de vulnerabilidad	Superficie en Km²	Porcentaje	Porcentaje	Vulnerabilidad
< 69	408.63	19.30	49.72	Baja
70 – 89	443.38	20.95		
90 – 109	200.38	9.47		
110 – 129	217.63	10.28	16.15	Media
130 – 149	124.33	5.87		
150 – 169	698.05	32.98	34.13	Alta
170 - 189	24.37	1.15		
Total	2116.76	100		
Cambios sufridos por la adecuación				
Índice de vulnerabilidad	Superficie en Km²	Porcentaje	Porcentaje	Vulnerabilidad
< 69	51.14	2.42	18.32	Baja
70 - 89	264.62	12.50		
90 - 109	70.11	3.31		
110 - 129	35.32	1.67	5.30	Media
130 - 149	76.87	3.63		
150 - 169	473.69	22.38	23.53	Alta
170 - 189	24.37	1.15		

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El objetivo principal de la presente investigación fue evaluar el estado de vulnerabilidad del Curso Alto del Río Lerma, perteneciente a la Cuenca Alta del Río Lerma en el Estado de México, mediante la aplicación combinada del método de análisis de vulnerabilidad (DRASTIC) y del modelo numérico con VisualMODFLOW. Esta metodología permitió generar mapas de vulnerabilidad con mayor confiabilidad, los cuales podrán ser utilizados como herramientas para el manejo sustentable de los recursos hídricos subterráneos y el ordenamiento territorial del área de estudio.

Los métodos seleccionados para ser utilizados en la adecuación del mapa de vulnerabilidad del Curso Alto del Río Lerma fueron, en primer lugar, la metodología DRASTIC por ser ésta quien considera más factores físicos y variables características de los medios subterráneos y permite una cuantificación consistente, y en segundo lugar, la modelación numérica, mediante el uso de trazado de partículas.

La aplicación de la metodología DRASTIC sobre la base de los sistemas de información geográfica, permitió generar un mapa de vulnerabilidad para el Curso Alto del Río Lerma, permitiendo obtener por esta vía una herramienta para la protección de las aguas subterráneas. Esta herramienta de protección es válida para futuros trabajos relacionados con el ordenamiento en el territorio de las actividades potencialmente contaminantes, y por otra parte, para el análisis del riesgo de contaminación derivado de la superposición de dichas actividades contaminantes con las áreas de mayor grado de sensibilidad a la contaminación obtenidas por el DRASTIC.

La utilización de los sistemas de información geográfica en la generación de la metodología DRASTIC, permite incorporar a esta cartografía la posibilidad de actualizarla de manera

rápida el mapa original, en caso de que fuese necesario realizarle algún cambio en cualquiera de los parámetros utilizados por dicha metodología; lo que permitirá que las autoridades gubernamentales cuenten con una poderosa herramienta dinámica para identificar áreas susceptibles de contaminar, evaluar situaciones de contaminación, priorizar esfuerzos en una evaluación más detallada, elaborar planes de monitoreo y diseñar redes de observación.

La aplicación de la metodología DRASTIC se sigue desarrollando por diferentes autores en formato raster (mallas), por lo que la presente investigación se enfocó en llevar a cabo dicha metodología en formato vectorial, mediante la superposición de polígonos, permitiendo incorporarle atributos a cada elemento de los diferentes parámetros que utiliza DRASTIC, lo que permitirá sin lugar a duda, que se puedan conocer de una manera más representativa, cada uno de los elementos que intervienen en la generación de los diferentes índices de vulnerabilidad. Por otra parte, dicha metodología podría permitir llevar a cabo la conversión de datos obtenidos en diferentes escalas espaciales y temporales, dentro de una escala común, con la finalidad de poder llevar a cabo el análisis de sensibilidad.

El uso combinado de los conceptos de vulnerabilidad definidos por el Committee on Techniques for Assessing Groundwater Vulnerability of the National Research Council en 1993 y por la Asociación Internacional de Hidrogeólogos, a través de Vrba y Zaporozec (1994), permitió crear la base conceptual para llevar a cabo las adecuaciones realizadas al mapa de vulnerabilidad generado a partir de la metodología DRASTIC, mediante el uso de la modelación numérica.

La utilización de la modelación numérica sobre la base del mapa generado por la metodología DRASTIC permitió, mediante el trazado de partículas, delimitar áreas en las cuales cualquier introducción de contaminación podría provocar el deterioro de la calidad del agua subterránea en aquellas fuentes de abasto seleccionadas de acuerdo a su importancia para el desarrollo socioeconómico de la región. El trazado de partículas se llevó a cabo en la capa superior (medio poroso) de la modelación utilizada, debido a que en esa capa donde extraen agua la mayoría de los pozos del área de estudio.

Las áreas delimitadas fueron incorporadas al mapa generado por la metodología DRASTIC, considerándolas como de alta vulnerabilidad, debido a la consideración de que un contaminante

persistente que en ellas se originara, podría llegar a los grupos de pozos a proteger sin la necesaria depuración. Esta sobreposición de las áreas delimitadas y el mapa DRASTIC original permitió obtener un nuevo mapa, en el cual quedo incorporado la protección complementaria de aquellos puntos de interés seleccionados previamente.

El modelo numérico que sirvió de cómo base fue el de Ariel Consultores (1996), sin embargo, para llevar a cabo el presente trabajo, se le realizaron dos adecuaciones fundamentales, la primera consistió en refinar la malla con el objetivo de disminuir la concentración en el centro de la celda de los abatimientos causados por los pozos que en la celda se ubican y en segundo lugar, el modelo se convirtió de estado transitorio a estacionario, con el objetivo de poder aplicar el trazado de partículas.

Una vez definidas las conclusiones del presente trabajo, se presentan las siguientes recomendaciones:

Aplicar la metodología generada a estudios similares en otros sectores del Curso del Río Lerma o de cualquier otro lugar, para contribuir a una administración ambientalmente segura de las aguas subterráneas en el Estado de México u otros estados del país.

Incorporar más datos al sistema de información geográfica y de ser posible a más detalle, para poder tener mayor precisión en los resultados obtenidos.

Realizar estudios de la zona no saturada, con la finalidad de poder cuantificar el tiempo de tránsito de un contaminante a través de ella, lo que permitirá contemplarlo en la modelación numérica.

Realizar un inventario de todos los posibles focos contaminantes que se encuentra en la zona de estudio, con la finalidad de incorporarlos mediante la sobreposición al mapa generado por la metodología DRASTIC, mediante el uso de los sistemas de información geográfica, como una herramienta, lo que permitirá comenzar a realizar el análisis de riesgo de contaminación de las aguas subterráneas en la zona de estudio.

Llevar a cabo un análisis de sensibilidad, con el objetivo de poder definir que parámetro necesita más énfasis en su determinación y posteriormente, poder llevar a cabo una comparación con la metodología del presente trabajo.

BIBLIOGRAFÍA

- ❑ Albinet, M. (1970). Carte de la vulnérabilité à la pollution des nappes d'eau souterraine de la France à 1/1.000.000 (Map of France of the ground water vulnerability to contamination, scale 1:1.000.000). Orleans, France : Pub. DATAR-BRGM.
- ❑ Albinet, M. y Margat, J. (1970). Cartographie de la vulnérabilité à la pollution des nappes d'eau souterraine. Bull BRGM 2me Series 3(4); 13-22 pp.
- ❑ Alvarado, R. J. (2000). “Sobreexplotación, vulnerabilidad y protección de aguas subterráneas en Cochabamba”. Comisión para la gestión integral del agua en Bolivia. Ema: monitoreo de aguas subterráneas.
- ❑ Aller, L.; Ennet, T.; Leher, J.H.; Petty, R.J. y Hackett, G. (1987). DRASTIC: a standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeological settings. EPA/600/2-87-035, 622 pp.
- ❑ Anders, E y Maidment, D. (1995). A spatial assessment of the vulnerability of Texas groundwater to nitrate contamination. Center for research in water resources. The University of Texas at Austin, CRWR Online Report 95-2.
- ❑ Ariel Consultores, S. A. (1996). Estudio de simulación hidrodinámica y diseño óptimo de las redes de observación de los acuíferos de Calera, San Luis Potosí y Toluca (3. Acuífero de Toluca). Contrato No. GAS-012-PRO-96. Para la Gerencia de Aguas Subterráneas. CNA.

- ❑ Arreguín, M.J. (1998). Aportes a la Historia de la Geohidrología en México 1890-1995. CIESAS; Asociación Geohidrológica Mexicana, A.C. D.F., México. 144 p.
- ❑ Bair, E. S., Sheets, A. y Eberts, S. M. (1990). Particle-tracking analysis of flow paths and traveltimes from hypothetical spill sites within the capture area of a wellfield. *Ground Water*, 29(3) 884-892.
- ❑ Bair, E. S., y Roadcap, G S. (1992). Comparison of models used to delineate capture zones of wells—Leakey-confined fractured-carbonate aquifer. *Ground Water*, 30(2) 199-211.
- ❑ Baldwin, J., Brandt, D., Hagan, E. y Wicherski, B. (2000). Cumulative Impacts Assessment, Thousand Spring Area of the Eastern Snake River Plain, Idaho. Idaho Department of Environmental Quality. Ground Water Quality Technical Report No. 14.
- ❑ Barlow, P. M. (1994a). Particle tracking analysis of contributing areas to public-supply wells in simple and complex flow systems. Cape Cod, Massachusetts: U. S. Geological Survey Open-File Report 93-(159) 68 p.
- ❑ Barlow, P. M. (1994b). Two and three-dimensional pathline analysis of contributing areas to public-supply wells of Cape Cod, Massachusetts. *Ground Water*, 32(1) 399-410.
- ❑ Bessouat, C., Castagnino, G., De los Santos, J. y Robano, M. (2001). Ponencias del Taller: Protección de acuíferos frente a la contaminación. Metodología. Toluca, México.
- ❑ Bessouat, C., Castagnino, G., de los Santos, J., Oleaga, A. y Pacheco, F. (1999). Carta preliminar de vulnerabilidad del acuífero de Raigón. II Encuentro de las aguas. Universidad de la República – Uruguay.
- ❑ Bosque, S.J. (1997). *Sistemas de Información Geográfica*. 2ª edición corregida. Ediciones Rialp, S.A. Alcalá, España. 449 p.
- ❑ Bryan, K. (1948). Los suelos complejos y fósiles de la Altiplanicie de México, en relación a los cambios climáticos, *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 13, 1-20.

- ❑ Civita, M. (1994). Le carte della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento. Teoria and practica (Aquifer vulnerability maps to pollution). Pitagora, Bologna.
- ❑ Civita, M. y De Regibus, C. (1995). Sperimentazione di alcune metodologie per la vulnerabilità degli acquiferi. Q Geol Appl Pitagora, Bologna. 3:63-71.
- ❑ CNA. (1996). Plano geológico escala 1:100,000. Plano No. III.1.
- ❑ Consultec, Ingenieros Asociados, S.C. (1978). Estudio del comportamiento de grietas en el valle del Alto Lerma. Para la CAVM. SARH.
- ❑ Corniello, A., Ducci, D. y Napolitano, P. (1997). Comparison between parametric methods to evaluate aquifer pollution vulnerability using GIS: and example in the "Piana Campana", southern Italy. In: Marinos PG, Koukis GC, Tsiambaos GC, and Stournaras GC (eds). Engineering geology and the environment. Balkema, Rotterdam. PP 1721-1726.
- ❑ Delin, G. N. y Almedinger, J. E. (1991). Delineation of recharge areas for selected wells in the St. Peter-Praire du Chien-Jordan aquifer, Rochester, Minnesota. U. S. Geological Survey Open-File Report 90-397, 60 p.
- ❑ Echeverri, R. G. (1998). Aspectos teóricos sobre el fenómeno de contaminación de aguas subterráneas. Revista Universidad Eafit. Julio–Agosto–Septiembre.
- ❑ ESRI (Environmental Systems Research Institute, Inc). (1998). Introduction to ArcView GIS. ESRI Educational Services, 1998.
- ❑ EVREN (Evaluación de Recursos Naturales S.A.). (1998). Vulnerabilidad a la contaminación de las aguas subterráneas por actividades urbanísticas en la Comunidad Valenciana. Publicaciones de Divulgación Técnica. Colección "Cartografía Temática" Número 2. Valencia, España. 58 pp.
- ❑ Expósito, C.J. (2001). "Delimitación de los perímetros de protección de pozos mediante las técnicas numéricas y el método analítico, acuífero Margarita, Cuba". Maestría en Ciencias del Agua, Universidad Autónoma del Estado de México. 119 p.

- ❑ Figueroa, V. G. (1993). Actualización de la información de los acuíferos del Alto Lerma (Valles Toluca e Ixtlahuaca, Edo. de México), y la adaptación de su modelo DAS al lenguaje Basic. Contrato No. SGAA-93-09. Para la Gerencia de Aguas Subterráneas. CNA.

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

- ❑ Foster, S.S.D. (1987). Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy. Vulnerability of Soil and Groundwater to pollutants. TNO Committee on Hydrological Research Information # 38, Ed. by W. Van Duijvenbooden and H.G. Van Waegenigh, The Hague: 69-86 pp.

- ❑ Fries, C., (1960). Geología del Estado de Morelos y partes adyacentes de México y Guerrero, región central meridional de México: México, D.F., Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Boletín, núm. 60, 236 p.

- ❑ Garfias, J., Llanos, H. y Moreno, A. (2001). Uso de un modelo de flujo de aguas subterráneas con rastreo de partículas para evaluar la vulnerabilidad de un acuífero, Vitoria Gastéis, España. Ponencias del Taller: Protección de acuíferos frente a la contaminación. Metodología. Toluca, México.

- ❑ GEM (Gobierno del Estado de México). (1993). Atlas Ecológico de la Cuenca Hidrográfica del Río Lerma. Tomo I Cartografía. Toluca, México: Comisión Coordinadora para la Recuperación Ecológica de la Cuenca del Río Lerma. 414 pp.

- ❑ GEM (Gobierno del Estado de México). (1997). Atlas Ecológico de la Cuenca Hidrográfica del Río Lerma. Tomo III Atlas de Ecosistemas Productivos. Toluca, México: Comisión Coordinadora para la Recuperación Ecológica de la Cuenca del Río Lerma. 249 pp.

- ❑ GEM (Gobierno del Estado de México). (2000). Atlas Ecológico de la Cuenca Hidrográfica del Río Lerma. Tomo V Industrial. Toluca, México: Comisión Coordinadora para la Recuperación Ecológica de la Cuenca del Río Lerma. 353 pp.
- ❑ Gogu R.C., Pandeale, A., Ionita, A. Ionescu, C. (1996) Groundwater vulnerability análisis using a low-cost Geographical Information System. MIS/UDMS Conference WEL-GIS WORK-SHOP's Environmental Information System for Regional and Municipal Planning, Prague, pp 35-49.
- ❑ Gogu, R. C. y Dassargues, A. (2000a). Current trends and future challenges in groundwater vulnerability assessment using overlay and index methods. *Environmental Geology*. 39(6) 549-559.
- ❑ Gogu, R. C. & Dassargues, A. (2000b). Sensitivity analysis for the EPIK methos of vulnerability assessment in a small karstic aquifer, southern Belgium. *Hydrogeology Journal* 8: 337-345.
- ❑ Gómez, M. (1998). Caracterización de la vulnerabilidad de los acuíferos a la contaminación. Aplicación de los índices DRASTIC y GOD. Curso sobre Contaminación de Suelos y Aguas Subterráneas. Centro de Estudio y Experimentación de Obras Públicas. Madrid, España.
- ❑ González, R., Marín, L. y Córdova, G. (1997). Hydrogeology and groundwater pollution of Yaqui Valley, Sonora, México. *Geofísica Internacional*. 36(1) 49-54.
- ❑ Goossens, M. y Van Damme, M. (1987). Vulnerability mapping in Flanders, Belgium, Proceedings at "Vulnerability of soil and groundwater to pollutants". In: Duijvenbooden W van, Waegeningh Ghvan (eds) TNO Committee on Hydrological Research, the Hague, Proceedings and Information. 38:355-360.
- ❑ Grupo Herraam de México, S.A. de C.V. (1992). Estudio hidrogeológico regional de los valles de Toluca e Ixtlahuaca, Contrato No. 2-33-1-0881. Para la DGSOH del DDF.

- ❑ Hirata, R. y Reboucas, A. (1999). La protección de los recursos hídricos subterráneos: una visión integrada, basada en perímetros de protección de pozos y vulnerabilidad de acuíferos. Boletín Geólogo Minero. Volumen 110. No. 4. Instituto Tecnológico Geominero de España. ITGE-IAH-UNESCO. pp.79-92.
- ❑ Hirata, R. y Reboucas, A. (2001). Groundwater protection: An integrated view based on wellhead protection areas and vulnerability maps. Environment: Issues, Technology, Services and Product. Medio Ambiente Online.
- ❑ IGME (1976). Mapa de vulnerabilidad a la contaminación de los mantos acuíferos de la España Peninsular, Baleares y Canarias. Primer esquema cualitativo. 20 ed. Mem. explic., mapa esc. 1:1,000,000. Madrid : Serv. Publ. Min Industria.
- ❑ IGME (1981). Mapas de orientación al vertido de residuos sólidos urbanos. Hojas esc. 1:50.000 pleg., mem. explic. Madrid.: Serv. Publ. Min. Industria. Lopéz, G.J. y Fernandez, R. L.
- ❑ IMTA. (1996). ERIC (Extractor Rápido de Información Climatológica). Vols. 1 al 6. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, México.
- ❑ INEGI. (1983). Carta edafológica escala 1:250,000, clave e14-2.
- ❑ INEGI. (1982). X Censo General de Población y Vivienda 1980. México.
- ❑ INEGI. (1992). XI Censo General de Población y Vivienda 1990. México.
- ❑ INEGI. (1996). Censo 1995. Estados Unidos Mexicanos, resultados preliminares, Méx.
- ❑ INEGI. (1998). Modelo Digital de Elevación E1402MDE escala 1:250,000.
- ❑ INEGI. (2001). XII Censo General de Población y Vivienda 2000. México.
- ❑ ININ, S.A. (1986). Manual técnico de diseño, construcción, operación y mantenimiento de pozos en las cuencas de México y del Alto Lerma. Para la DGCOH del DDF.

- ❑ Kimura, Y. (1997). Evaluation migration potential of contaminants through unsaturated subsurface in Texas vulnerability map. CE 397 GIS in Water Resources. The University of Texas at Austin.

- ❑ Köppen y García, E. (1981). Atlas Nacional del Medio Físico. SPP.

- ❑ Kumar, N. y Engel, B. (1994). GIS Statewide Ground-Water Vulnerability Ecvaluation to Pollution Potential. Seminar Publication National Conference on Environmental Problem-Solving with Geographic Information Systems. September 21-23, Cincinnati, Ohio.

- ❑ Lee, S; Lee, DH; Choi, SH; Yong Kim, W. y Lee, SG. (1998) Regional groundwater pollution susceptibility analysis using DRASTIC system and lineament density. ESRI International User Conferences.

- ❑ Lesser y Asociados, S.A. de C.V. (1987). Geohidrología del valle de Lerma. Contrato No. 7-33-1-0211 para la DGCOH del DDF.

- ❑ Lesser y Asociados, S.A. de C.V. (1992). Estudio para el diagnóstico del acuífero del valle de Toluca, para implementar la reglamentación de la extracción del agua subterránea. Contrato No. DIA-92-21-C. Para la Dirección de Infraestructura Rural del Gobierno del Estado de México.

- ❑ López, J. A. y Fernández, L. (1992). Mapas de vulnerabilidad y contaminación de las aguas subterráneas. MAPFRE Seguridad. No. 47 – Tercer Trimestre 1992.

- ❑ López, M. E. y Granados, R. R. (2000). Utilización de los Sistemas de Información Geográfica para la gestión de los recursos hídricos. 6ª Conferencia Internacional del Seminario Permanente Ciencia y Tecnología del Agua. Economía del Agua, hacia una mejor gestión de los recursos hídricos. Valencia, España.

- ❑ Llamas, S. (1999). La inserción de las aguas subterráneas en los sistemas de gestión integrada. Boletín Geológico Minero. 110(4) 9-25. Instituto Tecnológico Geominero de España. ITGE-IAH-UNESCO.

- ❑ Margat, J. (1968). Vulnèrabilitè des nappes d'eau souterrine à la pollution (Ground water vulnerability to contamination). Bases de la cartographie, (Doc.) Orléans, France: BRGM, 68 SGL 198 pp.

- ❑ Martínez, M., Delgado, P. Y Fabregat, V. (1998). Aplicación del método DRASIC para la evaluación a las aguas subterráneas por una obra lineal. Jornadas sobre la contaminación de las aguas subterráneas: un problema pendiente. Valencia, España. AIH-GE. En prensa.

- ❑ Martínez, R.J., Martínez, S.J, Castellanos, R.J. y Sarabia, F.C. (2001). Determinación espacial de la vulnerabilidad de un acuífero a ser contaminado por nitratos. XI Congreso Nacional de Irrigación. Simposio 9. Contaminación, Tratamiento y Reuso del agua. Artículo: ANEI-S90101.Guanajuato, México.

- ❑ Mejuto, M.F., Castaño, S. Y Vela, A. (2000). Utilidad de las técnicas de observación de la tierra a la elaboración de mapas de vulnerabilidad y riesgo de contaminación de aguas subterráneas. Sección Teledetección y SIG. Instituto de desarrollo Regional. Universidad de Castilla-La Mancha. Albacete.

- ❑ Mireles, L.P. y Franco, P.R. (2001). Actualización del mapa edafológico de acuerdo a la FAO/UNESCO de 1988, del Curso Alto del Río Lerma. Facultad de Geografía de la Universidad Autónoma del Estado de México, Toluca, México (inédito).

- ❑ Mooser F. (1956). Los ciclos del vulcanismo que formaron la cuenca de México. XX Congreso Geológico Internacional. Simposio sobre vulcanología del Cenozoico.

- ❑ Mooser, F. (1962). Bosquejo geológico del extremo sur de la Cuenca de México, México, D.F. Congreso Geológico Internacional, 20. Libro Guía Excursión C-9, 9-16.

- ❑ Napolitano, P. y Fabbri, AG. (1996). Single-parameter sensitivity análisis for aquifer vulnerability assessment using DRASTIC and SINTACS, HydroGIS '96. In: Application of geographic information systems in hydrology and water resources management. IAH Pub. 235:559-566.

- ❑ NRC (National Research Council). (1993). Groundwater vulnerability assessment, contamination potential under conditions of uncertainty. Committee on Techniques for Assessing Ground Water Vulnerability, Water Science and Technology Board, Commission on Geosciences Environment and Resources. National Academy Press, Washington DC.
- ❑ Oficina de Estudios Especiales de la CHCVM. SRH. (1970). Los acuíferos del Alto Lerma. Pub. No. 7. México.
- ❑ Osborn, N., Eckenstein, E. y Koon, K. (1998). Vulnerability Assessment of Twelve Major Aquifers in Oklahoma. Oklahoma Water Resource Board Technical Report 98-5.
- ❑ Perforaciones Leor, S.A. (1989). Cuantificación de agua subterránea en el valle de Lerma para determinar las causas de la disminución de caudales de extracción. Contrato No. 9-33-1-1-1513. Para la DGCOH del DDF.
- ❑ Pollock, David W. (1989). Documentation of computer programs to compute and display pathlines using results from the U.S. Geological Survey modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model, U.S. Geological Survey Open-File Report 89-381, 188 pp.
- ❑ Raisz, E. (1959). Landforms of México. Cambridge Mass.
- ❑ Rathod, K.S. y Rushton, K.R. (1990). Interpretation of pumping from boreholes in layered aquifers using a numerical model. School of Civil Engineering, University of Birmingham, United Kingdom.
- ❑ Sanhoury, I. (1998). GIS for aquifer vulnerability assessment applying. International Institute For Aerospace and earth Science. Enschede, (ITC). The Netherlands.127 pp.
- ❑ Scarborough, R.W. (1999). Can development be controlled with the help of GIS and watershed modelling?. ESRI International User Conferences.

- ❑ Servicios Geológicos, S.A. (1966). Estimación preliminar de los recursos de agua subterránea en la Cuenca Alta del Río Lerma hasta el estrechamiento de Atlacomulco. Para la DGOH del DDF. Julio.
- ❑ Shamsuddim, S. (2000). A study of groundwater pollution vulnerability using DRASTIC/GIS, west Belbal, India. Journal of Environmental Hydrology. Volume 8 Paper 1 January.
- ❑ Snyder, Daniel T., Wilkinson, James M., y Orzol, Leonard L., 1998, Use of a groundwater flow model with particle tracking to evaluate ground-water vulnerability, Clark County, Washington. USGS Water-Supply Paper 2488, 63 pp.
- ❑ Springer, A. E., y Bair, E. S. (1992). Comparison of methods used to delineate capture zones of wells: 2. confined/unconfined stratified-drift aquifer: Ground Water, 30 (5) 908-917.
- ❑ SRH (Dirección de Hidrología). (1970). Boletín Hidrológico No. 50, Región Hidrológica No. 12.
- ❑ Stenson, M.P. y Strachotta, C.P. (1999). Queensland's Groundwater Vulnerability Mapping Project: An Application of GIS in Regional Groundwater Protection. Groundwater Vulnerability Mapping Project. Natural Heritage Trust. OZR199.
- ❑ Sultan, R. (2001). Impacts on Wetland Hydrology from Extensive Groundwater Extraction: Lerma River Basin, Mexico. Fulfilment of the thesis requirement for the degree of Master of Science. University of Waterloo. Waterloo, Ontario, Canada.
- ❑ Sunday, T. U., Dharmesh, J. y Liao, H. (1996). Interactive modeling of ground-water vulnerability within a geographic information system environment. Ground Water. 34(4) 618-627 pp.
- ❑ UNITECNIA S.A. de C.V. (1996). Estudio para el diseño de redes de monitoreo de los acuíferos de los valles de Toluca y Atlacomulco-Ixtlahuaca, en el Estado de México. Elaborado para la Comisión Nacional del Agua, contrato No GAS-006-PRO-96.

- ❑ UNITECNIA S.A. de C.V. (1997). Actualización de mediciones piezométricas de los acuíferos reactivados en los valles de Toluca y Atlacomulco-Ixtlahuaca, en el Estado de México. Elaborado para la Comisión Nacional del Agua, contrato No GAS-019-PRO-97.
- ❑ Valcarce, R. M., Carrasco, H., Jiménez, S. (2001). Aplicación de la metodología GOD modificada, para el estudio de la vulnerabilidad del acuífero Kárstico cuenca sur de la Habana. Ponencias del Taller: Protección de acuíferos frente a la contaminación. Metodología. Toluca, México.
- ❑ Van Stempvoort, D., Evert, L. y Wassenaar, L. (1993). Aquifer vulnerability index: a GIS compatible method for groundwater vulnerability mapping. *Can Wat Res J.* 18:25-37.
- ❑ Vrána, M. (1984). Methodology for construction of groundwater protection maps. (Lecture for UNESCO/UNEP Project PLCE-3/29, Moscow, Sept. 1981) published in *Hydrogeological Principles of Groundwater Protection*, E.A. Kozlovsky, Editor in Chief, Moscow : UNESCO/UNEP. Vol. 1, 147-149 pp.
- ❑ Vrba, J. y Zaporozec, A. Edts. (1994). *Guide book on mapping groundwater vulnerability*. Edt. Heise. International contributions to hidrogeology, vol. 16. 131 pp.